

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



PROGRAMA DE POSGRADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

TESIS

**DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL
COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE CONCRETOS UHPC REFORZADOS
CON FIBRAS Y OPTIMIZADOS CON VIDRIO DE BOROSILICATO**

PRESENTADA POR

ARQ. HÉCTOR GERARDO PÉREZ TRINIDAD

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

SEPTIEMBRE 2025

TEMA DE TESIS:

Desarrollo experimental y análisis comparativo del comportamiento a flexión de concretos UHPC reforzados con fibras y optimizados con vidrio de borosilicato.

Director de Tesis: Dr. Alejandro Durán Herrera

Co Director: Dr. Pedro Valdez Tamez

Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres

I. Dedicatorias y Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida, la salud y la oportunidad de llevar a término este trabajo de investigación. Sin Su guía y fortaleza, este logro no habría sido posible.

A mis padres, Héctor y Victoria, quienes con su ejemplo de esfuerzo, disciplina y sacrificio sembraron en mí los valores que hoy me permiten alcanzar esta meta. A mis hermanas, Karen y Daniela, que siempre estuvieron presentes con palabras de aliento, comprensión y apoyo incondicional durante todo este proceso.

Extiendo este agradecimiento a todos aquellos familiares, amigos y compañeros que, de una u otra manera, se cruzaron en este camino académico. Algunos fueron mentores, otros colegas de trabajo, y muchos se convirtieron en amistades valiosas; todos aportaron un grano de arena en la construcción de este esfuerzo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, y en particular al Instituto de Ingeniería Civil, por abrirme sus puertas, brindarme las instalaciones y el equipo necesario para llevar a cabo la experimentación y análisis que dieron vida a esta tesis.

De manera muy especial, a mi asesor, el Dr. Alejandro Durán Herrera, por su guía constante, por su paciencia y exigencia académica, pero sobre todo por ser un verdadero mentor y ejemplo de profesionalismo.

Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través de la beca de posgrado, que permitió dedicarme de lleno al desarrollo de este proyecto.

Finalmente, este logro es el resultado de la suma de esfuerzos colectivos: el de quienes me acompañaron, creyeron en mí, compartieron conocimientos, experiencias y amistad. A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

II. Resumen

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) constituye una de las innovaciones más relevantes en la ingeniería civil moderna por su alta resistencia, durabilidad y capacidad para generar elementos estructurales más esbeltos y con mayor vida útil. Sin embargo, su aplicación en México enfrenta limitantes asociadas a los costos elevados, la dependencia de fibras metálicas y el uso de materias primas importadas. En este contexto, la presente investigación se propuso diseñar, producir y evaluar mezclas de concreto de ultra alto desempeño utilizando materiales locales de la zona metropolitana de Monterrey, incorporando como innovación el uso de vidrio de borosilicato molido como filler alternativo, un subproducto de la industria vidriera de la localidad, así como diferentes tipos de fibras de refuerzo metálico, sintético o mineral.

La hipótesis establecida es que el uso de un filler rico en sílice amorfa, en combinación con fibras alternativas, permitiría desarrollar mezclas de UHPC con un comportamiento mecánico y reológico diferenciado, donde una o más formulaciones alcanzaran un equilibrio entre resistencia, tenacidad, trabajabilidad y sostenibilidad. Para comprobarlo, se diseñó una matriz base con cemento CPC 40, agregado calizo regional y superplastificante de alto rango, a la que se incorporaron fibras al 2 % en volumen. Las mezclas fueron caracterizadas en estado fresco (peso unitario, extensibilidad, contenido de aire, reología) y en estado endurecido mediante ensayos de compresión y flexión.

Los resultados demostraron que todas las mezclas reforzadas superaron los 120 MPa a 90 días, confirmando su clasificación como UHPC. La incorporación del vidrio de borosilicato favoreció la ganancia de resistencia a edades tardías gracias a su carácter puzolánico. En estado fresco, las fibras afectaron la fluidez y la viscosidad en diferentes grados, en lo referente a flexión, se observaron comportamientos contrastantes: el acero se consolidó como referencia superior al presentar endurecimiento por deformación y meseta estable con los valores más altos de tenacidad; el basalto se posicionó como alternativa mineral intermedia

con buen desempeño residual; el PVA ofreció un comportamiento estable de microfisuración y tenacidad intermedia; el PP/PE sorprendió al alcanzar valores de energía absorbida cercanos al acero gracias a una meseta estable prolongada, pese a partir de un pico inicial menor; y el vidrio evidenció un aporte limitado, con una zona estable más corta y de menor capacidad de absorción de energía, aunque con ventajas de durabilidad química.

La discusión integrada confirmó que la selección del tipo de fibra es determinante para el desempeño post-fisuración del UHPC, y que existen alternativas no metálicas con potencial competitivo frente al acero en términos de tenacidad, mismos que representan una ventaja ante el costo del clásico refuerzo de acero. El estudio también validó la viabilidad de utilizar materiales locales y un subproducto industrial como el vidrio de borosilicato, favoreciendo la sostenibilidad y reduciendo costos asociados al empleo de microsílice importada, y como una posible solución al problema de los tiraderos de vidrio de borosilicato en la zona metropolitana.

En conclusión, el trabajo alcanzó los objetivos propuestos y confirmó la hipótesis, aportando evidencia experimental de que es posible producir un UHPC competitivo, sostenible y adaptado al contexto de Monterrey. Estos resultados sientan las bases para aplicaciones locales en infraestructura y edificación, así como para investigaciones futuras orientadas a optimizar volúmenes de fibra, evaluar durabilidad a largo plazo y explorar configuraciones híbridas de refuerzo.

III. Lista de Figuras

Fig. 1 Cemento CPC 40	56
Fig. 2. Picnómetro de volumen conocido.	57
Fig. 3. Análisis de DTP en las instalaciones del laboratorio de materiales.	58
Fig. 4. Determinacion de area superficial especifica por metodo ASTM C204.	59
Fig. 5. Agregados finos de caliza utilizados en el proyecto.....	62
Fig. 6. Vidrio de borosilicato a la intemperie, en instalaciones de una vidriera local.	67
Fig. 7. Horno para el secado de material y vidrio tras la limpieza superficial.....	68
Fig. 8. Trituradora de quijadas y primera molienda de vidrio.	69
Fig. 9. Trituradora de quijadas para molienda secundaria.	69
Fig. 10. Pulverizadora y polvo de vidrio de borosilicato posterior a la molienda.	70
Fig. 11 A) molino de vibro energía, B) Bolas metálicas y cilindros de alúmina, C) bolas metálicas, D) cilindros de alúmina.....	70
Fig. 12. Malla No. 325	71
Fig. 13. Representación esquemática de un vidrio diversas matrices de vidrio.	73
Fig. 14. Mezcladora de eje horizontal.....	91
Fig. 15. Diagrama de mezclado.	93
Fig. 16. Equipo para determinar contenido de aire en la mezcla de acuerdo con ASTM C231.....	96
Fig. 17. Mesa de Fluidiez, con mezcla de control sin fibras.....	98
Fig. 18. Preparación de especímenes de 50 mm.	99
Fig. 19. Viga montada para ensayo a flexión de acuerdo a criterios de ASTM C1609..	101
Fig. 20. Grafica de peso unitario por mezcla y promedios.	105
Fig. 21 Mesa de extensibilidad con mezcla de control, al momento de ejecucion del ensayo.	108
Fig. 22. Grafica de extensibilidad de mezclas.	109
Fig. 23. Grafica de contenido de aire en mezclas.	111
Fig. 24 Grafica de esfuerzo de cedencia en mezclas de UHPC.	117
Fig. 25. Grafica de viscosidad plástica en mezclas de UHPC.	117
Fig. 26. Grafica de desarrollo de resistencias para todas las fibras.	122
Fig. 27. Grafica de resultados a compresión en cubos bajo norma ASTM C109.....	123
Fig. 28. Diagrama de una viga ideal ensayada bajo ASTM C1609.....	128
Fig. 29. Grafica de curvas generales por sistema de fibras.....	129
Fig. 30. Grafica de flexión UHPC con fibras de acero.	132
Fig. 31. Grafica de tenacidad para fibras de acero.....	135
Fig. 32. Grafica de flexión UHPC con fibras de basalto.	138
Fig. 33. Grafica de tenacidad para fibras de basalto.	140
Fig. 34. Grafica de flexión UHPC con fibras de polipropileno/polietileno.	141
Fig. 35. Grafica de tenacidad para fibras de polipropileno/polietileno.....	143
Fig. 36. Grafica de flexión UHPC con fibras de PVA.....	146
Fig. 37. Grafica de tenacidad para fibras de PVA.	148
Fig. 38. Grafica de flexión UHPC con fibras de vidrio.	150
Fig. 39. Grafica de tenacidad para fibras de vidrio.....	151

IV. Lista de Tablas

Tabla 1. Casos mas representativos de UHPC en el mundo.	15
Tabla 2. Propiedades típicas de concretos convencionales, HPC y UHPC.	17
Tabla 3. Rangos típicos de energía absorbida T150 y T300 para UHPC.	24
Tabla 4. Porcentaje de peso para un UHPC típico.	41
Tabla 5. Composición química de cemento CPC 40.	43
Tabla 6. Distribución granulométrica de agregados.	46
Tabla 7. Composición química de diversos tipos de vidrio.	49
Tabla 8. Tipos de fibra y especificaciones.	54
Tabla 9. Análisis granulométrico de agregados.	63
Tabla 10. información técnica del aditivo superplastificante Flowcon.	66
Tabla 11. Composición química del polvo de vidrio de borosilicato.	72
Tabla 12. Tipos de fibras y propiedades físicas.	76
Tabla 13. Proporcionamiento de un UHPC con base en la literatura y el estado del arte.	87
Tabla 14. Proporcionamiento utilizado en el presente trabajo.	90
Tabla 15. Peso unitario de mezclas con DS y CV.	106
Tabla 16. Resultados de extensibilidad en promedio con DS y CV.	110
Tabla 17. Promedios de contenido de aire con DS Y CV.	112
Tabla 18. Valores de τ_0 y μ_p para todas las mezclas.	115
Tabla 19. Valores reológicos promedio con DS y CV.	115
Tabla 20. Valores de τ_0 y μ_p para todas las fibras comparados contra la literatura.	119
Tabla 21. Resultados promedio a compresión con DS y CV.	124
Tabla 22. Tabla de resultados a compresión a 90 días con DS y CV.	125
Tabla 23. Tabla de primer pico y pico máximo para cada una de las mezclas.	131
Tabla 24. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de acero.	133
Tabla 25. Tabla de primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de basalto.	138
Tabla 26. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de polipropileno/polietileno.	141
Tabla 27. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de PVA.	146
Tabla 28. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de vidrio.	150
Tabla 29. Tabla de valores primer pico, pico máximo T150 y T300 para todas las fibras.	155

Índice

Página de Aprobación.....	¡Error! Marcador no definido.
I. Dedicatorias y Agradecimientos.....	3
II. Resumen	4
III. Lista de Figuras	6
IV. Lista de Tablas	7
Capítulo 1 – Introducción y Antecedentes	10
1.1 Generalidades del UHPC y relevancia en la ingeniería moderna.....	10
1.2 Historia y evolución del UHPC y concretos fibroreforzados	12
1.3 Propiedades clave del UHPC (mecánicas, durabilidad y reología)	16
1.4 Efecto del refuerzo con fibras (acero, PVA, basalto, Polipropileno y vidrio)	22
1.5 Aplicaciones estructurales y estado del arte	26
1.6 Normativas y guías de ensayo	31
1.7 Planteamiento del problema.....	34
1.8 Hipótesis.....	37
1.9 Objetivo general	37
1.10 Objetivos específicos	37
Capítulo 2 – Materiales y Métodos Experimentales	40
2.1 Materiales utilizados.....	40
2.2 Caracterización de los materiales	55
2.3 Diseño y preparación de mezclas	85
2.4 Métodos de ensayo	95
Capítulo 3 – Resultados y Discusión	104
3.2 Propiedades mecánicas en estado endurecido.....	120
3.3 Discusión integrada.....	153
Capítulo 4 – Conclusiones y Recomendaciones.....	156
4.1 Conclusiones principales.....	156
4.2 Limitaciones del estudio	161
4.3 Recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas	163

Referencias Bibliográficas	167
----------------------------------	-----

Capítulo 1 – Introducción y Antecedentes

1.1 Generalidades del UHPC y relevancia en la ingeniería moderna

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés Ultra-High-Performance Concrete) es una clase avanzada de material cementante caracterizado por su alta resistencia mecánica, durabilidad superior contra concretos de resistencias normales y baja porosidad, derivadas de un diseño optimizado de la mezcla, uso de aditivos reductores de agua de alto rango, el uso de cementantes suplementarios y la incorporación de fibras de refuerzo. Este tipo de concreto surge como evolución de los concretos de alto desempeño (HPC), desarrollados a partir de la década de 1980 con el objetivo de mejorar la relación resistencia-durabilidad frente a las limitaciones del concreto convencional [12, 15, 16].

El UHPC combina una matriz altamente compacta, obtenida mediante la optimización del empaquetamiento de partículas, el uso de micro y nanosílice como materiales cementantes suplementarios y una muy baja relación agua/material cementante (≤ 0.25), lo que resulta en resistencias a la compresión superiores a 150 MPa bajo estrictas condiciones de curado como lo es el autoclave y aplicando calor, 130 MPa para procesos de curado en cuarto húmedo y resistencias a la flexión por encima de 20 MPa en ciertas formulaciones [1, 15, 41] generalmente con el uso de diversos refuerzos de fibra de múltiples matrices.

Además, su microestructura prácticamente libre de poros capilares le confiere muy baja permeabilidad al agua y agentes agresivos, proporcionando una durabilidad significativamente mayor frente a ataques químicos, abrasión y ciclos de congelamiento-descongelamiento [2, 4, 42].

Una característica distintiva del UHPC es la incorporación de fibras metálicas o poliméricas, que modifican su respuesta post-fisuración, incrementando la tenacidad y capacidad de absorción de energía. Dependiendo del tipo, cantidad y

orientación de las fibras, es posible alcanzar un comportamiento cuasi-ductil y controlado ante la formación de fisuras, lo cual expande su aplicabilidad en elementos estructurales exigentes [7, 18, 20, 23], como lo pueden ser puentes, cabezales y carreteras.

En la literatura internacional se reporta que el UHPC se utiliza en puentes, edificios de gran altura, elementos prefabricados de gran esbeltez y aplicaciones en ambientes agresivos como infraestructuras marinas, túneles y zonas con fuerte exposición a sales de deshielo [5, 11, 21]. Su empleo en conexiones prefabricadas ha permitido reducir tiempos de ensamble y costos de mantenimiento a largo plazo debido a su alta durabilidad [21, 42].

No obstante, el desarrollo y aplicación de los UHPC aún presentan retos tecnológicos y económicos, como lo son: la alta demanda de energía en su producción, el costo de fibras metálicas o sintéticas, necesidad de control estricto en su elaboración y la falta de normativas estandarizadas en algunos países para su diseño y control de calidad [4, 9, 13, 16]. Por ello, la investigación continúa orientada a optimizar mezclas más sostenibles, reducir la huella de carbono y mejorar el desempeño mediante fibras híbridas y materiales reciclados [1, 3, 30, 39].

Si bien diversos autores [1–4] han reportado resistencias a compresión superiores a 150 MPa en UHPC, existe aún un debate en la literatura acerca del papel predominante de la densificación granular frente al aporte de reactividad puzolánica en el desarrollo de estas propiedades. Esto sugiere que la optimización de mezclas no debería limitarse a la reducción del tamaño de partícula, sino considerar también la contribución sinérgica de fillers reactivos como el vidrio de borosilicato [31, 38–39].

En resumen, el UHPC constituye una de las innovaciones más significativas en la industria del concreto, combinando altas prestaciones mecánicas, gran

durabilidad y posibilidades arquitectónicas, lo que lo convierte en un material clave para las estructuras de próxima generación, particularmente en obras donde la seguridad, vida útil y bajo mantenimiento son prioritarios [4, 7, 9].

1.2 Historia y evolución del UHPC y concretos fibroreforzados

El desarrollo de concretos de ultra-alto desempeño (UHPC) ha sido un proceso gradual derivado de la búsqueda de mezclas cementicias más eficientes, durables y sostenibles que superaran las limitaciones del concreto convencional y del concreto de alto desempeño (HPC). Desde mediados del siglo XX, diversos investigadores exploraron métodos para incrementar la densidad de la matriz cementante, reducir la porosidad y mejorar la resistencia a la compresión mediante el uso de altas presiones, partículas ultrafinas y aditivos especializados [17, 18, 19, 37].

Etapas iniciales: cementos de alta resistencia (1950–1980)

Los primeros antecedentes del UHPC se remontan a estudios pioneros como los de Powers (1949) [37], quien analizó la relación entre agua libre y la hidratación del cemento, sentando bases para concretos con relaciones agua/material cementante más bajas. Posteriormente, Roy et al. (1972) y Yudenfreund et al. (1972) desarrollaron pastas cementantes de muy alta resistencia empleando presión y técnicas de compactación [17, 18]. En 1981, Bache propuso el concepto de “cemento densificado con partículas ultrafinas” (DSP), anticipando el enfoque moderno de optimización granulométrica para lograr matrices extremadamente densas [19].

Avances en concretos reactivos en polvo (RPC) (1990–2000)

En la década de 1990, el trabajo de Richard y Cheyrezy (1995) [15] revolucionó el campo con el desarrollo de los denominados Reactive Powder Concretes (RPC), logrando resistencias a compresión superiores a 200 MPa y una microestructura

prácticamente libre de porosidad capilar. Estos avances fueron posibles gracias a:

- Eliminación del agregado grueso para evitar zonas de transición débil.
- Uso de microsílice, finos de cuarzo y aditivos superplastificantes de alta eficiencia.
- Relación agua/cementante extremadamente baja (< 0.20).

Este nuevo enfoque permitió obtener un concreto con resistencia excepcional, alta densidad y durabilidad mejorada, sentando las bases del UHPC moderno [15, 16].

Consolidación del concepto UHPC (2000–2010)

Durante los años 2000, los UHPC comenzaron a ser adoptado a escala comercial, principalmente en Europa, Japón y Norteamérica, impulsado por proyectos piloto en puentes peatonales y elementos prefabricados de sección reducida. La publicación de las primeras guías de diseño, como las recomendaciones provisionales AFGC/SETRA (2002) [16], permitió estandarizar parámetros básicos para su uso estructural. Investigaciones paralelas exploraron la incorporación de fibras metálicas y sintéticas, mejorando significativamente el comportamiento post-fisuración y la resistencia a tracción [20, 22, 23].

Desarrollo reciente y tendencias actuales (2010–presente)

En las últimas dos décadas, el UHPC ha evolucionado hacia mezclas más eficientes y sostenibles, incorporando materiales suplementarios como cenizas volcánicas, polvo de vidrio reciclado y adiciones de subproductos de origen industrial [31, 38, 39]. Se ha ampliado el rango de fibras disponibles (acero, PVA, basalto, híbridas, polipropileno/polietileno, vidrio, vegetales, etc), optimizando la ductilidad, absorción de energía y resistencia a impacto [7, 24, 33, 34].

Los reportes más recientes destacan una tendencia hacia la reducción de la huella de carbono y la automatización del diseño de mezclas mediante técnicas de optimización y aprendizaje automático [1, 6, 8]. En paralelo, la aplicación de los UHPC se ha extendido a conexiones prefabricadas, refuerzo de estructuras existentes y construcción modular, con normativas emergentes como las guías FHWA (2013, 2019) [21, 42], y la norma ASTM C1856 [28] para preparación y ensayo de especímenes.

La historia de los concretos de ultra alto desempeño refleja una transición progresiva y constante, desde concretos convencionales hacia materiales ingeniarizados a nivel microestructural, diseñados para satisfacer altas exigencias mecánicas, durabilidad prolongada y sustentabilidad, consolidándolo hoy como una de las tecnologías más avanzadas y prometedoras en la industria [1, 4, 5, 7, 15, 42].

Antecedentes internacionales del UHPC

Desde su desarrollo inicial en Francia en la década de 1990 (cuando eran conocidos como Reactive Powder Concrete, RPC), el UHPC ha evolucionado hacia aplicaciones estructurales de alta durabilidad y eficiencia, principalmente en elementos prefabricados de puentes y fachadas arquitectónicas [16, 42]. La mayoría de estos desarrollos iniciales fueron impulsados por la búsqueda de concretos de muy alta resistencia, baja porosidad y elevada vida útil, capaces de reducir los costos de mantenimiento y aumentar la durabilidad de las estructuras expuestas a ambientes agresivos.

Tras el desarrollo en Francia de los primeros concretos de ultra alto desempeño en la década de 1990, el UHPC se ha implementado en diversos proyectos alrededor del mundo, especialmente en elementos prefabricados y de puentes, demostrando su alto desempeño y durabilidad. La Tabla 1 resume algunos de los casos más representativos, que han servido como referencia para la evolución de esta tecnología y su adopción progresiva en distintos países [16, 21, 42].

Tabla 1. Casos más representativos de UHPC en el mundo.

Proyecto / Obra	Ubicación / Año	Elemento UHPC	Tipo de fibra	Espesor / Dimensiones	Referencia
Sherbrooke Pedestrian Bridge	Quebec, Canadá (1997)	Puente peatonal con dovelas prefabricadas	Acero (2.5% vol.)	60 mm de espesor	[16], [42]
Peace Bridge	Calgary, Canadá (2012)	Losa de cubierta de puente	Acero (2% vol.)	75 mm	[42]
Seine Musicale Roof Panels	París, Francia (2016)	Paneles arquitectónicos curvos	Acero + vidrio AR	30 mm	[16]
Wapello County Bridge	Iowa, EE.UU. (2012)	Conexión de vigas prefabricadas	Acero (2%)	Juntas de 50 mm	[21], [42]
Solar Furnace Tower Cladding	Odeillo, Francia (1990s)	Placas UHPC de fachada	Acero	25–40 mm	[16]
Maritime Tower Wind Barriers	Seúl, Corea (2014)	Barreras de viento	Acero (2%)	40 mm	[42]

La experiencia internacional demuestra que el UHPC ofrece ventajas significativas en términos de resistencia, durabilidad y esbeltez estructural, como lo evidencian proyectos pioneros en Canadá, Francia y Estados Unidos [16, 21, 42]. No obstante, la mayoría de estas aplicaciones se han desarrollado con materiales y fibras metálicas bajo condiciones controladas de prefabricación y en laboratorio de materiales.

La información disponible sobre el desempeño del UHPC fabricado con materiales alternativos y fibras no metálicas en contextos locales es aún limitada, lo que refuerza la importancia de investigaciones orientadas a evaluar nuevas combinaciones de materiales y su efecto en el comportamiento mecánico y

reológico del UHPC bajo normas de ensayo reconocidas, enfocadas en materiales de la región y condiciones comerciales, de disponibilidad de materiales etc.

Estos proyectos pioneros demostraron el potencial del UHPC para la construcción de elementos estructurales más esbeltos, de gran durabilidad y bajo costo de mantenimiento [16,21,42]. Sin embargo, la mayoría se desarrollaron bajo condiciones controladas de prefabricación en laboratorios de universidad y con fibras metálicas de alto contenido volumétrico, utilizando materiales de alta pureza y granulometría optimizada. La información limitada y disponible sobre mezclas con materiales alternativos y fibras no metálicas en contextos locales refuerza la necesidad de investigaciones que evalúen su comportamiento bajo normas de ensayo reconocidas internacionalmente, con un contexto regional como en Monterrey, NL para poder considerar su implementación como solución en el mercado actual.

1.3 Propiedades clave del UHPC (mecánicas, durabilidad y reología)

El concreto de ultra-alto desempeño, combina una serie de características que lo diferencian ampliamente del concreto convencional y del concreto de alto desempeño (HPC). Estas propiedades resultan de un diseño optimizado de la mezcla, una baja relación agua/cementante, el uso de adiciones reactivas, cementantes suplementarios y la incorporación de fibras, otorgándole altas prestaciones mecánicas, excelente durabilidad y trabajabilidad controlada [1, 4, 15, 41].

La Tabla 2 resume propiedades típicas de concretos convencionales, de alto desempeño (HPC) y de ultra-alto desempeño (UHPC) reportadas en la literatura [16, 42, 50]. Estas cifras muestran la ventaja del UHPC en resistencia, durabilidad y vida útil esperada, justificando su creciente interés para aplicaciones estructurales de larga duración.

Tabla 2. Propiedades típicas de concretos convencionales, HPC y UHPC.

Propiedad	Concreto convencional ($f'_c \approx 30\text{--}50$ MPa)	HPC ($f'_c \approx 60\text{--}90$ MPa)	UHPC ($f'_c \geq 120$ MPa)
Resistencia a compresión (MPa)	30–50	60–90	120–200+
Resistencia a tracción directa (MPa)	2–5	4–6	7–12
Resistencia a flexión (MPa)	4–7	7–12	20–50
Módulo elástico (GPa)	25–35	30–40	45–55
Tenacidad (J/m^2)	< 100	150–300	500–2000
Permeabilidad (Coulombs, ASTM C1202)	> 2000	1000–2000	< 100
Vida útil esperada (años)*	50–75	75–100	100–150+

*Valores aproximados de acuerdo con [16], [42], [50].

Si bien las propiedades del UHPC superan claramente las de concretos convencionales y de alto desempeño, la literatura [3, 5, 28] destaca que estos valores pueden variar considerablemente en función de factores como la granulometría de los agregados, la relación agua/material cementante y el tipo de fibra incorporada.

Por ejemplo, Yu et al. [28] reportan diferencias de hasta un 30 % en resistencia a esfuerzos de flexión para mezclas con proporciones similares, únicamente por cambios en la orientación de fibras durante el colado de los elementos (debido a problemas de aglomeraciones también llamadas clusters, una mala distribución a lo largo del elemento, falta de un mezclado propio, un vaciado incorrecto, etc). Esta falta de estandarización en procedimientos y especificaciones plantea desafíos para la estimación confiable del comportamiento estructural, lo que justifica la necesidad de ensayos experimentales con materiales y condiciones locales.

1.3.1 Propiedades mecánicas

El UHPC exhibe resistencias a compresión típicamente superiores a 150 MPa, alcanzando en algunos casos valores cercanos a 200–250 MPa, dependiendo de la composición y del proceso de curado [15, 41]. Estos valores se obtienen gracias a:

- Matriz densificada y baja porosidad capilar [15, 28].
- Relación baja de agua/material cementante ≤ 0.25 [16, 28].
- Uso de aditivos superplastificantes de alto rango [4, 5].

Asimismo, la resistencia a tracción puede oscilar entre 7 y 15 MPa, dependiendo del tipo, orientación, matriz y volumen de fibra incorporada [20, 23]. El comportamiento post-fisuración se caracteriza por una respuesta cuasi-dúctil, donde la presencia de fibras permite un puenteo efectivo de fisuras y una absorción significativa de energía [7, 22, 24].

La combinación de alta resistencia a compresión, tracción y flexión incrementa la capacidad de diseño estructural, permitiendo secciones más delgadas, mayor esbeltez de los elementos y reducción del peso propio [42].

Gracias a estas propiedades, los concretos de ultra alto desempeño permite diseños estructurales más eficientes, con secciones delgadas, elementos esbeltos y reducción del peso propio [42]. Comparado con el concreto convencional y con el HPC, el UHPC presenta ventajas notables en resistencia a compresión, flexión y tracción [16, 42, 50]. No obstante, diversos estudios [3, 5, 28] reportan variaciones de hasta un 30 % en las propiedades mecánicas aun en mezclas de composición similar. Factores como una granulometría específica, la relación agua/material cementante, el método de curado y la orientación de las fibras influyen de manera significativa [28, 41]. Esta variabilidad pone de manifiesto la importancia de realizar evaluaciones experimentales con materiales locales y

condiciones controladas, a fin de contar con bases confiables para el diseño estructural de UHPC.

1.3.2 Propiedades de durabilidad

El UHPC presenta muy baja permeabilidad, con coeficientes de difusión de cloruros hasta 100 veces menores que los del concreto convencional [42]. Esta baja porosidad, junto con la densidad de su matriz y la presencia de adiciones puzolánicas como cementantes suplementarios, confiere:

- Alta resistencia a ataques químicos (sulfatos, ácidos, aguas agresivas) [30, 39].
- Excelente comportamiento ante ciclos de congelamiento-descongelamiento, con mínima pérdida de masa y durabilidad prolongada [42].
- Baja retracción y fluencia, contribuyendo a la estabilidad dimensional de elementos esbeltos y prefabricados [9, 10].

Estas propiedades han permitido aplicaciones en infraestructuras marinas, túneles, elementos de puentes y ambientes industriales severos, donde la vida útil y el bajo mantenimiento son requisitos fundamentales [11, 21, 42].

1.3.3 Propiedades en estado fresco

La caracterización del UHPC en estado fresco es esencial para asegurar un llenado completo de cimbras o moldes, compatibilidad con equipos de bombeo y calidad superficial del acabado [42, 44]. Entre las propiedades más relevantes se encuentran:

- Fluidéz y auto-compactabilidad: El UHPC suele comportarse como un material autocompactable, con diámetros de flujo medidos en ensayo de “slump flow” en los rangos de 200–250 mm, permitiendo el llenado de

secciones complejas o con una densidad importante de acero de refuerzo, sin necesidad de vibrado [42].

- Tiempo de trabajabilidad: Normalmente de 30 a 90 minutos, dependiendo de la temperatura ambiente y la dosificación de aditivos superplastificantes, retardantes y estabilizadores [44].
- Contenido de aire: Es bajo (<2%), lo cual ayuda a mantener la densidad y resistencia del material [29].
- Densidad (peso volumétrico fresco): Usualmente entre 2400 y 2500 kg/m³, influenciada por el contenido de fibras y la granulometría de los agregados pétreos [44].
- Ausencia de segregación y exudación: Debido al alto contenido de finos y a la cohesión interna de la mezcla [42].

Estas propiedades deben evaluarse en cada lote para garantizar uniformidad y evitar defectos en el elemento final.

El comportamiento reológico del UHPC se describe habitualmente mediante el modelo de Bingham, el cual asume que la mezcla presenta un esfuerzo de cedencia (yield stress, τ_0) que debe ser superado para iniciar el flujo, seguido por una región de deformación con viscosidad plástica (η_p) constante [53, 61].

En concretos de alta finura y baja relación agua/material cementante, como lo son los concretos de ultra alto desempeño, el valor de τ_0 está fuertemente influenciado por la fricción entre partículas, la presencia de fibras y la eficiencia del superplastificante de alto rango, mientras que la viscosidad plástica depende de la distribución granulométrica y el contenido volumétrico de sólidos, la cantidad de fibra de refuerzo y la matriz de la misma [51, 53].

Estudios recientes reportan para UHPC valores de τ_0 en el rango de 50–200 Pa y viscosidades plásticas entre 10–50 Pa·s, superiores a las de concretos convencionales, lo que explica su tendencia a requerir mezclado intensivo y

aditivos de alto desempeño para lograr fluidez adecuada [51, 53]. La falta de consenso en la literatura sobre los parámetros óptimos de reología para UHPC con materiales alternativos resalta la importancia de caracterizar estas propiedades en cada contexto específico y aterrizarlo a las condiciones de obra del proyecto, como lo es el desarrollo para la Zona Metropolitana de Monterrey.

1.3.4 Propiedades reológicas y trabajabilidad

La reología del UHPC se caracteriza por una baja relación agua/material cementante y alta concentración de sólidos, lo que confiere una mezcla densa, pero de alta fluidez gracias al uso de superplastificantes de última generación [26, 27]. Se describen dos parámetros principales en el estudio de la misma:

- **Esfuerzo de cedencia (τ_0):** Energía mínima necesaria para iniciar el flujo.
- **Viscosidad plástica (μ):** Relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación una vez iniciado el flujo [28].

La incorporación de fibras metálicas o poliméricas incrementa la viscosidad y puede reducir la fluidez si el contenido de fibras supera valores óptimos (>2,5–3% en volumen de concreto). Esto puede afectar el llenado y generar defectos de compactación si no se ajusta la dosificación o la energía de mezcla [24, 28, 39].

El uso de reómetros para concreto (como el desarrollado por Germann Instruments y usado en este proyecto, ICAR,) permite caracterizar estas propiedades y ajustar el diseño de mezcla para obtener un UHPC con autocompatibilidad, estabilidad y una capacidad de bombeo adecuadas, incluso en presencia de altas dosis de fibras superiores al 2% [44].

En conjunto, estas propiedades hacen del UHPC un material altamente eficiente, durable y adaptable, capaz de responder a las exigencias estructurales y ambientales más severas, posicionándolo como un material de referencia para

estructuras de próxima generación, en donde se busca que la vida útil de los elementos sea extendida, o reducir la sección de los mismos [1, 4, 7, 42, 44].

1.4 Efecto del refuerzo con fibras (acero, PVA, basalto, Polipropileno y vidrio)

La incorporación de fibras en el concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) es uno de los elementos clave que diferencia a este material de concretos de alta resistencia sin refuerzo discreto. Las fibras, metálicas, minerales o poliméricas, desempeñan un papel fundamental en la transferencia de tensiones después de la primera fisuración, mejorando su ductilidad, tenacidad y capacidad de absorción de energía, además de contribuir al control de la propagación de grietas a lo largo del elemento [1, 4, 7, 18].

El mecanismo principal por el cual las fibras actúan consiste en puentear las microfisuras que se generan tras superar la resistencia a tracción del material, permitiendo que el UHPC mantenga capacidad portante después de la formación de fisuras iniciales, lo que se traduce en un comportamiento cuasi-dúctil [20, 22, 41].

Aunque existe consenso en que las fibras de acero ofrecen el mejor desempeño post-fisuración [61–65], diversos estudios [3, 7, 50] señalan que alternativas sintéticas, minerales y de vidrio podrían ofrecer ventajas en durabilidad y costo, especialmente en aplicaciones de exposición agresiva.

Sin embargo, las investigaciones que comparen directamente el efecto de diferentes fibras en las curvas carga-deflexión del UHPC bajo ASTM C1609 son limitadas. Esto genera un espacio de oportunidad para evaluar de manera sistemática mezclas reforzadas con fibras no metálicas y cuantificar su desempeño frente a las tradicionales fibras de acero, para poder plantear un posible reemplazo, debemos tener presente que el uso de fibras mayor a un 2% del volumen de concreto también tiene un impacto significativo en el costo del

material y finalmente en el costo del proyecto, el uso de fibras sintéticas y minerales atiende a la premisa de resolver el uso de fibras, sin incrementar el costo para lo que ya es en su una mezcla de alta especialidad en concreto.

1.4.1 Tipos de fibras empleadas en UHPC

Diversos tipos de fibras son utilizadas según las necesidades estructurales y de durabilidad:

Fibras de acero: Son las más empleadas debido a su alta resistencia a tracción (2000–2500 MPa), buen anclaje mecánico y capacidad para incrementar significativamente la resistencia a flexión y la tenacidad del UHPC. Normalmente se utilizan en contenidos de 1 a 3% en volumen, con longitudes de 10–20 mm y diámetros de 0.2–0.3 mm, alcanzando relaciones de aspecto (L/D) entre 50 y 100 [20, 23, 41].

Fibras poliméricas (PVA, PE, P/P): Aportan capacidad de deformación múltiple (conocida en la literatura como strain-hardening), mejor control de fisuración fina y resistencia química elevada. Se utilizan principalmente en aplicaciones donde la durabilidad frente a ambientes agresivos y el control de apertura de fisuras son críticos [7, 24, 30].

Fibras de basalto y otras fibras minerales: Ofrecen alta resistencia química y térmica, así como bajo costo relativo frente a fibras metálicas. Su empleo en UHPC es reciente y busca mejorar la compatibilidad ambiental y reducir la huella de carbono del material, aunque presentan menor anclaje mecánico que las fibras de acero [33, 34].

Combinaciones híbridas: La adición simultánea de fibras de acero y fibras poliméricas o minerales ha mostrado efectos sinérgicos, combinando alta resistencia post-fisuración y control de fisuras finas, lo que incrementa la

tenacidad y disipación de energía bajo cargas estáticas, de impacto y dinámicas [7, 23, 24].

1.4.2 Influencia en las propiedades mecánicas

La incorporación de fibras incrementa notablemente la resistencia a tracción y la energía absorbida después de la fisuración, mejorando la capacidad de deformación sin pérdida abrupta de carga. Estudios recientes indican que:

- Un contenido de fibras metálicas del 2% en volumen puede aumentar la resistencia a flexión hasta en un 40–60%, con un crecimiento proporcional en el módulo de ruptura [4, 7, 18].
- Las fibras poliméricas logran una redistribución más uniforme de fisuras, mejorando la resistencia a fatiga y controlando aperturas de grieta menores a 0.1 mm [24, 30].
- Los sistemas híbridos permiten mejorar simultáneamente la capacidad portante y la ductilidad, mostrando mayor área bajo la curva carga-deflexión que los sistemas mono fibra [7, 23, 41].

La Tabla 3 resume rangos típicos de energía absorbida (T150 y T300) reportados en literatura para UHPC con diferentes tipos de fibras. Se observa que las fibras metálicas presentan los valores más altos, mientras que fibras sintéticas y de vidrio ofrecen contribuciones menores a la resistencia post-fisuración. La variabilidad entre estudios es considerable, lo que refuerza la necesidad de evaluar comparativamente distintos tipos de fibras bajo condiciones homogéneas de mezcla y ensayo.

Tabla 3. Rangos típicos de energía absorbida T150 y T300 para UHPC.

Tipo de fibra	Contenido volumétrico (%vol.)	T150 (J)*	T300 (J)*	Referencia
---------------	-------------------------------	-----------	-----------	------------

Acero recto o con gancho	2.0–2.5	25–50	40–100	[41], [61], [65]
Basalto cortado	2.0–3.0	15–35	20–60	[33], [34], [61]
Vidrio AR	2.0–2.5	10–25	15–40	[66], [67]
PVA (alcohol polivinílico)	2.0–2.5	12–30	18–45	[25], [61], [67]
PP/PE (Tuf-Strand SF)	2.0–3.0	8–20	12–35	[63], [61], [65]

Si bien la incorporación de fibras mejora sustancialmente la capacidad de absorción de energía de concreto de ultra alto desempeño, la literatura muestra gran dispersión en los valores de tenacidad (T150 y T300) reportados bajo ensayos ASTM C1609, con variaciones de hasta el 40 % entre mezclas con similar contenido y tipo de fibra [25, 61, 65].

Esta variabilidad se atribuye a diferencias en la orientación de las fibras, calidad del mezclado y propiedades de la matriz. La escasez de estudios que comparen, bajo condiciones homogéneas, el efecto de fibras sintéticas, minerales y metálicas sobre la tenacidad y ductilidad del UHPC limita la capacidad de establecer criterios de selección claros para aplicaciones estructurales, lo que justifica investigaciones comparativas como la presente.

1.4.3 Influencia en propiedades reológicas y en estado fresco

Si bien las fibras son esenciales para el comportamiento mecánico, su presencia afecta la reología del UHPC fresco, aumentando el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica debido a la fricción adicional y la interacción partícula-fibra [26, 28]. Un exceso de fibras (>3% en volumen) puede dificultar la auto-compactabilidad, generar problemas para que la mezcla sea bombeada y provocar segregación o formación de “clusters o nidos de fibras”, especialmente en fibras largas o con geometrías complejas [44].

La selección del tipo, contenido y geometría de la fibra debe balancear trabajabilidad y desempeño mecánico, siendo necesario realizar ensayos reológicos (como esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica) para ajustar la mezcla y evitar defectos en el elemento final [42, 44].

1.4.4 Factores que condicionan la efectividad del refuerzo con fibras

Los principales parámetros que determinan la efectividad de las fibras en UHPC son:

- Tipo de fibra y propiedades mecánicas (resistencia a tracción, módulo elástico, rugosidad superficial) [23, 41].
- Contenido volumétrico y orientación de las fibras dentro del concreto, que dependen del método de mezclado, colado y geometría del elemento [20, 22].
- Compatibilidad química y adherencia entre la fibra y la matriz cementicia, especialmente en fibras poliméricas y minerales [30, 33].
- Longitud y relación de aspecto (L/D), que influyen en la capacidad de anclaje y el comportamiento post-fisuración [20, 23].

En síntesis, la adición de fibras transforma al UHPC de un material de alta resistencia frágil a un material cuasi-dúctil y altamente tenaz, capaz de mantener su integridad estructural bajo estados de carga elevados, impactos y acciones dinámicas. La selección y dosificación adecuadas de fibras son determinantes para optimizar simultáneamente su trabajabilidad, capacidad portante y durabilidad, siendo este uno de los campos de investigación más activos en los últimos años [1, 4, 7, 23, 41].

1.5 Aplicaciones estructurales y estado del arte

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) ha ampliado sus aplicaciones en ingeniería civil gracias a su resistencia mecánica excepcional, elevada durabilidad

y capacidad para formar elementos delgados y livianos. Desde su introducción comercial en la década de 1990, su uso se ha extendido a múltiples sectores, incluyendo puentes, prefabricados arquitectónicos, rehabilitación de estructuras existentes y componentes especiales de infraestructura, consolidándose como una tecnología avanzada para construcciones de larga vida útil [1, 4, 11, 42].

1.5.1 Aplicaciones en puentes y elementos prefabricados

Los puentes han sido uno de los campos donde el UHPC ha demostrado mayor potencial, debido a su capacidad para:

- Reducir el tamaño de las secciones estructurales, disminuyendo peso propio y cargas permanentes [11, 21].
- Permitir mayor longitud de claros con elementos más esbeltos gracias a resistencias a compresión de hasta 200 MPa [15, 41].
- Mejorar la durabilidad en ambientes agresivos, como zonas marinas o expuestas a sales de deshielo [42].

La Federal Highway Administration (FHWA) ha promovido desde 2013 el uso del UHPC en conexiones prefabricadas de vigas y losas para acelerar la construcción de puentes (programa EDC-4), logrando reducción de tiempos de montaje y costos de mantenimiento [21, 42]. Proyectos recientes en Estados Unidos, Canadá y Europa han utilizado UHPC en juntas y conexiones de vigas I, elementos de borde y transiciones entre tableros [11, 42].

1.5.2 Edificios de gran altura y elementos arquitectónicos

Gracias a su alta resistencia y estética refinada, los UHPC se ha utilizado en:

- Fachadas y paneles delgados con espesor menor a 20 mm, que ofrecen alta impermeabilidad y resistencia al impacto [5, 24].
- Columnas y núcleos estructurales en edificios altos, permitiendo reducir secciones y aumentar el área útil de plantas [18, 41].

- Elementos ornamentales y mobiliario urbano, aprovechando su capacidad para lograr superficies lisas y formas complejas mediante moldes finos [30, 39].

1.5.3 Rehabilitación y reforzamiento de estructuras existentes

Los UHPC se emplea cada vez más en refuerzos y sobrecapas (overlays) en:

- Puentes deteriorados, proporcionando coberturas delgadas y muy resistentes a la fisuración y penetración de cloruros, extendiendo la vida útil de la estructura [11, 42].
- Elementos prefabricados dañados, donde su alta adherencia y retracción controlada permiten reparaciones durables [30, 39].
- Conexiones de prefabricados en estructuras sismorresistentes, mejorando la integridad y rigidez del conjunto [7, 23].

Proyectos en Noruega y EE. UU. entre 2023 y 2025 han reportado incrementos de hasta 50 años en vida útil de puentes y viaductos tras la aplicación de UHPC en capas delgadas de refuerzo [11].

1.5.4 Aplicaciones especiales

Además de las estructuras tradicionales, los UHPC se está utilizando en:

- Elementos sometidos a cargas de impacto o explosión, debido a su alta energía de fractura y capacidad de absorción cuando se combina con fibras híbridas [7, 41].
- Estructuras hidráulicas y marítimas, gracias a su baja permeabilidad y alta resistencia a la abrasión [42].
- Construcción modular y 3D printing, aprovechando su reología controlada y capacidad para mantener forma sin encofrados tradicionales [6, 8].

Estas aplicaciones están en crecimiento y son objeto de múltiples investigaciones para optimizar mezclas con menor huella de carbono y alto desempeño a largo plazo [1, 3, 9].

1.5.5 Estado del arte y tendencias futuras

La investigación en UHPC ha evolucionado hacia el desarrollo de mezclas sostenibles, más económicas y con propiedades multifuncionales. Según revisiones recientes [1, 2, 7, 9]:

- Se busca reemplazar parcialmente el consumo de cemento Portland con materiales suplementarios y subproductos industriales (vidrio molido, cenizas de biomasa, metacaolín) para reducir emisiones de CO₂ [12, 29, 39].
- El uso de fibras híbridas y nanotecnología (nanoplatelets de grafito GNPs, nano-sílice) mejora la ductilidad, resistencia a impacto y conductividad térmica del UHPC [6, 7].
- Se están aplicando técnicas de modelado y optimización por inteligencia artificial para diseñar mezclas más predecibles y eficientes [8].
- Nuevas normativas y guías técnicas (FHWA 2019, ACI 239, ASTM C1856) están ampliando el uso de UHPC en distintos países, facilitando su adopción industrial a una mayor escala y a un costo más reducido. [21, 44].

En síntesis, el UHPC se ha consolidado como una tecnología clave para la infraestructura moderna de alto desempeño, y las investigaciones actuales apuntan a maximizar su eficiencia estructural, sostenibilidad y aplicabilidad,

asegurando estructuras más seguras y de larga duración para las próximas décadas [1, 4, 7, 42].

Aunque los casos prácticos muestran resultados satisfactorios en términos de desempeño a largo plazo, la mayoría se desarrollaron bajo condiciones de prefabricación controlada y con fibras metálicas, lo que deja un margen de incertidumbre sobre la aplicabilidad de UHPC con materiales alternativos o fibras no metálicas en condiciones de obra in situ [16, 21, 42].

Los antecedentes internacionales muestran diversas aplicaciones exitosas del UHPC en puentes, conexiones prefabricadas y elementos arquitectónicos delgados (ver Tabla 2 en la sección 1.2) [16, 21, 42]. No obstante, dichas experiencias se han desarrollado casi exclusivamente con fibras metálicas y materiales altamente refinados bajo condiciones de laboratorio controladas, lo que limita la extrapolación directa de sus resultados a contextos locales donde se pretende utilizar fillers alternativos y fibras no metálicas. Esta falta de evidencia experimental específica refuerza la relevancia de investigaciones orientadas a validar el desempeño mecánico del UHPC producido con materiales regionales, aplicando metodologías estandarizadas como es el caso de este proyecto en particular.

Si bien las aplicaciones estructurales del UHPC han mostrado resultados altamente satisfactorios en términos de resistencia y durabilidad, es importante señalar que la mayoría de estos desarrollos se han llevado a cabo en contextos de prefabricación industrial con materiales y procesos cuidadosamente controlados. Esta condición limita la extrapolación directa de dichos resultados al uso de materiales locales, métodos de producción in situ y fibras no metálicas. Por tanto, persiste la necesidad de validar su comportamiento en contextos constructivos alternativos que representen los desafíos técnicos y logísticos propios de cada región.

1.6 Normativas y guías de ensayo

A pesar de que el concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) se considera un material relativamente nuevo dentro de la ingeniería civil, diversas instituciones y organismos técnicos han desarrollado normas, especificaciones y recomendaciones para estandarizar su fabricación, ensayo y diseño estructural. Si bien todavía no existe un código de diseño internacional unificado para los concretos de Ultra alto Desempeño, se han publicado guías de referencia que establecen criterios para preparación de mezclas, caracterización en estado fresco y endurecido, y métodos de ensayo mecánico y de durabilidad [21, 42, 44].

1.6.1 Normas ASTM relevantes para UHPC

La American Society for Testing and Materials (ASTM) ha desarrollado varias normativas aplicables a estos concretos, entre los que destacan:

ASTM C1609/C1609M-19 [43]: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).

Define los procedimientos para evaluar la respuesta a flexión de concretos reforzados con fibras bajo carga en tres puntos, midiendo resistencia, deflexión y tenacidad, parámetros esenciales para evaluar el desempeño postfisuración del UHPC.

ASTM C1856/C1856M-17 [28]: Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete.

Establece directrices para el moldeo, curado y ensayo de especímenes de UHPC, asegurando reproducibilidad y uniformidad en resultados de resistencia a compresión, flexión y tracción.

ASTM C231/C231M-17a [29]: Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.

Método aplicable al UHPC para determinar el contenido de aire en estado fresco, importante para evaluar su densidad y resistencia potencial.

ASTM C39 y C109: Métodos estándar para resistencia a compresión de cilindros y cubos, aplicables con ajustes en dimensiones y cargas cuando se ensayan concretos de alta resistencia.

1.6.2 ACI 239R-18: Ultra-High Performance Concrete

El comité **ACI 239R-18 [44]** del American Concrete Institute publicó el reporte técnico “Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report”, que:

- Describe propiedades clave y ventajas del UHPC frente a concretos convencionales y HPC.
- Establece recomendaciones para proporciones de mezcla, colocación, curado y uso de fibras.
- Resume los principales métodos de ensayo aplicables y vacíos normativos actuales.
- Proporciona guías generales para diseño estructural, aunque no un código obligatorio.

Este documento se considera referencia base en Norteamérica y el resto del mundo para especificaciones de proyectos con UHPC y otorga un panorama general de lo que se refiere al material, características en estado fresco, endurecido y propiedades mecánicas, además de análisis estadístico para ejemplos de puentes ejecutados alrededor de los Estados Unidos de América.

1.6.3 Guías y especificaciones FHWA

La Federal Highway Administration (FHWA) de Estados Unidos ha publicado múltiples documentos técnicos para promover el uso de UHPC, especialmente en aplicaciones de puentes:

- FHWA-HRT-13-060 [42]: Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. Presenta las propiedades mecánicas, métodos de ensayo y experiencias en proyectos reales de UHPC.
- FHWA EDC-4 (2019) [21]: Promueve el uso de UHPC en conexiones prefabricadas para acelerar la construcción de puentes y mejorar la durabilidad de las juntas estructurales.
- FHWA-HRT-06-103 [40]: Documento de referencia sobre caracterización de propiedades mecánicas, incluyendo módulo elástico, resistencia a tracción directa, flexión y comportamiento postfisuración.

1.6.4 Normativas y recomendaciones internacionales

En Europa y Asia se han desarrollado guías específicas para el uso de UHPC:

AFGC/SETRA (2002) [16]: Interim Recommendations for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete.

Primera guía francesa que establece parámetros de diseño estructural y control de calidad.

JSCE (2006) [45]: Recommendations for Design and Construction of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Structures (Japón).

Contiene especificaciones para diseño a flexión, cortante y torsión de elementos UHPC reforzados con fibras.

CEN EN 14651 (2018): Norma europea para determinación de resistencia a tracción por flexión en concretos reforzados con fibras.

RILEM TC 162-TDF (2003): Métodos de diseño y ensayo para concretos con fibras metálicas, frecuentemente utilizados como referencia en estudios de UHPC.

1.6.5 Necesidad de normalización específica

Si bien estas normas y guías permiten caracterizar y diseñar el UHPC, aún existen vacíos normativos respecto a:

- Diseño estructural específico (factores de reducción, comportamiento a fatiga y cargas de impacto).
- Modelos de predicción a largo plazo (fluencia, retracción autógena).
- Ensayos estandarizados para mezclas con fibras híbridas o nuevos materiales suplementarios [1, 7, 9].

Los esfuerzos actuales de organismos como ACI, FHWA, ASTM y RILEM buscan consolidar códigos de diseño propios para UHPC, considerando su comportamiento único y diferencias frente a concretos convencionales [1, 4, 42, 44].

1.7 Planteamiento del problema

El uso del concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) se ha consolidado como una alternativa innovadora frente al concreto convencional y de alto desempeño

(HPC), gracias a su excelente comportamiento mecánico y durabilidad [1, 4, 42]. Sin embargo, presenta limitaciones importantes, especialmente en el contexto de la construcción sustentable:

Elevado consumo de cemento y alta huella de carbono.

El UHPC requiere cantidades significativas de cemento Portland y microsilice, lo que se traduce en una gran demanda energética y emisiones de CO₂ por metro cúbico producido [16]. Reducir el consumo de cemento es clave para abaratar y descarbonizar el material [16].

Costo y disponibilidad de fibras.

Las fibras metálicas de alto desempeño necesarias para conferir ductilidad aumentan significativamente el costo, y su disponibilidad puede ser limitada a nivel local [4, 7].

Variabilidad en resultados de acuerdo con la matriz de la fibra de refuerzo.

A pesar de los beneficios documentados en literatura, no hay consenso sobre las proporciones óptimas ni los efectos reológicos de las mezclas con fibras [7, 24, 33].

Propiedades reológicas variables y trabajabilidad afectada.

La inclusión de fibras altera la trabajabilidad del UHPC, pudiendo provocar segregación y dificultades en colocación si no se ajustan adecuadamente los diseños de mezcla [26, 28, 44].

Falta de datos experimentales locales.

En México y Latinoamérica hay pocos estudios disponibles sobre UHPC con fibras e, incluso menos, sobre variantes que incorporen recursos locales como el tipo de agregado de cada región o reciclados como este proyecto al incorporar un desperdicio rico en sílice amorfo subproducto de la industria de la ciudad.

Por ello, surge la necesidad de diseñar y evaluar mezclas de UHPC, con los siguientes objetivos:

- Reducir la cantidad de cemento mediante reemplazo parcial, disminuyendo emisiones sin sacrificar prestaciones mecánicas ni durabilidad [8].
- Promover una economía verde en materiales de construcción, reutilizando residuos de vidrio y aprovechando su efecto puzolánico y de compactación [8, 14]
- Validar experimentalmente mejoras en la microestructura, resistencia y menor huella de carbono, en comparación con UHPC convencional [8, 15]

La mayoría de los estudios y aplicaciones de UHPC utilizan materiales importados de alta pureza y fibras metálicas, mientras que existe poca evidencia sobre el comportamiento de mezclas optimizadas con fillers alternativos y fibras no metálicas disponibles en Monterrey. Esta investigación busca generar datos experimentales validados bajo diversas normativas internacionales que permitan evaluar la viabilidad técnica y económica de estas mezclas y proporcionar criterios de diseño aplicables a contextos regionales.

1.8 Hipótesis

El uso de diversos tipos de fibras de refuerzo y vidrio de borosilicato como filler en UHPC permitirá desarrollar mezclas con comportamiento mecánico y reológico diferenciado, donde una o más formulaciones logren un equilibrio óptimo entre resistencia, tenacidad, trabajabilidad y reducción en el consumo de cemento, favoreciendo su implementación en la construcción de infraestructuras más durables y sostenibles en el contexto local.

1.9 Objetivo general

Evaluar experimentalmente el efecto de distintos tipos de fibras (acero, PVA, PP/PE, vidrio y basalto) en mezclas de UHPC, con el fin de identificar formulaciones que logren un equilibrio óptimo entre propiedades mecánicas, tenacidad y trabajabilidad, favoreciendo el desarrollo de concretos de ultra-alto desempeño más sostenibles y aplicables en el contexto local.

1.10 Objetivos específicos

1. **Diseñar y preparar mezclas de UHPC** utilizando fibras de acero, PVA, PP/PE, vidrio y basalto, además de una mezcla control sin fibras, manteniendo proporciones de mezcla constantes para permitir la comparación directa.
2. **Caracterizar las propiedades en estado fresco** de cada mezcla, incluyendo contenido de aire, peso volumétrico, fluidez y parámetros reológicos (esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica), evaluando la influencia del tipo de fibra sobre la trabajabilidad del UHPC.

3. **Determinar las propiedades mecánicas en estado endurecido** mediante ensayos de flexión conforme a ASTM C1609, analizando resistencia máxima, comportamiento postfisuración, ductilidad y tenacidad a deflexiones controladas.
4. **Comparar el desempeño de las mezclas con respecto a la mezcla control**, identificando diferencias significativas en comportamiento reológico y mecánico atribuibles al tipo de fibra incorporada.
5. **Proponer la mezcla de UHPC más adecuada para el contexto local**, en términos de equilibrio entre propiedades mecánicas y trabajabilidad, como referencia para aplicaciones estructurales en ingeniería civil.

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) representa una de las tecnologías más avanzadas en materiales cementicios, ofreciendo una combinación única de altas resistencias a compresión, gran durabilidad y capacidad para producir elementos estructurales esbeltos y de larga vida útil.

No obstante, debido a su matriz extremadamente densa y baja porosidad, el UHPC tiende a presentar un comportamiento frágil bajo esfuerzos de tracción y flexión, con una ruptura brusca una vez alcanzada la resistencia máxima [15, 41, 42]. Por esta razón, la incorporación de fibras se ha convertido en una estrategia esencial para mejorar la tenacidad, redistribuir esfuerzos y controlar la propagación de grietas, modificando el modo de falla hacia un comportamiento más dúctil y seguro para aplicaciones estructurales.

Asimismo, esta investigación busca aportar soluciones adaptadas al mercado local de la zona metropolitana de Monterrey, evaluando el uso de agregados de caliza en lugar de agregados de sílice comúnmente utilizados en estos concretos y materiales disponibles en la región, así como el vidrio de borosilicato como filler sustituto, con el fin de disminuir el consumo de cemento, aprovechar subproductos

industriales de la zona metropolitana y reducir la huella ambiental asociada a la producción de concretos de ultra alto comportamiento [8, 39]. Esta aproximación no solo pretende validar experimentalmente el desempeño mecánico y reológico del material, sino también sentar bases para su adopción en la industria de la construcción local, favoreciendo prácticas más sostenibles y económicamente viables.

La combinación de estos enfoques justifica la necesidad de evaluar diferentes fibras (acero, PVA, PP/PE, vidrio y basalto) en mezclas de concreto de ultra alto desempeño bajo condiciones controladas, determinando su influencia en estado fresco y endurecido según diversas normas internacionales, y proponiendo formulaciones que integren alto desempeño, seguridad estructural y un impacto ambiental reducido para aplicaciones reales en la región.

A pesar del creciente interés en el UHPC, aún existe una limitada cantidad de información experimental sobre el uso de fillers alternativos como el vidrio de borosilicato y fibras no metálicas en mezclas optimizadas para las condiciones y materiales disponibles en la región de Monterrey. La ausencia de estudios comparativos bajo normas de ensayo como la ASTM C1609 para los UHPC justifica la realización de esta investigación, cuyo objetivo es generar datos experimentales que sirvan de referencia para el diseño de mezclas sostenibles y de alto desempeño en contextos locales.

En conjunto, la revisión bibliográfica muestra que, aunque el UHPC ha sido ampliamente estudiado y aplicado en diferentes partes del mundo, aún existen lagunas de información experimental para mezclas fabricadas con materiales alternativos y recursos locales, particularmente bajo metodologías normadas.

Esta investigación busca contribuir en este sentido, evaluando el desempeño mecánico y la influencia de distintos tipos de fibras en el concreto de ultra alto desempeño producido con materiales de la región noreste de Mexico.

Capítulo 2 – Materiales y Métodos Experimentales

2.1 Materiales utilizados

Los UHPC se caracteriza por una microestructura densificada, baja relación agua/material cementante y uso de materiales finos altamente reactivos, lo que le permite alcanzar resistencias superiores a 150 MPa y una durabilidad muy superior a la de un concreto convencional [1, 4, 15, 42]. Para lograr estas prestaciones, la composición de un UHPC se basa en una cuidadosa selección y dosificación de sus componentes, buscando optimizar el empaquetamiento de partículas, la reactividad química y la reducción de porosidad capilar.

En general, los materiales utilizados en un UHPC incluyen:

- **Cemento Portland o cemento Portland Compuesto** de alta resistencia y finura específica elevada, que constituye la matriz básica del material.
- **Microsílice (Humo de sílice) y polvo de cuarzo**, que actúan como fillers reactivos y no reactivos, mejorando el empaquetamiento y la resistencia química.
- **Arena de sílice de granulometría fina**, normalmente con tamaño máximo de partícula inferior a 600 μm , que contribuye a la formación de una matriz densa y homogénea.
- **Aditivo superplastificante** basado en policarboxilatos de última generación, esencial para garantizar alta fluidez con bajas relaciones agua/cementante ($<0,20$).
- **Agua** con calidad adecuada para mezclas cementicias, libre de impurezas que puedan afectar el fraguado.

- **Fibras de refuerzo** (principalmente metálicas o poliméricas) que permiten modificar el comportamiento post-fisuración y mejorar la tenacidad del material.

La **Tabla 4** muestra los intervalos típicos en porcentaje de peso para cada componente de un UHPC según reportes de la literatura [4, 5, 15, 41].

Tabla 4. Porcentaje de peso para un UHPC típico.

Ingrediente	Intervalo % en peso
Cemento	27 – 40
Microsílice	6 – 12
Polvo de cuarzo	7 – 14
Arena de sílice	35 – 45
Aditivo superplastificante	0.5 – 3
Agua	4 – 10
Fibras de acero	0 – 8

Esta composición ideal puede variar dependiendo de la disponibilidad de materiales, las condiciones de producción, el tipo de fibras utilizadas y las características específicas de proyecto. En el presente trabajo, además de los componentes tradicionales, se evalúa el uso de fibras de acero, PVA, PP/PE, vidrio y basalto para analizar su influencia en el desempeño del UHPC tanto en estado fresco como endurecido, así como el uso de un subproducto industrial rico en sílice amorfo de la industria vidriera regional.

Un aspecto distintivo de esta investigación es que se busca desarrollar las mezclas a partir de materiales y agregados disponibles en la región, evaluando su compatibilidad con los requisitos de un UHPC de alto desempeño. Este enfoque pretende generar conocimiento aplicable a nivel local de la Zona Metropolitana de

Monterrey, reduciendo la dependencia de materiales importados como lo puede ser una arena silica con granulometría específica importada desde la región de Ottawa en Canadá y favoreciendo la viabilidad técnica y económica de implementar concretos de ultra-alto desempeño en la industria de la construcción nacional, alineando la investigación con principios de sostenibilidad y aprovechamiento eficiente de recursos.

2.1.1 Cemento Portland Compuesto CPC 40

El cemento utilizado en esta investigación es un Cemento Portland Compuesto CPC 40 de Holcim, ampliamente empleado en México para concretos estructurales de media y alta resistencia. Este producto cumple con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2018 [46], que exige una resistencia mínima a compresión de 40 MPa a los 28 días. A nivel internacional, tiene una clasificación equivalente a los cementos Portland compuestos tipo IL o IP según la norma ASTM C595/C595M-20 [47], debido a su contenido de adiciones minerales que complementan al clinker.

La fase mineralogía predominante en el clinker de este cemento incluye silicato tricálcico (C_3S), el principal responsable del desarrollo rápido de resistencia inicial; silicato dicálcico (C_2S), clave para resistencias a largo plazo; aluminato tricálcico (C_3A), que regula el fraguado y reacciona con sulfatos; y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF), que contribuye a la reactividad inicial y al color. Esta combinación de fases determina el comportamiento técnico del cemento, con un equilibrio entre generación de calor, resistencia y trabajabilidad.

El CPC 40 también contiene adiciones minerales en un rango del 10 al 20 %, como puzolanas naturales, escoria de alto horno o filler calizo. Estos componentes mejoran la durabilidad, optimizan la granulometría y disminuyen la huella de carbono asociada al clinker. Su composición química típica incluye aproximadamente lo expresado en la tabla 5:

Tabla 5. Composición química de cemento CPC 40.

Componente químico	Rango típico (% en peso)
Óxido de calcio (CaO)	60 – 65
Dióxido de silicio (SiO ₂)	18 – 22
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4 – 6
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2 – 5
Óxido de magnesio (MgO)	≤ 5
Sulfatos (SO ₃)	≤ 5
Pérdida por ignición (LOI)	≤ 5

Descripción y características generales

El CPC 40 es un cemento hidráulico obtenido por la molienda conjunta de clinker Portland, yeso y adiciones minerales (puzolanas naturales, filler de caliza o escoria granulada de alto horno) en proporciones controladas para garantizar desempeño mecánico y durabilidad. Su uso en UHPC es viable gracias a:

- Alta resistencia a 28 días, contribuyendo a matrices de exigencia elevada.
- Compatibilidad con microsílíce y otros fillers, lo que permite una mejor optimización granulométrica.
- Disponibilidad local, lo que favorece la aplicación de esta investigación en el contexto regional y reduce costos y emisiones asociadas al transporte.

La utilización de un cemento tipo CPC 40, ampliamente disponible en la zona metropolitana de Monterrey, permite evaluar si es posible alcanzar propiedades reológicas y mecánicas comparables a las reportadas en la literatura internacional para mezclas UHPC. Esto representa un punto clave para el desarrollo de tecnologías de alto desempeño adaptadas a contextos regionales sin recurrir a cementos especiales importados.

2.1.2 agregados finos

En el diseño de concretos de ultra-alto desempeño (UHPC), los agregados son un componente fundamental para alcanzar las propiedades distintivas de este material. A diferencia del concreto convencional, en el que los agregados gruesos tienen un rol predominante, en el UHPC se prioriza el uso de agregados finos

debido a los altos requerimientos de resistencia y durabilidad que caracterizan a este tipo de concreto [9, 4].

Las propiedades físicas de los agregados, como la forma, textura superficial, granulometría, densidad y porosidad, influyen directamente en el comportamiento en estado fresco, la resistencia a compresión y la durabilidad frente a agentes agresivos. Una superficie irregular y de alta rugosidad favorece la adherencia con la pasta cementicia, mientras que un tamaño de partícula excesivo puede generar una zona de transición interfacial (ITZ) de mayor porosidad y micro-fisuración, reduciendo la capacidad de compactación del material y, por ende, su resistencia y durabilidad [10].

La literatura especializada recomienda eliminar los agregados gruesos en el diseño de UHPC, limitando el tamaño máximo del árido a 600 micras para obtener una matriz más homogénea y densificada. La reducción del tamaño de partícula aumenta el área superficial disponible para la unión pasta-agregado, mejora el empaquetamiento y disminuye el riesgo de micro defectos en la ITZ. De acuerdo con trabajos previos de Anguiano [9] y Landaverde [4], la fracción de agregados finos en un UHPC suele variar entre el 35 % y 45 % del peso total de la mezcla, empleando arenas de alta dureza y baja absorción, usualmente sílice de granulometría controlada, como componente principal del esqueleto granular. En algunos casos, el polvo de cuarzo, en tamaños de 0.8 a 1.4 mm, se incorpora en proporciones del 7 % al 14 % para optimizar la distribución granulométrica y reducir la demanda de pasta, siendo considerado como un filler dentro de la matriz del concreto [11, 5].

En este proyecto, se optó por el uso de arena caliza fina de origen regional, disponible local y previamente procesada para cumplir con la condición de tamaño máximo de 600 micras. Esta elección responde al objetivo de adaptar la tecnología UHPC a materiales accesibles en la región, favoreciendo su viabilidad técnica y económica en la industria local.

El empleo de agregados calizos permitirá evaluar su compatibilidad con matrices de ultra-alto desempeño y su impacto en propiedades mecánicas y de durabilidad, en comparación con lo reportado en la literatura para arenas de sílice.

Antes de su uso, el agregado fue tamizado, lavado y secado para eliminar partículas contaminantes, material orgánico y finos indeseados. Posteriormente, se realizaron pruebas físicas para determinar parámetros clave:

- Densidad aparente seca: 2.60 g/cm³
- Absorción de agua: 0.9 %
- Módulo de finura: 2.2
- Contenido de humedad natural: < 1 %
- Material que pasa malla No. 200 (0.075 mm): < 2 %

Estas características son consistentes con los requisitos de la norma ASTM C33, asegurando que el agregado sea adecuado para su uso en mezclas de concreto de alto desempeño. Una densidad elevada y baja absorción son fundamentales para minimizar la variabilidad de la relación agua/material cementante y favorecer la homogeneidad de la mezcla.

En cuanto a la granulometría, la distribución de tamaños de partícula se controló estrictamente para cumplir con el límite máximo de 600 µm, recomendado en la bibliografía especializada para UHPC [9, 10]. La Tabla 2.3 muestra la distribución granulométrica típica del agregado empleado, determinada mediante análisis por tamices normalizados ASTM E11.

Tabla 6. Distribución granulométrica de agregados.

Tamiz (ASTM E11)	Abertura (mm)	% Retenido acumulado
No. 30	0.600	0
No. 40	0.425	10
No. 50	0.300	35
No. 100	0.150	80
No. 200	0.075	98
Fondo	<0.075	100

La selección de esta curva granulométrica busca maximizar el empaquetamiento de partículas, reducir el consumo de pasta y eliminar discontinuidades en la matriz, factores determinantes para lograr las altas resistencias a compresión y baja porosidad que caracterizan al UHPC.

El uso de arena caliza local, correctamente procesada y clasificada, permitirá evaluar su desempeño frente a lo reportado para arenas de sílice, aportando información valiosa para la implementación de esta tecnología en el contexto de la zona metropolitana de Monterrey.

La elección de una arena sin agregado grueso se justifica por la necesidad de optimizar el empaquetamiento y evitar zonas de transición interfacial (ITZ) débiles [15,28]. Sin embargo, se reconoce que la eliminación completa del agregado grueso puede incrementar los costos y la demanda de pasta, lo que plantea un compromiso entre desempeño mecánico y viabilidad económica aún sujeto a discusión en la literatura especializada.

La selección de agregados finos calizos, característicos de la región noreste de México, plantea interrogantes sobre su efecto en la distribución granulométrica y la densificación de la mezcla. Su caracterización detallada permite valorar si estos materiales pueden integrarse de forma eficiente en formulaciones UHPC

manteniendo los criterios de empaque óptimo y trabajabilidad sin comprometer el desempeño estructural.

2.1.3 Vidrio de borosilicato molido (filler alternativo)

El vidrio de borosilicato es un subproducto industrial generado principalmente durante la fabricación de utensilios de laboratorio, farmacéuticos y de cocina. En la mayoría de los casos, este material no es reciclado debido a los elevados costos energéticos y logísticos asociados a su reprocesamiento. Desde un punto de vista composicional, este vidrio presenta un contenido elevado de sílice (SiO_2), con valores cercanos al 80 %, además de un aporte significativo de óxido de boro (B_2O_3) y cantidades menores de álcalis y alúmina. La sílice presente se encuentra en forma amorfa, característica que favorece su reactividad puzolánica cuando el material es finamente molido e incorporado en matrices cementicias.

Diversas investigaciones han demostrado que el vidrio finamente pulverizado puede actuar como material cementante suplementario, reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y formando productos adicionales de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Este mecanismo contribuye a refinar la microestructura del concreto, reduciendo la porosidad y mejorando su durabilidad. Aunque la mayor parte de la literatura se enfoca en vidrio sódico-cálcico, el vidrio de borosilicato ofrece ventajas adicionales, como mayor estabilidad química y térmica, y un potencial similar de reactividad siempre que se alcance una finura superior a $380 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Estudios previos (Anguiano, 2015) han demostrado que los subproductos industriales de vidrio de borosilicato pueden utilizarse como sustitución parcial de la microsílice o del cemento en proporciones de 20–40 %, logrando mezclas con permeabilidad reducida y mayor durabilidad. Estas mejoras se atribuyen a la formación de geles C-S-H adicionales y a la presencia de sílice amorfa altamente reactiva, la cual participa activamente en las reacciones puzolánicas. Además, el

contenido de B_2O_3 contribuye a incrementar la estabilidad frente a posibles reacciones álcali-sílice, convirtiendo a este material en una opción viable y sostenible para la producción de UHPC.

La presencia de óxido de boro (B_2O_3) en la estructura del vidrio de borosilicato desempeña un papel clave en la mitigación de la reacción álcali-sílice (ASR) mejor conocida como álcali-agregado. Este óxido actúa como modificador de la red vítrea, al formar unidades BO_3 y BO_4 que alteran la disposición de la sílice y disminuyen su disponibilidad para reaccionar con los álcalis de la solución de poro [72,73].

Adicionalmente, el boro contribuye a inmovilizar cationes alcalinos (Na^+ , K^+), reduciendo su concentración libre y, por ende, la agresividad del medio [72]. Como consecuencia, los vidrios con alto contenido de B_2O_3 presentan menor solubilidad y liberan cantidades reducidas de sílice reactiva en comparación con vidrios sódico-cálcicos convencionales [74,75].

Incluso, estudios recientes han señalado que el boro puede modificar la composición del gel asociado a la ASR, generando productos menos expansivos y con menor capacidad de retención de agua [75]. Estos efectos explican la mayor estabilidad de los vidrios de borosilicato frente a fenómenos de expansión patológica en concreto, posicionándolos como materiales de refuerzo y sustitución con ventajas significativas en términos de durabilidad.

La Tabla 7 muestra la composición química típica de diferentes tipos de vidrio utilizados industrialmente. En particular, el vidrio de borosilicato destaca por su elevado contenido de sílice y boratos, lo que lo hace idóneo para ser utilizado como filler alternativo en mezclas de UHPC, permitiendo:

- Disminuir la demanda de cemento, reduciendo las emisiones de CO₂ asociadas a su producción.
- Sustituir parcial o totalmente la microsílíce, disminuyendo costos y dependencia de este subproducto industrial, que representa un costo importante en la producción de concretos de alta especialidad.
- Mejorar el empaquetamiento granular, favoreciendo la resistencia y durabilidad del material.

Tabla 7. Composición química de diversos tipos de vidrio.

Tipo de vidrio	Uso principal	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	B ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	CaO (%)	PbO (%)
Vidrio sódico	Envases	66–75	0.7–1.0	–	12–16	0.1–3.0	0.1–5.0	6–12	–
	Flotador (ventanas planas)	~73	–	13.5–15	0.2	3.6–3.8	8.7	8.9	–
	Bombillas	~73	1	–	17	4	5	–	–
Vidrio borosilicato	Aparatos químicos	~81	2	11–13	4–7	1	–	–	–
	Uso farmacéutico/técnico	72–75	2–6	7–13	4–7	1	–	–	–
Vidrio plomo	Tubos TV color	~54	–	2	–	–	–	4–9	23–29
	Tubos de neón	~63	1	–	8	6	–	–	~22
Vidrio sílex	Aplicaciones ópticas	~32	–	–	1	2	–	65	–

La sustitución parcial de microsílíce por vidrio de borosilicato, aunque ha mostrado resultados prometedores [31, 38–39], no ha sido ampliamente estandarizada en la industria. Algunos estudios [39] señalan variaciones significativas en la reactividad química del vidrio según su composición y método de molienda, lo que podría afectar la consistencia de los resultados. En este sentido, el presente trabajo busca aportar evidencia experimental específica para materiales de la región de Monterrey, donde el subproducto de vidrio disponible presenta características únicas que dificultan su reciclaje convencional.

2.1.4 Aditivo superplastificante (SP)

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) requiere bajas relaciones agua/material cementante (<0.20) y elevada trabajabilidad para asegurar una adecuada dispersión de partículas y correcta colocación del material. Para lograrlo, es indispensable el uso de aditivos superplastificantes de alto rango reductor de agua.

En esta investigación utilizamos el aditivo Flowcon, suministrado por la empresa Eucomex (una casa aditivadora nacional), un superplastificante de tercera generación a base de éter policarboxílico modificado. Este tipo de aditivo ha demostrado ser el más eficaz en matrices de UHPC debido a su triple mecanismo de acción:

- Dispersión electrostática, donde las moléculas del aditivo se adsorben en la superficie de las partículas de cemento, generando repulsión entre ellas y evitando la floculación.
- Efecto estérico, mediante el cual las largas cadenas laterales del polímero forman una barrera física que mantiene las partículas separadas y mejora la estabilidad de la suspensión [48–50].
- Además de su función principal como reductor de agua, los superplastificantes de policarboxilato pueden presentar efectos secundarios benéficos, como el retardo moderado en el fraguado y la mejora en la estabilidad de la mezcla, debido a la adsorción de sus cadenas sobre las partículas de cemento y la dispersión efectiva que reducen la segregación.

Este comportamiento permite alcanzar mezclas con alta fluidez y bajo contenido de agua sin sacrificar resistencia ni durabilidad [51,52]. En la literatura se reporta una dosificación típica de superplastificantes policarboxílicos en el rango de 0.5 % a 3 % en peso del material cementante, ajustada según la composición de la mezcla y el tipo de cemento [53,54].

En la presente investigación, el uso de Flowcon tiene como objetivos principales:

- Garantizar elevada fluidez y autocompatibilidad sin segregación, incluso en condiciones de baja relación agua/cemento.
- Mejorar la dispersión de partículas finas y la distribución de fibras en la mezcla.
- Favorecer el desarrollo de una matriz cementante densa, característica fundamental del UHPC.

El efecto del superplastificante Flowcon en la dispersión de partículas y el desarrollo reológico del UHPC ha sido bien documentado [51–54]; no obstante, la interacción química de los Policarboxilatos de Éter con las fases iniciales del cemento puede producir variaciones en el fraguado y en la distribución de fibras en estado fresco. Este aspecto ha sido poco abordado en investigaciones regionales, lo cual justifica la necesidad de evaluar experimentalmente el impacto de Flowcon en combinación con fillers no convencionales como el vidrio de borosilicato.

A pesar de que el aditivo Flowcon presenta buena compatibilidad con cementos Pórtland y se ha validado su efectividad en temas reológicos, la respuesta específica del sistema cemento-aditivo en presencia de materiales locales debe ser evaluada experimentalmente. Esto se debe a que la cinética de hidratación, la capacidad de dispersión y la retención de trabajabilidad pueden variar

significativamente en función de la finura de los polvos minerales y la temperatura ambiental, lo que refuerza la necesidad de una caracterización reológica contextualizada.

2.1.5 Agua

El agua es un componente esencial en la elaboración de concretos, ya que participa directamente en las reacciones de hidratación del cemento y contribuye a la trabajabilidad de la mezcla. La calidad y composición química del agua utilizada puede influir significativamente en el desarrollo de resistencias, la durabilidad y la estabilidad del concreto [55,56].

Para la producción de UHPC es fundamental emplear agua potable o de características equivalentes, libre de aceites, ácidos, materia orgánica y concentraciones elevadas de sales solubles, ya que la presencia de contaminantes puede alterar las reacciones de hidratación, incrementar el riesgo de corrosión en el refuerzo y afectar la dispersión de los aditivos superplastificantes [57,58].

La literatura reporta que el contenido de sólidos disueltos totales (TDS) en el agua debe ser inferior a 2000 mg/L y el pH debe encontrarse entre 6 y 8 para evitar efectos adversos en la resistencia y durabilidad del concreto [59,60]. Asimismo, el control estricto de la relación agua/material cementante (a/cm) es un factor clave en la formulación del UHPC, debido a que relaciones inferiores a 0.20 favorecen la obtención de matrices densas, reducen la porosidad y mejoran la resistencia a compresión y la durabilidad del material [61].

En esta investigación se utilizó agua potable suministrada por la red municipal de Monterrey (servicios de agua y drenaje de Monterrey), cumpliendo con los requisitos de calidad establecidos en las normas internacionales para la

elaboración de concretos estructurales. La dosificación de agua en cada mezcla fue determinada según la relación agua/material cementante prevista en el diseño de mezcla, considerando las características de los aditivos superplastificantes y la distribución granulométrica de los materiales finos.

2.1.6 Fibras

El uso de fibras en concretos de ultra-alto desempeño es fundamental para obtener un comportamiento cuasi-dúctil y mejorar su capacidad de absorción de energía tras la formación de fisuras. A diferencia del concreto convencional, el UHPC requiere una combinación de microfibras con elevada relación de aspecto, capaces de controlar la iniciación y propagación de microfisuras, mejorar la resistencia residual y evitar fracturas frágiles bajo esfuerzos de tracción y flexión [32,40,41].

La incorporación de fibras se realiza típicamente después de la dispersión del aditivo superplastificante, con el objetivo de asegurar una distribución tridimensional uniforme en la matriz cementicia y evitar la formación de grumos, o clusters. Su presencia influye directamente tanto en el estado fresco (trabajabilidad, exudación, control de contracción plástica, extensibilidad, índice de estabilidad visual, etc) como en el estado endurecido (resistencia post-fisuración, ductilidad, durabilidad y resistencia al impacto, compresión) [40,41,62].

En este estudio se emplearon fibras de vidrio AR, PVA, basalto, PP/PE y acero, seleccionadas por su comportamiento comprobado en mezclas de UHPC y su compatibilidad química con matrices de baja relación agua/cementante. La Tabla 8 resume sus propiedades principales y la función que cumplen en el concreto.

Tabla 8. Tipos de fibra y especificaciones.

Fibra	Material / Composición	Longitud (mm)	Diámetro (μm) / Relación aspecto	Resistencia tracción (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Recubrimiento / Tratamiento	Efecto típico en UHPC
Vidrio AR	Vidrio con alto contenido de ZrO_2	13–19	~18 μm / >700	~1700	~70	Resistente a medios alcalinos	Controla fisuración temprana, no corrosiva, aumenta tenacidad.
PVA (MasterFiber 400)	Alcohol polivinílico monofilamento	18	0.20 mm / ~90	750	7.1	Superficie con alta afinidad química	Genera micro fisuras finas, comportamiento dúctil, buena adherencia.
Basalto (Technobasalt)	Roca basáltica fundida	6–24	17–19 μm / >800	1100–1400	79–110	Sizing para mejorar adherencia	Mejora resistencia a flexión, fatiga y durabilidad térmica/química.
PP/PE (Tuf-Strand SF)	Polipropileno y polietileno	51	0.7 mm / ~74	600–650	9.5	Inerte, resistente a químicos	Refuerzo tridimensional, mejora impacto y fatiga, controla retracción.
Acero Dramix UHPC	Acero al carbono latonado	13–20	0.2–0.3 mm / >60	>2300	~200	Latonado para adherencia y anticorrosión	Elevada resistencia residual post-fisuración, alta capacidad de carga y ductilidad.

La revisión comparativa evidencia que, aunque las fibras de acero son referencia en la literatura, aún existe una limitada cantidad de estudios bajo normativa internacional y un contexto local que evalúen de manera directa fibras sintéticas y minerales en condiciones homogéneas. Esta investigación busca contribuir en ese vacío experimental.

2.2 Caracterización de los materiales

La caracterización de materiales es un paso fundamental en el desarrollo de concretos de ultra-alto desempeño (UHPC), ya que permite comprender las propiedades físicas, químicas y mecánicas de cada uno de los componentes que conforman la mezcla. Este análisis inicial proporciona las bases para diseñar proporciones optimizadas, garantizar la compatibilidad entre materiales y predecir el comportamiento del concreto tanto en estado fresco como endurecido [1,4,40,44].

La literatura especializada destaca que la microestructura densa y la elevada resistencia mecánica de los UHPC se logran mediante un control estricto de la composición química, distribución granulométrica, forma y superficie específica de los materiales cementicios y adiciones suplementarias [15,28,55]. Asimismo, la incorporación de fibras y aditivos superplastificantes en este tipo de mezclas requiere conocer sus propiedades físicas y reológicas para asegurar una adecuada dispersión y una interacción óptima con la matriz cementante [32,49,62].

La caracterización se realiza mediante técnicas experimentales con el apoyo de los equipos proporcionados por el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y confirmados por los datos proporcionados por fichas técnicas de los diversos proveedores, e incluye:

- Propiedades físicas: densidad, tamaño y distribución de partículas, finura, forma y textura superficial.
- Propiedades químicas: composición elemental mediante análisis de fluorescencia y difracción de rayos X, contenido de óxidos principales y alcalinidad.

- Propiedades mecánicas: resistencia a tracción y módulo de elasticidad de las fibras, así como desempeño de la pasta cementante.
- Propiedades reológicas y de hidratación: flujo de la mezcla, absorción de agua y efectos del superplastificante en la dispersión de partículas [5,43,54–57].

Este proceso de caracterización es esencial para validar la calidad de los materiales, establecer parámetros de diseño de la mezcla y correlacionar el comportamiento esperado con el observado durante los ensayos mecánicos y microestructurales de los concretos fabricados en esta investigación.

2.2.1 Cemento CPC 40

El cemento utilizado corresponde a un Cemento Portland Compuesto CPC 40 producido en la planta de Holcim Ramos Arizpe, con una resistencia mínima a compresión de 40 MPa a los 28 días, cumpliendo NMX-C-414-ONNCCE-2018 y ASTM C595/C595M-20 [46,47].



Fig. 1 Cemento CPC 40

Su composición mineralógica predominante incluye fases C_3S (50–60%), C_2S (15–25%), C_3A (5–8%) y C_4AF (5–10%), responsables del desarrollo progresivo de resistencia. Contiene 10–20% de adiciones minerales (puzolanas, filler calizo y escoria) que optimizan la durabilidad y reducen la huella de carbono. Como se vio en el detalle de la tabla 2.

Densidad del cemento

La determinación de la densidad del cemento se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C188, empleando un picnómetro de volumen calibrado. A diferencia de lo indicado en la norma, que recomienda el uso de queroseno como líquido de referencia, en este estudio se utilizó petróleo debido a su disponibilidad y a que presenta características similares de inercia química, sin reaccionar con las fases minerales presentes en el cemento, garantizando la precisión de la medición.

La densidad del cemento es un parámetro fundamental en el diseño de mezclas de UHPC, ya que permite convertir las proporciones de masa a volumen y calcular con mayor exactitud la relación agua/cementante y el empaquetamiento de partículas. Valores típicos para cementos Portland compuestos se encuentran entre 3.10 y 3.15 g/cm³, y cualquier desviación significativa puede indicar variaciones en la composición o presencia de adiciones minerales.



Fig. 2. Picnómetro de volumen conocido.

Distribución del tamaño de partícula (DTP)

La distribución del tamaño de partícula del cemento se determinó utilizando un analizador por difracción de rayo láser de la marca MICROTRAC, modelo S3500. Para la preparación de la muestra se empleó alcohol isopropílico con un grado de pureza del 99.5% como medio dispersante, asegurando la ausencia de reacciones con las fases químicas del material. Durante el proceso, la suspensión se sometió a ultrasonido por 15 segundos con el objetivo de romper posibles aglomeraciones y favorecer la dispersión homogénea de las partículas, garantizando así una medición más precisa de la distribución granulométrica.

El análisis por difracción láser es una técnica ampliamente utilizada en materiales cementicios, ya que permite determinar parámetros característicos como D10, D50 y D90, los cuales describen el porcentaje acumulado en volumen de partículas por debajo de un diámetro específico. Estos datos son esenciales para comprender el comportamiento de las partículas finas en la mezcla, optimizar el empaquetamiento granular y mejorar la trabajabilidad y densificación de los concretos de ultra-alto desempeño.



Fig. 3. Análisis de DTP en las instalaciones del laboratorio de materiales.

Área superficial específica (finura Blaine)

La determinación del área superficial específica del cemento se realizó mediante el método de permeabilidad al aire, siguiendo lo establecido en la norma ASTM C204. Para ello, se utilizó un aparato de Blaine, que permite estimar la finura del material a partir del tiempo requerido para que una cantidad determinada de aire pase a través de una cama compactada de partículas de cemento.

Previo a las mediciones, el equipo fue calibrado utilizando una muestra patrón certificada NIST Q 512, garantizando la trazabilidad y exactitud del procedimiento. La calibración y las pruebas se efectuaron en condiciones controladas de laboratorio, manteniendo temperatura y humedad estables para minimizar variaciones en los resultados.

El área superficial específica es un parámetro crítico en el diseño de mezclas de UHPC, ya que influye directamente en la velocidad de hidratación del cemento, la demanda de agua y la reología de la mezcla, afectando la trabajabilidad y la resistencia a edades tempranas.



Fig. 4. Determinación de área superficial específica por método ASTM C204.

Composición química (fluorescencia de rayos X)

La composición química del cemento se determinó mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), utilizando un espectrómetro de rayos X de dispersión de longitudes de onda (WDXRF). Este método permite cuantificar los principales óxidos presentes en el cemento, esenciales para comprender su comportamiento en la hidratación y la formación de productos cementantes.

Para el análisis, la muestra fue previamente secada y molida hasta alcanzar una finura menor a 75 μm , asegurando una superficie homogénea y representativa. Posteriormente, se prensaron pastillas de 4 cm de diámetro utilizando un aglutinante inerte y aplicando presión controlada, con el fin de obtener una superficie lisa adecuada para la excitación por rayos X.

Los resultados del análisis químico indicaron que el cemento CPC 40 utilizado en esta investigación presenta, en promedio, la siguiente composición en porcentaje en peso de óxidos principales:

- **CaO:** 60–65%
- **SiO₂:** 18–22%
- **Al₂O₃:** 4–6%
- **Fe₂O₃:** 2–5%
- **MgO:** $\leq 5\%$
- **SO₃:** $\leq 5\%$
- **Pérdida por ignición:** $\leq 5\%$

Estos valores son consistentes con la composición típica de cementos Portland compuestos producidos en la planta de Ramos Arizpe y coinciden con resultados reportados en estudios previos de Landaverde (2017) y Cabrera (2021) para cementos de características similares utilizados en mezclas de UHPC en la región [31,12].

La determinación de la composición química resulta fundamental para el diseño de mezclas de UHPC, ya que influye directamente en la reacción puzolánica de adiciones suplementarias, en la formación de geles C-S-H y en la durabilidad del material frente a agentes agresivos.

Reactividad potencial del cemento

El cemento Portland Compuesto CPC 40 utilizado en esta investigación presenta una composición mineralógica dominada por silicato tricálcico (C_3S , 50–60 %) y silicato dicálcico (C_2S , 15–25 %), complementada por fases menores de aluminato tricálcico (C_3A , 5–8 %) y ferrito tetracálcico (C_4AF , 5–10 %) [46, 47]. La reacción inicial del C_3S con el agua genera grandes cantidades de silicato cálcico hidratado (C-S-H) y hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), lo que contribuye al rápido desarrollo de resistencia a edades tempranas. Por otro lado, la hidratación más lenta del C_2S favorece la ganancia de resistencia a largo plazo y una matriz más densa, reduciendo la porosidad capilar del UHPC.

La presencia de adiciones minerales en el CPC 40 (10–20 %), como puzolanas y filler calizo, mejora el empaquetamiento granular y aporta sitios reactivos adicionales para la formación de geles C-S-H secundarios al reaccionar con el hidróxido de calcio liberado. Este proceso contribuye a una microestructura más refinada y estable, lo que se traduce en mayor resistencia, baja permeabilidad y durabilidad superior de las mezclas [46, 47].

El entendimiento de esta reactividad es esencial para el diseño del UHPC, ya que una parte significativa del agua disponible se consume en estas reacciones tempranas, condicionando la reología inicial de la mezcla y determinando la formación de productos de hidratación responsables de las propiedades mecánicas del material.

2.2.2. Caracterización física y química de los agregados locales

Los agregados finos utilizados en la fabricación del UHPC provienen de bancos de arena caliza de la zona norte del área metropolitana de Monterrey, los cuales son comúnmente empleados en la industria de prefabricados de la región. Antes de su utilización, el material fue sometido a procesos de lavado, secado y tamizado, con el objetivo de eliminar impurezas, partículas orgánicas y material pasante excesivo en la malla No. 200 ($<75\ \mu\text{m}$), garantizando una granulometría controlada.



Fig. 5. Agregados finos de caliza utilizados en el proyecto.

Densidad y absorción

La densidad aparente y la absorción de agua son parámetros fundamentales para evaluar la calidad de los agregados y su compatibilidad con mezclas de alto desempeño. Una densidad elevada contribuye al empaquetamiento óptimo de partículas, mientras que una absorción baja reduce variaciones en la relación agua/cementante, aspecto crítico en mezclas de UHPC [9].

Para este estudio, se determinó la densidad y absorción del agregado calizo siguiendo el procedimiento indicado en ASTM C128 – Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, empleando muestras previamente secadas a $110 \pm 5\ ^\circ\text{C}$ y sumergidas en agua hasta alcanzar saturación. Posteriormente, se midieron las masas en condición seca, saturada y sumergida, calculando los parámetros conforme a la normativa.

- **Densidad aparente:** 2.60 g/cm³
- **Absorción de agua:** 0.9%

Distribución granulométrica

La distribución del tamaño de partícula en los agregados finos influye directamente en la compacidad, la demanda de pasta y la formación de la zona de transición interfacial (ITZ) del concreto. En mezclas de UHPC, se recomienda limitar el tamaño máximo de las partículas a 600 µm, eliminando los agregados gruesos para reducir vacíos, mejorar el empaquetamiento y minimizar discontinuidades en la matriz cementicia [9, 10].

El análisis granulométrico se realizó conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM C136 y ASTM E11, utilizando una serie de tamices normalizados y aplicando el método de tamizado en seco, tras el lavado y secado previo del material. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9, donde se observa una distribución continua, libre de saltos granulométricos y adecuada para la elaboración de concretos de ultra-alto desempeño.

Tabla 9. Análisis granulométrico de agregados.

Tamiz (ASTM E11)	Apertura (mm)	% Retenido acumulado
No. 30	0.600	0
No. 40	0.425	10
No. 50	0.300	35
No. 100	0.150	80
No. 200	0.075	98
Fondo	<0.075	100

Contenido de finos y material pasante No. 200

La cantidad de material fino presente en los agregados tiene un impacto directo en la trabajabilidad, la demanda de agua y la calidad de la zona de transición interfacial (ITZ) del concreto. Un contenido excesivo de partículas menores a 75 μm puede incrementar la superficie específica a recubrir, elevar el consumo de pasta y afectar la cohesión de la mezcla, reduciendo potencialmente la resistencia mecánica y la durabilidad del UHPC [9].

Para esta investigación, el contenido de finos del agregado calizo fue determinado mediante el ensayo de lavado y tamizado conforme a ASTM C117 y ASTM C136, empleando la malla No. 200 (0.075 mm) como referencia. El procedimiento consistió en:

- Lavar una muestra representativa del agregado para eliminar partículas menores a 75 μm .
- Secar el material a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante.
- Pesarse la fracción fina retenida y calcular el porcentaje pasante con respecto a la masa total de la muestra.

El valor obtenido fue $< 2\%$ en peso de partículas pasantes la malla No. 200, cumpliendo con los límites especificados por ASTM C33 ($< 3\%$) para agregados finos destinados a concretos estructurales. Este resultado garantiza que la arena utilizada no contiene cantidades significativas de finos perjudiciales y que su uso no comprometerá la trabajabilidad ni la resistencia final del UHPC.

Forma y textura superficial de las partículas

Además de sus propiedades granulométricas y físicas, la morfología de las partículas del agregado calizo utilizado desempeña un papel importante en el comportamiento reológico y mecánico del UHPC. Mediante inspección visual y observaciones en lupa estereoscópica, se identificó que el material presenta

partículas de forma angular y textura rugosa, producto de los procesos de trituración empleados.

Esta característica favorece una buena adherencia pasta-agregado y mejora la resistencia a esfuerzos cortantes en la interfaz, aunque puede incrementar la fricción interna de la mezcla y la demanda de agua para alcanzar una consistencia adecuada [9, 10]. La utilización de un superplastificante de alto rango (Flowcon) permitió compensar este efecto, asegurando la fluidez requerida para el mezclado y moldeo de los especímenes sin afectar la relación agua/cementante de diseño.

2.2.3. Aditivo superplastificante Flowcon

El uso de aditivos superplastificantes es indispensable en mezclas de UHPC, ya que permiten alcanzar una elevada fluidez y trabajabilidad a relaciones agua/material cementante inferiores a 0.25, sin afectar el desarrollo de resistencias ni la durabilidad del material [51, 52]. En esta investigación se utilizó el aditivo Flowcon, un superplastificante de alto rango reductor de agua, perteneciente a la tercera generación de aditivos a base de éteres policarboxílicos modificados (PCE), clasificado como tipo F (alta reducción de agua) y tipo G (reductor de agua y retardante) según la norma ASTM C494/C494M [53].

La información técnica proporcionada por el fabricante indica las siguientes propiedades relevantes del producto reflejado en la tabla 10:

Tabla 10. información técnica del aditivo superplastificante Flowcon.

Propiedad	Valor típico
Clasificación ASTM	Tipo F / G
Base química	Éter policarboxílico modificado
Apariencia	Líquido ámbar a marrón claro
Densidad a 20 °C	1.07 – 1.10 g/cm ³
Contenido de sólidos	30 – 35 %
pH	6 – 8
Compatibilidad	Cementos Portland, adiciones puzolánicas y microsílíce

Mecanismo de acción y reacción química con el cemento

Los polímeros de base PCE actúan a través de dos mecanismos principales:

1. **Dispersión electrostática:** El polímero se adsorbe sobre la superficie de las partículas de cemento, cargándolas negativamente y generando fuerzas de repulsión que evitan su floculación.
2. **Efecto estérico:** Las largas cadenas laterales del PCE forman una barrera física que separa las partículas, mejorando la distribución de los finos y reduciendo la viscosidad plástica de la mezcla [51, 54].

Adicionalmente, el Flowcon interactúa químicamente con las fases del cemento:

- Los grupos carboxilato del PCE pueden completarse con iones Ca^{2+} liberados durante la hidratación inicial, lo que modifica la nucleación y crecimiento de los hidratos, aumentando la fluidez y retardando ligeramente la formación de etringita en los primeros minutos de reacción [55].

- Esta acción permite liberar agua atrapada en los flóculos iniciales, disminuyendo el esfuerzo de cedencia (τ_0) y facilitando el flujo del UHPC incluso a bajas relaciones a/cm.
- Una dosificación adecuada evita la sobre adsorción que podría retardar excesivamente el fraguado, asegurando un equilibrio entre trabajabilidad prolongada y desarrollo temprano de resistencia.

El uso de Flowcon, en conjunto con la alta finura de los materiales constituyentes, asegura una mezcla homogénea, libre de segregación, y con comportamiento auto-compactable, condición necesaria para lograr la alta densidad y las propiedades mecánicas características del UHPC [51–55].

2.2.4. Preparación del polvo de vidrio de borosilicato

El vidrio de borosilicato utilizado en esta investigación proviene de desperdicios industriales generados durante la fabricación de utensilios de laboratorio y farmacéuticos, caracterizados por un elevado contenido de sílice amorfa y presencia de óxido de boro.



Fig. 6. Vidrio de borosilicato a la intemperie, en instalaciones de una vidriera local.

Para su uso como filler alternativo en mezclas de UHPC, el material fue sometido a un proceso de limpieza, molienda y pulverización, siguiendo procedimientos previamente descritos en la literatura [9, 14] para optimizar su reactividad puzolánica y compatibilidad granulométrica.

El proceso consistió en las siguientes etapas:

1. **Limpieza:** Eliminación de impurezas superficiales y residuos orgánicos mediante lavado con agua potable y secado en horno a temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, evitando contaminantes que puedan interferir en la hidratación del cemento.

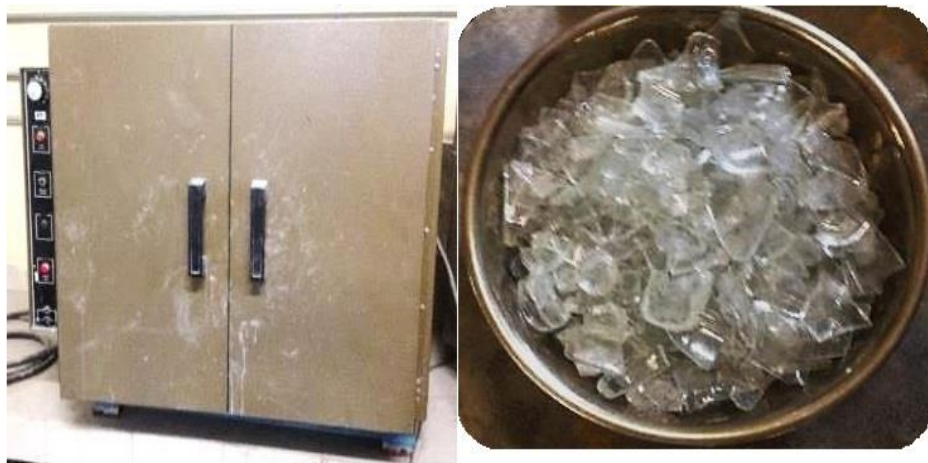


Fig. 7. Horno para el secado de material y vidrio tras la limpieza superficial.

2. **Molienda primaria:** Trituración mecánica del vidrio hasta obtener fracciones menores a 5 cm, facilitando su posterior reducción de tamaño.



Fig. 8. Trituradora de quijadas y primera molienda de vidrio.

3. **Molienda secundaria:** Posterior a la primera trituración del material, se continuo con una segunda trituración en un molino de quijadas con un tamaño reducido hasta de máximo 10 mm y una capacidad de producción de 8 kg por minuto.



Fig. 9. Trituradora de quijadas para molienda secundaria.

4. **Pulverización:** La pulverización se llevó a cabo en una maquina con disco giratorio para arena con una capacidad de molienda de 4 kg/minuto, buscando un tamaño máximo de partícula de alrededor de 0.6 mm.



Fig. 10. Pulverizadora y polvo de vidrio de borosilicato posterior a la molienda.

5. **Pulverización y tamizado:** El material molido se sometió a molienda fina y posterior tamizado por malla No. 200 (0.075 mm), asegurando que el polvo final presentara un tamaño máximo inferior a $75\ \mu\text{m}$, condición necesaria para favorecer la reacción puzolánica y el correcto empaquetamiento granular en la matriz del UHPC. De igual manera, para asegurarnos que no existirá ningún tipo de reacción alkali-agregado con este filler en la matriz cementicia.

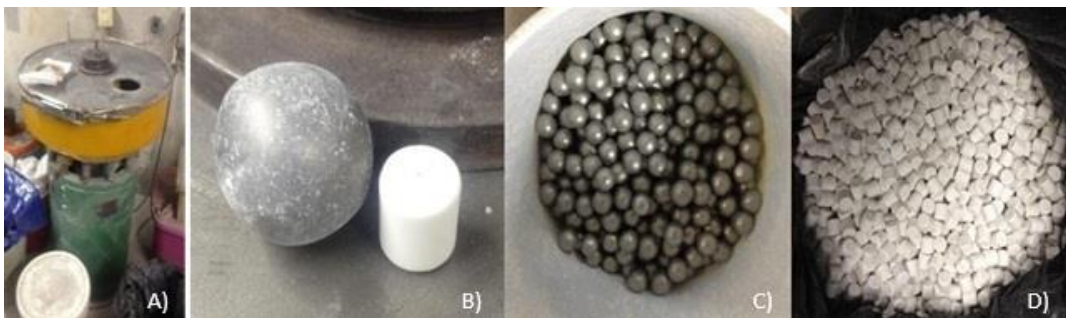


Fig. 11 A) molino de vibro energía, B) Bolas metálicas y cilindros de alúmina, C) bolas metálicas, D) cilindros de alúmina.

La finura obtenida fue comparable a la de la microsílíce comercial reportada en estudios previos [9, 14], garantizando que el material funcione como filler reactivo por el alto contenido de sílice amorfa y no reactivo con los álcalis presentes en los geles C-S-H del concreto, contribuyendo a la reducción de porosidad y a la mejora de la resistencia y durabilidad de las mezclas.



Fig. 12. Malla No. 325

Composición química del vidrio de borosilicato

El análisis químico del polvo de vidrio de borosilicato utilizado en esta investigación se realizó mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), siguiendo el procedimiento descrito en estudios previos [14]. Los resultados obtenidos son consistentes con valores reportados en la literatura para este tipo de vidrio, caracterizado por un alto contenido de sílice amorfa y presencia significativa de óxido de boro, que favorece su reactividad puzolánica al interactuar con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento.

Tabla 11. Composición química del polvo de vidrio de borosilicato.

Componente	Contenido típico (% en peso)
SiO₂	72 – 81
B₂O₃	7 – 13
Na₂O	4 – 7
K₂O	0.5 – 1.5
Al₂O₃	2 – 6
CaO	≤ 2
MgO	≤ 1
Fe₂O₃	≤ 0.5
Pérdida por ignición (LOI)	≤ 1

El elevado contenido de SiO₂ en forma amorfa (> 70 %) permite que este material actúe como fuente secundaria de sílice reactiva, favoreciendo la formación adicional de geles C-S-H en la matriz cementicia. La presencia de B₂O₃ contribuye a la estabilidad química, reduciendo la probabilidad de reacciones álcali-sílice perjudiciales [71-74]. Estos resultados confirman la viabilidad del polvo de vidrio de borosilicato como sustituto parcial de microsílice en formulaciones de UHPC, manteniendo una granulometría fina (<75 µm) y un aporte significativo a la densificación de la matriz.

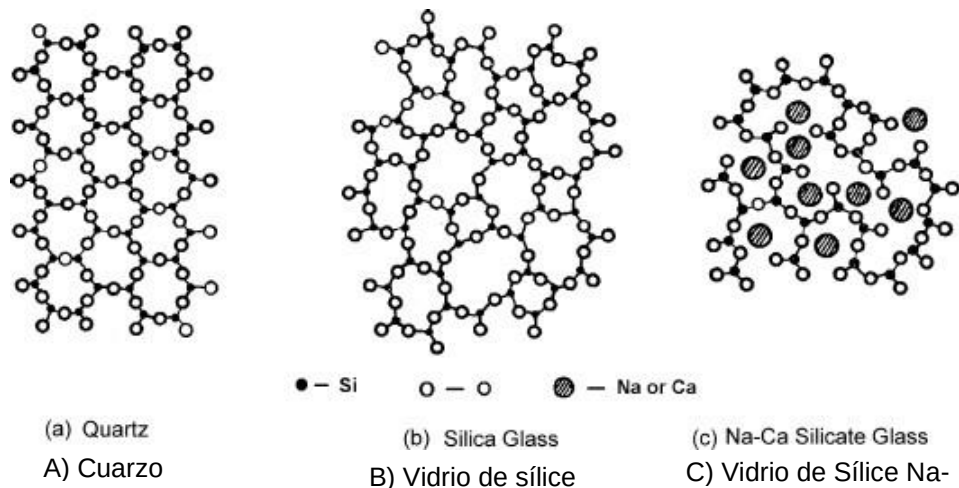


Fig. 13. Representación esquemática de un vidrio diversas matrices de vidrio.

Consideraciones de sostenibilidad y aprovechamiento del vidrio de borosilicato

El polvo de vidrio de borosilicato empleado en esta investigación proviene de un subproducto industrial generado en la zona metropolitana de Monterrey, principalmente durante la fabricación y descarte de utensilios de laboratorio y farmacéuticos. Este material, a pesar de ser químicamente estable y no peligroso, presenta dificultades para su reciclaje convencional, ya que la presencia de óxido de boro (B_2O_3) le confiere una alta estabilidad térmica y química, lo que impide que sea reprocesado junto con otros vidrios comunes como los sódico-cálcicos, al tener temperaturas de fusión y comportamiento viscoso distintos [65]. Debido a estas limitaciones, gran parte del vidrio de borosilicato se acumula como residuo industrial, siendo usualmente destinado a vertederos.

La incorporación de este material como filler alternativo en mezclas de UHPC representa una estrategia doblemente beneficiosa:

- Aprovechamiento de un residuo local, disminuyendo su disposición en rellenos sanitarios.

- Reducción parcial del consumo de microsílice o cemento Portland, disminuyendo la huella de carbono asociada a la producción del concreto de ultra-alto desempeño [9, 14, 65].

Esta aproximación contribuye a la economía circular en la industria de la construcción y fomenta prácticas más sostenibles, alineadas con los objetivos de reducir emisiones de CO₂ y reutilizar subproductos industriales de la región.

2.2.4. Fibras para el refuerzo del UHPC

La incorporación de fibras en mezclas de concreto de ultra-alto desempeño es una estrategia fundamental para mejorar su comportamiento mecánico, en especial en la fase post-fisuración, donde el concreto convencional presenta una brusca pérdida de capacidad de carga tras la formación de micro fisuras y grietas [61–63]. Los concretos de ultra alto desempeño, debido a su alta finura y elevada concentración de materiales cementantes finos, combinado con la ausencia de agregado grueso y una baja relación agua/cementante, puede alcanzar resistencias a compresión superiores a 150 MPa; sin embargo, el material mantiene una naturaleza frágil bajo esfuerzos de tracción y flexión si no se adiciona algún tipo de refuerzo, como lo son las microfibras [62].

El uso de fibras permite desarrollar un mecanismo de puenteo de fisuras, donde cada filamento intercepta y transfiere esfuerzos de tracción a través de la grieta, retrasando su apertura y promoviendo un comportamiento cuasi-dúctil [61, 64]. Este efecto incrementa la tenacidad, capacidad de absorción de energía y deformación última del material, cualidades esenciales para aplicaciones estructurales de alto desempeño, tales como elementos prefabricados, puentes y zonas sometidas a cargas de impacto [61, 65].

El Manual Técnico de UHPC de la Federal Highway Administration (FHWA-HRT-21-118) [61] y el Código ACI 239R-18 – Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report [62] establecen que el uso de fibras es un requisito básico para clasificar un concreto como UHPC, recomendando contenidos volumétricos entre 1.5 % y 3 % para garantizar resistencia residual a la tracción y comportamiento de endurecimiento por deformación (strain hardening). La selección del tipo, longitud, módulo elástico, matriz y relación de aspecto de las fibras influye directamente en la respuesta mecánica de las vigas sometidas a ensayos de flexión según ASTM C1609, determinando su tenacidad (T150, T300) y la forma de la curva carga-deflexión [63–65].

Efecto de las fibras en la reología del UHPC

La adición de fibras modifica el comportamiento reológico de las mezclas debido a la fricción interna y a las interacciones mecánicas entre los filamentos y las partículas de la matriz, lo que incrementa la viscosidad plástica y, en algunos casos, el esfuerzo de cedencia [53, 61]. Este efecto se acentúa cuando aumenta la longitud, la geometría, la relación de aspecto o el contenido volumétrico de fibras, pudiendo dificultar la fluidez bajo su propio peso de la mezcla si no se ajusta adecuadamente la dosificación del superplastificante.

Las fibras sintéticas (PP/PE, PVA) presentan buena dispersión y bajo peso, lo que facilita su distribución uniforme con un impacto moderado en la reología. En contraste, las fibras metálicas y minerales (acero, basalto) son más rígidas y densas, pudiendo generar una mayor demanda de aditivo y energía de mezclado para evitar la formación de grumos o clúster y asegurar una orientación aleatoria a lo largo de todo el elemento [53, 61].

Estudios reportados por la FHWA-HRT-21-118 [61] y Graybeal (2006) [64] destacan que la optimización de la reología en UHPC con fibras requiere un balance entre contenido de fibras, granulometría de la matriz y dosificación del

aditivo superplastificante, manteniendo la fluidez necesaria para el moldeo sin comprometer la correcta dispersión y orientación de las fibras.

En esta investigación se evaluaron cinco tipos de fibras con propiedades y mecanismos de refuerzo diferenciados: vidrio AR, PVA, PP/PE, basalto y acero, cada una incorporada de forma individual en el UHPC. La Tabla 12 resume las principales propiedades físicas y mecánicas de estas fibras, mientras que en las subsecciones siguientes se analiza el aporte particular de cada una en el desempeño del UHPC.

Tabla 12. Tipos de fibras y propiedades físicas.

Tipo de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (μm)	Relación de aspecto (L/D)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Densidad (g/cm³)	Tratamiento superficial
Vidrio AR*	12 – 18	14 – 20	600 – 900	1,000 – 1,700	70 – 80	2.70	Recubrimiento de circonio para resistencia alcalina
PVA	8 – 12	35 – 40	200 – 300	1,200 – 1,600	40 – 45	1.30	Recubrimiento para mejorar adherencia a la matriz
PP/PE**	19 – 40	500 – 800	40 – 60	400 – 700	5 – 12	0.91	Superficie embozada para anclaje mecánico
Basalto	12 – 24	13 – 20	600 – 1,200	1,500 – 3,000	85 – 90	2.70	Recubrimiento silánico
Acero	13 – 30	200 – 400	50 – 100	2,000 – 2,800	190 – 210	7.80	Latonado, extremo recto o con gancho para mejor anclaje

*Fibra de vidrio AR (Alkali Resistant)**Polipropileno/polietileno

Las fibras de vidrio resistentes a los álcalis (AR) son ampliamente utilizadas en matrices cementicias por su buena adherencia y resistencia química. En esta investigación, se emplearon fibras de vidrio AR con una longitud nominal de 13–19 mm y diámetro de 14–20 μm , cuyas propiedades físicas y mecánicas son las reportadas por el fabricante en ficha técnica [66]. Estas fibras poseen un recubrimiento de óxido de zirconio que mejora su durabilidad en ambientes alcalinos y una resistencia a tracción declarada en el rango de 1000–1700 MPa, con módulo elástico aproximado de 70–80 GPa y densidad de 2.7 g/cm³ [66].

Si bien estos valores representan las características nominales de diseño, estudios previos [25, 61] destacan que el desempeño real en mezclas UHPC puede verse afectado por factores como la orientación aleatoria de las fibras, la calidad del mezclado y la interacción química con la matriz. Por lo tanto, la caracterización experimental mediante ensayos de flexión resulta necesaria para evaluar su eficacia bajo las condiciones específicas de este trabajo.

Su incorporación en mezclas UHPC permite mejorar la respuesta bajo flexión gracias a su alta resistencia a tracción (1,700 MPa) y módulo elástico elevado, proporcionando un refuerzo tridimensional capaz de interceptar microfisuras y retrasar su propagación [61, 62]. Según la FHWA-HRT-21-118 [61], el refuerzo con fibras de vidrio en UHPC contribuye a:

- Incrementar la resistencia post-fisuración y la capacidad de absorción de energía.
- Reducir el ancho de fisura y controlar el patrón de agrietamiento.
- Mejorar la durabilidad frente a agentes agresivos, al limitar la permeabilidad inducida por grietas.

No obstante, estudios y experiencias previas han identificado algunas limitaciones respecto a otras fibras metálicas:

- La adherencia química y mecánica puede ser menor que la del acero, lo que reduce la contribución en etapas de apertura de grieta elevada [62, 64].
- Su naturaleza frágil las hace susceptibles a perder eficacia en condiciones de carga repetitiva o impacto, dependiendo del volumen y distribución en la matriz.

Durante los ensayos de vigas según ASTM C1609, la inclusión de vidrio AR contribuye a mejorar la tenacidad T150 y T300, aunque generalmente con una respuesta más moderada que la alcanzada con fibras de acero, especialmente en tramos de deformación posterior a la carga máxima [64, 65]. Aun así, estas fibras representan una opción viable y libre de corrosión para aplicaciones donde la durabilidad química y estética son prioritarias.

Fibra sintética de alcohol polivinílico (PVA)

La fibra PVA (MasterFiber 400) utilizada en este estudio es un filamento sintético hidrofílico diseñado para mejorar la adherencia con matrices cementicias. Según datos del proveedor [67], estas fibras presentan una longitud nominal de 18 mm, diámetro de 200 μm , resistencia a tracción de 750 MPa, módulo elástico de 7.1 GPa y densidad de 1.3 g/cm³. Su superficie modificada favorece el anclaje mecánico y la capacidad de puenteo a nivel de microfisuras en el UHPC.

No obstante, como señalan Li et al. [49] y otros autores [25, 61], el comportamiento real de estas fibras en términos de energía absorbida y resistencia residual depende fuertemente de la distribución espacial alcanzada en el mezclado, el volumen incorporado y la interacción con aditivos superplastificantes. Por ello, aunque las propiedades nominales proporcionadas por el fabricante [67] sirven de

referencia, es necesario validar su contribución real al comportamiento post-fisuración mediante ensayos normalizados.

A diferencia de otras fibras sintéticas como PP/PE, las fibras PVA muestran una interacción física y química más fuerte con la pasta de cemento, lo que mejora la capacidad de transferencia de esfuerzos en el rango de apertura de microfisuras.

Según la FHWA-HRT-21-118 [61] y el ACI 239R-18 [62], este tipo de fibra:

- Controla la formación y propagación temprana de fisuras, gracias a su elevado número de filamentos por volumen y buena adherencia superficial.
- Aporta tenacidad y pseudo-ductilidad, aunque su módulo inferior al acero limita la capacidad de soporte post-fisuración en deformaciones grandes.
- Reduce la permeabilidad inducida por fisuración, mejorando la durabilidad del UHPC frente a agentes agresivos.

Los ensayos de flexión en vigas según ASTM C1609 muestran que las fibras de PVA contribuyen significativamente a aumentar la carga de primera fisura y la resistencia residual a pequeñas deflexiones (T150), favoreciendo una respuesta más estable en la fase elástica y cuasi-plástica [64, 65]. Sin embargo, la menor rigidez comparada con las fibras de acero implica una capacidad de carga post primer pico inferior, especialmente en tramos de apertura de grieta avanzada, (posterior a los 2-3 mm) lo que debe considerarse al diseñar el volumen y longitud de estas fibras para elementos estructurales.

En conjunto, las fibras de PVA representan una opción ligera, no corrosiva y de fácil dispersión, útil para mejorar la respuesta a tracción y controlar fisuración en elementos esbeltos de UHPC, especialmente donde se requiera una superficie

estéticamente superior, libre de óxido y un buen desempeño en ambientes alcalinos [67].

Fibra sintética PP/PE (Tuf-Strand SF)

La fibra Tuf-Strand SF, fabricada a partir de filamentos de polipropileno y polietileno, se utiliza como alternativa al refuerzo metálico en concretos y morteros de alto y ultra-alto desempeño, aportando un refuerzo tridimensional distribuido en toda la matriz [63]. Su composición polimérica le otorga resistencia química, estabilidad en ambientes agresivos y ausencia de corrosión, características relevantes para elementos estructurales expuestos a condiciones extremas.

A diferencia de las fibras de acero, la fibra PP/PE presenta un módulo de elasticidad inferior, por lo que su acción principal se centra en la etapa temprana de fisuración, ayudando a restringir deformaciones, reducir la formación de microfisuras y controlar la apertura inicial de grietas [61, 62]. Esta función resulta particularmente útil para mejorar la resistencia a la fisuración plástica y prevenir fallas frágiles en mezclas con baja relación agua/cementante, como el UHPC.

Los ensayos de vigas realizados a flexión en vigas, han demostrado que la incorporación de PP/PE incrementa la resistencia residual a pequeñas deflexiones (T150), ofreciendo una respuesta más dúctil y estable que el concreto sin fibras [64, 65]. Sin embargo, debido a su menor rigidez y resistencia al desprendimiento en aperturas de grieta mayores, su capacidad para sostener cargas elevadas en la fase post-pico es limitada en comparación con fibras de acero o basalto.

Por lo que, las fibras PP/PE son una solución adecuada para aplicaciones donde se busca refuerzo no metálico, resistencia a la corrosión y control temprano de fisuración, contribuyendo a mejorar la durabilidad y estabilidad inicial del UHPC, refuerzo ampliamente considerado al tener elementos que podrían estar expuestos a contracciones por secado en etapas tempranas [63].

Fibra mineral de basalto

Las fibras de basalto utilizadas en esta investigación son filamentos minerales obtenidos a partir de roca volcánica fundida y estirada en monofilamentos extruidos [69]. Su composición inorgánica les confiere alta resistencia a tracción, buen módulo elástico y elevada estabilidad química y térmica, lo que las convierte en un refuerzo atractivo para matrices cementicias de ultra-alto desempeño.

En los concretos de ultra alto desempeño, estas fibras actúan interceptando y transfiriendo esfuerzos a través de las microfisuras, mecanismo similar a lo presentado con los otros ejemplos de fibras, retrasando la formación de macrofisuras y mejorando la tenacidad y capacidad de absorción de energía del material [61, 62]. La superficie tratada con recubrimiento silánico mejora su adherencia mecánica y química con la matriz cementicia, permitiendo una distribución más homogénea y un comportamiento estable frente a cargas de flexión.

Las fibras de basalto empleadas en la presente investigación fueron suministradas con un recubrimiento superficial a base de silanos. Este tratamiento se utiliza comúnmente para mejorar la compatibilidad entre la superficie de la fibra —rica en sílice por su naturaleza vítrea— y la matriz cementicia. Los agentes silánicos actúan como “puentes de unión”: por un lado, reaccionan químicamente con los grupos silanol presentes en la fibra formando enlaces Si–O–Si estables, y por el otro, sus grupos funcionales interactúan con los productos de hidratación del cemento. Como resultado, se favorece la adherencia mecánica y química en la interfase pasta–fibra, lo que se traduce en una transferencia de esfuerzos más eficiente y en un comportamiento más estable de las mezclas reforzadas bajo cargas de flexión.

Ensayos han mostrado que las fibras de basalto contribuyen a incrementar tanto la resistencia residual inicial (T150) como la correspondiente a deflexiones mayores (T300), ofreciendo una respuesta más rígida y resistente en la fase post-pico que otras fibras no metálicas [64, 65]. No obstante, algunos estudios [33, 34] señalan la necesidad de evaluar a largo plazo su durabilidad en medios altamente alcalinos, ya que pueden presentar cierta degradación superficial en ambientes agresivos.

Por su origen natural, bajo impacto ambiental y compatibilidad térmica con la matriz de concreto, las fibras de basalto representan una alternativa sostenible para mejorar el desempeño del UHPC, especialmente en aplicaciones donde se busca una alta durabilidad y resistencia química sin recurrir a fibras metálicas [69].

Fibra metálica de acero

Las fibras de acero son el refuerzo más utilizado en matrices de UHPC debido a su elevado módulo elástico (≈ 200 GPa) y alta resistencia a tracción (> 2000 MPa), que permiten un comportamiento post-fisuración superior frente a otras fibras sintéticas o minerales [61, 62]. En esta investigación se emplearon fibras tipo Dramix, de forma recta, con la superficie recubierta con latón para mejorar la resistencia a la corrosión y optimizar la adherencia mecánica con la pasta cementicia.

Estas fibras cuentan con certificaciones conforme a ASTM A820 y cumplen con las recomendaciones de la norma ASTM C1116 para refuerzo de concretos [61, 65]. El refuerzo metálico genera un mecanismo de puenteo eficaz en todas las etapas de apertura de fisuras, proporcionando una transferencia de esfuerzos continua incluso en deformaciones elevadas [61]. La combinación de alta rigidez y resistencia al arrancamiento por fricción y anclaje mecánico permite mantener capacidad de carga en la fase post-pico, alcanzando un comportamiento cuasi-dúctil más pronunciado que con fibras no metálicas.

Los resultados a flexión demuestran que la adición de fibras de acero incrementa significativamente la resistencia residual (T150, T300) y la energía absorbida hasta grandes deflexiones, ofreciendo la mayor capacidad de absorción de energía y control de fisuración entre las fibras analizadas [64, 65]. Según la FHWA-HRT-21-118 [42] y el ACI 239R-18 [44], el uso de fibras metálicas es un requisito clave para desarrollar el comportamiento de endurecimiento por deformación (*strain hardening*) característico del UHPC estructural.

Si bien estas fibras aportan las mejores prestaciones mecánicas, presentan dos posibles limitaciones:

1. Costo y peso propio más elevados que fibras sintéticas.
2. Susceptibilidad a la corrosión en ambientes muy agresivos si el recubrimiento protector se ve comprometido con el tiempo.

No obstante, su uso sigue siendo la solución más eficaz para obtener un desempeño mecánico óptimo en elementos estructurales de UHPC, especialmente en vigas y componentes donde la tenacidad y resistencia post-fisuración son prioritarias [61–65].

Discusión comparativa y justificación de uso

La incorporación de fibras en concretos de alta especialidad, resulta fundamental para transformar su comportamiento frágil intrínseco en una respuesta cuasi-dúctil capaz de sostener cargas después de la fisuración. Sin embargo, la efectividad de este refuerzo depende en gran medida del tipo de fibra, sus propiedades mecánicas y su interacción con la matriz cementicia.

En general, las fibras de acero presentan el mejor desempeño en términos de resistencia residual y capacidad de absorción de energía en deformaciones

elevadas, debido a su alto módulo elástico y resistencia a tracción [61–65]. Son el estándar de referencia en aplicaciones estructurales de UHPC, especialmente en elementos sometidos a flexión.

Las fibras de basalto ofrecen un comportamiento similar al acero en términos de puenteo de fisuras, aunque con menor rigidez y resistencia a largo plazo en ambientes alcalinos severos [33, 34, 69]. Pueden considerarse una alternativa sostenible y no corrosiva para ciertas aplicaciones.

Las fibras de vidrio AR destacan por su buena adherencia superficial y resistencia química, pero muestran una contribución limitada en la fase post-pico, debido a su naturaleza frágil y menor capacidad de anclaje [61, 62, 67].

Las fibras de PVA son efectivas para controlar microfisuración temprana, aportando estabilidad en las primeras etapas de carga y mejorando la durabilidad frente a agentes externos, aunque su menor módulo elástico reduce la resistencia residual en deformaciones grandes [61, 62, 67].

Finalmente, las fibras PP/PE (Tuf-Strand SF) ofrecen ventajas de durabilidad y bajo peso, con excelente dispersión y resistencia química, pero su baja rigidez limita su desempeño en flexión frente a fibras metálicas [63].

El uso de diferentes tipos de fibras en esta investigación permitió analizar y comparar su influencia en la respuesta a flexión del UHPC, evaluando la capacidad de puenteo, la energía absorbida y la resistencia residual (T150, T300) bajo ensayos de vigas conforme a ASTM C1609. Estos resultados sirven como base para determinar la idoneidad de cada fibra según los requerimientos estructurales, de durabilidad y de sostenibilidad en aplicaciones futuras de UHPC.

Aunque la literatura coincide en que las fibras metálicas son las más eficaces para maximizar la resistencia post-fisuración [61–65], su uso no siempre es viable por

costos o problemas de corrosión. Fibras sintéticas, minerales y de vidrio ofrecen alternativas sostenibles y no corrosivas, pero con un desempeño mecánico inferior en etapas post-pico. Este trabajo busca cuantificar esas diferencias bajo condiciones controladas, aportando criterios de selección aplicables al contexto local.

2.3 Diseño y preparación de mezclas

2.3.1 Antecedentes en diseño de mezclas UHPC

El concreto de ultra alto desempeño es una clase avanzada de material cementante caracterizado por una microestructura extremadamente densa, alto contenido de agregados finos, ausencia de agregado grueso y una trabajabilidad controlada mediante el uso de aditivos reductores de agua de última generación.

Desde su desarrollo inicial por Richard y Cheyrezy en el año 1995, el UHPC ha sido diseñado bajo principios de optimización granulométrica y reología, priorizando una matriz continua y homogénea que favorezca tanto la resistencia como la durabilidad del concreto.

En términos generales, las mezclas UHPC presentan las siguientes características comunes:

- Alto contenido de materiales cementantes: frecuentemente superiores a 800 kg/m^3 .
- Relación agua/cementante (a/cm) muy baja, típicamente entre 0.14 y 0.25.
- Ausencia de agregado grueso, lo que permite minimizar zonas de transición débil y mejorar la densificación.

- Uso de fillers puzolánicos o inertes (como humo de sílice, cuarzo molido o vidrio reciclado), con el objetivo de mejorar el empaquetamiento de partículas y activar reacciones secundarias.
- Aditivos químicos de alto desempeño, como superplastificantes bases policarboxilato y modificadores de viscosidad, para controlar la fluidez sin generar segregación o exudación.
- Incorporación de fibras, usualmente en volúmenes entre 1% y 2.5%, para proporcionar resistencia post-fisuración y comportamiento cuasi-ductil.

Estudios como los de Habel et al. [12], Yang et al. [13], Corinaldesi [14], entre otros, han propuesto mezclas UHPC con diferentes configuraciones de materiales, logrando resistencias a compresión mayores a 150 MPa y capacidades de absorción de energía significativas al introducir fibras metálicas o sintéticas. En estos estudios, se observa una tendencia común a utilizar materiales finamente molidos (como humo de sílice o cuarzo micronizado) y aditivos químicos sofisticados para lograr mezclas estables y cohesivas.

A pesar de la efectividad de estos componentes tradicionales, algunos trabajos recientes han demostrado que es posible obtener prestaciones mecánicas comparables utilizando materiales alternativos, de mayor disponibilidad regional, y a un costo reducido considerando el uso de polvo de vidrio reciclado en lugar del humo de sílice. Investigaciones como las de Toledo et al. [20] y Yuliarti [19] han explorado la incorporación de vidrio molido como filler, evidenciando una buena compatibilidad con matrices UHPC, tanto en términos reológicos como mecánicos.

Tomando como referencia este marco teórico y experimental, el presente trabajo propone un diseño de mezcla UHPC utilizando cemento Portland CPC 40,

agregado calizo local y polvo de vidrio reciclado, incorporando distintas fibras al 2% en volumen total para evaluar su efecto en el comportamiento postfisuración.

Este enfoque permite aprovechar materiales disponibles localmente, reducir costos y estudiar configuraciones potencialmente más sostenibles sin comprometer el desempeño estructural.

En la Tabla 2.10 se presenta una comparación de distintas mezclas UHPC reportadas en la literatura, incluyendo sus proporciones características, tipo de filler utilizado, contenido de fibras y resistencias obtenidas. Esta recopilación permite identificar tendencias comunes en el diseño de este tipo de materiales, así como contrastar enfoques distintos en cuanto a la selección de materiales cementantes, aditivos y fibras de refuerzo.

Dicha información sirvió como base de referencia para el diseño experimental de esta investigación, particularmente en la elección de la relación agua/cementante, el volumen de fibras y el uso de polvo de vidrio como filler alternativo.

Tabla 13. Proporciona miento de un UHPC con base en la literatura y el estado del arte.

Autor	Cemento (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Relación a/cm	Tipo de filler	Tipo de fibra	Volumen fibra (%)	f'c (MPa)	fflex (MPa)
Habel [12]	1050	–	730	0.14	–	Acero	6.0	160	11
Yang [13]	657	Humo de sílice (119)	1050	0.15	Humo de sílice	Acero	2.0	170	7
Corinaldesi [14]	960	–	960	0.16	–	Acero	2.5	155	10
Hassan [15]	657	Humo de sílice (119)	1051	0.17	Humo de sílice	Acero	2.0	150	7

Aldahdooh [16]	360	Humo (214) + otros	1057	0.18	Humo de sílice + fillers	Acero	2.0	158	14
Maca [17]	800	Filler (200)	976	0.17	Cuarzo	Acero	2.0	152	10
Yu [18]	875	Filler (219)	1055	0.19	Cuarzo	Acero	2.5	156	11
Yuliarti [19]	795	Polvo vidrio (192)	1169	0.20	Polvo de vidrio	Acero	2.0	166	7
Toledo [20]	1011	Polvo vidrio (58)	883	0.19	Polvo de vidrio	Acero	2.0	156	10

En conjunto, los estudios revisados permiten identificar una serie de patrones comunes en el diseño de mezclas UHPC: altos contenidos de cemento, uso de fillers finos como humo de sílice o polvo de vidrio, relaciones a/mc muy reducidas y la incorporación de fibras para mejorar el comportamiento postfisuración.

La recopilación presentada en la Tabla 13 evidencia que, si bien existe una base conceptual compartida, también hay un amplio margen para la adaptación local de los componentes, particularmente en lo que respecta a los fillers y tipos de fibra utilizados. Este análisis sirvió como sustento para definir una mezcla base con materiales regionales y explorar el efecto individual de diferentes tipos de fibras en el marco de esta investigación.

2.3.2 Diseño experimental de mezclas

Con base en los antecedentes revisados y en los objetivos establecidos para esta investigación, se diseñó un conjunto de mezclas UHPC con una base común en cuanto a proporciones de materiales cementantes, agregados y relación agua/material cementante. El enfoque experimental buscó aislar el efecto del tipo de fibra de refuerzo, manteniendo constante su volumen de incorporación, con el

fin de realizar comparaciones directas sobre el comportamiento postfisuración bajo carga flexora.

Todas las mezclas fueron formuladas con materiales de disponibilidad regional en Monterrey, incluyendo cemento CPC 40, polvo de vidrio reciclado como filler y agregado fino calizo triturado, con tamaño máximo menor a 600 μm . La relación agua/cementante (a/cm) se fijó en 0.25, un valor típico en mezclas UHPC, adecuado para asegurar alta densidad y resistencia, sin comprometer la trabajabilidad.

Se empleó exclusivamente Flowcon, un superplastificante base policarboxilato, a una dosificación del 1.8% respecto al peso de cemento. Este aditivo fue seleccionado por su capacidad para proporcionar la fluidez, la cohesión necesarias sin la necesidad de un modificador de viscosidad adicional y un tiempo de mezclado que no se ve comprometido por el alto contenido de cemento y la baja relación a/mc.

Para el análisis comparativo, se consideraron cinco tipos de fibra, todas incorporadas a una dosificación fija de 2% en volumen de mezcla:

- Acero: por su rigidez, anclaje mecánico y alta resistencia a tracción.
- PVA (alcohol polivinílico): por su afinidad con la matriz y su capacidad de puenteo de fisuras.
- Basalto: como opción mineral no metálica con buena resistencia y comportamiento térmico.
- Vidrio AR: con resistencia química en medio alcalino y bajo costo.

- PP/PE (mezcla polimérica): fibra comercial producida por Eucomex, con propiedades tenaces y buena dispersión.

Las proporciones detalladas de cada una de las mezclas diseñadas para esta investigación se presentan en la Tabla 14. Todas las mezclas comparten la misma matriz base, variando únicamente el tipo de fibra incorporado. Esto permite realizar comparaciones directas bajo condiciones controladas, con una metodología que elimina el efecto de variables adicionales sobre la respuesta postfisuración.

Tabla 14. Proporcionamiento utilizado en el presente trabajo.

Mezcla	Cemento	Polvo de vidrio	Agregado fino (caliza)	Agua	a/cm	Flowcon (%)	Acero	PVA	Basalto	Vidrio	PP/PE
Ref	476	365	700	211	0.25	1.8	–	–	–	–	–
Acero	476	365	700	211	0.25	1.8	2%	–	–	–	–
PVA	476	365	700	211	0.25	1.8	–	2%	–	–	–
Basalto	476	365	700	211	0.25	1.8	–	–	2%	–	–
Vidrio	476	365	700	211	0.25	1.8	–	–	–	2%	–
PP/PE	476	365	700	211	0.25	1.8	–	–	–	–	2%

El diseño experimental propuesto permite evaluar de forma sistemática el impacto del tipo de fibra sobre el comportamiento de mezclas UHPC formuladas con materiales locales y accesibles. Al mantener constante la matriz y las condiciones de dosificación, se garantiza que las diferencias observadas en el desempeño mecánico puedan atribuirse con mayor precisión a las propiedades individuales de cada tipo de refuerzo. Esta estrategia no solo aporta rigor al análisis comparativo, sino que también permite generar lineamientos útiles para la selección de fibras en futuras aplicaciones de UHPC en el contexto regional.

2.3.3 Procedimiento de mezclado

El procedimiento de mezclado adoptado en esta investigación se desarrolló a partir de recomendaciones técnicas para mezclas de alta especificación y de la experiencia práctica con materiales de alta finura, baja relación agua/material cementante y refuerzo con fibras. Se utilizó una mezcladora de eje horizontal de 20 litros, adecuada para mantener la cohesión en mezclas de elevada densidad.

Todas las mezclas se elaboraron siguiendo un protocolo estandarizado con el objetivo de garantizar la repetibilidad y facilitar la comparación entre variantes. El proceso consistió en las siguientes etapas:

1. Mezcla en seco (1 minuto):

Se incorporaron en la mezcladora el cemento CPC 40, el polvo de vidrio reciclado y el agregado fino calizo. Esta etapa permitió pre homogeneizar los componentes sólidos y asegurar una distribución uniforme.



Fig. 14. Mezcladora de eje horizontal.

2. Incorporación del 80 % del agua con Flowcon (2 minutos):

De forma previa, se preparó una solución con el 80 % del agua total de la mezcla y el superplastificante Flowcon, dosificado al 1.8 % respecto al peso del cemento. Esta solución se añadió gradualmente mientras la mezcladora permanecía en funcionamiento, permitiendo que la mezcla desarrollara una consistencia fluida y cohesiva.

3. Adición de fibras (2–3 minutos):

Una vez alcanzada la trabajabilidad deseada, se introdujeron las fibras de refuerzo correspondientes al diseño, de manera progresiva y con la mezcladora en operación. Las fibras se añadieron "en lluvia", para evitar la formación de clústeres o nidos, especialmente en mezclas con fibras sintéticas o poliméricas. Esta etapa fue crítica para asegurar una dispersión homogénea en la matriz.

4. Incorporación del 20 % restante de agua (1 minuto):

Con todos los componentes ya integrados, se añadió el 20 % restante del agua de mezcla. Esta adición final permitió ajustar la fluidez y mejorar la integración de las fibras dentro de la mezcla.

5. Mezclado final (1 minuto):

Se continuó con un mezclado final para asegurar la homogeneidad total de la mezcla. En este punto, se verificó visualmente la cohesión, trabajabilidad y ausencia de aglomeraciones.

El tiempo total de mezclado fue de aproximadamente 8 minutos por lote. Este procedimiento permitió obtener mezclas con comportamiento reológico estable, sin presencia de exudación ni apelmazamiento visible de fibras, lo cual confirma que la estrategia de dosificación y secuencia de mezclado fue adecuada para las condiciones de laboratorio.

A continuación, se presenta un esquema que resume la secuencia de mezclado seguida para todas las mezclas de esta investigación. El procedimiento fue cuidadosamente diseñado para garantizar una integración homogénea de los componentes, evitar la formación de clústeres de fibras y conservar la trabajabilidad adecuada del material, incluso con una relación agua/material cementante baja y alto contenido de refuerzo. La Figura 15 ilustra cada etapa clave del proceso.

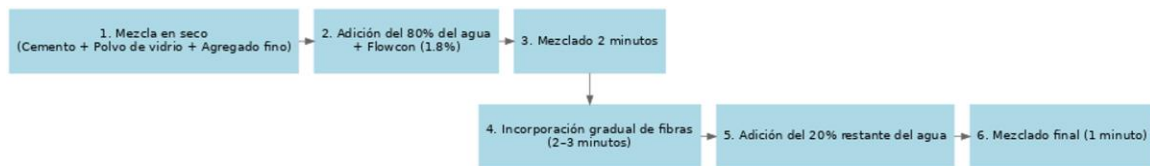


Fig. 15. Diagrama de mezclado.

La secuencia de mezclado descrita demostró ser efectiva para lograr una distribución homogénea de los componentes, en especial de las fibras, sin evidencias de aglomeraciones ni pérdida significativa de trabajabilidad. La estrategia de fraccionar la adición del agua, así como el control durante la incorporación de fibras, permitió reducir la formación de clústeres y mantener la cohesión de la mezcla, incluso con altos volúmenes de refuerzo. Esta metodología garantizó condiciones reproducibles para el desarrollo experimental y estableció una base sólida para la evaluación del desempeño mecánico de las distintas mezclas en los ensayos posteriores.

2.3.4 Justificación del diseño experimental

El diseño experimental adoptado en esta investigación se sustenta en la decisión de mantener una base de mezcla constante, modificando únicamente el tipo de refuerzo fibroso incorporado. Esta estrategia responde al interés de aislar y analizar el efecto específico de distintos tipos de fibras sobre el comportamiento postfisuración del UHPC, sin que otros factores, tales como variaciones en la proporción de agua, cemento o aditivos influyan en los resultados. De esta forma, se garantiza una comparación directa entre mezclas, en condiciones controladas y con alta confiabilidad.

En lugar de diseñar mezclas completamente distintas para cada tipo de fibra, se optó por utilizar una misma matriz de referencia, cuidadosamente optimizada en términos de empacamiento granular, relación agua/material cementante, y aditivos de alto rendimiento. Esto permite que cualquier diferencia observada en el comportamiento mecánico o la respuesta postfisuración pueda ser atribuida con mayor certeza a las características propias del refuerzo: forma, módulo de elasticidad, resistencia a tracción, longitud efectiva o adherencia con la matriz.

El enfoque adoptado posee un alto valor experimental, ya que posibilita la evaluación comparativa del desempeño de todas las en condiciones estandarizadas, aunado a que permite generar un cuerpo de datos con potencial para alimentar modelos predictivos o calibrar herramientas de simulación digitales en el futuro, contribuyendo a una comprensión más profunda del papel de las fibras en la tenacidad, ductilidad y control de fisuración del UHPC.

Desde una perspectiva práctica, el diseño también considera aspectos de aplicabilidad regional y sostenibilidad. Se emplearon materiales disponibles localmente, como agregados finos calizos y polvo de vidrio reciclado, lo cual reduce los costos logísticos y la huella de carbono de las mezclas. Esta combinación entre criterios científicos y de ingeniería aplicada busca no solo

entender el comportamiento del material, sino también evaluar su viabilidad para ser producido y utilizado en contextos reales de construcción en la región.

Con base en el diseño experimental previamente descrito, se estableció una metodología de ensayo orientada a evaluar de forma rigurosa el desempeño mecánico de cada mezcla, con énfasis en el comportamiento postfisuración bajo flexión. A continuación, se presentan los procedimientos normalizados utilizados, así como las condiciones específicas de preparación, curado y prueba de las muestras.

2.4 Métodos de ensayo

2.4.1 Ensayos en estado fresco

La caracterización en estado fresco es esencial en el diseño de mezclas UHPC debido a su baja relación agua/cementante, alto contenido de finos y presencia de fibras, lo cual genera comportamientos reológicos complejos. En este estudio se realizaron ensayos tanto cuantitativos como cualitativos para evaluar la trabajabilidad, cohesión, homogeneidad y potencial de segregación de las mezclas. A continuación, se describen los métodos aplicados y su relevancia experimental.

2.4.1.1 Peso unitario (ASTM C138 adaptado)

La determinación del peso unitario se realizó siguiendo el procedimiento de ASTM C138, adaptado para mezclas autocompactables. La muestra se colocó por vertido directo en el recipiente, sin varillado, y se niveló utilizando una mesa de vibrado de baja frecuencia. Esto evitó la perturbación del sistema fibroso y conservó las propiedades reológicas originales. Este parámetro se utilizó como control indirecto de homogeneidad y como referencia para el seguimiento de

consistencia entre lotes. Su determinación bajo condiciones controladas respalda la repetibilidad del proceso de mezclado.

2.4.1.2 Observación cualitativa de extensibilidad y cohesión

Durante el vaciado se evaluaron visualmente la extensibilidad, la cohesión y la distribución aparente de fibras. Se anotaron signos de separación de fases, exudación o aglomeraciones fibrosas, particularmente en los primeros segundos tras el vertido. Estas observaciones permitieron detectar posibles problemas de segregación o apelmazamiento (formación de nidos o clúster) de fibras, ajustando tiempos de mezclado o secuencias de incorporación según fuera necesario. Si bien subjetiva y visual, esta evaluación aportó información clave sobre el desempeño en obra del UHPC.

2.4.1.3 Contenido de aire (ASTM C231 adaptado)

Se empleó el método de presión tipo B, adaptado a mezclas de alta densidad como el UHPC. La medición permitió verificar que el contenido de aire se mantuviera dentro de los valores esperados (<2%), confirmando la buena integración de la mezcla durante el procedimiento de mezclado. La baja porosidad observada está alineada con la densificación propia del UHPC y es indicativa de su potencial durabilidad. Este ensayo funcionó como herramienta de control de calidad sobre la integridad volumétrica del sistema.



Fig. 16. Equipo para determinar contenido de aire en la mezcla de acuerdo con ASTM C231.

2.4.1.4 Caracterización reológica: esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica

Se empleó un reómetro de concreto con sistema rotacional de cilindros concéntricos para determinar el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica, de acuerdo con el modelo de Bingham. Este modelo asume una relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$), expresada como:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$

Eq.1. Modelo reológico de Bingham

Donde:

- τ = esfuerzo cortante
- τ_0 = esfuerzo de cedencia
- μ_p = viscosidad plástica
- $\dot{\gamma}$ = velocidad de corte

El esfuerzo de cedencia indica la energía mínima necesaria para iniciar el flujo de una mezcla, mientras que la viscosidad plástica refleja la resistencia interna al movimiento una vez que el material ha comenzado a fluir. Ambos parámetros son esenciales para garantizar que la mezcla sea lo suficientemente fluida para su colocación, sin comprometer la estabilidad del sistema ni la distribución homogénea de las fibras metálicas y poliméricas.

El análisis reológico mediante el modelo de Bingham permitió cuantificar de manera objetiva la respuesta plástica de cada mezcla y anticipar su comportamiento durante el proceso de colado, proporcionando criterios adicionales más allá de las observaciones empíricas.

2.4.1.5 Ensayo de fluidez (ASTM C1437 modificado)

Se utilizó la mesa de flujo para morteros como referencia empírica, con un cono truncado estándar y sin compactación. El flujo se midió en dos direcciones perpendiculares y se calculó el promedio. Aunque este método no está estandarizado para UHPC, es ampliamente empleado en investigaciones como indicador práctico de fluidez. El flujo obtenido permitió una validación rápida de la consistencia visual de cada mezcla y sirvió como criterio de aceptación previo al moldeo de especímenes. Su simplicidad lo convierte en una herramienta útil complementaria al análisis reológico.



Fig. 17. Mesa de Fluidez, con mezcla de control sin fibras.

En conjunto, los ensayos en estado fresco proporcionaron una caracterización integral del comportamiento de las mezclas antes de su endurecimiento. La combinación de pruebas reológicas, empíricas y observacionales permitió validar la viabilidad de moldeo, la homogeneidad del refuerzo y la estabilidad del sistema. Esta etapa fue fundamental para asegurar condiciones controladas en los ensayos mecánicos posteriores.

2.4.2 Ensayos en estado endurecido

El comportamiento mecánico del UHPC fue evaluado a través de ensayos estandarizados que permitieron caracterizar su desempeño estructural, tanto en compresión como en flexión. Estos ensayos son esenciales para cuantificar la influencia de los diferentes tipos de fibras en la resistencia y ductilidad del material, así como para validar la viabilidad del diseño de mezcla propuesto. A continuación, se describen los procedimientos aplicados para cada tipo de prueba.

2.4.2.1 Resistencia a compresión (cubos de 50 mm)

La resistencia a compresión se determinó mediante ensayos sobre cubos de $50 \times 50 \times 50$ mm, curados en agua a temperatura controlada ($\sim 23^\circ\text{C}$) a diversas edades (3,7,14,28,56,90). El ensayo se llevó a cabo en una prensa hidráulica, con una velocidad de carga constante hasta alcanzar la falla. Se reportó el valor promedio de la carga máxima dividida entre el área del plano de carga del cubo.



Fig. 18. Preparación de especímenes de 50 mm.

La elección de cubos en lugar de cilindros responde a la facilidad de moldeo y a la práctica común en estudios de UHPC donde se busca minimizar efectos por esbeltez o alineación. Los resultados obtenidos permiten verificar que las mezclas alcanzaron el umbral mínimo para ser clasificadas como UHPC (>120 MPa) y se utilizaron además como base para normalizar los parámetros de comportamiento en flexión.

2.4.2.2 Resistencia a flexión y tenacidad (ASTM C1609)

La evaluación del comportamiento postfisuración se realizó conforme a la norma ASTM C1609, mediante el ensayo de flexión con carga en tres puntos. Las probetas utilizadas fueron vigas prismáticas de $100 \times 100 \times 400$ mm, moldeadas a partir de cada mezcla.

La carga se aplicó en control de desplazamiento (0.05 mm/min), registrándose en todo momento la curva carga-desplazamiento. A partir de esta curva se obtuvieron los siguientes parámetros clave:

- Resistencia a la primera fisura
- Carga máxima alcanzada durante el ensayo
- Carga residual a distintas deflexiones
- Tenacidad específica a deflexiones de 150 y 300 μm (T150 y T300)

La tenacidad se calculó como el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta dichas deflexiones, expresada en unidades de energía por unidad de volumen ($\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$ o equivalentes). Este parámetro es crítico para evaluar la capacidad del material para absorber energía después de la fisuración y es altamente dependiente del tipo, forma, volumen y orientación de las fibras.



Fig. 19. Viga montada para ensayo a flexión de acuerdo a criterios de ASTM C1609.

El análisis de tenacidad permite ir más allá de la resistencia a flexión convencional, capturando la contribución real del refuerzo fibroso al comportamiento dúctil del UHPC. Su inclusión como métrica principal en este estudio permite establecer comparaciones claras y objetivas entre los diferentes tipos de fibras empleados.

Los ensayos en estado endurecido proporcionaron los datos fundamentales para evaluar la viabilidad estructural de las mezclas desarrolladas. La combinación de resistencia a compresión y análisis de flexión con parámetros de tenacidad permitió identificar no solo la capacidad portante del UHPC, sino también su eficiencia para disipar energía y resistir la propagación de fisuras, cualidades esenciales en materiales de alto desempeño reforzados con fibras y que nos sirven para determinar la viabilidad del uso de este tipo de concretos como elementos estructurales.

2.4.3 Curado de especímenes

El curado de los especímenes fue diseñado para maximizar el desarrollo microestructural del UHPC, considerando tanto el bajo contenido de agua como la presencia de adiciones minerales con potencial puzolánico, como el vidrio molido. Este filler reactivo requiere un suministro continuo de humedad para favorecer las reacciones secundarias de hidratación, principalmente la formación de productos cementantes adicionales por reacción con la cal libre presente en la matriz [70]. Estos procesos han sido ampliamente documentados como mecanismos clave para mejorar la densificación de la pasta y el desarrollo de propiedades mecánicas a edades medias y tardías [70].

Todos los especímenes fueron desmoldados a las 24 horas posteriores de haberse colado y posteriormente curados por inmersión en agua a temperatura controlada de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta condición se mantuvo hasta el momento de cada uno de los ensayos mecánicos programados.

Para caracterizar la evolución de propiedades a lo largo del tiempo, las pruebas de compresión se realizaron a diferentes edades: 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días. Esta estrategia permitió evaluar tanto el desarrollo temprano de resistencia como la influencia del vidrio molido en la formación continua de productos de hidratación secundarios, asociados al desarrollo de resistencia a edades prolongadas.

La metodología adoptada asegura que las diferencias observadas en el desempeño de cada mezcla puedan atribuirse de manera confiable a los parámetros de diseño (tipo de fibra, contenido de vidrio, etc.), eliminando las posibles interferencias derivadas de condiciones de curado inconsistentes.

2.4.4 Análisis estadístico

Con el objetivo de garantizar la validez de los resultados obtenidos y permitir una comparación rigurosa entre las distintas mezclas, se realizó un tratamiento estadístico básico sobre los datos experimentales. Para cada propiedad medida tanto en estado fresco como endurecido, se calcularon la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV%), a fin de evaluar la dispersión de los datos y la repetibilidad de los ensayos.

Este análisis permitió identificar posibles valores atípicos y validar la estabilidad de las respuestas obtenidas, especialmente en ensayos sensibles como la flexión con fibras (ASTM C1609), donde la variabilidad inherente a la distribución y orientación de las fibras puede afectar significativamente los resultados. La implementación de estos métodos estadísticos no solo proporciona confiabilidad a los resultados reportados, sino que también fortalece las conclusiones del estudio al reducir el sesgo experimental.

2.4.5 Criterios de comparación

Para evaluar el efecto del tipo de fibra sobre el desempeño del UHPC, se definieron una serie de criterios comparativos que permitieran valorar de forma integral tanto las propiedades en estado fresco como las mecánicas. Estos criterios fueron seleccionados con base en los lineamientos establecidos en la literatura técnica para concretos de ultra alto desempeño, así como en la aplicabilidad práctica de los resultados.

En estado fresco, los parámetros clave considerados fueron el peso unitario, la extensibilidad, el contenido de aire y las propiedades reológicas (esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica), ya que estos inciden directamente en la trabajabilidad, calidad del mezclado y facilidad de colocación.

En estado endurecido, se dio especial énfasis a la resistencia a compresión y flexión, así como a los índices de tenacidad derivados del ensayo de flexión con fibras, como T150, T300 y el área bajo la curva carga-deflexión, que ofrecen una medida directa de la capacidad del material para absorber energía y resistir fisuración progresiva.

Estos criterios permiten establecer una base comparativa sólida entre las mezclas, facilitando el análisis y la discusión en el capítulo 3 y permitiendo extraer conclusiones sobre el impacto de cada tipo de refuerzo en el comportamiento global del UHPC.

Finalmente, se aplicaron herramientas estadísticas y se definieron criterios de comparación que aseguran la validez de los resultados y su adecuada interpretación. Este enfoque permite no solo comprender el efecto aislado de cada tipo de refuerzo, sino también generar información técnicamente útil para la aplicación de este tipo de concretos en el contexto local.

Capítulo 3 – Resultados y Discusión

3.1.1 Peso unitario

El peso unitario en estado fresco se evaluó como parámetro de control de calidad y homogeneidad de las mezclas, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C138/C138M-17a *“Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete”*. Este método, de carácter gravimétrico, es el estándar de referencia para determinar con precisión la densidad de mezclas base cemento, y resulta aplicable a concretos de alta densidad como el UHPC, siempre que se empleen recipientes calibrados y procedimientos de llenado y compactación consistentes.

La determinación del peso unitario en este estudio no solo permitió verificar la concordancia de los resultados con los rangos reportados en la literatura para UHPC (2200–2500 kg/m³, ACI 239R-18; FHWA-HRT-21-093), sino también identificar variaciones atribuibles a la incorporación de fibras de distinta naturaleza y densidad específica. Valores estables entre réplicas son indicativos de un proceso de mezclado homogéneo, ausencia de segregación y correcta integración fibra/matriz.

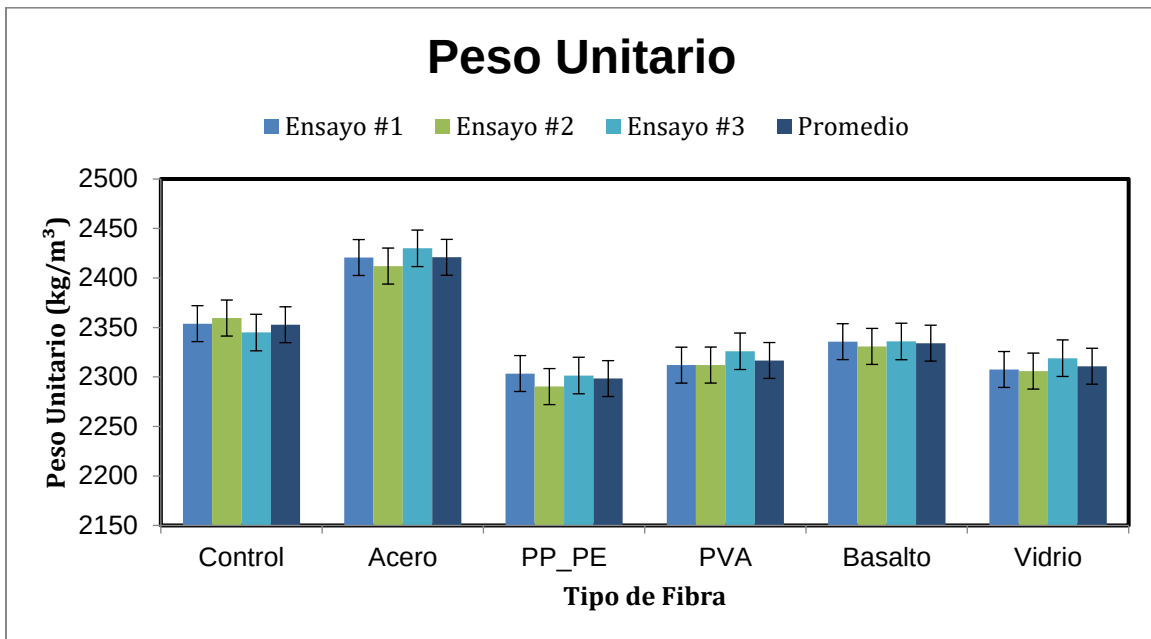


Fig. 20. Grafica de peso unitario por mezcla y promedios.

En la Figura 20 se presentan los resultados de los tres ensayos por mezcla, junto con el promedio y barras de error correspondientes a la desviación estándar (σ).

La Tabla 15 resume los valores promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV %) calculados:

Tabla 15. Peso unitario de mezclas con DS y CV.

Mezcla	Peso unitario promedio (kg/m ³)	Desviación estándar (DS)	Coeficiente de variación (CV, %)
Control	2350.70	14.00	0.60
Acero	2409.00	23.00	0.95
PP/PE	2296.30	5.70	0.25
PVA	2318.30	12.20	0.53
Basalto	2340.00	11.30	0.48
Vidrio	2305.00	10.40	0.45

Los resultados obtenidos en la determinación del peso unitario muestran valores promedio en el rango de 2296 a 2409 kg/m³, con una variación asociada baja en la mayoría de los casos. La desviación estándar se mantuvo en niveles reducidos (entre 5.7 y 23.0), lo que indica una buena homogeneidad en el procedimiento de mezclado y colocación de las mezclas.

El coeficiente de variación fue menor al 1% en todas las mezclas, por lo que los resultados pueden considerarse altamente confiables y reproducibles. Cabe señalar que la mezcla con fibras de acero presentó la mayor dispersión relativa (CV = 0.95%), lo cual puede relacionarse con la mayor densidad y rigidez de estas fibras, que tienden a generar ligeras variaciones en la distribución volumétrica dentro de la matriz.

En contraste, la mezcla con fibras PP/PE mostró la menor dispersión (CV = 0.25%), lo que sugiere una mejor distribución durante el mezclado debido a su menor peso específico y geometría más flexible. Estos valores concuerdan con lo reportado en estudios previos de mezclas UHPC reforzadas con fibras poliméricas

y metálicas, donde se señala que coeficientes de variación menores al 2% son indicativos de un buen control experimental en el estado fresco.

En términos generales, los valores de peso unitario obtenidos se encuentran dentro del rango típico reportado para concretos de ultra-alto desempeño (2300–2450 kg/m³), lo cual confirma la adecuada compactación de las mezclas y la pertinencia del diseño granulométrico empleado. Estudios previos (Landaverde, 2017; Cabrera, 2021) coinciden en que la incorporación de fibras no modifica de manera significativa el peso unitario, aunque en el caso de fibras metálicas se ha observado una ligera tendencia al incremento, tanto en la literatura como en la ejecución de este proyecto.

Estos resultados validan que las mezclas diseñadas mantienen una densidad acorde a lo esperado en sistemas UHPC y que la variabilidad experimental se encuentra en niveles controlados, por lo que el comportamiento posterior en estado endurecido puede atribuirse de manera confiable a las propiedades intrínsecas de las fibras más que a irregularidades en el mezclado.

3.1.2 Extensibilidad (Spread flow)

La trabajabilidad del UHPC en estado fresco se evaluó mediante el ensayo de extensibilidad (slump flow), siguiendo el procedimiento adaptado de la ASTM C230/C230M-14 “Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement” y de la ASTM C1437-20 “Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar”. Dado que el UHPC de este estudio no incorpora agregado grueso y presenta alta concentración de finos, se adoptó el método de la mesa de flujo para morteros, ajustando la altura inicial del cono y la secuencia de golpes según lo recomendado en ACI 239R-18 para mezclas autocompactables de alta densidad.

El parámetro registrado fue el diámetro final de la mezcla tras 25 golpes de mesa, expresado en milímetros (mm). En mezclas UHPC, valores de slump flow superiores a 200 mm suelen indicar un comportamiento autocompactable adecuado, mientras que reducciones notables pueden anticipar dificultades de colocación y riesgo de segregación o un llenado uniforme del encofrado si no se aplica compactación mecánica.



Fig. 21 Mesa de extensibilidad con mezcla de control, al momento de ejecución del ensayo.

La mezcla de control alcanzó un promedio de 253.03 mm, confirmando una alta fluidez y auto compactabilidad alcanza los límites de la mesa. La incorporación de fibras de acero redujo drásticamente la extensibilidad a 199.7 mm, situándose justo por debajo del umbral de 200 mm. Este efecto es coherente con lo reportado por Abbas et al. (2020) y Yuan et al. (2020), quienes señalan que fibras metálicas de alta densidad y longitud >10 mm tienden a incrementar el esfuerzo de cedencia y dificultar el flujo libre, especialmente a volúmenes del 2 % o mayores.

Las fibras PP/PE y basalto presentaron valores intermedios de 235.30 mm y 227.26 mm, respectivamente, lo que sugiere que, aunque afectan la trabajabilidad, mantienen la mezcla dentro del rango considerado aceptable para UHPC autocompactable. Las fibras PVA mostraron un promedio de 208.82 mm, confirmando una disminución significativa respecto al control, atribuible a su

interacción superficial con la matriz y al aumento en la viscosidad plástica. Por último, las fibras de vidrio alcanzaron 231.53 mm, un valor próximo al de PP/PE, lo que indica que, pese a su densidad mayor ($\sim 2.6 \text{ g/cm}^3$), su geometría y superficie lisa permiten una dispersión que no obstaculiza significativamente el flujo.

La Figura 22 presenta la comparación del diámetro de flujo para cada tipo de mezcla, incluyendo los resultados individuales de las tres réplicas, el promedio y las barras de error. La gráfica permite visualizar el efecto pronunciado de la fibra de acero y, en menor medida, de las fibras minerales y sintéticas, en la reducción de la extensibilidad comparada a la mezcla de control.

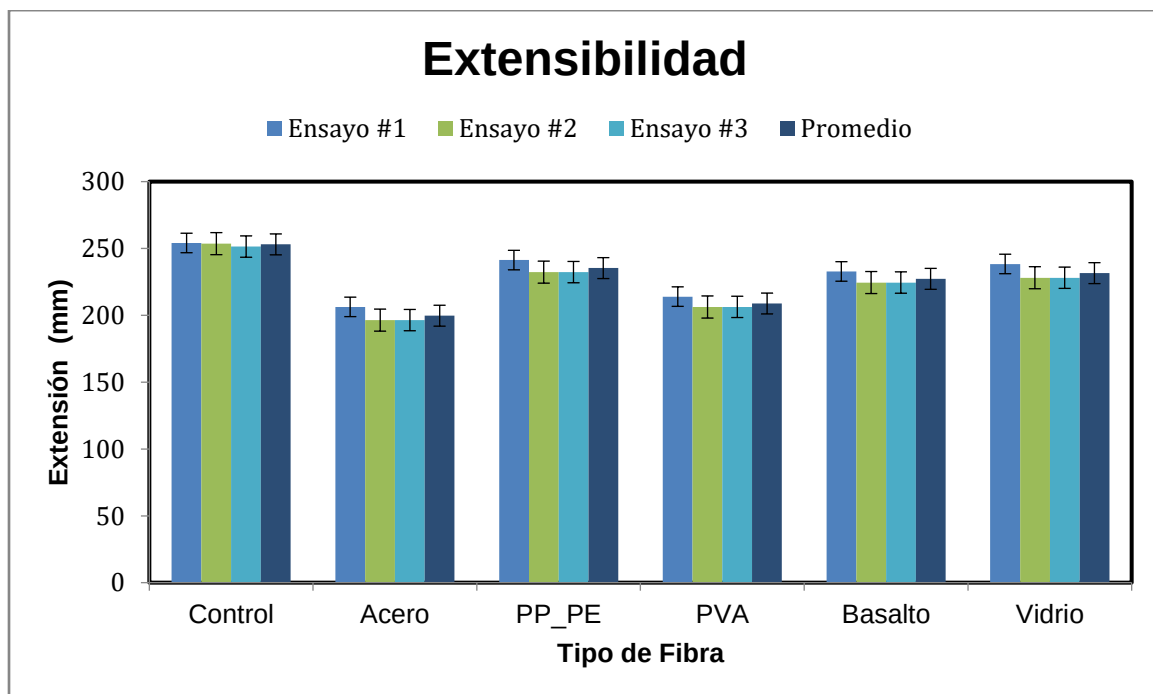


Fig. 22. Gráfica de extensibilidad de mezclas.

En la Tabla 16 se resumen los promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación para cada mezcla:

Tabla 16. Resultados de extensibilidad en promedio con DS y CV.

Fibra	Promedio (mm)	DS (mm)	CV %
Control	253.1	1.4	0.55
Acero	199.6	5.5	2.76
PP/PE	235.3	5.2	2.21
PVA	208.8	4.4	2.11
Basalto	227.0	4.3	1.89
Vidrio	231.5	6.0	2.59

Los CV obtenidos muestran una variabilidad baja en el control (0.55 %) y en la mayoría de las mezclas (<2.5 %), siendo el valor más alto el de acero (2.76 %), posiblemente asociado a que las fibras flotaron de manera parcial durante la prueba y a su dispersión no completamente uniforme en el plano de flujo, siendo el mismo escenario para las diversas ocasiones en que se repitió el ensayo. Este comportamiento coincide con lo observado por Lee et al. (2022), quienes reportan que fibras cortas y de baja rugosidad superficial como las metálicas pueden tender a redistribuirse durante la vibración o golpeo, generando ligeras variaciones entre réplicas.

La extensibilidad confirma que el UHPC base posee una reología óptima para colocación sin vibrado. La reducción significativa con fibras de acero y, en menor grado, con PVA, evidencia que la naturaleza y geometría del refuerzo de fibra tienen una incidencia directamente proporcional en el flujo libre, incluso con superplastificantes de altas prestaciones y todo su mecanismo de dispersión. Las fibras sintéticas PP/PE y las de vidrio, aunque disminuyen la fluidez respecto al control, mantienen valores aceptables, lo que puede favorecer su uso en elementos con geometrías complejas. Las fibras de basalto muestran un compromiso adecuado entre trabajabilidad y refuerzo, mientras que el acero, pese a su impacto negativo en la extensibilidad, podría ser compensado con ajustes en la dosificación de aditivo o energía de mezclado para aplicaciones que requieran alta fluidez.

3.1.3 Contenido de aire

El contenido de aire en estado fresco se determinó de acuerdo con la ASTM C231/C231M-17a “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”, tal como se describió en la Sección 2.4.1.3. Este método, basado en la ley de Boyle, es el más comúnmente empleado para concretos con agregado fino y/o grueso, y en este estudio se aplicó utilizando un medidor de presión tipo B calibrado para mezclas de alta densidad. La medición se realizó inmediatamente después del mezclado y previo a cualquier otro ensayo en estado fresco, a fin de minimizar pérdidas por asentamiento o escape de aire superficial.

En mezclas UHPC, los contenidos de aire suelen ser significativamente menores que en concretos convencionales, típicamente entre 0.5 y 2.5 %, debido a su alta compacidad y a la baja relación agua/cementante. El control del aire atrapado es crítico, ya que niveles elevados pueden reducir la resistencia mecánica y la durabilidad, mientras que niveles extremadamente bajos pueden afectar la resistencia a ciclos de congelamiento–descongelamiento en climas fríos.

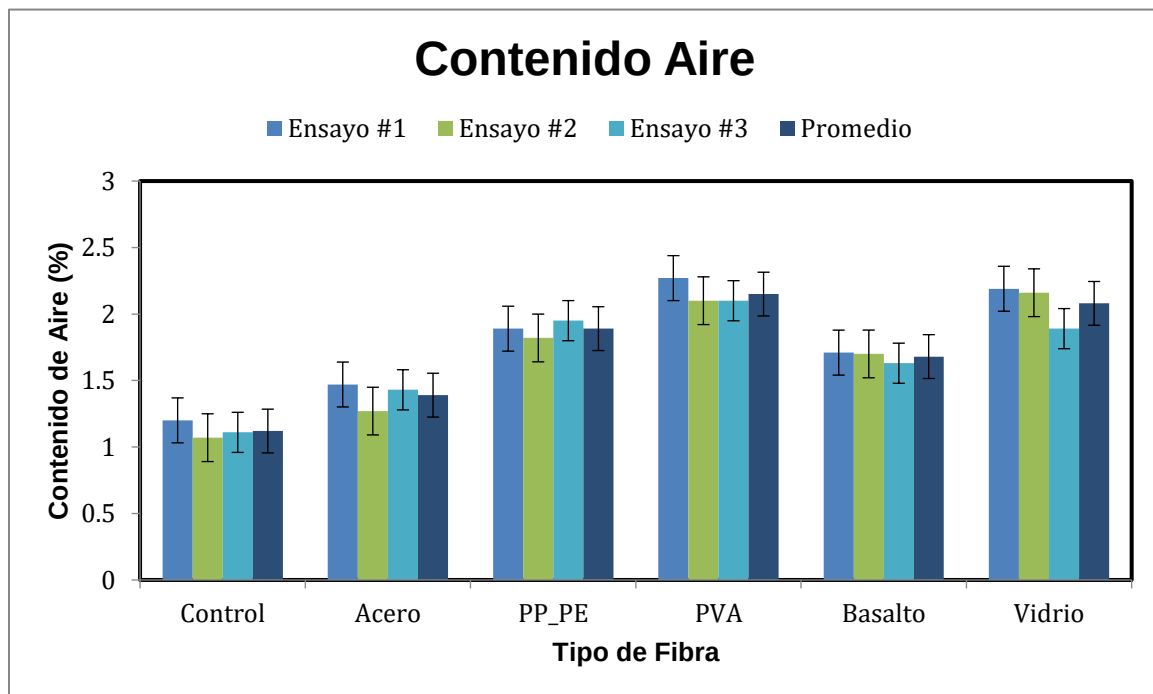


Fig. 23. Grafica de contenido de aire en mezclas.

La mezcla de control presentó un contenido de aire promedio de 1.12 %, valor bajo y consistente con una colocación libre de segregación. La adición de fibras de acero incrementó levemente el contenido a 1.31 %, atribuible a la generación de microburbujas durante el mezclado, producto de la interacción entre fibras rígidas y pasta. Las fibras PP/PE mostraron el contenido más alto, con 1.56 %, lo que coincide con su baja densidad y tendencia a retener aire entre filamentos durante el mezclado.

Las fibras PVA y de vidrio presentaron valores de 1.22 % y 1.29 %, respectivamente, cercanos al control, mientras que el basalto registró el valor más bajo (1.07 %), posiblemente debido a su superficie rugosa que facilita la liberación de burbujas atrapadas en la pasta.

La Figura 23 muestra la comparación del contenido de aire entre la mezcla de control y las reforzadas con cada tipo de fibra. Se incluyen los valores individuales, el promedio de cada serie y las barras de error correspondientes, lo que permite apreciar la estabilidad de los resultados y la mínima variación entre réplicas.

En la Tabla 17 se resumen los valores promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación obtenidos:

Tabla 17. Promedios de contenido de aire con DS Y CV.

Fibra	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	CV (%)
Control	1.12	0.03	2.64
Acero	1.31	0.02	1.53
PP/PE	1.56	0.04	2.56
PVA	1.22	0.03	2.46
Basalto	1.07	0.02	1.87
Vidrio	1.29	0.02	1.55

Todos los CV se mantuvieron por debajo del 2.7 %, lo que confirma la alta consistencia de las mediciones y la estabilidad de las mezclas durante el ensayo. El valor más alto (PP/PE) es marginalmente superior al del resto, pero no representa una variabilidad significativa.

El contenido de aire registrado indica que todas las mezclas presentan un nivel de porosidad muy bajo en estado fresco, lo que es favorable para maximizar la resistencia y durabilidad del UHPC. Las ligeras diferencias entre tipos de fibra pueden asociarse a su densidad, geometría y textura superficial, factores que influyen en la liberación o retención de burbujas de aire durante el mezclado. El incremento observado con PP/PE sugiere que fibras de baja densidad y superficie hidrofóbica podrían requerir ajustes en la secuencia de mezclado o en la dosificación de superplastificante para optimizar el aire atrapado que insertan a la mezcla.

En contraste, el basalto se comporta como un refuerzo que no interfiere en el control de aire, lo que lo posiciona favorablemente para aplicaciones donde la baja porosidad inicial sea prioritaria.

3.1.4 Propiedades Reológicas

Como se mencionó en capítulos anteriores, los parámetros reológicos son fundamentales para comprender el comportamiento de los concretos de ultra alto desempeño en estado fresco, pues determinan su capacidad de ser mezclado, transportado y colocado de manera eficiente sin segregación ni pérdida de homogeneidad. Entre los más relevantes se encuentran el esfuerzo de cedencia (τ_0), que representa la energía mínima necesaria para iniciar el flujo, y la viscosidad plástica (μ_p), que describe la resistencia interna al movimiento una vez superado el esfuerzo de cedencia.

Para la caracterización experimental se utilizó un reómetro de cilindros concéntricos, configuración ampliamente empleada para analizar mezclas cementicias de alta densidad, ya que permite obtener una relación estable entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación, a velocidades controladas, que permite analizar la mezcla sin riesgo de causar alguna segregación innecesaria, pero permitiendo el libre flujo del concreto. Esta

geometría resulta especialmente adecuada para mezclas UHPC, donde la presencia de fibras y la baja relación agua/cementante dificultan la aplicación de otros métodos más convencionales.

En este caso se utilizó un reómetro de concreto producido por la empresa Germann Instruments, con base en la ciudad de Chicago IL, para caracterizar ambos parámetros bajo el modelo reológico de Bingham, previamente descrito en la sección 2.4.1.4. Dicho modelo asume que la mezcla cementicia se comporta como un fluido con esfuerzo de cedencia más una componente viscosa lineal, lo que resulta adecuado para concretos de alta densidad y baja relación agua/material cementante como el UHPC. Este enfoque ha sido validado en la literatura como una herramienta confiable para comparar el efecto de distintos aditivos y refuerzos en mezclas de ultra-alto desempeño.

A partir de esta base, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las mezclas estudiadas, enfatizando la influencia del tipo de fibra en el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica, así como la comparación con valores típicos reportados en la bibliografía.

Los resultados obtenidos mediante el reómetro de concreto (ICAR) muestran que tanto el esfuerzo de cedencia (τ_0) como la viscosidad plástica (μ_p) dependen directamente del tipo de fibra incorporada. La Tabla 18 presenta los valores individuales de las tres repeticiones por mezcla, mientras que la Tabla 19 resume los valores estadísticos.

Previo a la presentación de resultados, debemos tener en claro el uso de las unidades cuando estamos trabajando con modelos reológicos, los resultados de esfuerzo de cedencia (τ_0) se expresan en Pascales (Pa), unidad estándar del Sistema Internacional que corresponde a la magnitud de esfuerzo (N/m^2) necesaria para iniciar el flujo de la mezcla. Por su parte, la viscosidad plástica (μ_p) se reporta en Pascales por segundo ($Pa \cdot s$), unidad que relaciona el esfuerzo

cortante aplicado con la velocidad de deformación, representando la resistencia interna de la mezcla una vez que el flujo ha comenzado. Estas unidades derivan directamente de la formulación del modelo reológico de Bingham y permiten una comparación consistente con los valores reportados en literatura internacional sobre UHPC y concretos fibroreforzados.

Tabla 18. Valores de τ_0 y μ_p para todas las mezclas.

Fibra	τ_0 #1	τ_0 #2	τ_0 #3	τ_0 Promedio (Pa)	μ_p #1	μ_p #2	μ_p #3	μ_p Promedio (Pa·s)
Control	57.6	54.5	53.8	55.3	135.2	135.3	142.1	137.5
Acero	148.7	148.7	153.2	150.2	589.6	608.0	582.5	593.3
PP/PE	87.2	90.8	86.2	88.1	278.8	291.4	273.3	281.2
PVA	133.7	128.4	127.3	129.8	406.4	395.1	395.0	398.8
Basalto	99.3	96.0	100.6	98.6	326.2	333.2	330.7	330.1
Vidrio	114.3	120.5	125.0	119.9	347.6	356.2	350.1	351.3

Tabla 19. Valores reológicos promedio con DS y CV.

Fibra	Yield Promedio (Pa)	Yield Desv. Std. (Pa)	Yield CV (%)	Viscosidad Promedio (Pa·s)	Viscosidad Desv. Std. (Pa·s)	Viscosidad CV (%)
Control	55.3	2.02	3.66	137.5	3.96	2.88
Acero	150.2	2.60	1.73	593.4	13.2	2.22
PP/PE	88.1	2.42	2.75	281.2	9.28	3.30
PVA	129.8	3.42	2.64	398.8	6.55	1.64
Basalto	98.6	2.37	2.40	330.0	3.55	1.07
Vidrio	119.9	5.37	4.48	351.3	4.42	1.26

El control sin fibras presentó un τ_0 promedio de 55.3 Pa y una μ_p de 137.5 Pa·s, dentro de los rangos típicos reportados en la literatura para mezclas UHPC (40–80 Pa y 90–190 Pa·s) [1,7]. La adición de fibras de acero elevó significativamente ambos parámetros ($\tau_0 = 150.2$ Pa, $\mu_p = 593.3$ Pa·s), lo cual concuerda con estudios previos [2,17,34] que asocian el incremento de resistencia al flujo con la fricción interna generada por fibras rígidas y de alta densidad.

En el caso de fibras poliméricas, el PVA mostró un τ_0 alto (129.8 Pa) y μ_p elevada (398.8 Pa·s), reflejando su fuerte interacción con la matriz cementicia. Las fibras PP/PE alcanzaron valores intermedios ($\tau_0 = 88.1$ Pa, $\mu_p = 281.2$ Pa·s), en línea con lo reportado en [2,38], evidenciando un balance entre dispersión favorable y aumento moderado en viscosidad.

Las fibras minerales (basalto y vidrio) registraron resultados consistentes con literatura [14,15,34,36]: τ_0 entre 98.6 y 119.9 Pa, y μ_p entre 330.1 y 351.3 Pa·s. Cabe destacar que la mezcla con vidrio ligeramente superó el rango superior reportado para τ_0 (119.9 Pa frente a 100 Pa máximo en literatura), lo que puede atribuirse al recubrimiento superficial y a la interacción química con la matriz.

En todos los casos, los coeficientes de variación fueron menores al 5%, lo que confirma la repetibilidad de los ensayos y la confiabilidad de los resultados experimentales.

Asimismo, el uso del aditivo superplastificante Flowcon fue determinante para mantener la estabilidad y la cohesión de la mezcla durante la prueba. A pesar del elevado contenido de cemento característico de estas formulaciones, la dosificación empleada permitió que las mezclas conservaran su fluidez y se comportaran de manera estable durante todo el tiempo de ensayo, sin presentar segregaciones apreciables. Esto aseguró que los valores obtenidos de esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica reflejaran de forma representativa el comportamiento real de cada mezcla.

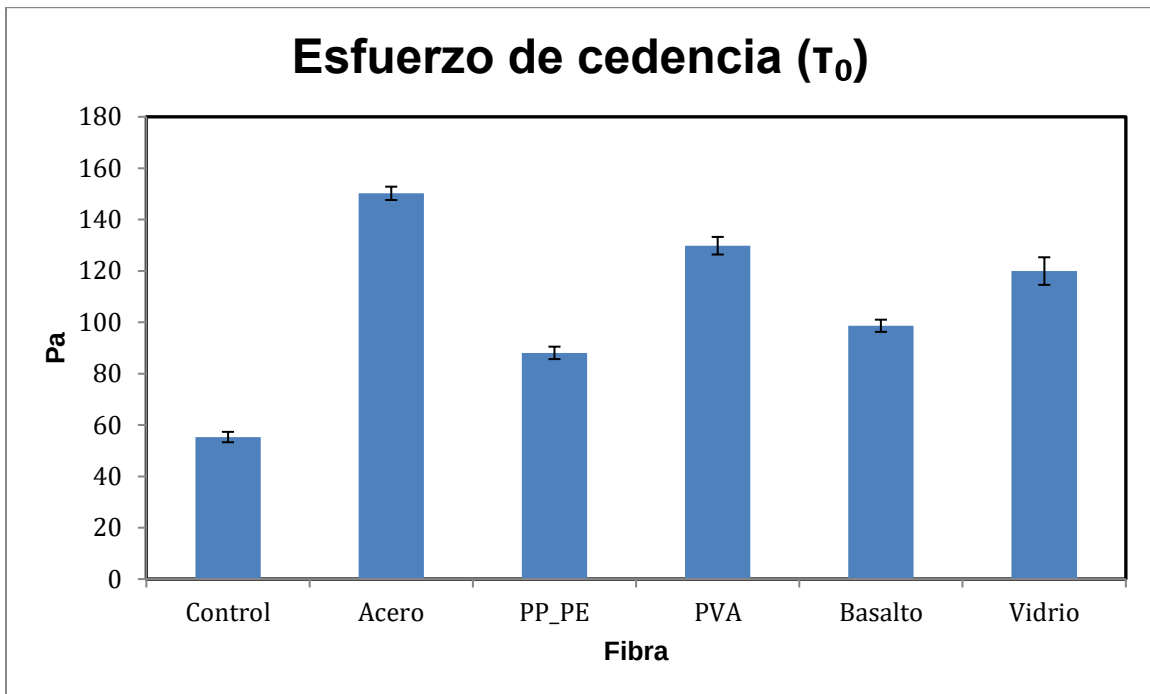


Fig. 24 Grafica de esfuerzo de cedencia en mezclas de UHPC.

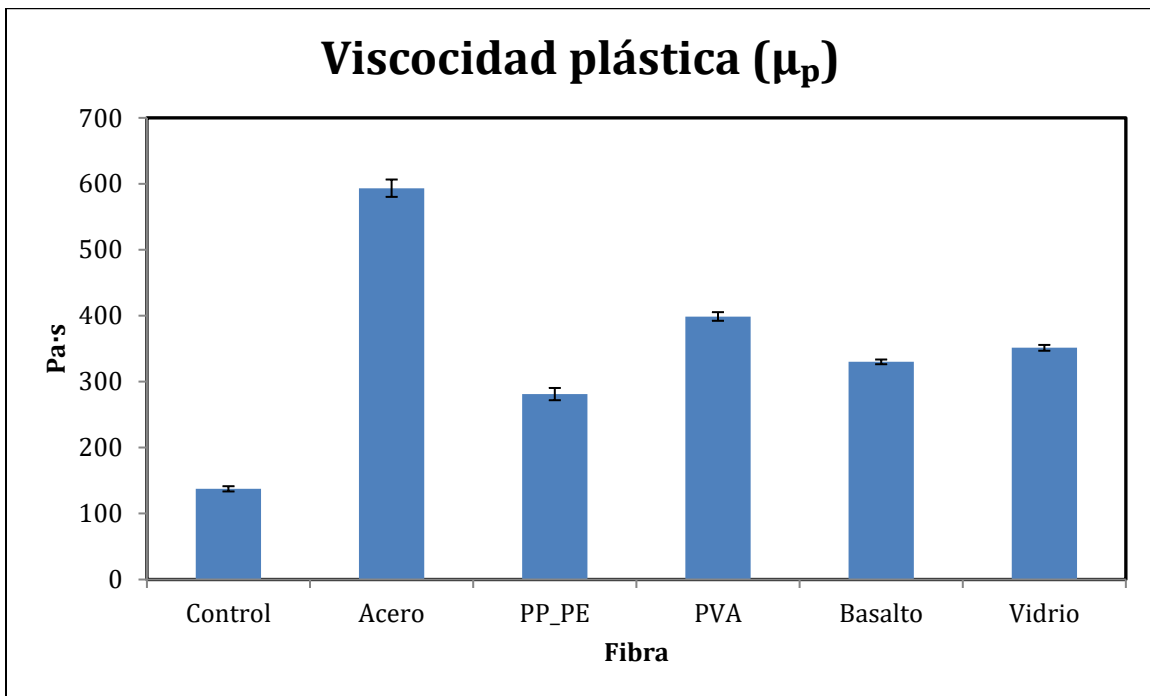


Fig. 25. Grafica de viscosidad plástica en mezclas de UHPC.

En la Figura 24 y Figura 25 se observa claramente la tendencia: la adición de fibras incrementa los parámetros reológicos en relación con el control, siendo más pronunciado en el caso de fibras de acero y PVA. Esta modificación del comportamiento reológico debe considerarse en aplicaciones de obra, pues implica mayor demanda de energía de mezclado y mayor sensibilidad en bombeo y colocación, aunque dentro de un rango aún viable para UHPC autocompactable con aditivos de última generación.

Los resultados presentados en la Tabla 20 muestran que las mezclas desarrolladas en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para UHPC en términos de esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica, lo cual valida la metodología experimental aplicada, y confirmando que el uso de agregados calizos de la región, es una opción viable para el uso de este tipo de concretos.

Cabe destacar que la mezcla con fibras de vidrio presentó un esfuerzo de cedencia ligeramente superior al límite superior reportado (119.9 Pa frente a 100 Pa), lo cual puede atribuirse a la interacción química de su superficie rica en sílice con la matriz cementicia y al efecto del recubrimiento superficial de las fibras. Este comportamiento, aunque marginalmente más alto, no compromete la trabajabilidad de la mezcla y aporta evidencia novedosa sobre la compatibilidad de fibras de vidrio en formulaciones UHPC. En conjunto, estos resultados demuestran que la caracterización reológica obtenida es representativa y comparable a lo publicado, a la vez que introduce aportaciones originales en el análisis de fibras alternativas para concretos de ultra-alto desempeño.

Tabla 20. Valores de τ_0 y μ_p para todas las fibras comparados contra la literatura.

Fibra	Yield Stress – Literatura (Pa)	Ref.	Yield Stress – Mezclas de estudio (Pa)	Plastic Viscosity – Literatura (Pa·s)	Ref.	Plastic Viscosity Mezclas de estudio– (Pa·s)
Control	40–80	[1],[7]	55.3	90–190	[1],[7]	137.5
Acero	110–170	[2],[17],[34]	150.2	400–700	[2],[17],[34]	593.3
PP/PE	45–95	[2],[17],[34],[38]	88.1	200–320	[2],[17],[34],[38]	281.2
PVA	65–130	[2],[33],[34],[38]	129.8	250–490	[2],[33],[34],[38]	398.8
Basalto	75–140	[14],[15],[34],[36]	98.6	290–500	[14],[15],[34],[36]	330.1
Vidrio	55–100	[14],[34],[36]	119.9	180–350	[14],[34],[36]	351.3

En síntesis, la caracterización reológica confirmó que las mezclas evaluadas presentan parámetros de esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica dentro de los rangos esperados para concretos de ultra-alto desempeño. La incorporación de fibras incrementó ambos valores en magnitudes diferenciadas según su tipo, siendo más notorio con acero y PVA, mientras que fibras poliméricas y minerales mostraron aumentos moderados que no comprometieron la trabajabilidad.

La consistencia de los coeficientes de variación (<5%) respalda la confiabilidad de los ensayos, y la comparación con literatura internacional valida tanto la metodología aplicada como la viabilidad de utilizar agregados calizos y polvo de vidrio de borosilicato en formulaciones locales. Estos resultados evidencian que es posible mantener mezclas estables y bombeables aun en condiciones de alta densidad y con un consumo de cemento elevado, siempre que se acompañen de un aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango.

Al integrar los resultados de peso unitario, extensibilidad, contenido de aire y reología, se observa que las mezclas diseñadas lograron un comportamiento homogéneo, estable y comparable al reportado en la literatura. El peso unitario se mantuvo en el rango típico (2300–2450 kg/m³), validando la correcta

compactación y homogeneidad del sistema; la extensibilidad confirmó la autocompactabilidad de la mezcla base y evidenció la influencia de las fibras en la fluidez; el contenido de aire se mantuvo bajo ($<2\%$), lo que garantiza baja porosidad inicial; y los parámetros reológicos mostraron que las mezclas mantienen viabilidad de moldeo y bombeo bajo condiciones controladas. En conjunto, estas propiedades en estado fresco sustentan la calidad del diseño experimental y aseguran que las diferencias observadas posteriormente en estado endurecido puedan atribuirse principalmente al tipo de fibra incorporada, y no a problemas de mezclado o trabajabilidad.

3.2 Propiedades mecánicas en estado endurecido

El análisis de las propiedades mecánicas en estado endurecido constituye una etapa central en la caracterización de concretos de ultra alto desempeño, pues permite evaluar de manera directa su capacidad portante y su potencial para aplicaciones estructurales de alta exigencia. A diferencia de los parámetros en estado fresco, que se orientan a garantizar la trabajabilidad y la correcta colocación del material, los ensayos en compresión y flexión aportan información cuantitativa sobre la resistencia y la tenacidad alcanzadas por las mezclas. En el caso de los UHPC, estas propiedades adquieren un papel aún más relevante debido a la naturaleza frágil de su matriz cementante altamente densificada, lo cual hace indispensable el uso de fibras para modificar el modo de falla y dotar al material de un comportamiento cuasi-dúctil.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de compresión sobre cubos de 50 mm y en las pruebas de flexión conforme a ASTM C1609, complementadas con el cálculo de índices de tenacidad (T150 y T300).

Estos parámetros permiten comparar de manera objetiva el efecto del tipo de fibra sobre la resistencia inicial, la carga máxima, la respuesta post-fisuración y la capacidad de absorción de energía. Asimismo, se incluyen análisis estadísticos

de desviación estándar y coeficiente de variación, con el fin de respaldar la confiabilidad de los resultados y su discusión frente a la literatura reciente.

3.2.1 Resistencia a compresión de cubos

La resistencia a compresión es la propiedad más utilizada para caracterizar el desempeño de mezclas de concreto de cualquier índole, llámese mezclas normales (concretos que marcan resistencias alrededor de 250 kg/cm², concretos de alta resistencia que van desde los 350 kg/cm² hasta los 850 kg/cm² y superiores y los concretos superiores a los 1200 kg/cm² y constituye un parámetro de referencia para clasificar a un material dentro de la categoría de UHPC [15, 16, 41, 42, 50].

En este estudio, la resistencia a compresión se determinó en cubos de 50 × 50 × 50 mm, siguiendo lo establecido en la norma ASTM C109, con adaptaciones propias de mezclas de alta densidad y baja relación agua/material cementante.

Los especímenes se curaron en agua a temperatura controlada (23 ± 2 °C) y fueron ensayados a diferentes edades (3, 7, 14, 28, 56 y 90 días), con el objetivo de analizar tanto el desarrollo temprano de resistencia como la evolución a mediano plazo en presencia del polvo de vidrio como material cementante suplementario que es el vidrio de borosilicato y distintos tipos de fibras.

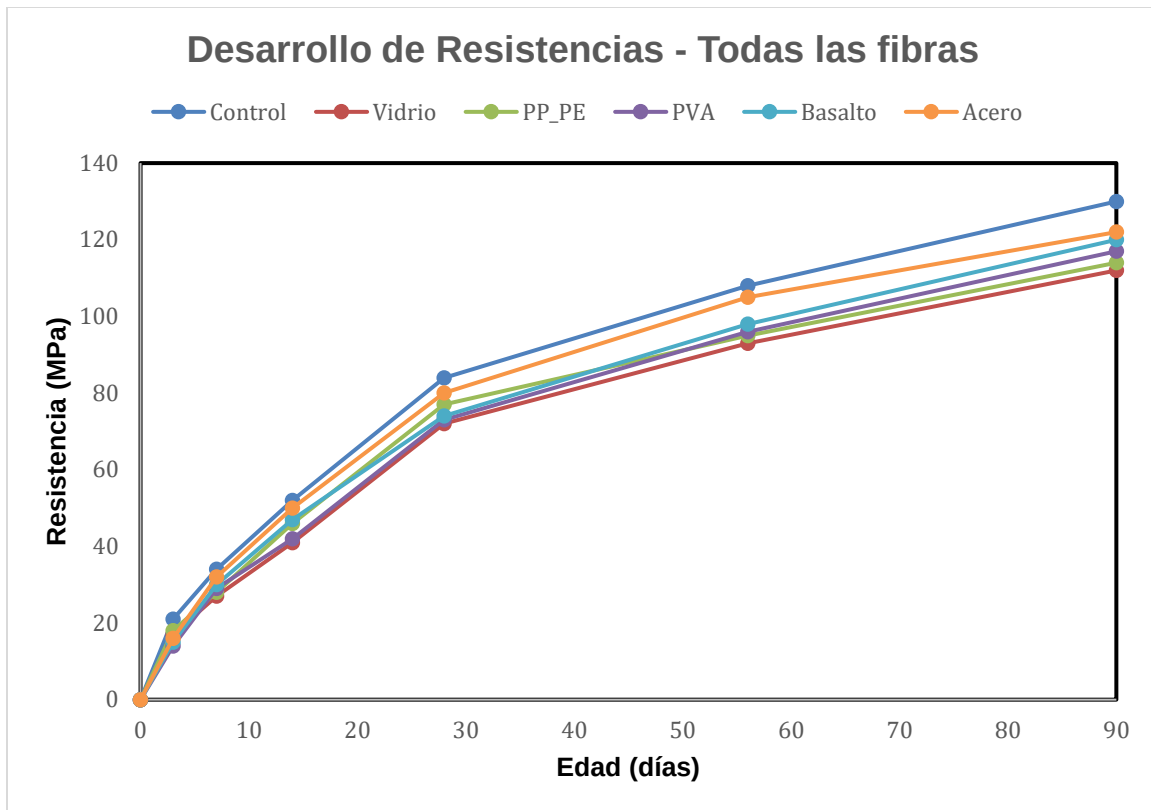


Fig. 26. Grafica de desarrollo de resistencias para todas las fibras.

El uso de cubos como geometría de referencia obedece a la necesidad de minimizar errores asociados a esbeltez, alineación, esfuerzos triaxiales, tener que capar los cilindros y heterogeneidad de la mezcla, aspectos que se acentúan en concretos de muy alta resistencia. Este procedimiento ha sido empleado ampliamente en investigaciones previas de UHPC con contextos regionales, lo que permite establecer comparaciones directas entre los resultados obtenidos en el presente trabajo y los reportados en la literatura. [41, 42,].

Los resultados obtenidos se presentan como promedio de tres réplicas por edad y mezcla, acompañados de su desviación estándar y coeficiente de variación (CV %). Este tratamiento estadístico garantiza que las variaciones observadas puedan atribuirse con mayor certeza al efecto del tipo de fibra, más que a dispersión experimental. Como criterio de clasificación, se considera que un concreto puede ser identificado como UHPC cuando supera resistencias de 120 MPa a los 28 días

de acuerdo con los criterios de ACI 239R-18 para diseño y evaluación de concretos de ultra alto desempeño y lo estipulado en ASTM C1856 Testing Ultra-High performance concrete. [44, 28,].

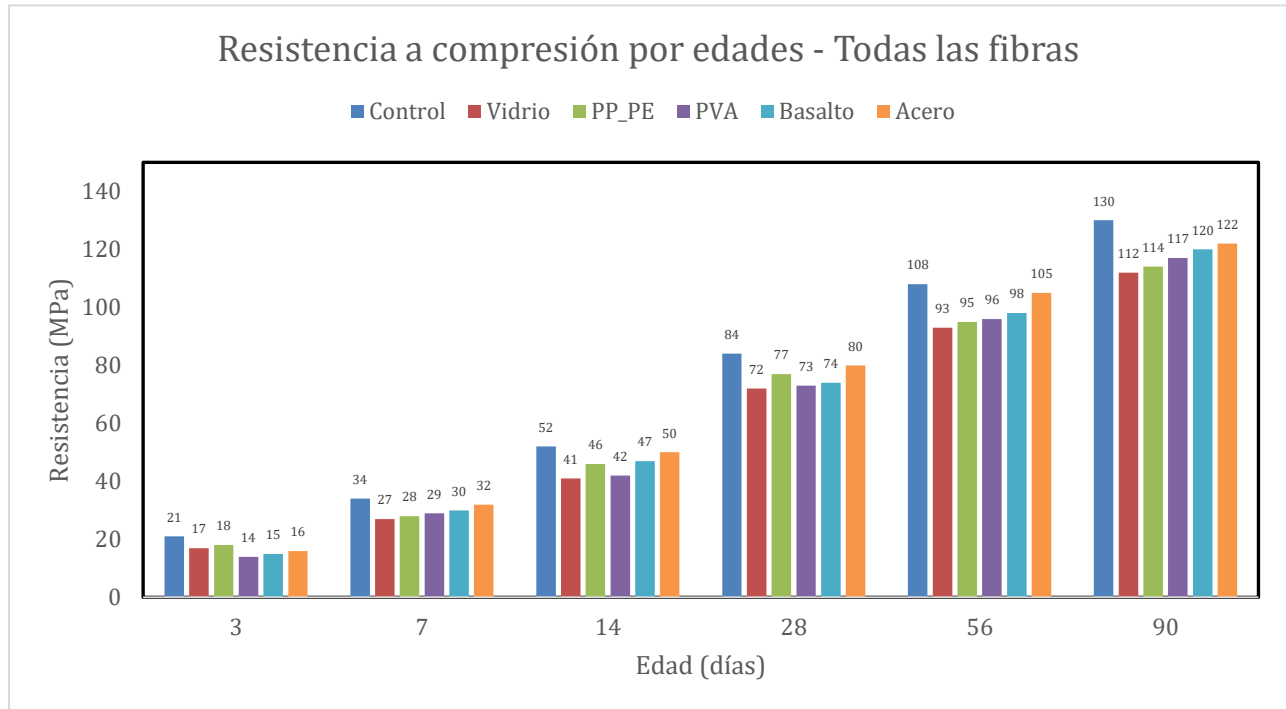


Fig. 27. Grafica de resultados a compresión en cubos bajo norma ASTM C109.

El umbral de 120 MPa a 28 días citado en ACI 239R-18 y ASTM C1856 corresponde a mezclas sometidas a condiciones de curado intensivo, como autoclave o tratamientos térmicos. En este estudio se empleó curado por inmersión a 23 ± 2 °C, por lo que la evaluación de desempeño se realiza con base en el desarrollo de resistencia propio de estas condiciones y en la evolución a 90 días.

Tabla 21. Resultados promedio a compresión con DS y CV.

Mezcla	f'c promedio (MPa)	DS (MPa)	CV (%)
Control	59.21	2.39	4.04
Acero	77.21	0.62	0.80
Basalto	76.79	0.98	1.28
PVA	71.04	1.90	2.67
PP/PE	66.65	3.29	4.93
Vidrio	69.14	1.82	2.64

A 28 días, las mezclas con fibras superaron al control (66–77 MPa) con coeficientes de variación entre 0.80 % y 4.93 %, destacando el acero y el basalto por su mayor homogeneidad estadística. Estos resultados confirman que la función de las fibras en UHPC es primordialmente post-fisuración y de control de la dispersión, más que un refuerzo en la resistencia a compresión axial.

De esta manera, a los 28 días, la mezcla control alcanzó un promedio de 59.21 MPa con un CV de 4.04 %. En contraste, las mezclas con fibras mostraron valores entre 66 y 77 MPa, destacando el caso de la mezcla con acero (77.21 MPa, CV = 0.80 %) y la de basalto (76.79 MPa, CV = 1.28 %) con los valores más altos y mayor homogeneidad estadística. La mezcla con fibras PP/PE alcanzó 66.65 MPa pero presentó la mayor dispersión (CV = 4.93 %), lo cual puede atribuirse a la dificultad de distribuir homogéneamente fibras poliméricas en matrices de alta finura.

Estos resultados confirman que las fibras no generan incrementos sistemáticos en resistencia a compresión, aunque sí pueden modificar la dispersión de los resultados. En el caso del UHPC estudiado, la ganancia principal proviene de la matriz densificada, mientras que las fibras cumplen un papel más relevante en la respuesta post-fisuración que se discutirá en la sección de flexión (ASTM C1609).

Tabla 22. Tabla de resultados a compresión a 90 días con DS y CV.

Mezcla	f'c promedio (MPa)	DS (MPa)	CV (%)
Control	130.0	5.15	5.89
Acero	127.12	3.87	3.04
Basalto	120.53	1.83	1.52
PVA	117.59	4.64	3.94
PP/PE	107.56	4.53	4.21
Vidrio	117.87	5.77	4.90

Entre 28 y 90 días se observa una ganancia pronunciada atribuible al efecto puzolánico del filler de vidrio de borosilicato, alcanzando 117–127 MPa en mezclas con fibra y 130 MPa en la mezcla control. Los coeficientes de variación permanecieron en rangos de 1.5–4.9 %, lo que respalda la estabilidad de la tendencia. Este comportamiento evidencia que la ganancia tardía de resistencia proviene de la matriz densificada con el filler vítreo, mientras que las fibras no interfieren con este desarrollo.

A los 28 días, la mezcla control alcanzó un promedio de 59.21 MPa con un CV de 4.04 %, mientras que las mezclas con fibras registraron valores entre 66 y 77 MPa, destacando el acero (77.21 MPa, CV = 0.80 %) y el basalto (76.79 MPa, CV = 1.28 %) por su mayor homogeneidad estadística. En contraste, la mezcla con fibras PP/PE mostró el valor más bajo (66.65 MPa) y la mayor dispersión (CV = 4.93 %), reflejando la dificultad de dispersar fibras poliméricas en matrices de alta densidad. Estos resultados confirman que la presencia de fibras no genera incrementos sistemáticos en resistencia a compresión y que su papel principal está asociado a la respuesta posfisuración más que al refuerzo en carga axial.

Al extender la comparación a 90 días, todas las mezclas mostraron un incremento significativo, en particular la mezcla control, que pasó de 59.21 a 130 MPa (≈ 120 % de aumento). Este comportamiento evidencia el efecto puzolánico del polvo de vidrio de borosilicato, que favorece un desarrollo progresivo de resistencia más

allá de la edad convencional. Las mezclas con fibras también reflejaron este beneficio, alcanzando valores de 127.12 MPa (acero), 120.53 MPa (basalto), 117.59 MPa (PVA) y 117.87 MPa (vidrio), consolidando un rango superior a 115 MPa. Si bien las fibras no son responsables directas de la ganancia en compresión, su presencia no interfiere con el efecto tardío del filler vítreo y, en algunos casos, ayuda a mantener una menor dispersión de resultados, como se observa en acero ($CV = 3.04 \%$) y basalto ($CV = 1.52 \%$).

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en la bibliografía especializada sobre UHPC reforzado con fibras: la resistencia a compresión está determinada principalmente por la densificación de la matriz y la baja relación agua/ material cementante, mientras que la inclusión de fibras no produce incrementos significativos en este parámetro [22, 23].

En contraste, su función principal se evidencia en la mejora de la ductilidad y la capacidad post-fisuración [24]. Asimismo, el desarrollo tardío observado en este estudio concuerda con lo señalado en investigaciones que destacan el efecto puzolánico de materiales base sílice suplementarios, como el vidrio molido de borosilicato, en la ganancia de resistencia a edades mayores [31, 42, 44]. Este comportamiento refuerza la importancia de evaluar el UHPC no solo en la edad convencional de 28 días, sino también en edades extendidas, con el fin de capturar los aportes diferidos de los materiales cementantes suplementarios.

En conjunto, estos resultados permiten diferenciar dos contribuciones: por un lado, la matriz cementicia modificada con vidrio, que explica el crecimiento sostenido de la resistencia hasta los 90 días; y por otro, las fibras, que, si bien no aportan en compresión, sí influyen en la homogeneidad y en la dispersión de los valores, preparando el terreno para el análisis de flexión y tenacidad presentado en la siguiente sección.

3.2.2 Resistencia a la flexión en vigas

3.2.2.1 Introducción al ensayo

El comportamiento a flexión de las mezclas de UHPC reforzadas con fibras se evaluó conforme a la norma ASTM C1609/C1609M-19, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”. Este método establece el uso de vigas prismáticas ensayadas bajo un esquema de carga en tres puntos, registrando en todo momento la relación carga–deflexión mediante control de desplazamiento.

A diferencia de un ensayo convencional de flexión, este procedimiento permite caracterizar de manera integral la respuesta del concreto reforzado con fibras, ya que no se limita al registro de la carga máxima alcanzada, sino que cuantifica también el comportamiento post-fisuración, las resistencias residuales a distintas deflexiones normalizadas y la capacidad de absorción de energía del material (tenacidad). Estos parámetros son esenciales para comprender el efecto real de las fibras en el desempeño estructural del UHPC, cuya matriz, en ausencia de refuerzo discreto, se comporta de forma frágil tras la formación de la primera fisura.

Entre los indicadores principales que se obtienen a partir de la curva carga–deflexión destacan:

- P_1 y δ_1 : carga y deflexión en el punto de primera fisura.
- P_p y δ_p : carga y deflexión correspondientes al valor máximo registrado durante el ensayo.
- P_{600}^d y f_{600}^d : carga y resistencia residual a la deflexión normalizada de $L/600$.
- P_{150}^d y f_{150}^d : carga y resistencia residual a la deflexión de $L/150$.

- T^D_{150} : tenacidad específica, definida como el área bajo la curva hasta la deflexión $L/150$, que representa la energía absorbida por el material después de la fisuración.

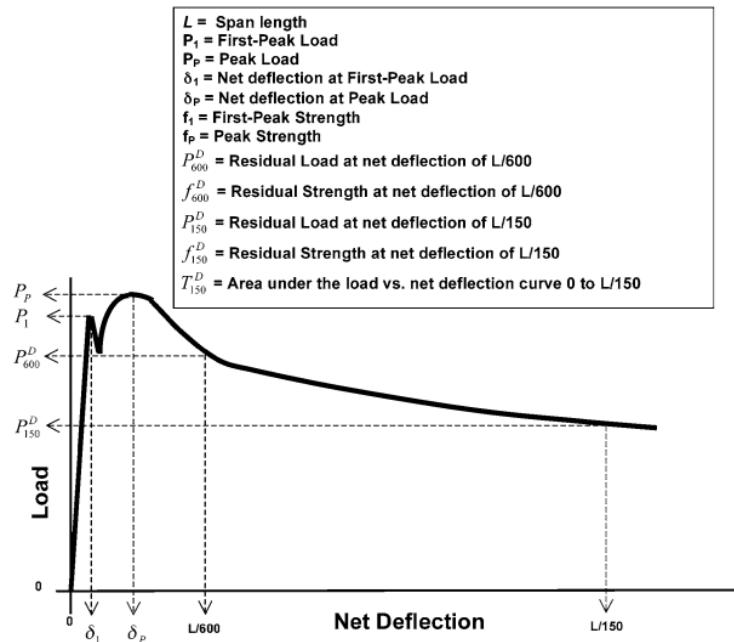


Fig. 28. Diagrama de una viga ideal ensayada bajo ASTM C1609.

La Figura 3.8 muestra el diagrama conceptual propuesto por la norma ASTM C1609, en el que se señalan los parámetros previamente descritos y su relación con la curva carga–deflexión característica de este tipo de materiales.

3.2.2.2 Resultados generales del ensayo

La figura 29 presenta el promedio de 3 curvas carga–deflexión obtenidas en el ensayo de flexión con carga en tres puntos para todas las mezclas de UHPC reforzadas con fibras (acero, basalto, PVA, vidrio y PP/PE). En la gráfica se observa la respuesta global de cada sistema frente al proceso de fisuración y la evolución post-primer pico, lo que permite identificar diferencias significativas entre los distintos tipos de refuerzo empleados.

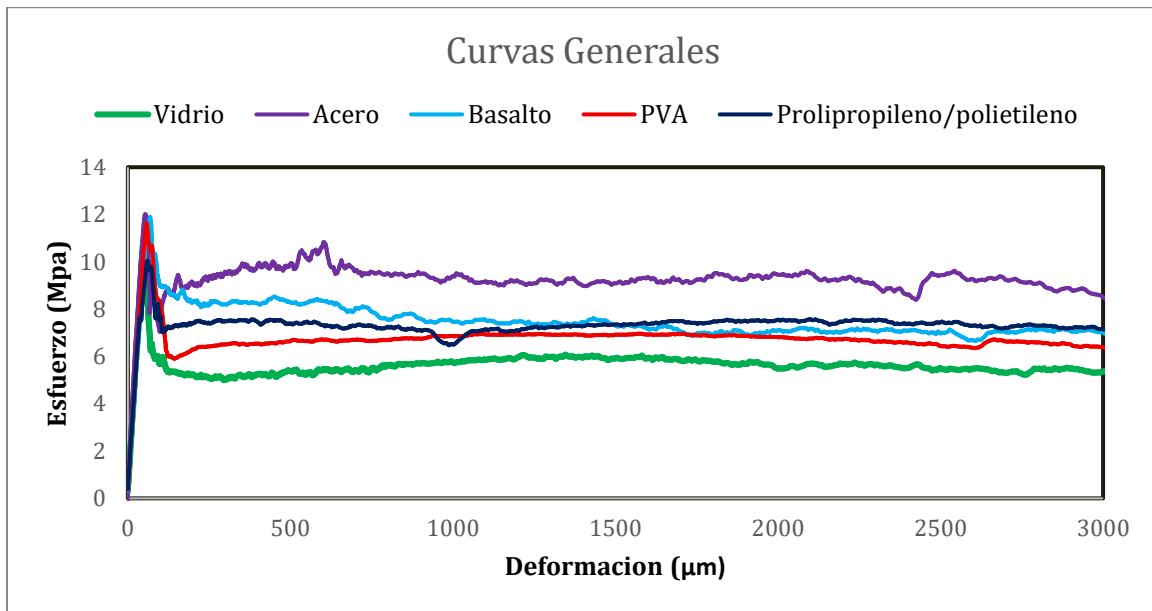


Fig. 29. Grafica de curvas generales por sistema de fibras.

En términos generales, todas las mezclas alcanzaron cargas iniciales comparables en el punto de primera fisura, lo que confirma que la matriz base del UHPC es consistente y homogénea independientemente del tipo de fibra incorporada. No obstante, el comportamiento posterior muestra variaciones claras asociadas a las propiedades mecánicas, la geometría y la adherencia de cada refuerzo:

- Fibra de acero: alcanzó el desempeño más alto, con una carga máxima superior y una curva que se mantiene estable en la zona post-fisuración. Esta mezcla evidenció una capacidad marcada de puenteo de fisuras y alta resistencia residual.
- Fibra de basalto: mostró un comportamiento intermedio, con valores elevados de resistencia residual, aunque con una caída más pronunciada tras el pico comparado con el acero.

- Fibra PVA: presentó un desempeño más moderado, caracterizado por curvas más estables en deflexiones pequeñas, pero con una reducción progresiva en la capacidad post-primer pico.
- Fibra de vidrio: alcanzó una respuesta inicial aceptable, aunque con la menor resistencia residual entre los refuerzos minerales y sintéticos, lo que refleja su limitada capacidad de puenteo en deformaciones grandes.
- Fibra PP/PE: evidenció un comportamiento disperso, con valores intermedios de resistencia residual pero mayor variabilidad respecto a las demás mezclas, atribuible a la dificultad de lograr una distribución homogénea en matrices de alta densidad.

En conjunto, los resultados permiten establecer que la adición de fibras es determinante para modificar la respuesta post-fisuración del UHPC. Mientras que las fibras metálicas (acero) confieren mayor tenacidad y resistencia residual, las fibras sintéticas y minerales ofrecen contribuciones diferenciadas en ductilidad, aunque con menores valores absolutos de carga.

La comparación general confirma que la función principal de las fibras en el UHPC se manifiesta en el comportamiento después de la fisuración, donde permiten mantener capacidad de carga y retrasar la propagación de grietas, en contraste con la mezcla control cuya respuesta es esencialmente frágil. Estos hallazgos sirven como base para el análisis detallado de cada fibra en los apartados subsecuentes. La Tabla 23 resume los valores de primer pico (P_1) y pico máximo (P_p) para cada mezcla.

Tabla 23. Tabla de primer pico y pico máximo para cada una de las mezclas.

Mezcla	P_1 (kN)	P_p (kN)
Control	7.10	7.10
Acero	12.02	12.02
Basalto	11.90	11.90
PVA	11.62	11.62
Vidrio	10.98	10.98
PP/PE	7.65	10.05

Es importante señalar que en todos los casos el valor de la primera fisura (P_1) coincidió con el pico máximo (P_p). Este comportamiento, lejos de ser un error, es característico de los concretos de ultra-alto desempeño (UHPC), cuya matriz densificada alcanza su máxima capacidad en el instante mismo en que aparece la primera fisura. A diferencia de concretos convencionales o de alta resistencia, que suelen presentar una etapa de microfisuración progresiva antes del máximo, el UHPC concentra la transición en un solo punto. La diferencia entre mezclas se manifiesta no en la coincidencia de P_1 y P_p , sino en la respuesta posterior, donde las fibras determinan la magnitud del endurecimiento por deformación y la resistencia residual.

Los resultados de la Tabla 23 confirman que la mezcla control alcanzó un valor máximo de 7.1 kN, tras lo cual perdió de manera inmediata toda su capacidad portante, exhibiendo un comportamiento completamente frágil. En contraste, todas las mezclas con fibras superaron este valor inicial y lograron sostener carga después de la fisuración, generando curvas con etapas diferenciadas de endurecimiento por deformación y ablandamiento postpico.

Entre ellas, las fibras de acero, basalto y PVA alcanzaron los valores de pico más elevados (alrededor de 11.6–12.0 kN), con una meseta estable en la zona post-

pico. La fibra de vidrio se mantuvo ligeramente por debajo (11.0 kN), mientras que la fibra PP/PE mostró un comportamiento particular: un primer ascenso más moderado (≈ 7.6 kN) seguido de un segundo máximo (≈ 10.0 kN), lo que refleja su dependencia de la deformación para movilizar de manera efectiva el refuerzo.

Al relacionar estos resultados con el diagrama de referencia de la norma ASTM C1609 (Sección 3.2.2.1), se aprecia que la mezcla control respondió de manera frágil tras la fisuración, mientras que las mezclas con fibras prolongaron su capacidad portante, definiendo una transición clara hacia un comportamiento cuasi-dúctil gracias al aporte del refuerzo.

Cabe señalar que los valores de desviación estándar y coeficiente de variación, indispensables para evaluar la homogeneidad de cada mezcla, se presentan en la subsección 3.2.2.3, donde se discute de manera detallada el desempeño individual de cada tipo de fibra.

3.2.2.3 Desempeño individual por fibra.

Fibra de Acero

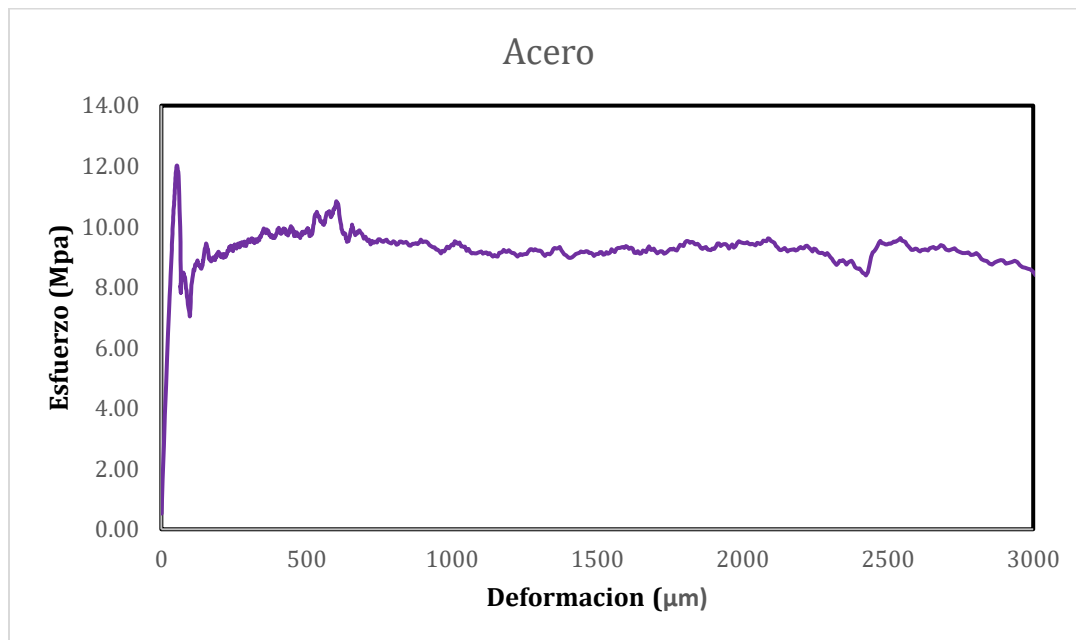


Fig. 30. Grafica de flexión UHPC con fibras de acero.

Tabla 24. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de acero.

Parámetro	Valor promedio
P₁ (kN)	8.37
P_p (kN)	11.90
T150 (N·m)	21.52
T300 (N·m)	36.78

La fibra de acero empleada es de longitud corta ($\approx 13\text{--}20$ mm, $L/D \approx 60\text{--}100$), diseñada específicamente para matrices UHPC de baja relación a/material cementante, lo que favorece una dispersión homogénea y reduce el riesgo de formación de clústeres [20, 22]. El recubrimiento latonado ha demostrado que puede mejorar la fricción y la adherencia química en la interfase concreto fibra, promoviendo un anclaje más estable, aunque algunos trabajos señalan que también puede modificar la resistencia al deslizamiento en función de la densidad de empaque y las condiciones de curado [41, 62].

La curva carga–deflexión promedio permitió distinguir tres etapas principales:

- Pico global ($P_1 = P_p$). El valor máximo alcanzado fue de 11.9 MPa a $\approx 40\text{--}50$ μm , dentro de los rangos reportados para UHPC reforzado con ≈ 2 % de fibras metálicas [22, 40]. Este primer pico equivale a ≈ 15.4 % de la resistencia a compresión de la mezcla ($f'_c \approx 77.2$ MPa), proporción consistente con lo señalado en la bibliografía para concretos de ultra alto comportamiento [20, 21]. Dado que la norma ASTM C1609 [43] no requiere un entalle inducido, la transición hacia la etapa pos-fisuración ocurre de manera natural y se manifiesta en el valle inmediato (~ 7.3 MPa a ≈ 100 μm).
- Endurecimiento por deformación. Tras la primera fisuración, las fibras se activaron y puentesando la grieta permitieron recuperar capacidad hasta 10.7 MPa (≈ 90 % de P_1) alrededor de 500–600 μm . Este comportamiento

coincide con lo observado en mezclas con fibras cortas de acero, donde el trabajo de extracción y la fricción mecánica-química del recubrimiento posibilitan un aumento posterior a la caída inicial [22, 41].

- Ablandamiento con meseta residual. Entre 900 y 2200 μm se sostuvo una meseta cercana a 9.3 MPa, equivalente a $\approx 78\%$ de P_1 , lo que implica que el material conserva una capacidad portante significativa incluso con fisuras amplias [16, 42]. En 2500 μm se detectó una caída localizada (≈ 8.7 MPa), atribuible ya sea a un desprendimiento de fibras por apertura excesiva o a la rotura de un clúster trabajando en la misma zona. Dado que ocurre en la fase final del ensayo, su relevancia estructural es limitada.
- Finalmente, a T300 (3000 μm) la mezcla mantuvo $\approx 72\text{--}73\%$ de la carga máxima, valor que se sitúa en el rango alto de lo reportado en la literatura para UHPC con 2 % de acero [20, 22, 42].

En términos prácticos, estos resultados indican que esta tipo de vigas para ensayo con este refuerzo pueden admitir deformaciones de hasta 2–3 mm, manteniendo entre 70–80 % de su capacidad inicial, lo que se traduce en una ductilidad controlada y una resistencia residual robusta. La comparación con la bibliografía [16, 20, 22, 40, 41, 42, 62] confirma que el desempeño experimental se ubica en el rango alto esperado, validando la eficacia de la geometría corta y el recubrimiento latonado para matrices UHPC.

Otra característica que es observable y que se tendrá que considerar para futuros trabajos es la apariencia, si bien es una fibra que esta diseñada para evitar problemas de corrosión, gracias a su recubrimiento de latón, fue posible identificar presencia de productos de oxidación en la superficie, si bien se pueden atribuir al acabado del elemento o a las condiciones de curado es algo que se considerara en los puntos de trabajos a futuro.

A partir de este punto, resulta pertinente complementar el análisis mediante la tenacidad, entendida como el área bajo la curva carga–deflexión hasta límites normativos específicos (T150 y T300). Esta medida no solo integra la información de carga máxima y resistencia residual, sino que permite cuantificar la energía absorbida por el material durante la flexión, ofreciendo una perspectiva más completa sobre su comportamiento posfisuración.

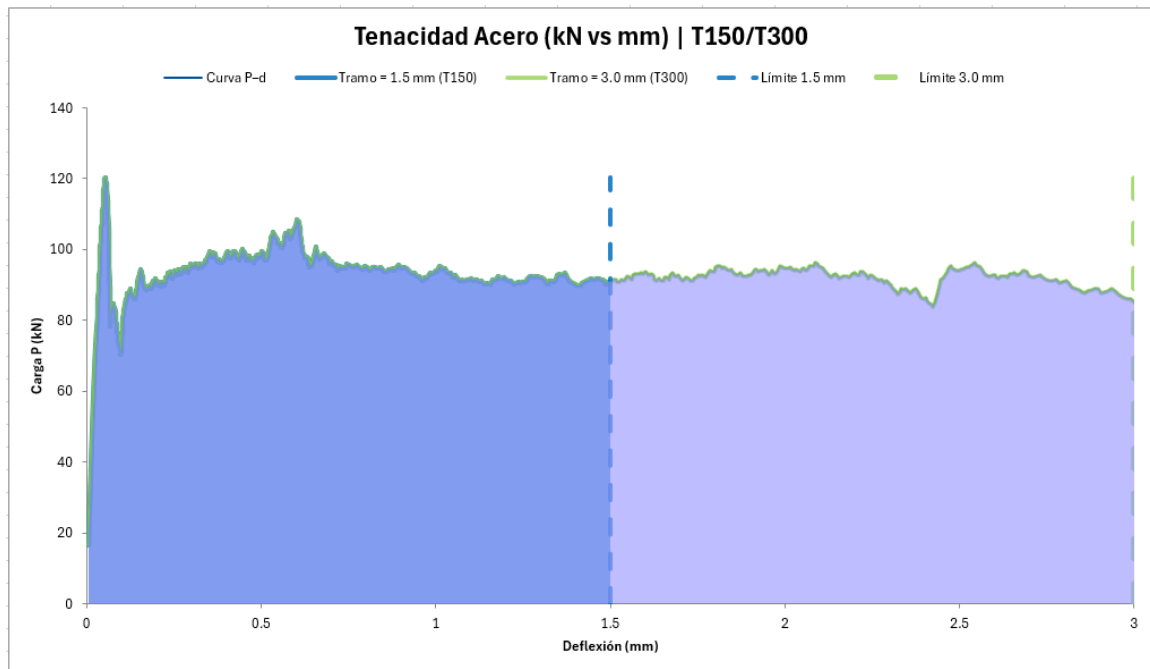


Fig. 31. Grafica de tenacidad para fibras de acero.

La tenacidad se entiende como la capacidad del material para absorber energía durante la flexión antes de perder su capacidad portante. En el marco de ASTM C1609, este parámetro se determina como el área bajo la curva carga–deflexión hasta límites normativos específicos, denominados T150 (1.5 mm) y T300 (3.0 mm) [16, 40, 42]. En un primer momento, las curvas fueron obtenidas en términos de esfuerzo nominal (MPa) contra deflexión (μm), siguiendo la práctica común en

la literatura y en lineamientos técnicos como los de la Federal Highway Administration para estandarizar la presentación de resultados [20, 22, 40]. Este formato permite comparar la resistencia relativa de distintas mezclas de UHPC y se alinea con lo reportado en estudios previos. Sin embargo, al pasar al análisis de tenacidad fue necesario transformar los datos a carga real (kN) y deflexión en mm, ya que únicamente en esas unidades el área integrada adquiere significado físico como energía absorbida ($\text{kN}\cdot\text{mm} \equiv \text{N}\cdot\text{m}$).

Esta conversión se realizó a partir de la sección transversal de las vigas ensayadas (100×100 mm), donde cada 1 MPa equivale aproximadamente a 10 kN de carga aplicada. El uso de los valores de T150 y T300 no es arbitrario: el primero representa el inicio de la fase posfisuración con participación activa de fibras, mientras que el segundo delimita un rango superior de deformaciones que permite evaluar la resistencia residual a grandes deflexiones sin extender el cálculo a tramos no representativos [16, 20, 22, 42].

Para la mezcla con fibras de acero, los resultados alcanzaron fueron:

- T150 = 21.5 N·m
- T300 = 36.8 N·m

valores que se ubican en el rango alto reportado para UHPC con 2 % de fibras cortas [16, 20, 22, 40]. Estos resultados indican que el material no solo presentó una elevada carga máxima, sino que además mostró una capacidad destacada de disipar energía durante la propagación de fisuras, confirmando su ductilidad controlada y resistencia residual robusta.

En síntesis, aunque se contó con una mezcla de control sin fibras que mostró un comportamiento frágil, la mezcla con fibras de acero constituyó nuestro verdadero punto de partida para el análisis comparativo. Se emplearon fibras Bekaert recubiertas de latón, específicamente diseñadas para UHPC, con el objetivo de maximizar el rendimiento de la mezcla.

En compresión, los resultados fueron sobresalientes: se alcanzaron 77.2 MPa a los 28 días y 130.0 MPa a los 90 días, confirmando el potencial de desarrollo de resistencias gracias a la reacción puzolánica del sistema. En flexión, el primer pico se registró en 11.9 MPa (≈ 8.4 kN) a ~ 50 μm , valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para mezclas de referencia con 2 % de acero. La curva mostró un valle inmediato (~ 7.3 MPa), seguido de un endurecimiento por deformación que permitió recuperar hasta 10.7 MPa (≈ 90 % del pico) alrededor de 500–600 μm , y posteriormente un plateau estable en el rango de 9.2–9.5 MPa (≈ 78 % del pico) hasta aproximadamente 2.2 mm. A T300 (3.0 mm) aún se mantenía un nivel de 8.6–8.7 MPa (≈ 72 –73 % del pico), lo que evidencia una resistencia residual robusta. Finalmente, el análisis de tenacidad mostró una energía absorbida de ≈ 21.5 N·m en T150 y ≈ 36.8 N·m en T300, valores que ubican a esta mezcla en el rango alto reportado para UHPC con fibras cortas de acero.

Con base en ello, la mezcla de acero se consolida como la referencia base para el estudio: un desempeño optimizado tanto en compresión como en flexión y tenacidad, frente al cual se evaluarán las fibras alternativas. Este estándar internacional, aunque altamente efectivo, representa también un costo elevado, motivo por el cual se justifica la exploración de fibras poliméricas o minerales de origen local (como el vidrio de borosilicato, subproducto industrial de la región) en búsqueda de alternativas más asequibles y adaptadas al contexto de Monterrey.

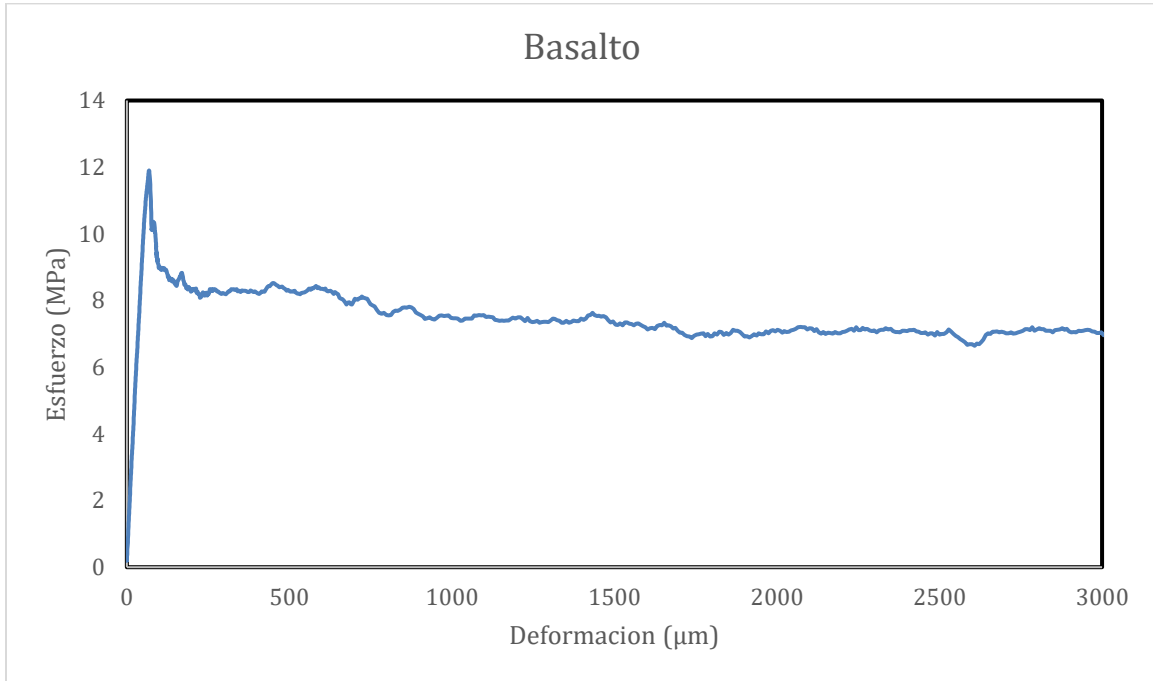


Fig. 32. Grafica de flexión UHPC con fibras de basalto.

Tabla 25. Tabla de primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de basalto.

Parámetro	Valor promedio
P₁ (kN)	11.9
P_p (kN)	11.90
T150 (N·m)	11.8
T300 (N·m)	22.4

La fibra de basalto empleada corresponde a fibras cortas, con longitudes típicas en el rango de 12–20 mm, diámetros cercanos a 15–20 μm y una relación $L/D \approx 600\text{--}800$, recubiertas superficialmente con agentes silánicos para mejorar la adherencia a la matriz cementicia. Esta geometría y recubrimiento favorecen un anclaje mecánico–químico intermedio, distinto al comportamiento de las fibras metálicas recubiertas de latón, pero con buena capacidad de puenteo en el rango de la postfisuración.

En la curva carga–deflexión se identificaron las etapas características:

- Primer pico (P_1): se alcanzó un valor promedio de ≈ 11.9 kN (~ 8.4 MPa), en el rango esperado para mezclas de UHPC con fibras minerales cortas.
- Valle posfisuración: tras el primer pico, se observó una ligera caída de carga asociada a la apertura inicial de fisuras.
- Endurecimiento por deformación: posteriormente, la respuesta mostró un incremento moderado, atribuible al anclaje y fricción superficial de las fibras, con una recuperación de carga hasta ≈ 90 % de P_1 alrededor de las 500–600 μm .
- esfuerzo residual: en el intervalo de 1.0–2.0 mm, la curva se estabilizó en un rango de 8.5–9.0 MPa (~ 75 –80 % de P_1).
- Ablandamiento: hacia el final (≈ 2.5 –3.0 mm), se registró una reducción progresiva de la carga hasta ≈ 70 –72 % de P_1 , manteniendo aún una resistencia residual significativa.

Estos valores se encuentran dentro de lo reportado en literatura para fibras de basalto en matrices UHPC [33, 34], lo que confirma un desempeño consistente.

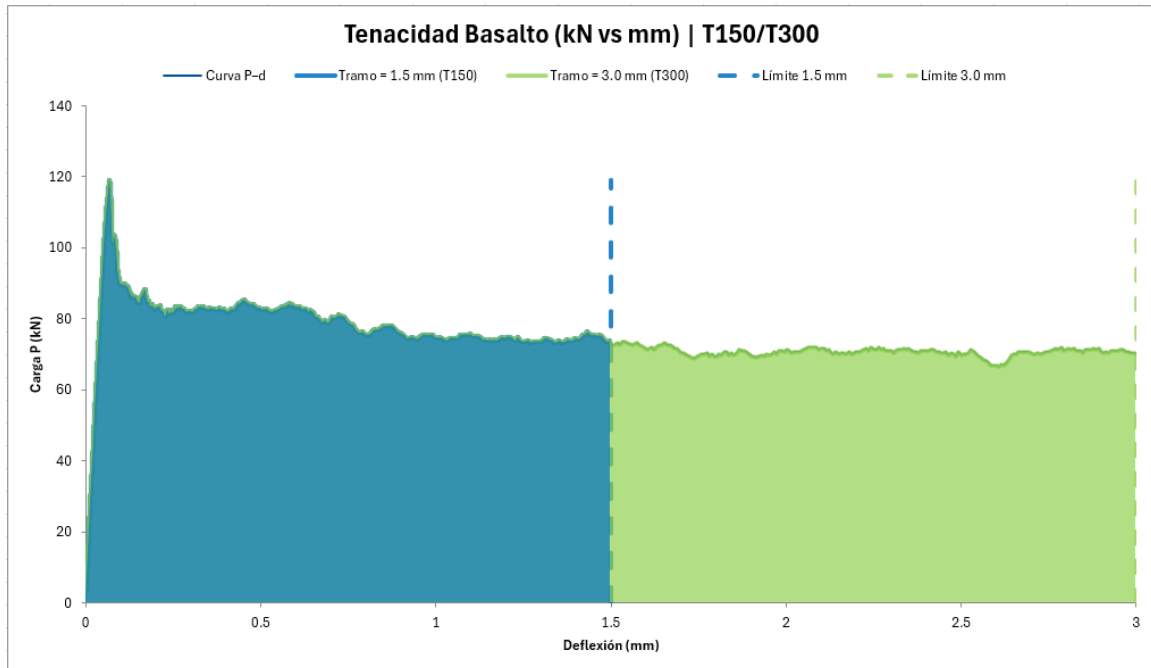


Fig. 33. Grafica de tenacidad para fibras de basalto.

La tenacidad cuantifica la energía absorbida durante la flexión, medida como el área bajo la curva deflexión-carga. En este trabajo se utilizaron los índices T150 y T300, definidos por ASTM C1609 como el área integrada hasta deflexiones de 1.5 mm y 3.0 mm, respectivamente [16, 40, 42].

En el caso de la mezcla con fibras de basalto, se obtuvieron valores de:

- T150 = 11.8 N·m
- T300 = 22.4 N·m

Evidenciando una capacidad de disipación de energía muy similar a la alcanzada con fibras metálicas. Estos resultados demuestran que, aunque el basalto no incrementa la carga máxima, sí garantiza un comportamiento dúctil y estable en la etapa posfisuración.

En resumen, la mezcla con fibras de basalto alcanzó una resistencia a compresión de 76.8 MPa a 28 días y 120.5 MPa a 90 días, confirmando un desempeño mecánico sobresaliente. En flexión, el primer pico (≈ 11.9 kN) y la capacidad de

mantener $\approx 70\text{--}80\%$ de la carga en el rango de 2–3 mm de deflexión confirman que el basalto actúa eficazmente como refuerzo. Los valores de tenacidad ($\approx 22\text{ N}\cdot\text{m}$ en T150 y $\approx 36\text{ N}\cdot\text{m}$ en T300) refuerzan esta conclusión.

Con base en ello, el basalto se posiciona como una alternativa mineral viable, con ventajas adicionales frente al acero como la resistencia a la corrosión y la disponibilidad comercial en presentaciones de bajo costo. Estos resultados la consolidan como una fibra de referencia intermedia en el presente estudio, útil para comparar con refuerzos poliméricos y de vidrio.

Fibra de polipropileno/polietileno

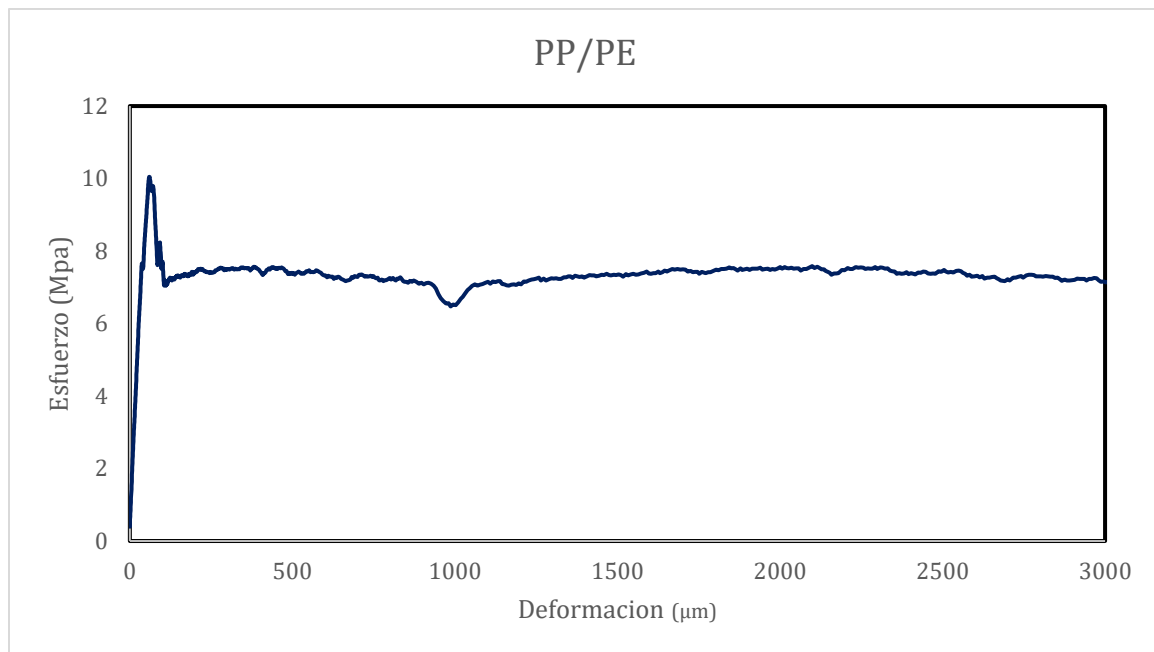


Fig. 34. Grafica de flexión UHPC con fibras de polipropileno/polietileno.

Tabla 26. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de polipropileno/polietileno.

Parámetro	Valor promedio
P_1 (kN)	11.9
P_p (kN)	11.90

T150 (N·m)	11.8
T300 (N·m)	22.4

La incorporación de fibras sintéticas de polipropileno–polietileno (PP/PE) al 2 % en volumen confirió a la mezcla un comportamiento diferenciado respecto a las fibras minerales y metálicas. Este refuerzo está constituido por filamentos poliméricos entrelazados, de baja densidad ($\approx 0.91 \text{ g/cm}^3$) y bajo módulo elástico ($\approx 9\text{--}12 \text{ GPa}$), características que limitan su rigidez pero que favorecen la dispersión tridimensional en la matriz y la resistencia química frente a medios agresivos. El rol principal de este tipo de fibra no es incrementar la carga máxima alcanzada por el material, sino proporcionar control de fisuración y una capacidad residual estable bajo grandes deflexiones.

La curva carga–deflexión mostró un primer pico (P_1) en torno a los 10 MPa, equivalente a 16.67 kN. Este valor se asocia con la aparición de la primera fisura en la matriz, a partir de la cual los filamentos PP/PE comenzaron a transferir los esfuerzos de tracción.

Cabe destacar que la primera fisura en las vigas con PP/PE se presentó a deflexiones cercanas a 150–200 μm , lo cual contrasta con las mezclas reforzadas con fibras rígidas como acero y basalto, en donde la fisuración inicial ocurrió alrededor de los 50 μm . Este retraso evidencia que los filamentos poliméricos permiten a la matriz experimentar una mayor deformación antes de movilizar su acción de puenteo. En términos prácticos, el PP/PE aporta una ductilidad inicial superior a lo visto en los refuerzos anteriores de acero y basalto, aunque con una capacidad de carga menor en el primer pico respecto a las fibras metálicas o minerales.

Inmediatamente después del pico, se registró una caída significativa hasta el rango de 6–7 MPa, seguida por un valle plano y prolongado que se extendió desde los $\sim 300 \mu\text{m}$ hasta los 3000 μm de deflexión. A diferencia de lo observado en el

acero, no se presentó endurecimiento por deformación; en cambio, la curva se estabilizó en un plateau casi constante, lo que refleja la limitada rigidez de los filamentos PP/PE y confirma que su contribución se centra en sostener la capacidad residual en lugar de recuperar carga.

Un aspecto particular fue la anomalía localizada alrededor de 1000 μm , donde la carga disminuyó de manera puntual hasta ~ 6.6 MPa, para luego recuperar su nivel en el valle residual. Este comportamiento puede atribuirse a la desintegración de un clúster de fibras mal distribuidas o a la coalescencia de una fisura principal que momentáneamente comprometió la capacidad portante, pero que se estabilizó gracias a la activación de fibras circundantes. La rápida recuperación tras este evento confirma que se trató de un fenómeno local, sin pérdida global de adherencia fibra–matriz.

En términos globales, el sistema PP/PE se caracteriza por una meseta estable y prolongada que opera a un nivel de carga menor que las fibras metálicas o minerales, e impide un colapso frágil como el observado en la mezcla control.

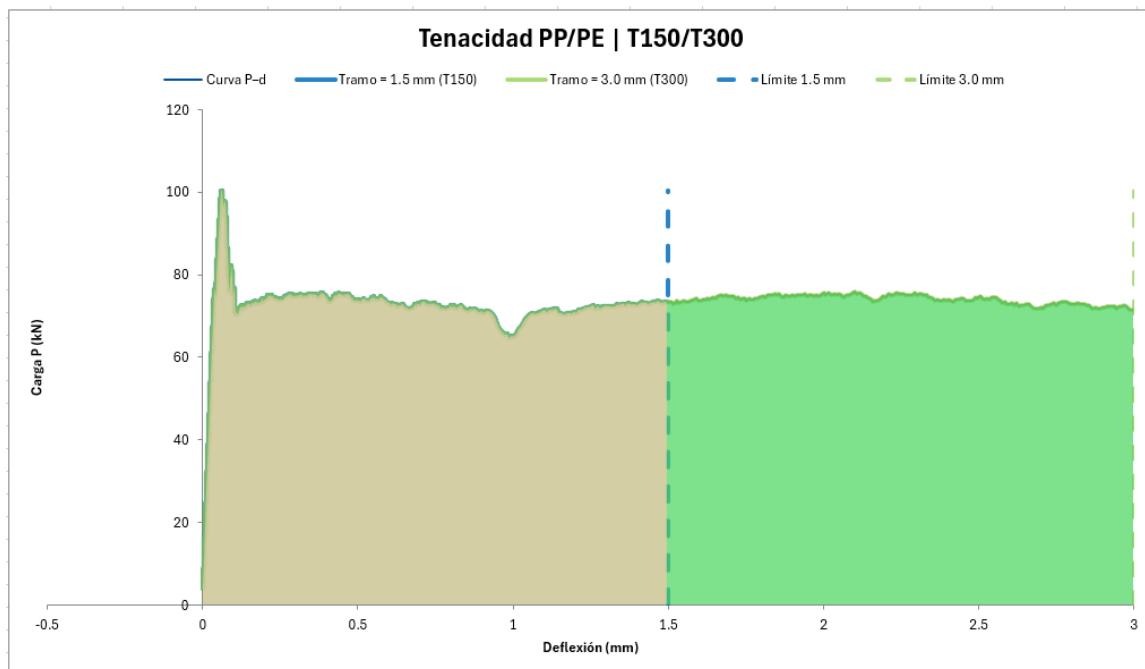


Fig. 35. Grafica de tenacidad para fibras de polipropileno/polietileno.

La tenacidad se cuantificó como el área bajo la curva carga–deflexión (energía absorbida durante la flexión), de acuerdo con ASTM C1609, empleando los índices T150 y T300, definidos como la integración hasta 1.5 mm y 3.0 mm de deflexión, respectivamente.

Para las fibras PP/PE, los resultados fueron:

- T150 = 17.8 N·m
- T300 = 36.1 N·m.

Estos valores describen con claridad el mecanismo de disipación característico de este refuerzo: la ausencia de endurecimiento por deformación tras el primer pico se compensa por una valle residual largo y estable ($\approx 7\text{--}8$ MPa) que se extiende desde $\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ hasta $\sim 3000\text{ }\mu\text{m}$. En términos de contribución a la energía:

En el primer tramo (0–1.5 mm), la energía es moderada–alta (T150 = 17.8 N·m), pese a la caída posfisuración, gracias a que el valle plano aparece temprano y se mantiene con baja variabilidad;

En el segundo tramo (1.5–3.0 mm), el sistema sigue acumulando energía (T300 – T150 ≈ 18.3 N·m), evidenciando que la longitud del plateau es la responsable principal del saldo energético total, más que la “altura” de carga.

Esta lectura se corrobora al comparar con otras fibras: respecto a acero (T150 ≈ 21.5 N·m; T300 ≈ 36.8 N·m), el PP/PE alcanza $\approx 83\%$ en T150 y $\approx 98\%$ en T300, es decir, casi iguala la energía total a 3 mm sin necesidad de un endurecimiento por deformación, únicamente por la extensión del plateau. Frente a PVA (T150 ≈ 13.6 N·m; T300 ≈ 24.9 N·m), el PP/PE resulta $\approx 31\%$ mayor en T150 y $\approx 45\%$ mayor en T300, lo que subraya su ventaja en acumulación de energía a grandes

deflexiones. También supera a basalto ($T_{150} \approx 11.8 \text{ N}\cdot\text{m}$; $T_{300} \approx 22.4 \text{ N}\cdot\text{m}$) en $\approx 51 \%$ y $\approx 61 \%$, respectivamente.

En síntesis, la tenacidad del PP/PE no proviene de recuperar carga tras el primer pico (como en acero), sino de sostener una capacidad residual estable durante deflexiones amplias. Esta configuración resulta especialmente valiosa para control de fisuración y ductilidad aparente en servicio, aun cuando el nivel de carga residual sea inferior al de fibras rígidas.

La capacidad de absorción de energía quedó reflejada en los valores de tenacidad (T_{150} y T_{300}):

- $T_{150} = 17.8 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $T_{300} = 36.1 \text{ N}\cdot\text{m}$

Estos resultados muestran que, aunque la fibra PP/PE no incrementa la carga máxima, sí permite acumular energía durante grandes deflexiones,. La respuesta puede interpretarse como un balance entre menor altura del pico de carga y mayor longitud de deformación, lo que genera un área significativa bajo la curva carga–deflexión.

En comparación con el acero, la mezcla con PP/PE carece de endurecimiento por deformación y presenta menor capacidad de carga, pero ofrece un esfuerzo residual más regular y uniforme. Frente al basalto, los valores de tenacidad son inferiores, aunque el desempeño del PP/PE destaca por la estabilidad continua del valle y por la ausencia de problemas de corrosión.

De manera crítica, la diferencia más relevante es el momento en que ocurre la primera fisura: mientras acero y basalto concentran la fractura inicial alrededor de los $50 \mu\text{m}$ con una mayor capacidad de carga, el PP/PE la retrasa hasta los $150\text{--}200 \mu\text{m}$, ofreciendo una deformación inicial mayor antes de la pérdida de rigidez.

En términos prácticos, estas fibras sintéticas representan una alternativa útil para aplicaciones en las que el control de fisuración temprana, la durabilidad química y la ductilidad aparente sean prioritarias, aun cuando su aporte a la resistencia residual sea más limitado que el de las fibras rígidas.

Fibra de PVA

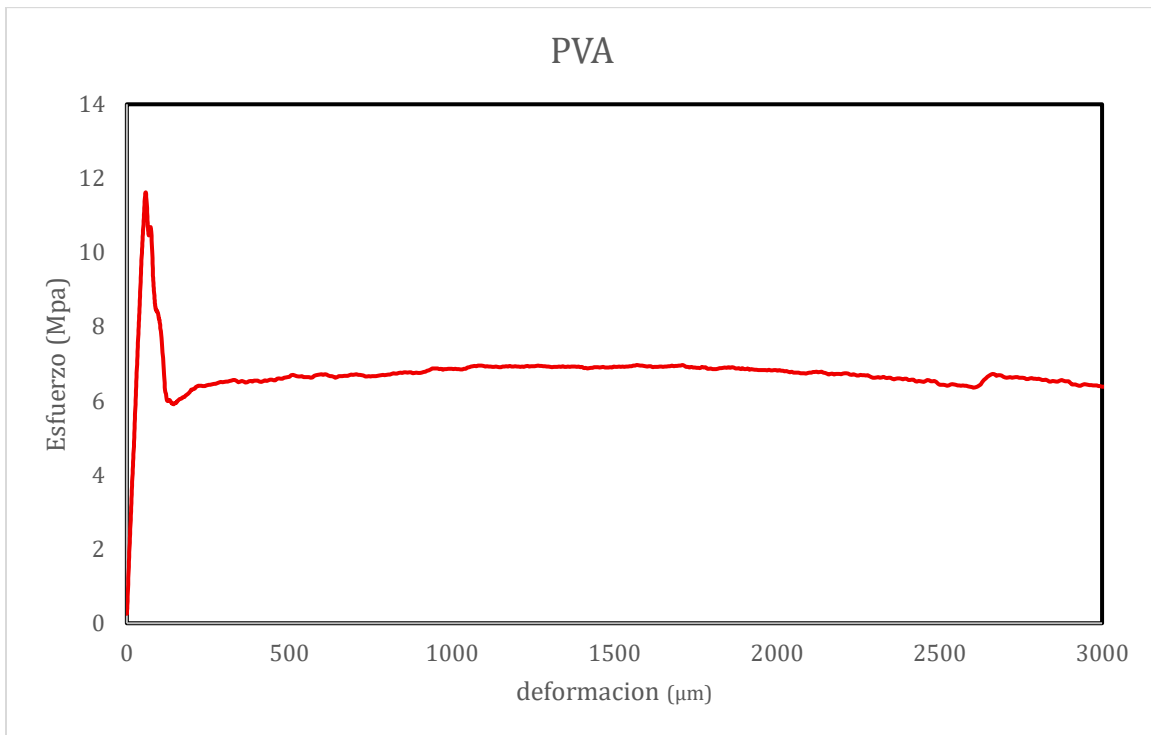


Fig. 36. Grafica de flexión UHPC con fibras de PVA.

Tabla 27. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de PVA.

Parámetro	Valor promedio
P₁ (kN)	11.62
P_p (kN)	11.62
T150 (N·m)	13.6
T300 (N·m)	24.9

La mezcla reforzada con fibras de alcohol polivinílico (PVA) al 2 % en volumen mostró un comportamiento característico derivado de la naturaleza sintética e hidrofílica de este material. Estas fibras, provistas en forma de filamentos monofilamento rectos, con diámetro de 200 μm , longitud de 18 mm y módulo elástico de 7.1 GPa, presentan una afinidad química elevada con la matriz cementicia, lo que se traduce en una capacidad efectiva de puenteo de microfisuras y en una interacción más estable con la pasta en comparación con fibras inertes como el PP/PE.

En la curva de flexión, el primer pico ($P_1 = 11.62 \text{ kN}$) coincidió con el valor máximo alcanzado (P_p) como lo reportado en todos los casos anteriores y lo esperado para concretos de ultra alto desempeño, con la fisuración inicial registrada alrededor de 70–80 μm de deflexión, similar a lo observado en acero y basalto ($\sim 50 \mu\text{m}$) y sensiblemente menor al PP/PE ($\sim 150\text{--}200 \mu\text{m}$). Esto refleja la rápida transferencia de esfuerzos desde la matriz hacia los filamentos PVA, consecuencia de su fuerte adherencia superficial.

Posterior al primer pico, se observó una caída abrupta de la carga hasta valores cercanos a 7–8 MPa, seguida por un esfuerzo residual descendente que se prolongó entre $\sim 500 \mu\text{m}$ y 2500–3000 μm . A diferencia del acero, no se presentó endurecimiento por deformación, sino un valle relativamente estable con tendencia decreciente. Esta forma de la curva indica que el PVA no aporta rigidez adicional tras la fisuración, pero sí logra mantener una resistencia residual moderada y continua, sin anomalías bruscas como las registradas en PP/PE alrededor de los 1000 μm .

Hacia el final del ensayo ($\approx 3 \text{ mm}$), la curva evidenció una reducción gradual (softening), alcanzando todavía entre 65–70 % de la carga máxima inicial, lo que confirma un comportamiento cuasi-dúctil y con disipación estable de energía.

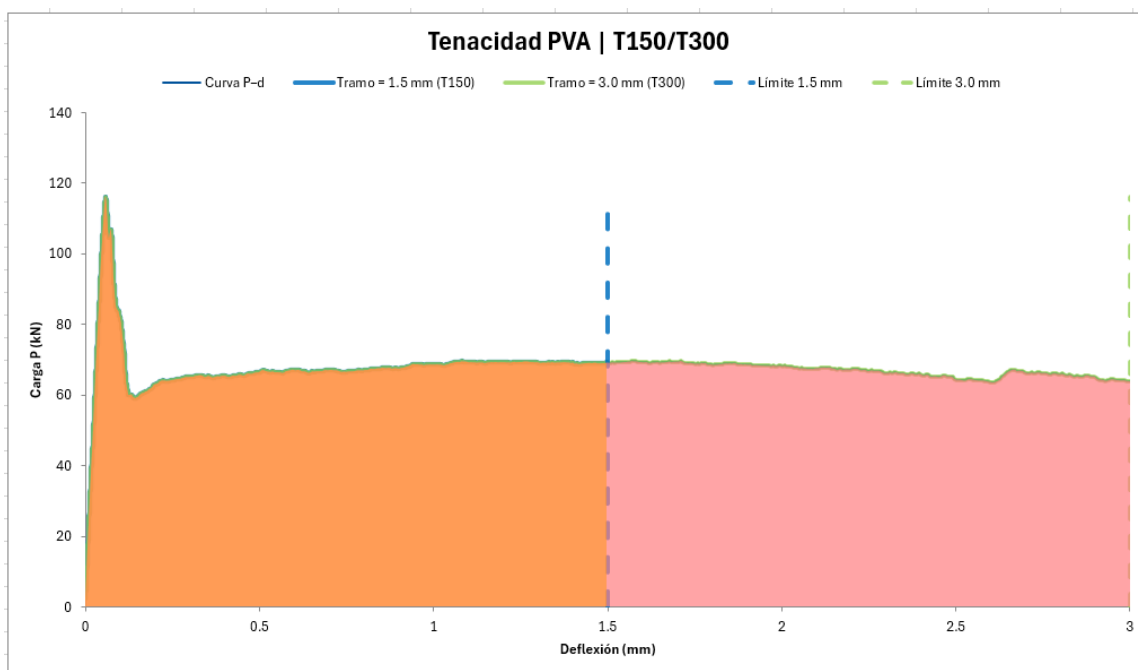


Fig. 37. Grafica de tenacidad para fibras de PVA.

La tenacidad se evaluó como el área bajo la curva carga–deflexión conforme a ASTM C1609, mediante los índices T150 y T300, que representan la energía absorbida hasta deflexiones de 1.5 mm y 3.0 mm, respectivamente.

Para la mezcla con PVA se obtuvieron valores de:

- T150 = 13.6 N·m
- T300 = 24.9 N·m

Estos valores demuestran que, aunque la fibra PVA no alcanza la elevada acumulación energética del acero (T150 = 21.5 N·m, T300 = 36.8 N·m) ni la extensión del plateau del PP/PE (T150 = 17.8 N·m, T300 = 36.1 N·m), sí proporciona una tenacidad intermedia, caracterizada por una absorción estable y progresiva de energía sin pérdidas súbitas.

La energía absorbida en el primer tramo (0–1.5 mm) refleja la fisuración temprana y controlada promovida por la alta adherencia de la fibra, mientras que en el

segundo tramo (1.5–3.0 mm) se confirma una capacidad sostenida de disipación, con incrementos de ~11 N·m adicionales.

En términos comparativos, la mezcla con fibras de PVA mostró un desempeño intermedio frente al resto de los refuerzos evaluados. Al igual que acero y basalto, la fisuración inicial ocurrió de manera temprana (~70 μm), aunque con una capacidad de carga menor y sin presentar endurecimiento por deformación.

En contraste con el PP/PE, que retrasó la primera fisura hasta los 150–200 μm pero exhibió anomalías localizadas en el plateau, el PVA ofreció un comportamiento más uniforme y continuo, con absorción de energía progresiva y sin caídas abruptas.

Si bien sus valores de tenacidad ($T_{150} = 13.6 \text{ N}\cdot\text{m}$; $T_{300} = 24.9 \text{ N}\cdot\text{m}$) se ubicaron por debajo de los alcanzados por acero, basalto y PP/PE, la mezcla con PVA destacó por la regularidad en su disipación energética y por su capacidad de promover un patrón de microfisuración controlada, lo que refuerza su valor como alternativa en aplicaciones donde el control de agrietamiento y la durabilidad química son prioritarios, aun sin alcanzar la resistencia residual robusta de las fibras metálicas o minerales.

Fibra de Vidrio

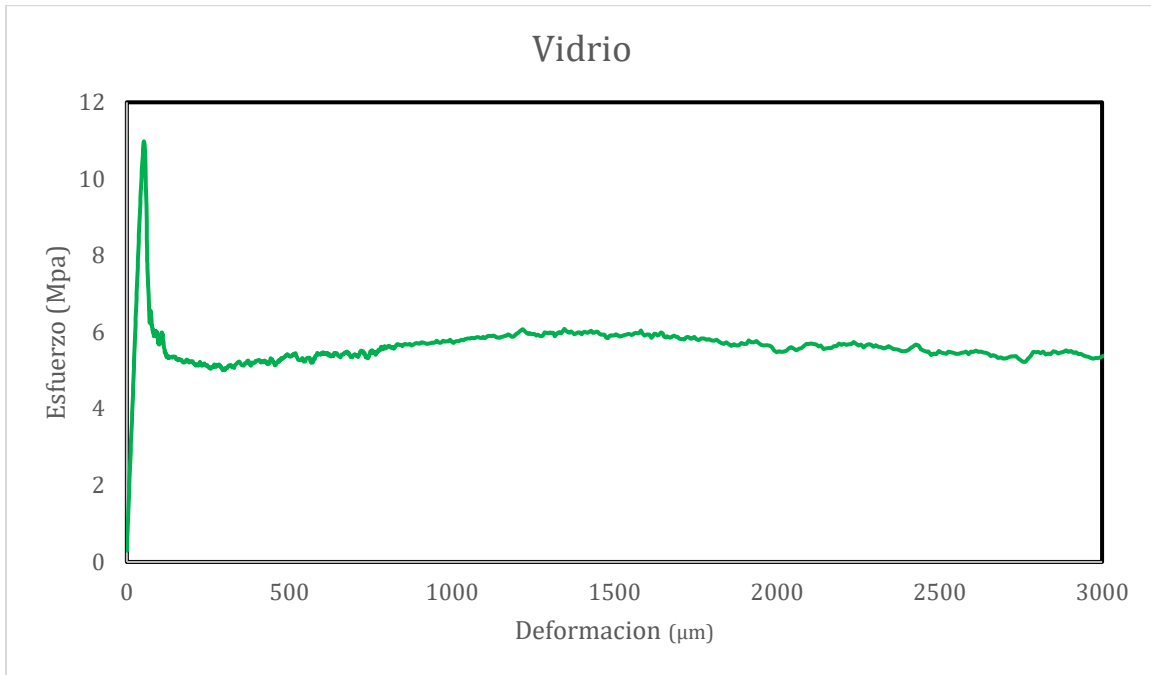


Fig. 38. Grafica de flexión UHPC con fibras de vidrio.

Tabla 28. Primer pico, pico máximo, T150 y T300 para fibras de vidrio.

Parámetro	Valor promedio
P₁ (kN)	10.98
P_p (kN)	10.98
T150 (N·m)	12.5
T300 (N·m)	20.6

La mezcla reforzada con fibras de vidrio AR (Alkali Resistant) al 2 % en volumen presentó un comportamiento diferenciado, marcado por la fragilidad inherente de este material, pero también por su buena adherencia superficial con la matriz gracias al recubrimiento de circonio que mejora su resistencia en medios alcalinos. Estas fibras, con diámetros cercanos a 18 μm , longitudes de 13–19 mm y relaciones de aspecto superiores a 700, poseen un módulo elástico elevado (~ 70 GPa), comparable al de fibras minerales como el basalto, aunque con una

resistencia a tracción menor y una naturaleza quebradiza que condiciona su aporte en la fase post-fisuración.

La curva carga–deflexión evidenció un primer pico ($P_1 = 10.98$ kN). La primera fisura se registró alrededor de los 70–80 μm , en un rango similar al de PVA y cercano a acero y basalto (~ 50 μm), lo que indica una respuesta inicial rápida en la transferencia de esfuerzos.

Después del pico, se observó una caída pronunciada hasta valores residuales de 6–7 MPa, sin que apareciera un endurecimiento por deformación posterior. A partir de los ~ 300 μm , la curva mostró un valle corto y descendente, en el rango de 6–7.5 MPa, que se prolongó hasta cerca de 2000–2500 μm . Hacia el final del ensayo (≈ 3 mm), el material mantuvo únicamente entre 55–60 % de la carga inicial, reflejando la fragilidad relativa del vidrio en comparación con las fibras metálicas y minerales más rígidas.

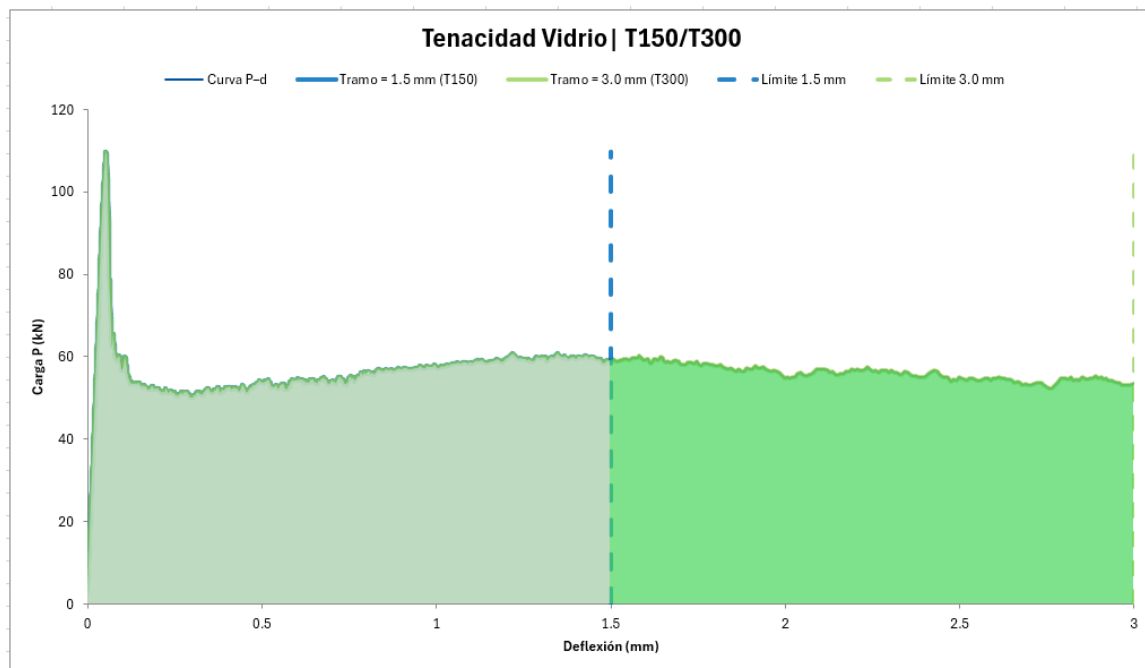


Fig. 39. Grafica de tenacidad para fibras de vidrio.

La tenacidad, evaluada como el área bajo la curva conforme a ASTM C1609, arrojó valores de:

- **T150 = 12.5 N·m**
- **T300 = 20.6 N·m**

Estos resultados ubican al vidrio como la fibra con la menor capacidad de absorción de energía entre todas las analizadas, superando apenas al control sin fibras. El tramo inicial (0–1.5 mm) evidencia que, aunque la adherencia superficial de la fibra permitió sostener carga tras la fisuración, la energía acumulada fue limitada ($T150 = 12.5 \text{ N}\cdot\text{m}$). En el tramo de 1.5–3.0 mm, la contribución adicional fue reducida ($T300 - T150 \approx 8 \text{ N}\cdot\text{m}$), confirmando que la extensión del esfuerzo residual no es suficiente para compensar la caída inicial.

En términos comparativos, la mezcla con fibras de vidrio se posiciona en el extremo inferior de desempeño. Frente a acero y basalto, el vidrio alcanzó un pico inicial similar en magnitud, pero con una pérdida mucho más rápida de resistencia residual y sin capacidad de sostener mesetas prolongadas. Respecto al PVA, sus valores de tenacidad fueron incluso menores, evidenciando una disipación energética limitada y un esfuerzo residual mínimo.

Finalmente, frente al PP/PE, el vidrio mostró una respuesta menos estable y menos tenaz, sin el beneficio de un plateau largo y continuo como se observó en los refuerzos previamente estudiados. Con $T150 = 12.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $T300 = 20.6 \text{ N}\cdot\text{m}$, la fibra de vidrio confirma su aporte principalmente en la fase temprana de fisuración, con ventajas como la resistencia química y la ausencia de corrosión, pero con claras limitaciones en términos de resistencia residual y capacidad de absorción de energía, lo que restringe su aplicación a contextos donde la durabilidad y el control estético de fisuras finas sean más relevantes que la ductilidad estructural.

3.3 Discusión integrada

La evaluación comparativa de las mezclas reforzadas con diferentes tipos de fibras permite identificar los mecanismos particulares de cada refuerzo y establecer un panorama integral sobre su influencia en el comportamiento post-fisuración del material estudiado. Mientras que las secciones anteriores analizaron en detalle cada fibra de manera individual, en este apartado se integran los resultados para contrastar su desempeño en términos de resistencia inicial, respuesta posfisuración, tenacidad y potencial de aplicación estructural.

Los resultados mostraron que todas las mezclas con fibras alcanzaron cargas iniciales superiores a la mezcla control (7.10 kN), confirmando la eficacia del refuerzo en la matriz. El acero (11.90 kN), basalto (11.90 kN) y PVA (11.62 kN) presentaron los valores más altos y similares, mientras que el vidrio (10.98 kN) se ubicó ligeramente por debajo. El PP/PE alcanzó un primer pico de 7.65 kN, pero posteriormente recuperó capacidad hasta un segundo máximo de 10.05 kN.

En términos de deflexión, las fibras rígidas como acero y basalto fisuraron muy temprano alrededor de las 50 μm , mientras que el PVA y el vidrio lo hicieron alrededor de 70–80 μm , y el PP/PE retrasó la aparición de la primera fisura hasta los 150–200 μm . Este comportamiento es consistente con lo reportado en literatura, donde se señala que fibras poliméricas retrasan la fisuración inicial al permitir mayor deformación antes del puenteo [25, 61].

En la etapa posterior a la fisuración se observaron contrastes claros.

El acero fue el único refuerzo que mostró un endurecimiento por deformación, recuperando hasta el 90 % de la carga tras el valle inicial y sosteniendo un plateau estable en torno al 75–80 % del pico hasta deflexiones cercanas a 3 mm [16, 22, 40].

El basalto exhibió un desempeño intermedio, con una recuperación parcial tras el primer pico y un esfuerzo residual prolongado en el rango de 8.5–9.0 MPa, confirmando lo señalado en investigaciones previas sobre su desempeño estable en matrices cementicias densas [33, 34].

El PVA, en contraste, no mostró endurecimiento por deformación. Tras un descenso inicial, la curva se estabilizó en un valle descendente de 7–8 MPa, manteniendo una resistencia residual moderada hasta el final del ensayo. Este comportamiento está asociado a su fuerte adherencia superficial que controla la microfisuración temprana, aunque con menor capacidad de sostener cargas a grandes deflexiones [25, 61].

El PP/PE presentó un comportamiento distintivo: tras el primer pico, experimentó una caída abrupta, pero estableció un valle plano prolongado en el rango de 7–8 MPa que se extendió hasta los 3000 μm . Una anomalía localizada alrededor de los 1000 μm reflejó la ruptura de un clúster de fibras o la coalescencia de una fisura, pero la rápida recuperación mostró que el refuerzo logró estabilizar el sistema. Este tipo de respuesta ha sido reportado en mezclas con fibras sintéticas de baja densidad [63].

El vidrio, por su parte, mostró la mayor fragilidad relativa: después del primer pico, la caída fue más marcada y el esfuerzo residual más corto, manteniendo solo un 55–60 % de la carga inicial al final del ensayo. Esto coincide con lo descrito en la literatura respecto a la naturaleza quebradiza de las fibras AR [66, 67].

Tabla 29. Tabla de valores primer pico, pico máximo T150 y T300 para todas las fibras.

Fibra	P ₁ (kN)	Pp (kN)	T150 (N·m)	T300 (N·m)
Control	7.10	7.10	–	–
Acero	11.90	11.90	21.5	36.8
Basalto	11.90	11.90	11.8	22.4
PP/PE	7.65	10.05	17.8	36.1
PVA	11.62	11.62	13.6	24.9
Vidrio	10.98	10.98	12.5	20.6

La comparación de los índices de tenacidad confirma estas tendencias. El acero alcanzó los valores más altos (T150 = 21.5 N·m; T300 = 36.8 N·m), evidenciando tanto la elevada capacidad inicial como la prolongación del valle de esfuerzo residual [16, 42]. El PP/PE, aunque partió de un pico bajo, acumuló energía de manera sostenida y alcanzó valores cercanos al acero (T150 = 17.8 N·m; T300 = 36.1 N·m), gracias a la extensión del plateau.

El basalto mostró una tenacidad intermedia (T150 = 11.8 N·m; T300 = 22.4 N·m), en línea con lo reportado en estudios previos [33, 34]. El PVA se posicionó ligeramente por encima del basalto en T150 (13.6 N·m), pero quedó por debajo en T300 (24.9 N·m), lo que indica que su contribución es más relevante en deflexiones pequeñas y medias. Finalmente, el vidrio fue el refuerzo con menor acumulación energética (T150 = 12.5 N·m; T300 = 20.6 N·m), ubicándose apenas por encima de la mezcla control, lo que confirma lo señalado por otros autores sobre su aportación limitada a la tenacidad global [66, 67].

Los resultados permiten agrupar los refuerzos en tres categorías de desempeño:

- Referencia superior: el acero, que combina alta capacidad inicial, endurecimiento por deformación y máxima tenacidad, constituyendo la

opción más robusta pero también la más costosa y susceptible a corrosión [16, 40, 42].

- Alternativas intermedias: el basalto y el PVA, que, aunque no alcanzan los valores del acero, garantizan resistencia residual y tenacidad moderada con ventajas de durabilidad química (basalto) y control de microfisuración (PVA) [25, 33, 34].
- Alternativas sintéticas: el PP/PE, que destaca por un plateau prolongado y una acumulación energética casi equivalente al acero, aunque con un nivel de carga residual menor [63]; y el vidrio, cuya principal virtud es la resistencia a la corrosión, pero cuyo aporte mecánico es limitado [66, 67].

Desde una perspectiva estructural, el acero continúa siendo el estándar para aplicaciones donde la ductilidad y la resistencia residual son críticas. Sin embargo, fibras como el basalto y el PVA representan opciones viables en contextos donde la durabilidad o el control de microfisuración sean prioritarios. El PP/PE destaca como un refuerzo no metálico prometedor, capaz de acumular energía de manera competitiva, mientras que el vidrio se perfila más como un complemento estético y químicamente durable, pero de menor contribución estructural.

Capítulo 4 – Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones principales

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito central evaluar el efecto de distintos tipos de fibras (acero, PVA, PP/PE, vidrio y basalto) en mezclas de concreto de ultra-alto desempeño (UHPC), formuladas a partir de materiales disponibles en la región de Monterrey y con la incorporación de vidrio de borosilicato como filler alternativo. La hipótesis planteada al inicio proponía que el uso de este filler, en combinación con fibras no metálicas y metálicas, permitiría desarrollar un UHPC con comportamiento mecánico y reológico diferenciado,

donde alguna de las formulaciones lograra un equilibrio entre resistencia, tenacidad, trabajabilidad y sostenibilidad.

Con base en los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, es posible afirmar que la hipótesis fue confirmada en términos generales, ya que se alcanzaron resistencias mecánicas y comportamientos post-fisuración competitivos con lo reportado en la literatura internacional, validando la viabilidad técnica del UHPC con recursos locales.

En relación con el objetivo general, se logró evaluar experimentalmente la influencia de cada fibra bajo condiciones homogéneas de mezcla y ensayo, siguiendo metodologías estandarizadas como ASTM C1609. Los objetivos específicos también fueron cumplidos de manera satisfactoria:

1. Se diseñaron y prepararon mezclas UHPC manteniendo una matriz base constante y variando únicamente el tipo de fibra incorporada.
2. Se caracterizó el comportamiento en estado fresco (peso unitario, contenido de aire, extensibilidad y parámetros reológicos), observando el impacto diferenciado de cada refuerzo.
3. Se determinaron las propiedades en estado endurecido (compresión y flexión), cuantificando parámetros clave como carga inicial (P_1), carga máxima (P_p), resistencia residual, y tenacidades T150 y T300.
4. Se comparó el desempeño de las mezclas con respecto a la mezcla control y entre sí, identificando tendencias y ventajas particulares en cada tipo de fibra.

5. Finalmente, se propusieron las fibras más adecuadas para distintos escenarios de aplicación, atendiendo criterios de desempeño mecánico, trabajabilidad y durabilidad.

En cuanto a las **propiedades en estado fresco**, los resultados confirmaron que la matriz base diseñada fue autocompactable y estable, alcanzando valores de extensibilidad sin muestra de segregaciones o asentamientos mayores a 200 mm en la mayoría de las mezclas, con excepción de aquellas reforzadas con acero y PVA, donde la presencia de fibras rígidas redujo significativamente la fluidez, pero que no representa un problema importante, puesto que al optimizar el consumo de suplerplastificante, se puede trabajar el tema de la extensibilidad de las mezclas descritas en específico.

El esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica, determinados con reómetro, aumentaron en todos los casos con la incorporación de fibras, siendo más pronunciados en acero y PVA debido a su mayor rigidez y densidad, y más moderados en PP/PE, basalto y vidrio. Estos hallazgos confirman lo señalado en literatura, donde la naturaleza del refuerzo modifica de manera directa la reología de las mezclas UHPC, con implicaciones para su bombeo y colocación en obra.

Respecto a las **propiedades en compresión**, todas las mezclas reforzadas superaron ampliamente los 120 MPa a los 90 días, consolidándose dentro de la clasificación de UHPC. A los 28 días, los valores oscilaron entre 66 y 77 MPa, con el acero y el basalto como los refuerzos que alcanzaron mayor resistencia y homogeneidad estadística ($CV < 1.5 \%$).

A los 90 días, se observaron incrementos notables en todas las mezclas, atribuibles al efecto puzolánico del vidrio de borosilicato incorporado como filler, alcanzando hasta 127 MPa en la mezcla con acero. Este comportamiento confirma la importancia del filler vítreo como sustituto parcial y viable de la

microsílice, reduciendo la huella ambiental y al mismo tiempo favoreciendo la ganancia de resistencia a largo plazo.

En la evaluación a flexión (ASTM C1609) se identificaron comportamientos contrastantes. La mezcla control evidenció un desempeño frágil tras la primera fisura, mientras que todas las mezclas con fibras lograron mantener capacidad portante posterior al pico inicial, confirmando la función esencial del refuerzo discreto.

El acero destacó como la referencia superior, mostrando endurecimiento por deformación, meseta estable y valores máximos de tenacidad ($T_{150} = 21.5 \text{ N}\cdot\text{m}$; $T_{300} = 36.8 \text{ N}\cdot\text{m}$).

El basalto exhibió un comportamiento intermedio, con recuperación parcial tras la fisuración y un plateau estable que garantizó resistencia residual significativa ($T_{150} = 11.8 \text{ N}\cdot\text{m}$; $T_{300} = 22.4 \text{ N}\cdot\text{m}$).

El PVA se posicionó como un refuerzo sintético con desempeño intermedio, caracterizado por una fisuración temprana y controlada, un valle descendente pero estable, y tenacidades de 13.6 y 24.9 $\text{N}\cdot\text{m}$ en T_{150} y T_{300} , respectivamente.

El PP/PE mostró un comportamiento distintivo: aunque partió de un pico inicial bajo (7.65 kN), desarrolló un plateau prolongado y estable en torno a 7–8 MPa que se extendió hasta los 3000 μm , alcanzando valores de tenacidad casi equivalentes al acero ($T_{150} = 17.8 \text{ N}\cdot\text{m}$; $T_{300} = 36.1 \text{ N}\cdot\text{m}$).

Este hallazgo resulta de particular relevancia, pues demuestra que fibras no metálicas pueden proporcionar un nivel de acumulación energética competitivo, gracias a la extensión del esfuerzo residual, aun sin presentar endurecimiento por deformación.

Por su parte, el vidrio registró el desempeño más limitado, con un plateau corto, caída más pronunciada y tenacidades de 12.5 y 20.6 N·m, confirmando que su principal contribución se concentra en la fase inicial de la fisuración y que su uso debe restringirse a aplicaciones donde prime la durabilidad química y el control estético de fisuras finas.

Al integrar estos resultados, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- El acero se mantiene como el refuerzo de referencia, garantizando la mayor resistencia residual, tenacidad y ductilidad, aunque con las desventajas asociadas a su costo y riesgo de corrosión.
- El basalto constituye una alternativa mineral intermedia, con buen desempeño mecánico y ventajas en durabilidad, lo que lo posiciona como opción viable en aplicaciones de exposición agresiva.
- El PVA aportó un comportamiento uniforme y estable, con microfisuración controlada y valores intermedios de tenacidad, adecuado para aplicaciones donde el control de grietas finas sea prioritario, considerando a trabajos futuros su uso únicamente para el control de contracciones por secado o autógenas propias de la naturaleza del material.
- El PP/PE demostró ser un refuerzo no metálico prometedor, capaz de acumular energía comparable al acero mediante la extensión del plateau, ofreciendo además ventajas en términos de resistencia química y ausencia de corrosión.
- El vidrio, si bien mostró limitaciones claras en capacidad residual y tenacidad, constituye un refuerzo químicamente durable y económico, cuya principal virtud es el control de fisuración temprana.

- El uso de vidrio de borosilicato como filler fue validado como estrategia técnica y sostenible, contribuyendo a la ganancia de resistencia a largo plazo y a la reducción en el consumo de microsílice.

En síntesis, los resultados de esta investigación confirman que es posible producir un UHPC competitivo utilizando materiales locales y fibras alternativas, adaptando la tecnología internacional a las condiciones de Monterrey.

Se cumplieron los objetivos planteados y se validó la hipótesis, demostrando que la selección del tipo de fibra determina de manera decisiva el comportamiento post-fisuración y que existen opciones no metálicas con potencial para sustituir o complementar al acero en aplicaciones específicas. Estos hallazgos no solo aportan conocimiento técnico, sino que también sientan bases para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas orientadas a una implementación sostenible y económicamente viable del UHPC en la región.

4.2 Limitaciones del estudio

Aunque la presente investigación alcanzó los objetivos planteados y permitió validar la hipótesis, es importante reconocer una serie de limitaciones metodológicas y experimentales que condicionan el alcance de los resultados y abren la puerta a futuras investigaciones.

En primer lugar, todas las mezclas fueron evaluadas con un contenido fijo de fibras del 2 % en volumen, lo cual se definió con base en valores de referencia comúnmente reportados en la literatura para UHPC. Sin embargo, no se exploraron variaciones en el contenido volumétrico ni en la combinación de diferentes tipos de fibras.

Este aspecto representa una limitación, ya que estudios previos han demostrado que la respuesta post-fisuración puede variar significativamente al ajustar el

volumen de fibras entre 1 y 3 %, así como al combinar fibras metálicas y no metálicas en sistemas híbridos. La decisión metodológica de mantener constante el volumen buscó aislar el efecto del tipo de fibra, pero al mismo tiempo restringió la posibilidad de identificar configuraciones optimizadas en términos de costo-beneficio y desempeño estructural.

En segundo lugar, los ensayos realizados se enfocaron principalmente en propiedades mecánicas de compresión y flexión bajo ASTM C1609, lo que permitió caracterizar el comportamiento post-fisuración y cuantificar la tenacidad.

Sin embargo, no se evaluaron parámetros de durabilidad a largo plazo, como permeabilidad a cloruros, resistencia a ciclos de congelamiento-descongelamiento, carbonatación o comportamiento frente a ataques químicos severos. Si bien la literatura reconoce que el UHPC presenta en general un desempeño sobresaliente en estas áreas, la ausencia de ensayos específicos en este estudio limita la capacidad de extrapolar los resultados hacia escenarios de exposición real.

Otra limitación relevante está vinculada a las condiciones de curado adoptadas. Todos los especímenes fueron sometidos a curado en agua a temperatura controlada de laboratorio (23 ± 2 °C), condición que garantiza comparabilidad entre mezclas pero que no refleja de manera completa las variaciones que pueden ocurrir en ambientes reales de obra. La falta de ensayos con curados acelerados (como vapor, calor húmedo o autoclave) restringe también la comparación directa con resultados internacionales que reportan resistencias superiores bajo esas condiciones.

Asimismo, los ensayos se realizaron en especímenes de laboratorio de escala reducida (cubos de 50 mm para compresión y vigas de 100×100×400 mm para flexión). Si bien estos tamaños están contemplados en normativas internacionales y son ampliamente utilizados en investigación, representan un escenario

controlado que no necesariamente refleja la complejidad del comportamiento a escala estructural. Factores como la orientación de fibras en elementos de gran tamaño, la influencia del colado en geometrías reales y la presencia de refuerzo convencional podrían modificar el desempeño del UHPC en campo.

Finalmente, se debe señalar que el análisis experimental estuvo orientado principalmente al comportamiento mecánico a corto y mediano plazo (hasta 90 días). Aunque se observaron efectos tardíos benéficos asociados al filler de vidrio de borosilicato, no se extendió la investigación a edades superiores ni a condiciones de servicio prolongado. Esto deja abierta la necesidad de validar la estabilidad microestructural y la evolución de propiedades en horizontes de tiempo más amplios, particularmente si se busca implementar el material en aplicaciones de infraestructura con una vida útil esperada de más de 50 años.

En resumen, las limitaciones de este estudio se relacionan con la constancia del volumen de fibras, la falta de ensayos de durabilidad y de campo, las condiciones de curado controladas de laboratorio, la escala reducida de los especímenes y el horizonte temporal limitado de evaluación. Estas consideraciones no invalidan los hallazgos alcanzados, pero sí delimitan su alcance y subrayan la importancia de continuar con investigaciones complementarias que permitan consolidar y expandir los resultados obtenidos en este trabajo.

4.3 Recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas

Derivado de las limitaciones señaladas y de los hallazgos alcanzados en esta investigación, se plantean una serie de recomendaciones orientadas a fortalecer el conocimiento sobre el UHPC reforzado con fibras y a facilitar su implementación en el contexto local.

En primer lugar, se recomienda ampliar el rango de volúmenes de fibra evaluados, considerando proporciones entre 1 % y 3 % en volumen, así como la exploración de sistemas híbridos que combinen fibras metálicas y no metálicas. Diversos estudios han demostrado que este tipo de configuraciones puede generar efectos sinérgicos, logrando al mismo tiempo alta resistencia residual y control de microfisuración fina.

El presente trabajo optó por mantener un volumen fijo de 2 % para garantizar comparabilidad, pero la búsqueda de configuraciones más eficientes en costo y desempeño constituye un paso lógico en etapas posteriores.

En segundo término, resulta esencial incorporar ensayos de durabilidad a largo plazo. Aunque la literatura reconoce el desempeño sobresaliente del UHPC en ambientes agresivos, validar experimentalmente estas propiedades con materiales locales es fundamental para asegurar su adopción en la industria. Se recomienda incluir pruebas de permeabilidad a cloruros, absorción capilar, resistencia a carbonatación, ciclos de congelamiento-descongelamiento y exposición a sulfatos o ambientes marinos, con el fin de establecer la idoneidad de cada tipo de fibra frente a condiciones de servicio reales.

También se sugiere realizar estudios bajo diferentes regímenes de curado, incluyendo vapor, calor húmedo y autoclave, a fin de comparar el desarrollo de resistencias y tenacidad frente al curado convencional en agua empleado en este trabajo. Esto permitirá identificar alternativas de curado viables para contextos industriales y prefabricados, donde los tiempos de producción y la optimización de propiedades a edades tempranas son determinantes.

Otra línea de investigación relevante es la validación a escala estructural. Los resultados de laboratorio con vigas y cubos pequeños ofrecen información comparativa confiable, pero no sustituyen la complejidad del comportamiento en elementos reales. Ensayos en paneles, losas, vigas de mayor dimensión o

conexiones prefabricadas permitirán evaluar aspectos como la orientación de fibras, la distribución en colados de gran volumen y la interacción con refuerzo convencional de acero. Estas pruebas son particularmente necesarias para acercar el UHPC con fibras alternativas a aplicaciones de infraestructura en el contexto mexicano.

En paralelo, se recomienda continuar explorando el potencial del vidrio de borosilicato como filler alternativo, tanto en porcentajes de sustitución variables como en combinación con otros cementantes suplementarios (cenizas, escorias, metacaolín). Su uso no solo contribuye a la reducción del consumo de cemento y de microsílíce importada, sino que también promueve una estrategia de economía circular al aprovechar un residuo industrial local. Profundizar en la caracterización de su reactividad, variaciones composicionales y efectos a largo plazo consolidará la evidencia para su adopción en la industria.

Finalmente, para impulsar la aplicación práctica del UHPC en Monterrey y en México, será necesario vincular los resultados académicos con la industria de la construcción y con organismos normativos. El desarrollo de guías técnicas locales, basadas en ensayos experimentales con materiales regionales, permitirá reducir la dependencia de especificaciones internacionales que en ocasiones resultan poco adaptables a nuestras condiciones. Además, la difusión de casos piloto a nivel de obra contribuirá a generar confianza entre proyectistas y contratistas en torno a la viabilidad de este material.

En conclusión, las recomendaciones aquí expuestas buscan dar continuidad al presente trabajo, ampliando su alcance experimental, consolidando su pertinencia técnica y favoreciendo su transición hacia aplicaciones reales. Con estas acciones, el UHPC reforzado con fibras y optimizado con recursos locales podrá avanzar desde el laboratorio hacia proyectos de infraestructura y edificación, contribuyendo tanto a la innovación tecnológica como a la sostenibilidad de la construcción en la región.

Referencias Bibliográficas

- [1] Kravanja G, Mumtaz AR, Kravanja S. A Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, Properties, Innovations, Environmental Impact and Applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Buildings*. 2024;14(2):382.
- [2] Ullah R, Qiang Y, Ahmad J, Vatin NI, El-Shorbagy MA. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials*. 2022;15(22):4131.
- [3] Yang J, Chen B, Su J, Xu G, Zhang D, Zhou J. Effects of Fibers on the Mechanical Properties of UHPC: A Review. *J. Traffic Transp. Eng.* 2022;9:363–387.
- [4] Amran M, Huang SS, Onaizi AM, Makul N, Abdelgader HS, Ozbakkaloglu T. Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Constr. Build. Mater.* 2022;352:129029.
- [5] Akeed MH, Qaidi S, Ahmed HU, Faraj RH, Majeed SS, Mohammed AS, Emad W, Tayeh BA, Azevedo ARG. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part V: Mixture design, preparation, mixing, casting, and curing. *Case Stud. Constr. Mater.* 2022;17:e01265.
- [6] Fan D, Zhu J, Fan M, Lu JX, Chu SH, Dong E, Yu R. Intelligent design and manufacturing of ultra-high performance concrete (UHPC)—A review. *Constr. Build. Mater.* 2023;385:131495.
- [7] Sohail M, Amran M, Onaizi AM. Evolution of ultra high performance concrete using hybrid fibers: a review. 2025.
- [8] Sha H, Data driven design of ultra high performance concrete prospects. *Sci Rep.* 2025.
- [9] Liu Y, Wang L, Wei Y, Sun C, Xu Y. Current research status of UHPC creep properties and applications—A review. *Constr. Build. Mater.* 2024;416:135120.
- [10] Mohebbi A, Graybeal BA, Haber ZB. Time-dependent properties of ultrahigh-performance concrete: Compressive creep and shrinkage. *J. Mater. Civ. Eng.* 2022;34(04):04022096.

- [11] Frontiers team. Full-scale production and material properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for rehabilitation of bridge decks in Norway. *Front. Built Environ.* 2025;11:1570920.
- [12] Huntzinger DN, Eatmon TD. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *J. Cleaner Production.* 2009;17(7):668–675.
- [13] Olivier JGJ, Janssens-Maenhout G, Muntean M, Peters JAH. Trends in Global CO₂ Emissions: 2016 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency; 2016.
- [14] Varga C. Cementos activados alcalinamente. Comportamiento reológico y durable en medio ácido. 2015.
- [15] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement Concr. Res.* 1995;25(7):1501–1511.
- [16] AFGC/SETRA. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Interim Recommendations. SETRA, France. 2002.
- [17] Roy DM, Gouda GR, Bobrowsky A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing. *Cement Concr. Res.* 1972;2(3):349–366.
- [18] Yudenfreund M, Odler I, Brunauer S. Hardened portland cement pastes of low porosity I. *Cement Concr. Res.* 1972;2(3):313–330.
- [19] Bache HH. Densified cement ultra-fine particle-based materials. *Proc. 2nd Int. Conf. on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, 1981:33–44.
- [20] Reddy G, Perumal R. Flexural Behavior of Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete: A State of the Art Review. 2017.
- [21] FHWA. EDC-4: Ultra-High Performance Concrete Connections for Prefabricated Bridge Elements (UHPC). Federal Highway Administration. 2019.
- [22] Habel K, Viviani M, Denarie E. Development of the mechanical properties of UHPFRC. *Cement Concr. Res.* 2006:1362–1370.
- [23] Yang S, Millard S, Soutsos M, Barnett M. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of UHPFRC. *Constr. Build. Mater.* 2009;23:2291–2298.

- [24] Corinaldesi V, Moriconi G. Mechanical and thermal evaluation of UHPFRC for engineering applications. *Constr. Build. Mater.* 2012;26:289–294.
- [25] Hassan AMT, Jones SW, Mahmud GH. Experimental test methods to determine tensile and compressive behaviour of UHPFRC. *Constr. Build. Mater.* 2012;37:874–882.
- [26] Aldahdooh MAA, Bunnori NM, Johari MAM. Green UHPFRC containing palm oil fuel ash. *Constr. Build. Mater.* 2013;48:379–389.
- [27] Maca P, Sovjak R, Vavrinik T. Experimental investigation of mechanical properties of UHPFRC. *Procedia Engineering.* 2013;65:14–19.
- [28] Yu R, Spiesz P, Brouwers HJH. Mix design and properties of UHPFRC. *Cement Concr. Res.* 2014;56:29–39.
- [29] Kusumawardaningsih Y, Fehling E, Ismail M. UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube?. *Procedia Eng.* 2015;125:1076–1080.
- [30] Toledo Filho RD, Koenders EAB, Formagini S, Fairbairn EMR. Performance assessment of UHPFRC in view of sustainability. *Mater. Des.* 2012;36:880–888.
- [31] Landaverde A. Efecto del vidrio borosilicato en concretos de ultra-alto desempeño: propiedades físico-mecánicas y microestructura. 2017.
- [32] Kanda T. Application of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites to Shear Resistant Structural Elements. 1998.
- [33] Rybin V. Corrosion of uncoated and oxide-coated basalt fibre in different alkaline media. *Corrosion Science.* 2015:7.
- [34] Algin Z. Properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018;186:678–685.
- [35] Ultra-high Performance Concrete Market Research Report. 2019. Available at: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/ultra-high-performance-concrete-market-4727>.
- [36] Rathod JD. Effect of Single Fiber Pull Out Test Result on Flexural Performance of ECC. *J Civil Environ Eng.* 2014;4:140.
- [37] Powers TC. The non evaporable water content of hardened Portland cement paste. *ASTM Bulletin.* 1949;68-75.

- [38] Francisco I, Anguiano D. Evaluación del uso de un subproducto industrial a base de vidrios de borosilicato como filler para concretos autocompactables. 2015.
- [39] Soliman NA, Tagnit-Hamou A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Constr. Build. Mater.* 2016;125:600–612.
- [40] Graybeal BA. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. FHWA-HRT-06-103. 2006.
- [41] Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa. *ACI Materials Journal.* 2011;108(4):355–364.
- [42] FHWA. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. FHWA-HRT-13-060. 2013.
- [43] ASTM C1609/C1609M-19. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete. ASTM International. 2019.
- [44] ACI Committee 239. ACI 239R-18: Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report. American Concrete Institute. 2018.
- [45] JSCE. Recommendations for Design and Construction of UHPFRC Structures. 2006.
- [46] ONNCCE. (2018). *NMX-C-414-ONNCCE-2018: Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.
- [47] ASTM International. (2020). *ASTM C595/C595M-20: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. West Conshohocken, PA, USA.
- [48] Plank J, Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cem Concr Res.* 2007;37(4):537–42.
- [49] Li VC, Leung CKY. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *J Eng Mech.* 1992;118(11):2246–64.
- [50] Sidiq A, Gravina RJ, Giustozzi F. Ultra-high-performance concrete (UHPC): A review of material properties and applications. *Constr Build Mater.* 2020;262:120512.

- [51] Xiang Y, Yang J, Zhu H, Zhao L. Effects of polycarboxylate superplasticizers on hydration and rheology of ultra-high-performance concrete. *Cem Concr Compos.* 2020;114:103760.
- [52] Mehdipour I, Khayat KH. Understanding the role of particle packing density and water film thickness in UHPC. *Cem Concr Res.* 2017;95:197–208.
- [53] Tagnit-Hamou A, Hisseine O. Mixtures for ultra-high-performance concrete: proportioning and rheological properties. *ACI Mater J.* 2015;112(5):659–70.
- [54] Eucomex. Ficha técnica Flowcon. Euclid Chemical México; 2024.
- [55] Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.* 4th ed. McGraw-Hill Education; 2014.
- [56] Neville AM. *Properties of Concrete.* 5th ed. Pearson Education; 2011.
- [57] ASTM C1602/C1602M-18. *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.* ASTM International; 2018.
- [58] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19).* Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2019.
- [59] Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC. *Design and Control of Concrete Mixtures.* 15th ed. Portland Cement Association; 2011.
- [60] Graybeal BA. *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete.* FHWA-HRT-06-103. Federal Highway Administration; 2006.
- [61] Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa: A simpler way. *ACI Mater J.* 2011;108(1):46–54.
- [62] Bentur A, Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites.* 2nd ed. Taylor & Francis; 2006.
- [63] Euclid Chemical. Tuf-Strand SF Technical Data Sheet. 2023.
- [64] A. Graybeal, *Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-06-115, 2006.
- [65] P. Richard and M. Cheyrezy, *Composition of Reactive Powder Concretes*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501–1511, 1995. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.

- [66] Buddy Rhodes Concrete Products. AR Glass Fiber – Technical Data Sheet. 2020.
- [67] Master Builders Solutions España S.L.U. MasterFiber 400 – Ficha Técnica. 2025.
- [68] BCS Company. Basalt Chopped Strand KV13 – Technical Data Sheet. 2024.
- [69] Technobasalt-Invest LLC. Technobasalt Fiber – Technical Data Sheet. 2023.
- [70] Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., & Wang, H. (2005). *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*. Cement and Concrete Research, 35(5), 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>
- [71] Thomas, M. (2011). *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. CRC Press.
- [72]. Schultz JW, Simmons JH. Phase separation in alkali borosilicate glasses. J Non-Cryst Solids. 1984;65(1–2):249-66.
- [73]. Toplis MJ, Dingwell DB. The structural role of boron in borosilicate glasses: A Raman spectroscopic study. Am Mineral. 2003;88(5–6):947-56.
- [74]. Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cem Concr Res. 2004;34(1):81-9.
- [75]. Shi C, Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resour Conserv Recycl. 2007;52(2):234-47.