

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES
TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y
MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN
EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D**

Por:

MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTORADO EN
INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción

Febrero, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES
TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES
PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS
DE IMPRESIÓN 3D**

Por:

MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTORADO EN
INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Director de Tesis

Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera
Codirector de Tesis

Febrero, 2026



2026/02/18

DR. BERNARDO TADEO TERAN TORRES
COORDINADOR ACADÉMICO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Teran Torres,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D”**, que presenta el M.C. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,



DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
Evaluador



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/02/15

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D**”, que presenta el **M.C. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,

Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera

Evaluador



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/02/19

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D”**, que presenta el **M.C. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,

Dr. César Antonio Juárez Alvarado

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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

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



Xalapa, Ver., 07 de febrero de 2026
Oficio 1/2026

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D”**, que presenta el **M.C. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,

Dr. Miguel Angel Baltazar Zamora

Evaluador



Asunto: revisión de tesis

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, 17 de febrero de 2026

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MATERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D", que presenta el M.C. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

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

Atentamente,

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita
Evaluador



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA

Dr. Baldomero H. Zárate Nicolás
Vo. Bo. Director



2026
año de
Margarita
Maza



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: MARIO IVÁN VELASQUEZ HERNÁNDEZ

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE AGLUTINANTES
TERNARIOS A BASE DE CEMENTO PORTLAND Y MA-
TERIALES PUZOLÁNICOS CON POTENCIAL APLICACIÓN
EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

CORREGIR LOS ERRORES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA.

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

Nombre y firma de quien corrigió:

Ramón Longoria

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo



José Manuel Mendoza Rangel
Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 16 de abril de 20 26

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN




Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

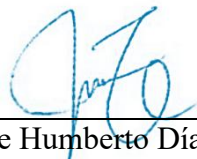
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis *“Desarrollo y Caracterización de Aglutinantes Ternarios a Base de Cemento Portland y Materiales Puzolánicos con Potencial Aplicación en Procesos de Impresión 3D”* realizada por el M.C. *Mario Iván Velásquez Hernández*, sea aceptada para su defensa como opción al grado de DOCTORADO EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción.


El Comité de Tesis:



Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Director de Tesis
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación




Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera
Codirector de Tesis



Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Revisor 1



Dr. Miguel Ángel Baltazar Zamora
Revisor 2



Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita
Revisor 3

Instituto de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N. L. febrero del 2026.

DEDICATORIA

A mis abuelos, **Ofelia Hernández Rodríguez y Fulgencio Velásquez López**, por ser ellos mi apoyo y motivación más grande para alcanzar cada meta propuesta hasta ahora y por ser las personas que se preocuparon, me aconsejaron y guiaron en cada momento de mi vida.

A mi madre, **María de los Ángeles Velásquez Hernández**, por orientarme y acompañarme en los momentos difíciles de la vida, dándome sus sabios consejos y guiándome para llegar a ser una persona de bien.

A mi hermana y a mi prima, **Diana Velásquez Hernández y Arlet Esmeralda Montero Velásquez**, porque, sin importar los momentos complicados que hemos vivido, me han brindado su apoyo, comprensión y cariño para salir adelante.

A quienes, sin saberlo, me impulsaron a reconstruirme en los momentos más difíciles. A las presencias breves, a los silencios y a las despedidas que me enseñaron a seguir adelante. Gracias por recordarme que también desde la adversidad se puede avanzar.

*Lo que está detrás de nosotros
y lo que está delante de nosotros
es poco comparado con lo que
está dentro de nosotros.*

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMIENTOS

Gracias especiales a mi director, el **Dr. José Manuel Mendoza Rangel**, por orientarme, apoyarme, guiarme y compartirme su experiencia para el desarrollo del tema y para así llevar a buen puerto esta investigación.

A mí co – director, el **Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera**, por el tiempo, la disponibilidad y el conocimiento que me brindó, así como por asesorarme y orientarme para realizar todo lo correspondiente a este trabajo de la mejor manera.

A mí asesor, el **Dr. Miguel Ángel Baltazar Zamora**, por su apoyo, comentarios y sugerencias que aportaron conocimiento y experiencias para la elaboración y conclusión de este trabajo.

Así mismo, agradezco a todo el personal académico, profesional, técnico y humano que aportaron granos de arena que contribuyeron en el desarrollo y conclusión de este proyecto.

Agradezco también al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, ahora **SECIHTI**, por el apoyo económico brindado durante la estancia en el posgrado.

Gracias también a la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por brindarme las herramientas y la calidad necesaria para mi formación profesional y personal, por permitirme ser parte de un sistema integral para ser una persona productiva y por abrirme las puertas para entrar y concluir esta etapa de mi vida.

Y finalmente, pero no menos importante, gracias especiales al grupo de personas que la vida me dio para ser más amena cada adversidad de este largo y difícil camino. A esas personas que sin darse cuenta siempre tuvieron una palabra, un gesto, un comentario, una muestra de cariño o simplemente una acción que me impulsó a seguir adelante. Gracias por siempre a: **Ángel R., Abraham H., Ramón M., Antonio T., Fernando Z., Diego N., Aída R., Aranza V., Olga S. y Sunny M.**

La raíz de todo bien reposa en la tierra de la gratitud.

Dalai Lama

RESUMEN

La impresión 3D en la construcción se ha consolidado como una alternativa emergente para enfrentar el déficit global de vivienda, mejorar la eficiencia en obra y promover materiales de menor impacto ambiental, bajo los principios de economía circular, sostenibilidad y la cuarta revolución industrial. Sin embargo, uno de los principales retos que enfrenta esta tecnología es el desarrollo de aglutinantes capaces de cumplir simultáneamente con criterios extruibilidad, edificabilidad y desempeño mecánico. En este contexto, la presente tesis doctoral aborda el diseño, caracterización y modelado de sistemas de aglutinantes ternarios basados en cemento Portland (CP), metacaolín (MK), ceniza volante (CV) y ceniza de bagazo de caña de azúcar (CB), con el objetivo de generar mezclas sostenibles, optimizadas y aptas para su uso en impresión 3D de elementos constructivos.

La investigación se estructura en torno a un enfoque científico que combina caracterización fisicoquímica de las puzolanas, ensayos en estado fresco, análisis reológicos, modelación estadística mediante Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), evaluación de printabilidad y determinación del comportamiento mecánico. Permitiendo comprender en profundidad la interacción entre composición y propiedades de impresión, aspectos críticos para garantizar la estabilidad durante la extrusión y la deposición.

Los resultados aportaron modelos predictivos con altos valores de ajuste ($R^2 > 0.90$), tanto para las mezclas MK-CV como MK-CB, para propiedades clave, ofreciendo herramientas replicables para el diseño racional de aglutinantes imprimibles. En conjunto, los hallazgos permiten avanzar hacia una fabricación aditiva más eficiente, sostenible y viable, con potencial para transformar los procesos constructivos en México y contribuir a resolver la necesidad urgente de vivienda digna y asequible.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación.....	4
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Objetivos	6
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	7
2.1. Impresión 3D y automatización en la construcción	7
2.2. Tecnología de fabricación aditiva en construcción.....	10
2.3. Aglutinantes elaborados con base en cemento para impresión 3D	16
2.4. Propiedades en estado fresco de las tintas cementantes.....	23
2.5. Reología y su impacto en la impresión 3D	25
2.6. Propiedades mecánicas en impresión 3D.....	41
2.7. Sostenibilidad y economía circular	43
CAPÍTULO 3. Antecedentes	46
3.1. Estado del arte de aglutinantes para impresión 3D	46
3.2. Desafíos y oportunidades	56
CAPÍTULO 4. Metodología experimental.....	59
4.1. Etapa I. Diseño de Mezclas.....	59
4.2. Etapa II. Evaluación en estado fresco	65
4.3. Etapa III. Caracterización reológica.....	70
4.4. Etapa IV. Obtención del modelo de optimización	72
4.5. Etapa V. Evaluación de printabilidad.....	76
4.6. Etapa VI. Evaluación del comportamiento mecánico	80
CAPÍTULO 5. Resultados y Discusión	84
5.1. Caracterización de materiales	84
5.2. Análisis de propiedades en estado fresco.....	92
5.3. Caracterización reológica.....	131
5.4. Evaluación estadística y ajuste de los modelos de predicción	154
5.5. Selección y análisis de mezclas óptimas.....	166
5.6. Evaluación de printabilidad	175

5.7. Resultados del comportamiento mecánico.....	179
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	192
REFERENCIAS	198

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones del estado de la materia para diferentes tipos de materiales y medios.	27
Tabla 2. Comparación entre aglutinantes alternativos para impresión 3D.	54
Tabla 3. Factores y niveles del diseño de experimentos MSR I-optimal.....	63
Tabla 4. Niveles codificados para cada factor del diseño de experimentos.....	63
Tabla 5. Proporciones de mezcla para los modelos de optimización MK-CV y MK-CB.	64
Tabla 6. Nomenclaturas de las mezclas para cada modelo de optimización.	65
Tabla 7. Procedimiento de prueba CSR para la determinación de R_{thix} y A_{thix}	71
Tabla 8. Evaluaciones cualitativas de las propiedades aplicables a impresión 3D.....	73
Tabla 9. Sistema de clasificación de calidad para mezclas aplicables a impresión 3D. ..	74
Tabla 10. Composición química del CPO40R y los MPS.	85
Tabla 11. Densidad y área superficial del CPO 40R y los MPS.....	91
Tabla 12. Índice de actividad puzolánica de los MPS.	92
Tabla 13. Resumen del ANOVA para los modelos de fluidez.	96
Tabla 14. Resumen del ANOVA para los modelos de edificabilidad.....	103
Tabla 15. Resumen del ANOVA para los modelos de fraguado inicial.	110
Tabla 16. Resumen del ANOVA para los modelos de fraguado final.	110
Tabla 17. Evaluación cualitativa de las propiedades aplicables a la impresión 3D de las mezclas de MK-CV.....	130
Tabla 18. Evaluación cualitativa de las propiedades aplicables a la impresión 3D de las mezclas de MK-CB.	130
Tabla 19. Esfuerzo de corte inicial y R_{thix} de mezclas de MK-CV.	136
Tabla 20. Esfuerzo de corte inicial y R_{thix} de las mezclas de MK-CB.....	137
Tabla 21. Esfuerzos de corte iniciales y finales, así como la tasa de estructuración (A_{thix}) de las mezclas de MK-CV.....	143
Tabla 22. Esfuerzos de corte iniciales y finales, así como la tasa de estructuración (A_{thix}) de las mezclas de MK-CB.....	143
Tabla 23. Modelos de regresión codificados para mezclas MK-CV.	162
Tabla 24. Modelos de regresión codificados para mezclas MK-CB.....	162

Tabla 25. Ecuaciones de regresión en unidades no codificadas para mezclas MK-CV.	165
Tabla 26. Ecuaciones de regresión en unidades no codificadas para mezclas MK-CB.	166
Tabla 27. Rangos de valores óptimos en las propiedades aplicables a impresión 3D ...	168
Tabla 28. Mezclas seleccionadas para evaluación de printabilidad del modelo MK-CV.	172
Tabla 29. Mezclas seleccionadas para evaluación de printabilidad del modelo MK-CB.	173
Tabla 30. Evaluación visual de las mezclas del modelo MK-CV.....	176
Tabla 31. Evaluación visual de las mezclas del modelo MK-CB.....	178
Tabla 32. Evaluación visual de las mezclas MK-CV y MK-CB en estado endurecido.	189

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de los procesos de impresión 3D utilizados en diversas industrias. Tomada de (Mobarak et al., 2023).	12
Figura 2. Etapas del proceso de impresión 3D en la construcción.....	13
Figura 3. Ley de Newton - Modelo de placas paralelas.....	26
Figura 4. Reogramas de (a) fluido reofluidificante, (b) fluido reoespesante y (c) fluido viscoplástico.....	29
Figura 5. Modelo de Maxwell.....	30
Figura 6. Respuesta de materiales sometidos a ensayos reológicos de (a) relajación del esfuerzo, (b) cedencia a la deformación, (c) recuperación de la deformación y (d) ensayo oscilatorio.....	31
Figura 7. Comportamiento de un material tixotrópico idealizado.	32
Figura 8. Proceso de floculación y gelación en materiales cementantes. Tomada de: (Farid Ojeda-Farías, 2019).....	34
Figura 9. Refloculación y estructuración de un material cementante en función de la evolución del límite elástico.....	37
Figura 10. Proyectos de construcción desarrollados con impresión 3D	46
Figura 11. Muestras en polvo de los MPS utilizados como materia prima.....	60
Figura 12. Valores decodificados de las corridas experimentales.	64
Figura 13. Boquilla de impresión.....	77
Figura 14. Sistema de impresión.....	78
Figura 15. Diseño de especímenes para pruebas de a) compresión y b) tensión.	81
Figura 16. Dirección de aplicación de carga en ensayos de resistencia a compresión. ...	82
Figura 17. Esquematización de ensayo de flexión por tres puntos.	83
Figura 18. Difractogramas del CPO40R y los MPS.	86
Figura 19. Morfología de las partículas del CPO40R y los MPS.	88
Figura 20. Distribución del tamaño de partícula del CPO40R y los MPS.....	89
Figura 21. Fluidéz de las mezclas de los modelos de optimización: a) MK-CV; b) MK-CB.	95
Figura 22. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de fluidéz: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).	97

Figura 23. Efectos principales e interacción de factores para la fluidez de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.....	99
Figura 24. Edificabilidad de las mezclas de los modelos de optimización: a) MK-CV; b) MK-CB.....	102
Figura 25. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de edificabilidad: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).	105
Figura 26. Efectos principales e interacción de factores para la edificabilidad de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.....	106
Figura 27. Tiempos de fraguado de las mezclas relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.....	109
Figura 28. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de tiempo de fraguado inicial: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).	113
Figura 29. Efectos principales e interacción de factores para la fluidez de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.....	114
Figura 30. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de tiempo de fraguado final: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).	116
Figura 31. Efecto principales e interacciones de los factores para el tiempo de fraguado final de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.	117
Figura 32. Distribución de tamaños de partículas de las mezclas en de los aglutinantes asociadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.....	120
Figura 33. Área superficial específica (BET) de las mezclas de aglutinantes en seco relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.	122
Figura 34. Tasa de generación de calor de las mezclas cementantes relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.....	126
Figura 35. Refloculación a corto plazo en función del esfuerzo de corte para las mezclas de a) MK-CV y de b) MK-CB.	136
Figura 36. Estructuración a largo plazo en función del esfuerzo de corte para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.	142

Figura 37. Viscosidad en función del tiempo para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.	148
Figura 38. Viscosidad en función de la tasa de corte para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.....	152
Figura 39. Resultados experimentales vs la predicción del modelo MK-CV para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.	156
Figura 40. Resultados experimentales vs la predicción del modelo MK-CB para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.	157
Figura 41. Residuos vs valores ajustados del modelo MK-CV para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.....	159
Figura 42. Residuos vs valores ajustados del modelo MK-CB para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.....	160
Figura 43. Rangos de printabilidad por triple desempeño para mezclas base cemento.	168
Figura 44. Simulación de mezclas printables para los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.	170
Figura 45. Selección de mezclas en su primera depuración con base en estadística para los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.	171
Figura 46. Evaluación de las mezclas seleccionadas de los modelos MK-CV y MK-CB en el diagrama de rango de printabilidad por triple desempeño.	175
Figura 47. Resistencia de compresión de cubos moldeados e impresos de los modelos a) MK-CV y b) MK-CB. (\perp : Carga aplicada en dirección perpendicular a las capas impresas; \parallel : Carga aplicada en dirección paralela a las capas impresas).	182
Figura 48. Resistencia a la flexión de barras moldeadas e impresas de los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.....	185

LISTA DE ABREVIATURAS

CAH	-	Aluminato de Calcio Hidratado
CASH	-	Aluminosilicato de Calcio Hidratado
δ	-	Ángulo de fase
BET	-	Área superficial (<i>Brunauer–Emmett–Teller</i>)
CP	-	Cemento Portland
CB	-	Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar
CV	-	Ceniza Volante
C-P	-	<i>Concrete Printing</i>
CC	-	<i>Contour Crafting</i>
4IR	-	Cuarta Revolución Industrial
γ	-	Deformación
DDE	-	Deposición Directa de Energía
D_{50}	-	Diámetro medio de las partículas
DRX	-	Difracción de Rayos X
CAD	-	Diseño Asistido por Computadora
Sd	-	Distancia media de separación
DTP	-	Distribución de Tamaño de Partícula
DS	-	<i>D-Shape</i>
E_{CB}	-	Ecuación de edificabilidad (%) para el modelo MK-CB
E_{CV}	-	Ecuación de edificabilidad (%) para el modelo MK-CV
F_{CB}	-	Ecuación de fluidez (%) para el modelo MK-CB
F_{CV}	-	Ecuación de fluidez (%) para el modelo MK-CV
TFF_{CB}	-	Ecuación de tiempo de fraguado final (min) para el modelo MK-CB
TFF_{CV}	-	Ecuación de tiempo de fraguado final (min) para el modelo MK-CV
TFI_{CB}	-	Ecuación de tiempo de fraguado inicial (min) para el modelo MK-CB
TFI_{CV}	-	Ecuación de tiempo de fraguado inicial (min) para el modelo MK-CV
E	-	Edificabilidad
τ	-	Esfuerzo cortante
SL	-	Estereolitografía
FOL	-	Fabricación de Objetos Laminados
F	-	Fluidez
FRX	-	Fluorescencia de Rayos X
FLP	-	Fusión de Lecho de Polvo
Ca(OH)₂	-	Hidróxido de Calcio
IAP	-	Índice de Actividad Puzolánica
IA	-	Inyección de Aglutinante
$\tau_{D,i}$	-	Límite dinámico inicial
$\tau_0(t)$	-	Límite elástico en función del tiempo
$\tau_s(t)$	-	Límite elástico estático al tiempo t
τ_0	-	Límite elástico inicial
$\tau_{S,i}$	-	Límite estático inicial
MPS	-	Materiales Puzolánicos Suplementarios

MK	- Metacaolín
MEB	- Microscopía Electrónica de Barrido
MDF	- Modelización por Deposición Fundida
G^*	- Modulo complejo
G'	- Módulo de almacenamiento
G	- Módulo de elasticidad
G''	- Módulo de pérdida
ODS	- Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	- Organización de las Naciones Unidas
OMS	- Organización Mundial de la Salud
$\lambda(t)$	- Parámetro estructural asociado a la floculación
a/cm	- Relación agua-cementante
f_c	- Resistencia de Compresión
f_r	- Resistencia de Flexión
CSH	- Silicato de Calcio Hidratado
SSL	- Sinterización por Láser
ASTM	- Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
A_{thix}	- Tasa de acumulación estructural.
R_{thix}	- Tasa de refloculación
R_{rigid}	- Tasa de rigidez
TFF	- Tiempo de Fraguado Final
TFI	- Tiempo de Fraguado Inicial
t_{perc}	- Tiempo de percolación
t_{rf}	- Tiempo de refloculación
$\dot{\gamma}$	- Velocidad de corte
CSR	- Velocidad de Corte Constante
η	- Viscosidad
μ_p	- Viscosidad plástica

CAPÍTULO 1. Introducción

El sector de la construcción enfrenta múltiples desafíos relacionados con la escasez de recursos naturales, el crecimiento poblacional, el déficit de vivienda y la urgente necesidad de adoptar procesos de construcción más sostenibles (Klave et al., 2025; Vasilca et al., 2021). A pesar de los avances tecnológicos y científicos en las técnicas constructivas y el desarrollo de nuevos materiales, los métodos empleados continúan demandando mano de obra, tiempo y recursos significativos, pero además de provocando un alto impacto ambiental (Zajemska et al., 2025). Ante este panorama, la construcción por impresión 3D ha surgido como una tecnología con potencial para transformar la forma en la que se proyectan y ejecutan las obras civiles, gracias a ventajas como la automatización, eficiencia, reducción de costos, libertad de diseño y menor huella de carbono (Paolini et al., 2019).

La fabricación aditiva de elementos constructivos consiste en la deposición controlada y secuencial de materiales cementantes en capas consecutivas (Buswell et al., 2018). No obstante, su aplicación a escala industrial aún enfrenta desafíos críticos como el desarrollo de aglutinantes con propiedades físicas, químicas, reológicas y mecánicas adecuadas para impresión (Peng & Unluer, 2023b). Adicionalmente, la mayoría de los aglutinantes desarrollados en la actualidad se basan en cemento Portland (CP), lo que representa un obstáculo en términos de sostenibilidad ambiental debido a factores como las altas emisiones de CO₂ relacionadas con la fabricación del clinker, el excesivo consumo de energía y la intensiva explotación de recursos naturales, posicionando al sector de la construcción como una de las industrias de mayor impacto ambiental (Naqi & Jang, 2019). Así, el desarrollo de aglutinantes que reduzcan el contenido de CP sin comprometer el desempeño técnico del material se vuelve una línea prioritaria de investigación.

Diversos estudios (Nodehi et al., 2022; Zaid & El Ouni, 2024) han explorado alternativas al CP como la incorporación de materiales calizos, arcillas calcinadas y otras puzolanas. P.ej., el metacaolín (MK) ha demostrado buena reactividad y estabilidad durante la extrusión de capas, aunque también ha presentado limitaciones relacionadas con sus propiedades reológicas (Thajeel et al., 2025), las cuales pueden mitigarse con la

incorporación de materiales como la ceniza volante (CV) y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CB). La CV puede mejorar la trabajabilidad y bombeabilidad de las mezclas, disminuyendo el requerimiento de agua (Panda et al., 2019a). Por su parte, la CB puede mejorar la fluidez y la retención de agua en mezclas cementantes, mientras que se alinea con el enfoque de economía circular al valorizar este residuo que usualmente no se aprovecha a escala industrial (Rodier et al., 2019).

A partir de lo anterior, la combinación de estos materiales da lugar al desarrollo de aglutinantes ternarios potencialmente más sostenibles y adecuados para impresión 3D, lo cual es importante para lograr alternativas de impresión 3D aprovechando residuos industriales y disminuyendo el contenido de CP, incrementando aún más los beneficios ambientales de la construcción por impresión 3D.

Por lo tanto, esta investigación se fundamenta en los principios de la Economía Circular, la Sostenibilidad y la Cuarta Revolución Industrial (4IR), proponiendo el desarrollo y evaluación de aglutinantes ternarios con reemplazos parciales de CP por MK en combinación con CV o CB, orientados a su aplicación en procesos de impresión 3D. El estudio aborda primordialmente las propiedades en estado fresco y el comportamiento reológico, así como la evaluación del desempeño de la tinta durante la extrusión y el desempeño mecánico en estado endurecido, esto con el objetivo de contribuir al avance científico-tecnológico de materiales cementantes innovadores, accesibles y sostenibles.

1.1. Planteamiento del problema

Conforme a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la vivienda digna y asequible es un espacio con servicios e instalaciones para el bienestar físico, social y de salud del ser humano, lo cual está reconocido actualmente como un derecho humano fundamental según la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Sin embargo, la satisfacción de este derecho se encuentra limitada por la crisis global de vivienda y la demanda poblacional (Solf et al., 2024). La población mundial ha superado los 8 mil millones de personas y se prevé que llegará a los 10.3 mil millones para el 2070 (Ritchie et al., 2023). Además, se estima que alrededor de 1.6 mil millones de personas no tienen acceso a una vivienda adecuada con servicios básicos, lo cual podría ascender a 3 mil millones hacia el año 2030, según la ONU (Solf et al., 2024).

Asimismo, en países en desarrollo como México se estima que el 38.4% de la población vive en condiciones inadecuadas o no tengan acceso a una vivienda digna como consecuencia del crecimiento poblacional, el déficit habitacional y la desigualdad económica (ONU-Habitat, 2019).

Frente a este panorama, las limitaciones de los procesos constructivos tradicionales dificultan una respuesta eficiente a la creciente demanda de vivienda, ya que son lentos y laboriosos, presentan un desempeño bajo para la producción en masa, altos costos de desarrollo, así como una dependencia significativa de recursos materiales y energéticos, conllevando impactos ambientales importantes como la generación de gases contaminantes y residuos (Subramanya et al., 2020); todo lo anterior en comparación con métodos de construcción modular e impresión 3D.

En este contexto, la Industria 4.0 ha impulsado nuevas soluciones tecnológicas que transformen los procesos tradicionales de construcción (Alaloul et al., 2020; Olsson et al., 2021). P.ej., la construcción por impresión 3D es una alternativa ventajosa debido a la automatización de procesos, reducción de tiempos de ejecución, costos y residuos, así como una mayor libertad de diseño arquitectónico (Y. Chen, Liu, et al., 2022; R. J. M. Wolfs et al., 2019).

No obstante, su implementación efectiva ha requerido el desarrollo de tintas cementantes que cumplan con las propiedades y características de un material printable. Esto ha representado un desafío técnico debido a la complejidad de la optimización de las tintas y los impactos ambientales, puesto que la mayoría de las tintas reportadas utilizan CP y aditivos químicos (Y. Chen, He, et al., 2022). Lo anterior ha derivado en la búsqueda de materiales alternativos para reducir el consumo de CP, sustituyéndolo por materias primas de menor impacto ambiental como las puzolanas y los residuos industriales (Mendoza Rangel & Díaz-Aguilera, 2023).

Aunque la investigación en impresión 3D de materiales cementantes ha mostrado avances significativos, persisten huecos en el conocimiento sobre el desarrollo y optimización de aglutinantes ternarios a base de CP y MK, CV y CB, esto es considerando un enfoque integral del comportamiento fisicoquímico, reológico y mecánico, así como las propiedades de printabilidad como la extrudabilidad, edificabilidad, estabilidad, entre

otros. Asimismo, no existen metodologías estandarizadas para evaluar la printabilidad ni modelos de predicción que permitan optimizar sus diseños de mezcla de manera eficiente.

1.2. Justificación

A pesar de los beneficios de la impresión 3D de materiales cementantes (M. Chen et al., 2018; R. J. M. Wolfs et al., 2019), su potencial de aplicación está limitado por el desarrollo de aglutinantes compatibles con los requerimientos en estado fresco y endurecido, tales como la extrudabilidad, la edificabilidad y la resistencia mecánica (Y. Chen, Chaves Figueiredo, et al., 2020a; M. Rahman et al., 2024).

No obstante, se ha cuestionado el uso de tintas convencionales debido a su impacto ambiental relacionado con el uso intensivo del CP con respecto de mezclas convencionales, lo cual ha sido necesario para lograr los morteros especializados con las propiedades que se requieren (Bhattacharjee et al., 2021; Mohan et al., 2022). Esto aporta a los ~4.1 mil millones de toneladas de CP asociadas al 10% de las emisiones mundiales de CO₂ (Poudyal & Adhikari, 2021), ubicándose como la tercer mayor fuente de emisiones por detrás del uso de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo (Friedlingstein et al., 2020). Además, la fabricación de cemento requiere un consumo energético anual de 11 EJ, lo cual representa el 3% del consumo de energía mundial (Hache et al., 2020; Naqi & Jang, 2019). Lo anterior además de la presión ejercida sobre el consumo de los recursos naturales utilizados como materia prima, que compromete el logro de los objetivos globales de sostenibilidad como el ODS 12-Producción y consumo responsable (Peng & Unluer, 2023b).

Así, los aglutinantes con contenido reducido de CP cobran relevancia. Existen diversas propuestas como los geopolímeros, los cementos de aluminato, los cementos activados alcalinamente, la sustitución de CP por yeso, adiciones puzolánicas, materiales calizos y arcillas calcinadas como el MK (Peng & Unluer, 2023b), destacando las últimas dos debido a su abundancia, bajo impacto ambiental (~0.3 kg CO₂/kg producido), adecuada reactividad y mejora de la edificabilidad (Scrivener et al., 2018). Sin embargo, su limitación radica en el comportamiento reológico, dificultando la capacidad de extrusión y la ventana de impresión (Long et al., 2021; Zhao et al., 2021).

De lo anterior, surge la necesidad de incorporar otros materiales para mejorar el desempeño reológico de las tintas cementantes. Los materiales puzolánicos como la CV y la CB son residuos de alta disponibilidad a nivel mundial. Por un lado, la CV es un subproducto de la industria carboeléctrica, que genera mayor trabajabilidad y capacidad de bombeo con menores consumos de agua (Albar et al., 2020; Tu et al., 2023); además, su disponibilidad se estimada en ~1140 millones de toneladas a nivel mundial del 2016 al 2021, a pesar de la transición energética en varios países (Jin et al., 2021). Por otra parte, la CB es un residuo agroindustrial generado por la calcinación de la caña de azúcar, la cual se genera en cantidades de ~10 millones de toneladas aprovechables en épocas de zafra en México, con moliendas de ~50 millones de toneladas de caña de acuerdo con la CONADESUCA entre 2022-2023. De hecho, la valorización y el aprovechamiento de residuos en diversas aplicaciones de la industria de la construcción resulta pertinente conforme a la economía circular, para optimizar el uso de recursos y reducir la generación de residuos, pero además minimiza la explotación de materias primas vírgenes no-renovables (Nodehi & Taghvaei, 2022; Shukla et al., 2024).

En síntesis, al sustituir CP por combinaciones de MK con CV o CB, se busca formular aglutinantes ternarios capaces de mantener o mejorar el desempeño técnico necesario para la impresión 3D, al tiempo que se reducen las emisiones asociadas al CP y se minimiza el impacto ambiental, esto con el fin de contribuir a lograr la aplicación industrial de estos materiales como una solución sostenible y accesible para el desarrollo habitacional que se demanda en la actualidad. La impresión 3D combinada con el uso de estos aglutinantes optimizados basados en residuos industriales, podría ofrecer una alternativa para la construcción de vivienda digna, de bajo costo y accesibles, contribuyendo a solucionar el déficit habitacional en países en desarrollo como México. De esta forma, la presente investigación se alinea con los principios de la industria 4.0, la economía circular, la sostenibilidad y la justicia social, al ofrecer alternativas viables para una construcción eficiente, inclusiva y resiliente.

1.3. Hipótesis

La combinación de metacaolín con ceniza volante o ceniza de bagazo de caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento Portland modificará las características físicas y

químicas de los aglutinantes ternarios, favoreciendo sus propiedades de printabilidad, reológicas y mecánicas, permitiendo su potencial aplicación en impresión 3D.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar aglutinantes ternarios a base de cemento Portland, metacaolín, ceniza volante y de bagazo de caña de azúcar, cuyas propiedades de printabilidad, reológicas y mecánicas optimizadas permitan evaluar su potencial aplicación en impresión 3D.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Corroborar la factibilidad de uso de materiales puzolánicos (metacaolín, ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar) como sustitución parcial del cemento Portland en aglutinantes ternarios, mediante la caracterización de sus propiedades físicas y químicas.
2. Establecer un diseño de experimentos que permita evaluar el comportamiento de los aglutinantes ternarios a base de cemento Portland, con sustituciones variables de los materiales puzolánicos.
3. Evaluar las propiedades en estado fresco y el comportamiento reológico de los aglutinantes para identificar las respuestas clave asociadas a su potencial printabilidad, considerando los efectos derivados de las interacciones fisicoquímicas entre los componentes.
4. Optimizar las mezclas mediante un modelo multivariable de predicción, considerando los criterios de printabilidad en función de las propiedades objetivo.
5. Evaluar la extrudabilidad y el desempeño mecánico (a compresión y tensión) de las mezclas con mayor potencial de printabilidad obtenidas a partir del modelo de predicción para validar la funcionalidad estructural de la impresión 3D.
6. Proponer aglutinantes ternarios optimizados, técnicamente viables y con potencial de aplicación en impresión 3D.

CAPÍTULO 2. Marco teórico

2.1. Impresión 3D y automatización en la construcción

La industria de la construcción está siendo impulsada por los avances tecnológicos de la 4IR, basadas en la automatización, digitalización y fabricación aditiva (Tamir et al., 2023). En torno a esto, la impresión 3D de concreto o 3DCP por sus siglas en inglés (*3D Concrete Printing*), posibilita la fabricación de elementos constructivos mediante la deposición capa por capa de mezclas cementantes como concreto, mortero o suspensiones base cemento, evitando la necesidad de implementar encofrados y reduciendo los residuos de material (Fonseca & Matos, 2023; Paul et al., 2018). Por tanto, esta técnica ofrece alternativas para enfrentar los desafíos del sector de la construcción relacionados con los altos consumos de recursos naturales, la generación de residuos, los largos tiempos de ejecución y la dependencia intensiva de mano de obra (Al-Tamimi et al., 2023).

2.1.1. Evolución de la industria 4.0

El desarrollo de la humanidad y el crecimiento poblacional ha enmarcado la evolución de la industria de la construcción (Alaloul et al., 2020). La primera revolución industrial (1760–1830) trajo consigo la creación de nuevos materiales de construcción como el vidrio, el hierro fundido y el acero, transformando radicalmente las posibilidades estructurales y arquitectónicas de aquella época. Posteriormente, la segunda revolución industrial (1870–1914) se caracterizó por innovaciones en los métodos de producción en masa, reducción de costos, y la aparición de nuevos enfoques arquitectónicos como la construcción vertical, la tecnología de prefabricados, así como los inicios del diseño asistido por computadora (CAD) (Maskuriy et al., 2019).

Estos avances sentaron las bases para la tercera revolución industrial (1950–1970) conocida como la revolución digital, en la cual comenzaron a integrarse los procesos constructivos con las herramientas informáticas y programas de diseño-3D asistido por computadora, permitiendo una mayor precisión y eficiencia en las etapas de diseño y planificación (Alaloul et al., 2020).

No obstante, la industria 4.0 (4IR), representa actualmente un salto cualitativo basado en la digitalización ya establecida en décadas anteriores. Esta nueva etapa busca transformar

completamente los sistemas de producción, gestión y gobernanza a través de la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), robótica, análisis de *big data* y sistemas ciberfísicos (Alaloul et al., 2020; Olsson et al., 2021). En la construcción, este paradigma ha comenzado a consolidarse bajo el concepto de la Construcción 4.0, donde se prioriza la eficiencia energética, la sostenibilidad, la automatización de procesos y el uso de la impresión 3D que permiten una personalización masiva, mayor velocidad de ejecución y reducción de residuos (van der Heijden, 2023).

2.1.2. Aplicaciones de la automatización en edificación

En los últimos años se ha observado un incremento en el uso de tecnologías de automatización en la industria de la construcción, permitiendo la optimización de procesos, mayor productividad y reducción de errores humanos; esto resalta porque históricamente el sector se ha caracterizado por una adopción tecnológica incipiente en comparación con otras industrias (Sawhney et al., 2020). Algunos ejemplos son el uso de robots para tareas repetitivas y peligrosas, drones para inspección y supervisión, realidad virtual para la planeación y detección de problemas, sistemas digitales como BIM e inteligencia artificial y, recientemente, la construcción por impresión 3D (Tamir et al., 2023).

De hecho, el uso de robots surge por la búsqueda de relevar al ser humano de tareas en los procesos de construcción que conllevan riesgos, a fin de proteger la integridad de los trabajadores, p.ej., demoliciones, movimientos de tierras en terrenos complejos, ensamblado de estructuras, soldadura, corte de materiales, levantamiento y posicionamiento de cargas pesadas (Bock & Linner, 2015). Por su parte, los drones equipados con cámaras y sensores han sido útiles en tareas de inspección estructural con imágenes en alta resolución, así como en el monitoreo y mapeo de los sitios de construcción y son especialmente útiles en sitios de difícil acceso. Asimismo, la realidad virtual permitió visualizaciones de diseño arquitectónico y estructural, posibilitando un mejor proceso creativo y la toma de decisiones, así como una mejor coordinación y ejecución de los proyectos de construcción, ventajas similares a las que provee la integración de sistemas digitales como BIM y la aplicación de inteligencia artificial (Oesterreich & Teuteberg, 2016).

Asimismo, la construcción por impresión 3D resalta porque permite la fabricación aditiva de elementos en sitio o en planta, representando una alternativa viable para enfrentar desafíos actuales como el déficit de vivienda, la necesidad de viviendas de urgencia, o la personalización arquitectónica a bajo costo (Bazli et al., 2023). No obstante, su implementación a gran escala aún requiere superar retos tecnológicos, la falta de estándares y el desarrollo de tintas cementantes con un enfoque de circularidad, siendo este último el principal enfoque de esta investigación.

2.1.3. Potencial y limitaciones actuales para la automatización de la industria de la construcción

El potencial de la automatización en la construcción se fundamenta en su capacidad para transformar integralmente la cadena productiva del sector. Esto abarca desde la etapa de diseño hasta la ejecución y operación de infraestructuras, promoviendo una construcción más eficiente, precisa, segura y sostenible (F. Bos et al., 2016). En particular, la impresión 3D permite fabricar geometrías complejas con un alto grado de personalización al eliminar encofrados que restringen los diseños arquitectónicos actuales, reduce significativamente el desperdicio de materiales, acorta los tiempos de ejecución y minimiza la intervención humana en condiciones peligrosas (Al-Tamimi et al., 2023).

En el ámbito social, la impresión 3D representa una oportunidad estratégica para abordar problemas globales como el déficit de vivienda asequible, la necesidad de respuesta rápida ante desastres naturales y el impulso de nuevas formas arquitectónicas adaptadas a contextos específicos (Ahmed, 2023; Tu et al., 2023). Lo anterior es debido a que esta tecnología permite acelerar los tiempos de construcción, reducir la dependencia de mano de obra altamente especializada y generar edificaciones con mayor eficiencia en el uso de materiales, lo que facilita su implementación en comunidades vulnerables o de difícil acceso (Oseji et al., 2025; W. Xu et al., 2022). Además, la automatización contribuye a mejorar la trazabilidad y el control de calidad en cada etapa del proceso constructivo, lo que se traduce en una reducción de errores, sobrecostos y retrasos (Lukert et al., 2024). Esto es porque los sistemas de impresión digital permiten monitorear parámetros como velocidad de extrusión, geometría depositada y consistencia del material en tiempo real,

garantizando una mayor uniformidad en las capas y disminuyendo la variabilidad asociada a los métodos tradicionales (Cui et al., 2025; H. Zhang et al., 2024).

No obstante, las normativas vigentes no contemplan aún los procesos constructivos basados en fabricación aditiva. Esto representa un reto actualmente porque genera incertidumbre técnica y jurídica respecto a la durabilidad, resistencia estructural y seguridad de las edificaciones impresas en 3D (F. Bos et al., 2016).

Desde una perspectiva técnica, los desafíos se relacionan con la compatibilidad de los materiales y la impresión 3D, por lo que la inversión inicial en equipos especializados y en el desarrollo de materiales puede ser considerable, limitando su adopción por parte de pequeñas y medianas empresas del sector (Ambily et al., 2024). Adicionalmente, otros retos se asocian con temas culturales y organizacionales. La industria de la construcción es uno de los sectores más conservadores y la adopción de nuevas tecnologías requiere capacitación, cambios en los modelos de negocio y una mentalidad orientada a la innovación. Así, estas barreras han imposibilitado el crecimiento y la innovación en los procesos y productos de la construcción (Olsson et al., 2021; W. Xu et al., 2022).

En resumen, aunque el potencial de la automatización de los procesos en la construcción es significativo, su consolidación como práctica común depende del avance en investigación aplicada, el desarrollo de materiales funcionales, la actualización normativa y la voluntad del sector para transformar sus prácticas tradicionalistas.

2.2. Tecnología de fabricación aditiva en construcción

La fabricación puede definirse como un proceso de producción industrial que contempla procedimientos y herramientas necesarios para transformar materias primas en productos terminados para su uso o venta (Mobarak et al., 2023). Los procesos de fabricación se clasifican según el método de transformación de la materia prima, destacando cuatro enfoques principales: conformado, fundición, sustracción y adición. El primero de estos hace referencia a la aplicación de fuerza a un bloque de material para cambiar su forma; la fundición implica la transformación de un material sólido a estado líquido mediante procesos térmicos para su posterior colocación en un molde; la sustracción corresponde a la eliminación de material para moldear un producto final; mientras que la adición es el

proceso de fabricación de piezas mediante técnicas de acumulación progresiva de material (Jandyal et al., 2022; Tamir et al., 2023).

El proceso industrial de adición, también conocido como fabricación aditiva, manufactura aditiva o impresión 3D, se basa en el uso de tecnologías digitales como el CAD. A partir de un modelo-3D, el objeto se divide en capas mediante un software especializado y los datos son enviados a una impresora 3D que deposita el material de forma controlada en capas sucesivas hasta obtener el objeto deseado (Elhadad et al., 2023).

En la actualidad la fabricación aditiva se divide en 7 tipos en función de las dimensiones y formas de las capas, los materiales utilizados y los principios de funcionamiento de cada técnica de acuerdo con la norma F2792 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM): (1) estereolitografía (SL), (2) modelización por deposición fundida (MDF), (3) fusión en lecho de polvo (FLP), (4) sinterización selectiva por láser (SSL), (5) inyección de aglutinante (IA), (6) deposición directa de energía (DDE) y (7) fabricación de objetos laminados (FOL). La Figura 1 representa algunas de las técnicas de impresión 3D más utilizadas en la actualidad.

La impresión 3D por extrusión pertenece a la MDF y, actualmente, la técnica más difundida; su implementación eficiente depende de la comprensión de los principios operativos, los equipos disponibles y los factores críticos para su aplicación exitosa.

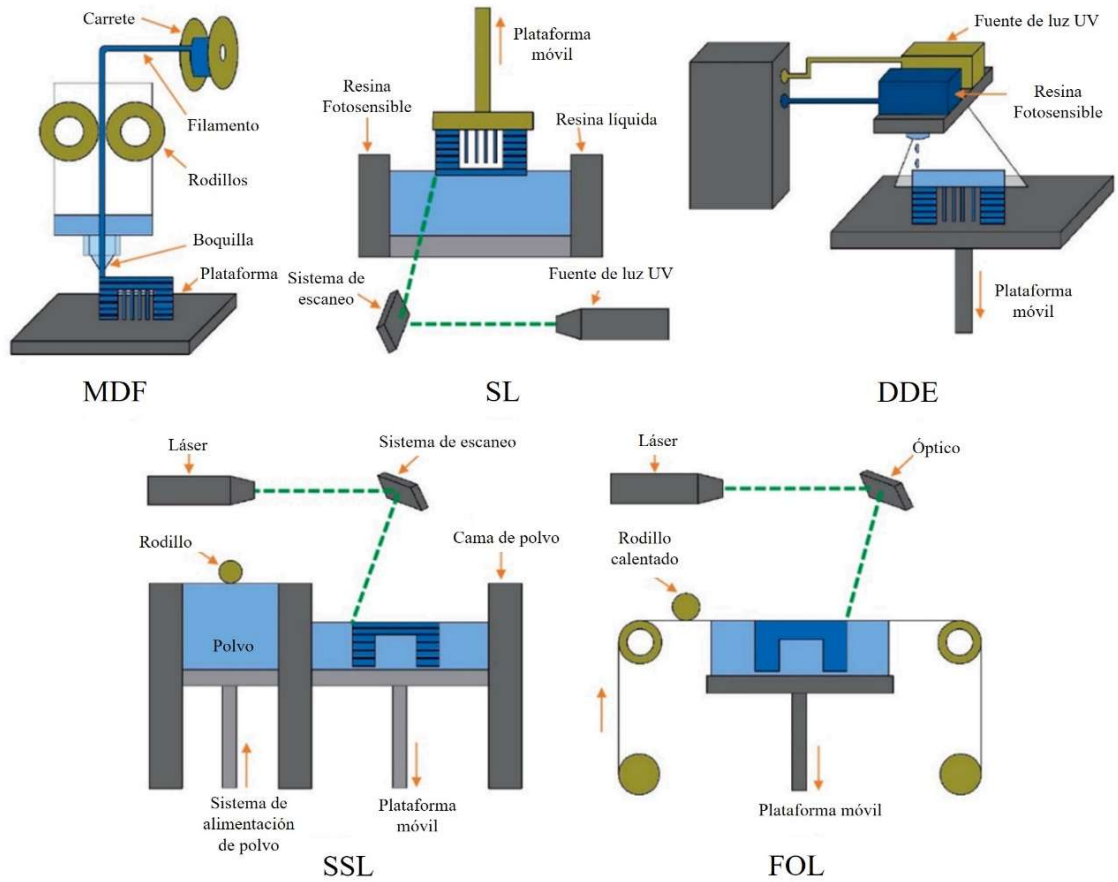


Figura 1. Representación de los procesos de impresión 3D utilizados en diversas industrias. Tomada de (Mobarak et al., 2023).

2.2.1. Principios básicos de la impresión 3D por extrusión de mezclas cementantes

La construcción por impresión 3D se basa en los fundamentos de la impresión 3D por extrusión, en el cual la adición sucesiva de capas de la tinta cementante sigue un modelo-3D digital diseñado mediante software CAD (Tu et al., 2023).

Las tintas involucran cementantes de concretos, morteros o suspensiones modificados y la impresión de las estructuras requiere el control preciso de tres etapas clave (Figura 2):

- Bombeo de material: Se transporta la tinta desde el equipo de mezclado hacia el cabezal de impresión.
- Extrusión o deposición: La tinta se deposita en filamentos con propiedades reológicas cuidadosamente ajustadas para lograr su estabilidad dimensional.

- c) Construcción de la estructura: El filamento debe soportar su propio peso y el de las capas sucesivas, sin colapsos ni deformaciones.

Estas etapas deben considerar los factores físicos y químicos que gobiernan el comportamiento de las tintas cementantes, como la fluidez, la velocidad de fraguado, la resistencia inicial y la adhesión interlaminar. En este sentido, el diseño de tintas cementantes optimizadas, la calibración del equipo de impresión y la sincronización del proceso son aspectos fundamentales para el éxito de la impresión 3D.

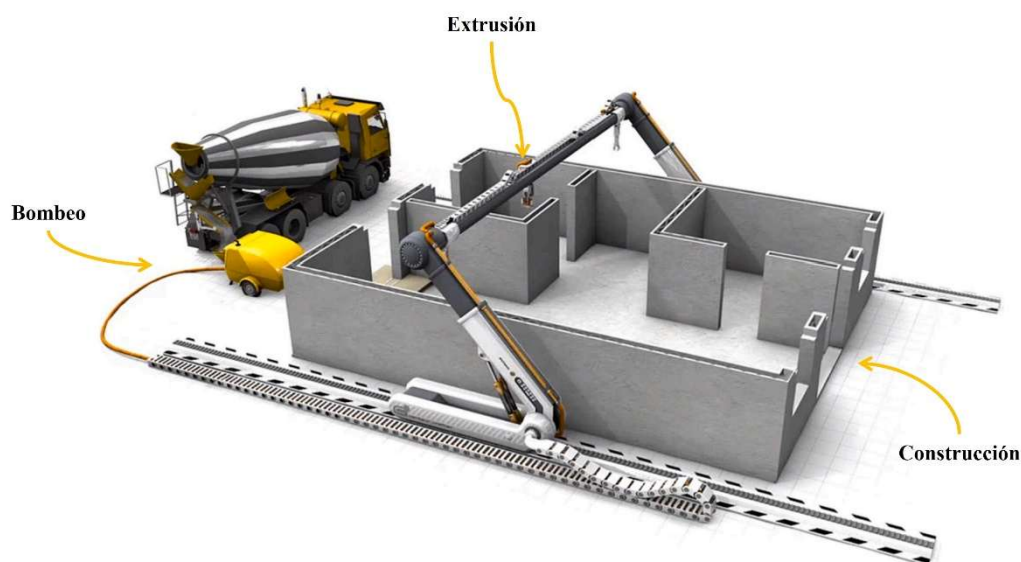


Figura 2. Etapas del proceso de impresión 3D en la construcción.
Adaptada de (Bazli et al., 2023)

2.2.2. Equipos y sistemas disponibles

El comportamiento reológico de las tintas cementantes, sumado a los requerimientos estructurales y de sostenibilidad, ha derivado en el desarrollo de tecnologías específicas para la impresión 3D. Existen tres enfoques tecnológicos que han marcado tendencia en esta área: *Contour Crafting* (CC), *D-Shape* (DS) y *Concrete Printing* (C-P). (Tu et al., 2023). Los equipos utilizados en estas alternativas se clasifican según la configuración del movimiento y del entorno operativo en:

- a) Sistemas tipo pórtico (*Gantry*): Se componen de una estructura fija de ejes cartesianos donde se desplaza el cabezal de extrusión, permitiendo imprimir

elementos de gran tamaño con una alta precisión. Estos sistemas son utilizados por empresas como COBOD y Winsun (Puzatova et al., 2022).

- b) Brazos robóticos articulados: Ofrecen mayor libertad de movimiento y son capaces de imprimir formas más complejas. Sin embargo, su alcance es más limitado y suelen operar en entornos controlados para imprimir elementos prefabricados (Fry et al., 2020).
- c) Sistemas móviles o modulares: Son impresoras portátiles o montadas sobre vehículos, diseñadas para operar directamente en sitio. Aunque aún se encuentran en etapas de desarrollo, representan una opción atractiva para aplicaciones rápidas y económicas en zonas remotas o de emergencia (Alhijaily et al., 2025).

Estos equipos incluyen bombas de extrusión, mezcladoras automáticas, tanques de almacenamiento, sensores de presión, temperatura y humedad, así como el software de control y diseño de trayectoria; además, todos son aplicables a CC, DS y C-P:

2.2.2.1 *Contour Crafting*

El proceso de elaboración de contornos o CC, fue propuesto inicialmente por Khoshnevis y Dutton en 1998, inspirado en técnicas de extrusión como el MDF (Lyu et al., 2021). Esta metodología combina la extrusión controlada de la tinta cementante con una técnica de allanado para mejorar el acabado superficial. El aglutinante es bombeado hacia un cabezal de extrusión equipado con llanas laterales, las cuales se deslizan sobre las caras externas del filamento, generando superficies lisas. Esto reduce la necesidad de procesos posteriores, pero requiere de sistemas mecánicos especializados para lograr acabados de precisión. La estructura se construye mediante la extrusión de capas para conformar muros huecos que pueden ser rellenados con materiales de refuerzo (Bazli et al., 2023).

2.2.2.2 *D-Shape*

La tecnología DS o impresión en lecho de partículas, fue desarrollada en 2007 por Enrico Dini y se basa en el principio de la estereolitografía adaptada al uso de materiales granulares (Tu et al., 2023). El proceso emplea un lecho de arena con adiciones de óxidos o sales (p.ej., magnesia), sobre el cual se deposita un aglutinante reactivo mediante una boquilla controlada. La reacción entre el aglutinante y el lecho de polvo solidifica el

material, generando capas cohesivas y autoportantes. Este procedimiento se repite de forma sucesiva hasta completar el elemento (Lyu et al., 2021).

Este sistema permite imprimir geometrías complejas con materiales alternativos como los residuos industriales o el polvo de roca. No obstante, su aplicación se ha limitado principalmente a elementos no portantes como esculturas, mobiliario urbano o estructuras arquitectónicas debido a la fragilidad del material consolidado (Bazli et al., 2023).

2.2.2.3 Concrete Printing

El enfoque de C-P fue desarrollado a partir del año 2009 en la Universidad de Loughborough en Reino Unido y es una de las metodologías más utilizadas en la actualidad. Este sistema se basa en la extrusión directa de una mezcla cementante modificada, optimizada mediante aditivos químicos que controlan su reología, tiempo de fraguado y desarrollo de resistencia temprana (Lyu et al., 2021).

A diferencia del CC, esta técnica no requiere un proceso posterior de relleno, ya que los filamentos extruidos constituyen directamente los muros o componentes estructurales, reduciendo la complejidad del proceso y permitiendo una mayor libertad geométrica. La mezcla debe cumplir simultáneamente con los requisitos de la capacidad de bombeo, extrusión, y resistencia temprana para soportar el peso de capas sucesivas (Bazli et al., 2023).

El C-P es altamente versátil y ha sido utilizado tanto en impresoras tipo pórtico como en brazos robóticos industriales, siendo adaptable a diversas escalas y aplicaciones constructivas, desde viviendas de bajo costo hasta elementos modulares prefabricados.

2.2.3. Factores clave de éxito

La implementación exitosa de la impresión 3D de tintas cementantes depende de una adecuada integración entre materiales, maquinaria y procesos. Entre los factores críticos destacan (Cao et al., 2022; Y. Chen, He, et al., 2022; Z. Li et al., 2020):

- a) Compatibilidad del material con el sistema de impresión 3D: Las mezclas deben ser diseñadas para cumplir con propiedades reológicas estrictas y estables durante todo el proceso de impresión 3D.

- b) Precisión y sincronización del sistema de extrusión: La relación entre la velocidad de del extrusor, el caudal del material depositado y la altura de capa debe mantenerse constante. Un desequilibrio entre estos factores puede provocar inestabilidad, colapsos o errores geométricos.
- c) Condiciones ambientales: Factores como la temperatura, la humedad y el viento afectan directamente la trabajabilidad y el fraguado del material. En consecuencia, se requiere de monitoreo en tiempo real.
- d) Calidad del diseño digital y la planificación del proceso: El éxito del proceso está ligado al uso de modelos-3D precisos, un adecuado *slicing* y rutas de impresión optimizadas.
- e) Capacitación y enfoque interdisciplinario: La construcción por impresión 3D demanda un trabajo conjunto entre ingenieros civiles, diseñadores, expertos en materiales, desarrolladores de software y operadores de maquinaria.

El control de estos factores y la validación experimental de las condiciones de impresión aportan a lograr una producción confiable, repetible y con estándares de calidad adecuados.

2.3. Aglutinantes elaborados con base en cemento para impresión 3D

La construcción por impresión 3D requiere de aglutinantes con propiedades de printabilidad adecuadas. El principal componente de las tintas cementantes convencionales es CP y se busca superar las limitaciones de su aplicación en impresión 3D mediante el uso de materiales puzolánicos suplementarios (MPS). En esta sección se aborda el papel del CP en impresión 3D, sus restricciones técnicas y ambientales, así como las estrategias para su modificación y sustitución parcial con materiales más sostenibles y funcionalmente adecuados.

2.3.1. Cemento Portland: rol, limitaciones y emisiones en impresión 3D

El CP es el aglutinante hidráulico más utilizado a nivel mundial en la industria de la construcción. Esto se debe a su disponibilidad, bajo costo y propiedades mecánicas confiables. En impresión 3D, el CP cumple una función clave como base del aglutinante, proporcionando cohesión en estado fresco y resistencia mecánica (J. Zhang et al., 2019).

Sin embargo, su uso en tintas para impresión 3D presenta múltiples limitaciones. En primer lugar, la velocidad de hidratación y desarrollo de resistencia temprana del CP no siempre es suficiente para cumplir con los requisitos de edificabilidad en intervalos cortos de tiempo. Además, la reología de las tintas de CP no garantiza una adecuada extruibilidad y estabilidad dimensional del filamento extruido, factores esenciales para evitar el colapso de las capas recién colocadas (Wangler et al., 2019).

Desde el punto de vista medioambiental, el uso intensivo de CP en tintas de impresión 3D contribuye a que este material sea una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono a nivel global (7-8%). Cabe mencionar que esto se relaciona principalmente con la descarbonatación de la calicita ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) y al consumo energético durante el proceso de clinkerización (Habert et al., 2020). En el contexto de la economía circular y la sostenibilidad, estas cifras resultan preocupantes, especialmente en una tecnología como la impresión 3D, que busca posicionarse como una solución constructiva innovadora y ambientalmente responsable.

Adicionalmente, el alto contenido de clinker en las tintas para impresión 3D genera un mayor calor durante el fraguado, promoviendo fisuración térmica temprana durante la impresión en climas cálidos o de elementos masivos (Do et al., 2020). Esta problemática, en conjunto con la generación de residuos industriales, refuerza la necesidad de explorar alternativas para sustituir el uso de CP.

El uso de MPS como el MK, la CV y la CB ha permitido reducir el contenido de clinker en diferentes tipos de mezclas cementantes (p.ej., morteros, concretos convencionales y autocompactables, tintas de impresión 3D, otros), mejorando propiedades reológicas, modificando la cinética de hidratación y disminuyendo la huella ambiental del aglutinante (Ndahirwa et al., 2022).

2.3.2. Metacaolín, ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar

La necesidad de encontrar soluciones sostenibles en la construcción ha impulsado el uso de MPS que no solo reducen el impacto ambiental, sino que también mejoran algunas propiedades de los aglutinantes base CP (Aziz et al., 2024). Asimismo, estos materiales cobran aún más relevancia en el diseño de tintas cementantes para impresión 3D, ya que

se requiere una adecuada fluidez, estabilidad de sus propiedades en estado fresco en el tiempo y desarrollo temprano de resistencia comparado con mezclas convencionales. Entre los MPS más estudiados se encuentran el MK, la CV y la CB. Aunque tienen orígenes, composiciones y comportamientos distintos, comparten su naturaleza puzolánica.

El MK es un material que se produce a partir de la calcinación de la caolinita entre 600 y 800 °C, lo cual deshidroxila y destruye la estructura cristalina del mineral, convirtiéndolo a su fase amorfa (Onyelowe et al., 2023). Lo anterior le confiere al MK su alta actividad puzolánica, lo cual favorece el refinamiento de la microestructura de las matrices cementantes, reduciendo la porosidad y mejorando la resistencia mecánica y la durabilidad. En impresión 3D, el MK permite ajustar la viscosidad de la mezcla, estabilizándola en el tiempo sin necesidad de añadir grandes cantidades de aditivos químicos (Thajeel et al., 2025).

La CV es un residuo de la combustión de carbón en plantas termoeléctricas. Según su origen y tratamiento puede clasificarse en tipo F (por su bajo contenido de calcio) o tipo C (por su alto contenido de calcio) (G. Li et al., 2022). La ceniza tipo F es común en el diseño de tintas cementantes para impresión 3D porque favorece a la circularidad, brinda una buena trabajabilidad y ralentiza la reactividad de la mezcla, lo que ayuda a modular la hidratación de la mezcla y extender el tiempo abierto de impresión. Además, mejora la bombeabilidad y disminuye la densidad de las mezclas, volviéndolas más ligeras (Vico Lujano et al., 2025).

La CB se obtiene tras la combustión del residuo de la caña de azúcar, un subproducto abundante en países con industria azucarera desarrollada como México. Cuando es adecuadamente calcinada y molida, presenta una alta proporción de sílice reactiva que le otorga propiedades comparables a otros MPS (Abdalla et al., 2024). Su incorporación en mezclas cementantes no sólo reduce la huella ambiental, sino que también puede reducir la demanda de agua, mejorar la cohesión y aumenta la resistencia a largo plazo (Bheel et al., 2022). Además, contribuye a reutilización de materiales alternativos locales, promoviendo el desarrollo regional y reduciendo la dependencia de materias primas tradicionales.

El uso combinado de estos materiales en un aglutinante ternario brinda la oportunidad de aprovechar las propiedades que ofrecen los tres materiales. Esta sinergia es especialmente útil en impresión 3D, donde el comportamiento en estado fresco debe ser cuidadosamente controlado sin sacrificar el desempeño estructural ni comprometer la viabilidad ambiental del proceso.

2.3.3. Requerimientos funcionales de los aglutinantes para impresión 3D

El desarrollo de tintas cementantes está ligado a las características del equipo de impresión disponible y a la escala de aplicación, ya sea experimental o industrial (Onanuga & Biernacki, 2023). Esto significa que las propiedades reológicas, mecánicas y físicas deben adaptarse a los sistemas de extrusión y al elemento a imprimir.

Siendo el concreto modificado, el mortero y las pastas cementantes los materiales printables más utilizados (Peng & Unluer, 2023a), cada uno de estos presenta ventajas y desafíos particulares en estado fresco y endurecido:

- a) Concreto: su uso en impresión 3D es limitado debido a la presencia de agregado grueso, ya que provoca bloqueos durante el bombeo y en la boquilla de extrusión. Por esta razón, se han desarrollado concretos modificados, eliminando el agregado grueso o utilizando tecnologías de impresión especiales y de mayor tamaño como las desarrolladas por COBOD y CEMEX, que permiten imprimir concretos más cercanos a los convencionales (F. P. Bos et al., 2022).
- b) Morteros: es el material printable más versátil en la actualidad (Tu et al., 2023). Gracias a su granulometría más fina y su mejor compatibilidad con las impresoras disponibles en el mercado, los morteros permiten una extrusión más fluida, mejor edificabilidad y menor riesgo de obstrucciones. Estos materiales deben cumplir con tres requerimientos fundamentales: (a) extrudabilidad, para ser extruido de manera continua y uniforme; (b) trabajabilidad, para mantenerse cohesionado durante la impresión, y (c) edificabilidad, para soportar el peso de capas sucesivas sin deformarse (Al-Noaimat, Ghaffar, et al., 2023). No obstante, no debe subestimarse el rol del aglutinante en los morteros, así como la relación agua/aglutinantes, ya que estos parámetros determinan el comportamiento reológico (Onanuga & Biernacki, 2023).

- c) Suspensiones: las pastas o suspensiones cementantes son particularmente importantes a nivel de investigación de las propiedades reológicas (Ojeda-Farías et al., 2019), ya que facilitan el ajuste preciso de estas propiedades y el estudio de los fenómenos fisicoquímicos que definen la printabilidad. Lo anterior puede realizarse modificando tanto la fase sólida (p.ej., mediante adiciones minerales como MK, CV o CB) como la fase líquida de las tintas (p.ej., mediante aditivos químicos como súper plastificantes o retardantes) (Onanuga & Biernacki, 2023). Esto también permite establecer correlaciones entre las formulaciones y las propiedades de printabilidad, lo cual es idóneo para escalar a morteros o concretos, los cuales son materiales con interacciones internas más complejas.

En resumen, el desarrollo de tintas base CP para impresión 3D requiere una visión sistémica, en la que la selección del tipo de mezcla depende no solo del elemento a imprimir, sino también de las capacidades del equipo de impresión y del entorno en que se implementará. Cada tipo de tinta presenta oportunidades únicas y retos particulares, por lo que la elección de las materias primas debe estar basada en una comprensión profunda de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como por su interacción con el sistema de impresión.

2.3.4. Mecanismos de activación química de las tintas cementantes

Las tintas cementantes no sólo deben cumplir con criterios físicos y reológicos específicos, sino que también deben presentar un comportamiento químico que garantice un adecuado desarrollo de resistencia y estabilidad dimensional en el tiempo. En este sentido los mecanismos de activación para las reacciones químicas dentro de la mezcla juegan un papel fundamental en la evolución de las propiedades del material, desde el estado fresco hasta el endurecido.

En mezclas convencionales, el CP es el principal responsable del proceso de hidratación que da origen a los productos de gelación y endurecimiento (Lavagna & Nisticò, 2022); sin embargo, al incorporar MPS como el MK, la CV o la CB, se introduce la complejidad adicional de la activación puzolánica para lograr su reacción de manera significativa (Dvorkin et al., 2022a). Esto consiste en la reacción entre las fases amorfas ricas en sílice y/o alúmina de los MPS y los productos de hidratación del cemento, principalmente el

hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (gel CSH, CAH) que refinan la microestructura de la matriz cementante y contribuyen al desarrollo de resistencia mecánica (Y. Lin et al., 2023).

Además, en sistemas ternarios que combinan dos o más materiales puzolánicos con el CP, se generan interacciones sinérgicas y competitivas que modifican la reología, la cinética de hidratación y la formación de productos de reacción secundarios (Chang et al., 2025; Pinheiro et al., 2023; Wang et al., 2023). Lo anterior puede optimizarse para favorecer su adaptabilidad al proceso de impresión. A medida que se avanza en el diseño de tintas cementantes, comprender los mecanismos de reacción se vuelve esencial para ajustar las proporciones brindadas por los componentes, p.ej., controlar los tiempos de fraguado, la tasa de ganancia de resistencia y la trabajabilidad que facilite la extrusión sin comprometer la estabilidad estructural.

2.3.5. Activación puzolánica de los materiales cementantes suplementarios

El MK, CV y CB presentan características que favorecen la activación puzolánica, p.ej., el primero puede formar fases como el aluminosilicato de calcio hidratado (CASH) (Weise et al., 2024); la CV (especialmente la de tipo F) presenta una reactividad puzolánica moderada, siendo más lenta para reaccionar, pero efectiva a edades mayores (Golewski, 2022); mientras que la CB también puede presentar una reactividad significativa, aunque su desempeño depende en gran medida de la temperatura de calcinación y de la pureza del residuo (Mansaneira et al., 2017).

La velocidad y la extensión de la reacción puzolánica dependen de varios factores, entre ellos el tamaño de partícula, el área superficial, el contenido de fases amorfas y la disponibilidad de agua y el calcio libre (Tural et al., 2024). Cabe mencionar que el consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ debido a la reacción puzolánica también mejora la durabilidad frente a ataques químicos, contribuyendo al refinamiento de los poros, lo cual la disminuye de permeabilidad a costa de reducir el desarrollo de resistencia mecánica a mediano y largo plazo en algunos casos (Tavares et al., 2020).

En el contexto de la impresión 3D, una activación puzolánica adecuada no solo favorece la resistencia final, sino que también puede influir en la reología de la tinta cementante,

modificando la interacción entre las partículas y los tiempos de fraguado, siendo una estrategia para optimizar el diseño de tintas sostenibles y funcionales (J. Xu et al., 2025).

2.3.6. Interacciones físicas y químicas en los aglutinantes ternarios

Cuando se combinan dos o más MPS con el CP en un sistema ternario, el comportamiento de la mezcla ya no depende únicamente de las propiedades individuales de cada componente, sino de las interacciones fisicoquímicas que ocurren entre estos. Dichas interacciones pueden generar efectos sinérgicos o antagónicos (Raveendran & K, 2024). En el caso de los sistemas ternarios de CP-MK-CV o CP-MK-CB, las interacciones afectan el estado fresco y endurecido. El MK tiende a incrementar la demanda de agua y modificar la viscosidad del sistema debido a su reactividad y superficie específica (Hassan & Mayo, 2014). No obstante, cuando se combina con CV es posible lograr una compensación de las propiedades reológicas debido a una menor reactividad y un efecto como lubricante, logrando una fluidez adecuada sin perder estabilidad (Ahari et al., 2015).

Además, el MK aporta una mayor concentración de alúmina reactiva, mientras que la CV y la CB pueden proveer sílice amorfa en función de su calidad. Por lo tanto, esta combinación puede favorecer la formación de fases ricas en silicato y aluminato cálcico hidratado, promoviendo un desarrollo mecánico más uniforme y estable (W. Ding et al., 2020; Zhan et al., 2021). Asimismo, estos materiales pueden influir en la cinética de hidratación del CP, acelerando o retardando el fraguado, lo cual es crítico en impresión 3D donde los tiempos deben estar cuidadosamente ajustados para garantizar la extrudabilidad y edificabilidad (Duan et al., 2022a; Thajeel et al., 2025). En términos físicos, la combinación de distintas granulometrías y morfologías de las partículas pueden mejorar el empaquetamiento, reduciendo vacíos y mejorando la cohesión de la pasta, lo cual promueve una extrusión sin segregación ni pérdida de forma (M. Chen et al., 2018).

Por otra parte, estas interacciones también pueden modificar la estabilidad química del sistema frente a agentes agresivos externos, como los sulfatos o el fenómeno de la carbonatación, mejorando la durabilidad del elemento impreso en condiciones naturales de exposición (Arslan et al., 2024).

En resumen, entender el comportamiento de los sistemas ternarios requiere un enfoque integral que combine el análisis reológico, químico y mecánico, así como una cuidadosa evaluación experimental. Esta comprensión no sólo permite optimizar la formulación del material, sino también adaptar su desempeño a las condiciones y exigencias de la tecnología de impresión 3D disponible.

2.4. Propiedades en estado fresco de las tintas cementantes

La comprensión de las propiedades en estado fresco de una tinta cementante es fundamental para su uso, ya que influye en la facilidad de bombeo, extrusión y deposición del material sin comprometer la estabilidad estructural o la calidad del producto impreso (Kazemian et al., 2017; Z. Li et al., 2020; Robayo-Salazar et al., 2024). A diferencia del concreto convencional, las tintas cementantes deben cumplir con una serie de requisitos específicos que garanticen la continuidad del proceso de extrusión y la precisión geométrica. En este sentido, se reconocen como propiedades clave la trabajabilidad, la extrudabilidad, la edificabilidad, el tiempo abierto y la estabilidad dimensional (Robayo-Salazar et al., 2023; Y. Zhang et al., 2018).

2.4.1. Trabajabilidad

Es la facilidad de la tinta para ser manipulada sin segregación o pérdida de homogeneidad. Para impresión 3D, esta propiedad asegura que la mezcla se pueda bombear, transportar y depositar de forma continua. Una mezcla trabajable debe tener una viscosidad adecuada que permita el flujo controlado por extrusión, sin presentar fenómenos de asentamiento o sangrado. Esta propiedad depende de la granulometría, la reología del sistema, el contenido de agua y la naturaleza de los aditivos químicos (Chen et al., 2022).

2.4.1. Extrudabilidad

Es la capacidad de la tinta para pasar a través del sistema de impresión (tubo y boquilla) y ser depositado en forma de un filamento continuo, sin ruptura, deformación o pérdida de cohesión. Una extrudabilidad adecuada implica que la mezcla tiene un equilibrio entre plasticidad y cohesión, siendo capaz de soportar el proceso de cizallamiento inducido por la extrusión. La relación agua/aglutinantes, la distribución de tamaño de partícula y la

formulación del aglutinante afectan directamente esta propiedad (Al-Noaimat, Chougan, et al., 2023).

2.4.2. Edificabilidad

Es la capacidad del filamento extruido para mantener su forma bajo el peso de capas subsecuentes. Implica una ganancia de resistencia temprana suficiente para evitar el colapso o deformación progresiva del material depositado. La tixotropía y la velocidad de endurecimiento son factores clave en esta propiedad (Khan et al., 2023). Una tinta con buena edificabilidad permitirá imprimir elementos con múltiples capas sin requerir tiempos de espera largos entre ellas.

2.4.3. Tiempo abierto

Es el que la tinta conserva su trabajabilidad y puede ser impreso sin perder fluidez por el inicio de fraguado. Está relacionado con el desarrollo de las reacciones de hidratación y define la ventana operativa de la tinta. El equilibrio entre mantener la extrudabilidad el tiempo suficiente para completar la impresión y asegurar una ganancia de resistencia rápida que permita la edificabilidad es lo idóneo (Chen et al., 2022).

2.4.4. Estabilidad dimensional en estado fresco

Se refiere a la capacidad del filamento recién depositado para mantener su forma y dimensiones geométricas sin expansión, asentamiento o deformación lateral. Está asociada con las propiedades reológicas y la edificabilidad de la tinta, tales como la viscosidad plástica, la tixotropía, así como la velocidad de gelación y endurecimiento del aglutinante. Un filamento inestable dimensionalmente puede promover deformaciones en las capas inferiores, pérdida de alineación vertical y deterioro de la calidad superficial. Para lograr buena estabilidad dimensional, es crucial limitar el contenido de agua y evitar tintas que propicien exudación o colapso (Lan et al., 2024).

2.4.5. Influencia de la relación agua/aglutinantes

La relación agua/aglutinantes (a/cm) es uno de los factores más importantes para las propiedades en estado fresco. Una a/cm elevada puede facilitar la trabajabilidad y la extrudabilidad, pero conlleva riesgos de segregación, menor edificabilidad y estabilidad dimensional, así como tiempos abiertos excesivos. Por el contrario, una a/cm baja puede

mejorar la edificabilidad y acelerar el fraguado, pero dificulta el bombeo y la extrusión de la tinta (Dai et al., 2020; Roussel, 2018; Wangler et al., 2019; Z. Zhang et al., 2025).

Por ello, el diseño de tintas cementantes debe buscar una relación a/cm óptima, que equilibre la fluidez, la cohesión, y la resistencia temprana. Además, es frecuente el uso de aditivos superplastificantes y modificadores de viscosidad para permitir una reducción del contenido de agua sin comprometer la fluidez necesaria para impresión (Y. Chen, Chaves Figueiredo, et al., 2020b; X. Lin et al., 2021).

2.5. Reología y su impacto en la impresión 3D

La reología estudia el comportamiento de los materiales en estado fresco bajo condiciones de flujo y deformación (Sharma et al., 2025a). Estas propiedades son críticas para la impresión 3D de materiales cementantes, ya que determinan la viabilidad del proceso de extrusión, la calidad del filamento depositado y la capacidad del material para mantener su forma bajo cargas autoimpuestas (Boddepalli et al., 2023). En este contexto, la acumulación estructural se vuelve un concepto clave para explicar la resistencia progresiva que desarrolla el filamento extruido en reposo después de ser depositado, sin necesidad de fraguado completo (Perrot et al., 2016). Esto permite que las capas impresas soporten el peso de capas sucesivas en tiempos cortos, lo cual es esencial para la construcción vertical y continua (M. Chen et al., 2020).

2.5.1. Reología de los materiales

El término “reología” fue acuñado en 1920 por Eugene C. Bingham en el Lafayette College, Indiana, EE. UU., y se refiere a la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia (Irgens, 2014). Aunque originalmente centrada en fluidos, su campo de acción se ha expandido al análisis de materiales que presentan características tanto líquidas como sólidas. Tal como afirmó Heráclito: "todo fluye", y bajo esta premisa, la reología considera no solo líquidos, sino también gases, sólidos y mezclas complejas en estados intermedios (Ojeda-Farías et al., 2019).

En consecuencia, muchos materiales de interés para la ingeniería, como los morteros para impresión 3D, presentan comportamientos que requieren el análisis conjunto de sus componentes elásticos en fase sólida y los componentes viscosos en fase líquida

(Gutierrez-Lemini, 2014). Por lo tanto, el estudio reológico permite evaluar la manera en que estos materiales responden a fuerzas externas, lo cual es crucial para garantizar la printabilidad, estabilidad y desempeño estructural de las tintas.

(a) Estado viscoso de la materia

La viscosidad es una propiedad fundamental que describe la resistencia de un material a fluir (Navarrete et al., 2022). Se modela frecuentemente mediante el esquema de placas paralelas, en el cual un fluido es sometido a una fuerza de corte entre dos placas planas, una fija y otra móvil (Figura 3). Este sistema permite definir dos parámetros:

- a) Esfuerzo cortante (τ): la fuerza aplicada (F) por unidad de área (A) para inducir el desplazamiento del material (Ec. (1)).
- b) Velocidad de corte ($\dot{\gamma}$): la razón entre la velocidad relativa del movimiento (V) y la distancia entre las placas (h) (Ec. (2)).

Así, la viscosidad (η) es la razón entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte (Ec. (3)). En materiales complejos, esta puede depender del tiempo, la temperatura o la historia de deformación.

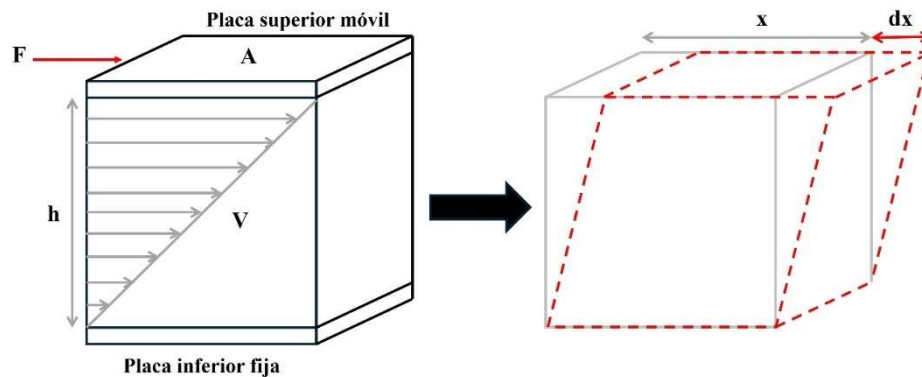


Figura 3. Ley de Newton - Modelo de placas paralelas

$$\tau = \frac{F}{A} [=] \frac{N}{m^2} = Pa \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{h} [=] \frac{cm}{cm} = s^{-1} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [=] \frac{Pa}{s^{-1}} = Pa \cdot s \quad \text{Ec. (3)}$$

(b) Estado elástico de la materia

Cuando un material se comporta como un sólido elástico ideal, la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación sigue la ley de Hooke. La deformación es proporcional al desplazamiento relativo entre partículas dividido por la longitud original (Ec. (4)) y el esfuerzo se relaciona con la deformación a través del módulo de elasticidad (G) (Ec. (5)).

$$\gamma = \frac{x}{h} = \frac{dx}{dh} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\tau = G\gamma \quad \text{Ec. (5)}$$

2.5.1.2 Comportamientos reológicos generales

Existen múltiples tipos de materiales cuyas propiedades se describen mediante diferentes ecuaciones de estado. Estos van desde sólidos euclidianos hasta fluidos ideales (Tabla 1) (Monroy-Loperena, 2024). El estudio reológico se aplica a la mayoría de ellos, a excepción de los sólidos perfectos y los fluidos sin viscosidad (fluidos de Pascal). En la práctica, los materiales de interés en la ingeniería civil suelen clasificarse como fluidos newtonianos, fluidos no newtonianos y fluidos viscoelásticos (Farid Ojeda-Farías, 2019).

Tabla 1. Ecuaciones del estado de la materia para diferentes tipos de materiales y medios.

Sólido euclidiano (perfecto)	$\gamma = 0$
Sólido elástico de Hooke (lineal)	$\tau = G\gamma$
Sólido elástico no lineal	$\tau = G(\gamma)\gamma$
Medios reológicamente complejos	$\tau = \tau(\gamma, \dot{\gamma}, t, \dots)$
Fluido viscoso no lineal (No Newtoniano)	$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$
Fluido viscoso lineal (Newtoniano)	$\tau = \eta\dot{\gamma}$
Fluido de Pascal (perfecto)	$\tau = 0$

Adaptada de: (Rojas, 2012).

(a) Fluidos newtonianos

Son aquellos que obedecen la ley de viscosidad de Newton, es decir, presentan una viscosidad constante independiente de la tasa de corte (Lavrov, 2023). La gráfica τ vs $\dot{\gamma}$ para estos materiales es una línea recta que pasa por el origen y, aunque su viscosidad no varía con el tiempo, sí puede hacerlo con la temperatura o la presión.

(b) Fluidos no newtonianos

Estos materiales no siguen la ley de Newton. Su viscosidad aparente cambia en función de la tasa de corte, el tiempo o la temperatura (Lavrov, 2023). Esta clase incluye:

- a) Reofluidificantes (*shear thinning*) (Figura 4-a): disminuyen su viscosidad aparente al aumentar la tasa de corte.
- b) Reoespesantes (*shear thickening*) (Figura 4-b): aumentan su viscosidad con la tasa de corte.
- c) Viscoplasticos (Figura 4-c): presentan un esfuerzo umbral que debe superarse para que ocurra el flujo.

Diversos modelos han sido propuestos para describir su comportamiento, p.ej., los modelos de Ostwald–de Waele, Carreau, Ellis y Sisko.

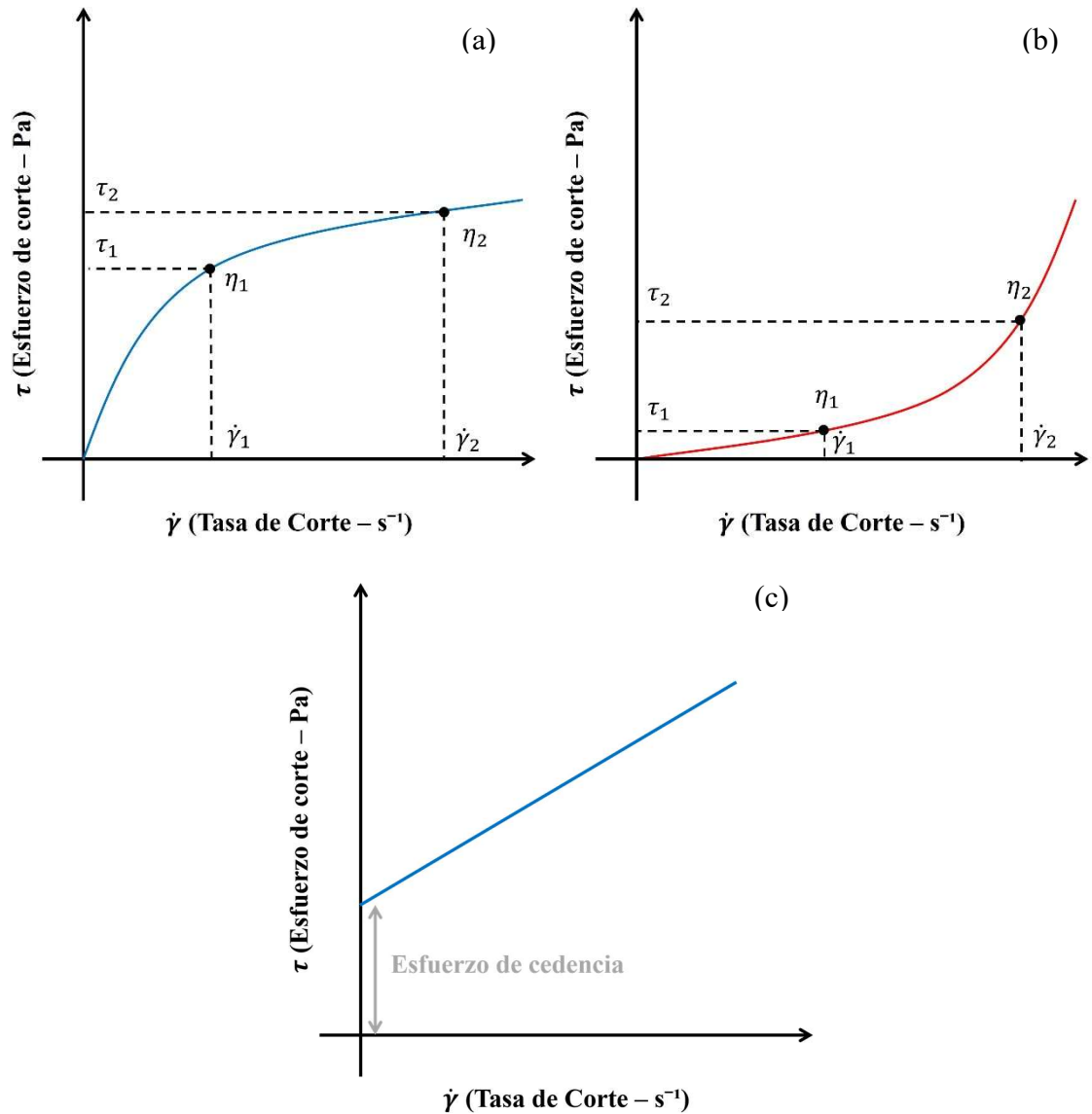


Figura 4. Reogramas de (a) fluido refluidificante, (b) fluido reespesante y (c) fluido viscoplástico.

(c) Fluidos viscoelásticos

Los materiales viscoelásticos combinan propiedades de sólidos elásticos y fluidos viscosos. Al aplicarles una fuerza una parte de la energía se almacena (componente elástico) y otra parte se disipa (componente viscoso). El modelo de Maxwell es una representación básica de este comportamiento, con un resorte (módulo elástico, G) y un pistón (viscosidad, η) en serie (Figura 5) (Charles et al., 2021).



Figura 5. Modelo de Maxwell.

Los ensayos reológicos más comunes para caracterizar estos materiales incluyen:

- a) Relajación del esfuerzo (Figura 6-a): el material se deforma y se observa la disminución del esfuerzo con el tiempo (Qian & Li, 2011).
- b) Cedencia a la deformación (Figura 6-b): se aplica un esfuerzo constante y se mide la evolución de la deformación (M. Chen et al., 2020).
- c) Recuperación de la deformación (Figura 6-c): analiza cuánto puede recuperar un material tras la eliminación del esfuerzo (Farid Ojeda-Farías, 2019).
- d) Ensayo oscilatorio (Figura 6-d): se aplica una deformación sinusoidal y se evalúa la respuesta mediante el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdidas (G''). En este último ensayo, el módulo complejo (G^*) se representa como una combinación de G' y G'' . El ángulo de fase (δ) indica la proporción relativa entre comportamiento elástico y viscoso. En materiales viscoelásticos, δ se encuentra entre 0° (sólido ideal) y 90° (líquido newtoniano). Las representaciones gráficas de G' y G'' permiten identificar transiciones entre zonas de comportamiento viscoso, gomoso y vítreo (Petrovic et al., 2015).

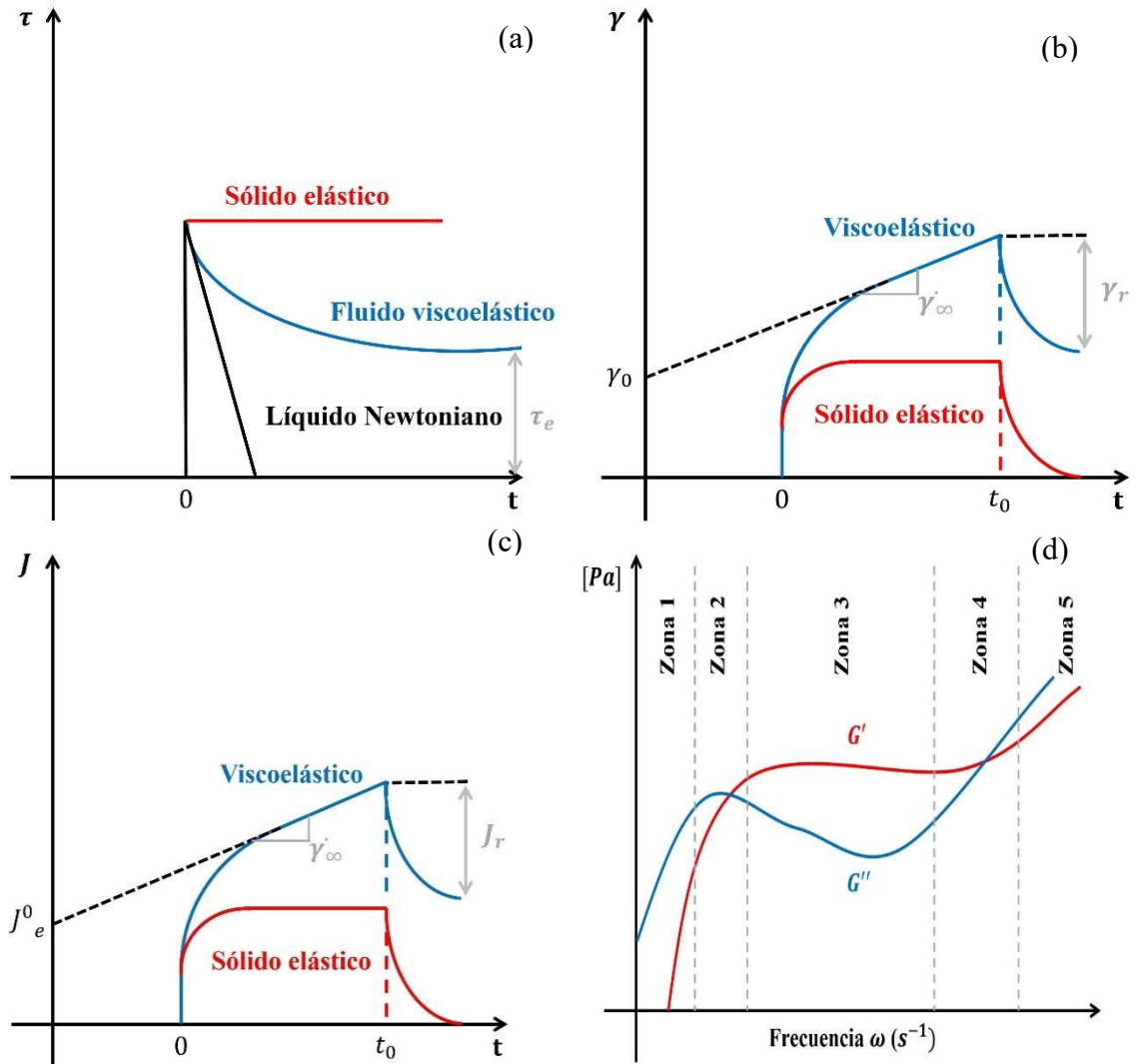


Figura 6. Respuesta de materiales sometidos a ensayos reológicos de (a) relajación del esfuerzo, (b) cedencia a la deformación, (c) recuperación de la deformación y (d) ensayo oscilatorio.

2.5.2. Reología de los materiales base cemento

Las mezclas cementantes pertenecen a la categoría de fluidos reológicamente complejos debido a que sus propiedades cambian en función del tiempo, el esfuerzo cortante y la tasa de corte (Sharma et al., 2025b). Estas suspensiones evolucionan reológicamente conforme avanza la hidratación del cemento, dando lugar a comportamientos típicos de materiales tixotrópicos (Jiao et al., 2019). Dentro de este contexto, resulta indispensable comprender fenómenos como la tixotropía, la acumulación estructural, la floculación y la gelación, así como los modelos que permiten cuantificarlos.

(a) Tixotropía

Es la capacidad de ciertos materiales para disminuir su viscosidad con el tiempo al someterlo bajo un esfuerzo cortante y recuperarla progresivamente al cesar dicho esfuerzo (Jiao et al., 2021). A diferencia de los fluidos puramente dependientes del esfuerzo o la tasa de corte, los materiales tixotrópicos también presentan una dependencia temporal, ya que su viscosidad y resistencia al flujo no solo dependen de las condiciones instantáneas de carga, sino de la duración de la aplicación del esfuerzo (Farid Ojeda-Farías, 2019).

Este comportamiento se representa comúnmente mediante lazos de histéresis en curvas de flujo esfuerzo-deformación (Figura 7). En una tixotropía positiva, la viscosidad disminuye durante ciclos de corte repetidos; en cambio, una tixotropía negativa implica un aumento de la viscosidad bajo las mismas condiciones (Farid Ojeda-Farías, 2019). Cabe destacar que estos lazos no son lineales ni completamente simétricos, ya que también dependen de la magnitud del esfuerzo y de la tasa de corte aplicada.

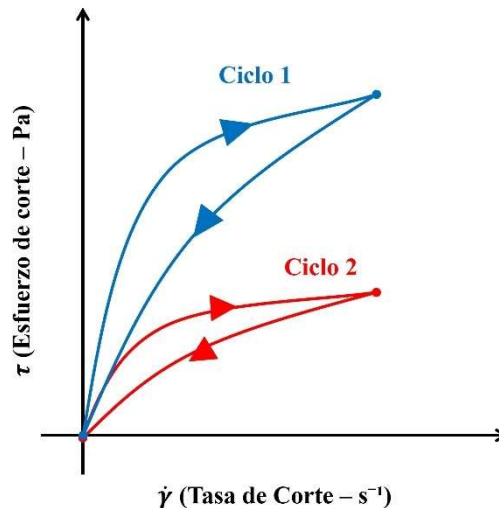


Figura 7. Comportamiento de un material tixotrópico idealizado.

(b) Acumulación estructural (*Structural Build-Up*)

Aunque el término "tixotropía" ha sido empleado para describir el comportamiento de los materiales cementantes, este fenómeno abarca procesos reversibles (p.ej., la floculación física) e irreversibles (p.ej., los derivados de la hidratación química del CP) (Kruger et al., 2019). Por esta razón, resulta más preciso hablar de acumulación estructural tixotrópica, lo cual incluye la reconstrucción de la red interna del material en reposo y su degradación

bajo carga (Jiao et al., 2021; Peng & Unluer, 2023a). La acumulación estructural puede dividirse en dos componentes:

- a) Floculación: Es un proceso reversible en el cual las partículas en suspensión tienden a aglomerarse mediante interacciones físicas débiles (p.ej., las fuerzas de Van der Waals o enlaces de puentes de iones), formando estructuras conocidas como flóculos (Farid Ojeda-Farías, 2019). Esto proporciona rigidez inicial al sistema, pero pueden desintegrarse con la aplicación de esfuerzo cortante, provocando una disminución temporal de la viscosidad. Por tanto, la refloculación permite que el material recupere su estructura al cesar el esfuerzo.
- b) Gelación: Es un proceso parcialmente irreversible que implica la formación de una red continua y densa de flóculos conectados, generando una estructura tridimensional más resistente al corte (Ioannidou et al., 2016; N. Zhang et al., 2016). En los materiales cementantes, esta evolución microestructural está asociada al inicio de la hidratación química, que forma productos como el gel CSH. Así, es difícil de romper esta red densa y consolidada mediante esfuerzo mecánico, marcando el inicio de una pérdida progresiva de la fluidez.

La Figura 8 esquematiza esta evolución, desde las partículas aisladas, la etapa de floculación intermedia, hasta alcanzar una estructura de gel densa y consolidada.

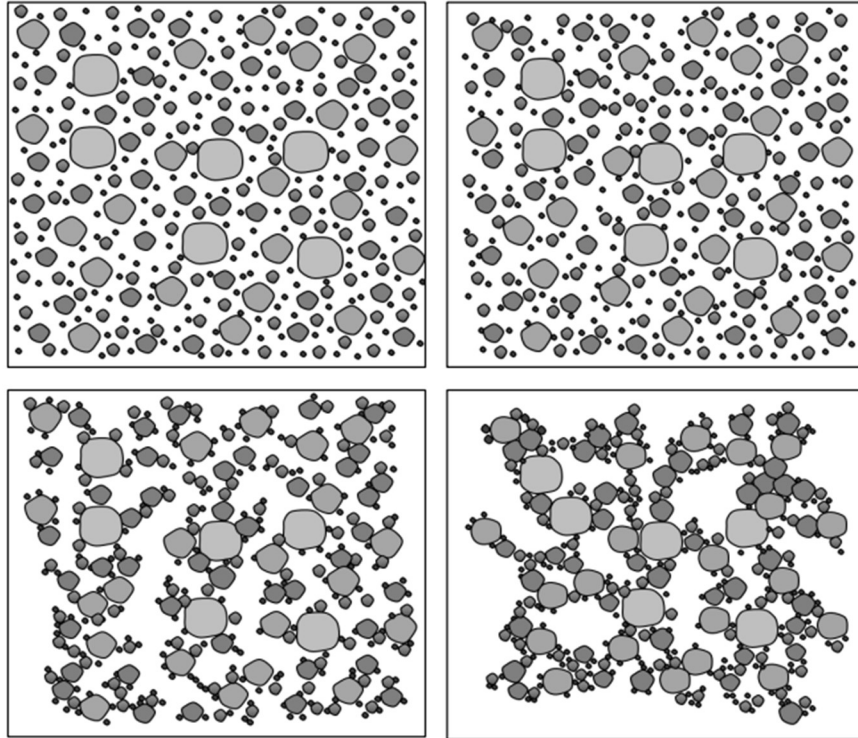


Figura 8. Proceso de floculación y gelación en materiales cementantes. Tomada de:
(Farid Ojeda-Farías, 2019).

(i) Modelos para evaluar la acumulación estructural tixotrópica

Existen diversos modelos para cuantificar la evolución de la acumulación estructural de los materiales cementantes. Entre los más relevantes destacan los modelos basados en límites elásticos y en pruebas oscilatorias de pequeña amplitud (SAOS, por sus siglas en inglés), los cuales permiten estimar la tasa de formación y recuperación estructural de las pastas.

a) Modelo de Roussel (2006): Utilizando el modelo de Bingham, Roussel propuso una formulación cinética para describir la evolución de la tixotropía reversible mediante un parámetro estructural interno (λ):

$$\tau_0(t) = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} + \lambda(t) \quad \text{Ec. (6)}$$

donde:

- $\tau_0(t)$: límite elástico en función del tiempo
- τ_0 : límite elástico inicial

- μ_p : viscosidad plástica
- $\dot{\gamma}$: tasa de corte
- $\lambda(t)$: parámetro estructural asociado a la floculación

Posteriormente, definió una expresión lineal de la evolución del límite elástico con el tiempo:

$$\tau_0(t) = \tau_0 + A_{thix} \cdot t \quad \text{Ec. (7)}$$

donde:

- A_{thix} : representa la tasa de acumulación estructural.
- b) Modelo de Perrot et al. (2016): Este modelo introduce una evolución exponencial del límite elástico estático, considerando el tiempo de reposo y el avance de la hidratación:

$$\tau_0(t) = \tau_0 + A_{thix} \cdot t_c (e^{t/t_c} - 1) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\tau_0 = m \frac{A_0 a^* \phi^2 (1 + \chi a(t))^{4/3} (\phi (1 + \chi a(t)) - \phi_{perc})}{d_0^2 H^2 \phi_m (\phi_m - \phi (1 + \chi a(t)))} + A_{thix} \cdot t \quad \text{Ec. (9)}$$

donde t_c es un tiempo característico para ajustar los valores experimentales, m un factor dependiente de la distribución del tamaño de partícula, d el diámetro medio de la partícula, a^* el radio de curvatura de los puntos de contacto H la distancia de separación en los puntos de contacto, A_0 la constante de Hamaker, ϕ_{perc} la fracción de volumen de percolación, ϕ la fracción de volumen sólido, ϕ_m la fracción de volumen máximo de partículas, $a(t)$ un indicador del grado de hidratación y χ un parámetro que indica el volumen hidratado de cemento.

- c) Modelo de Mostafa & Yahia (2017): Basado en pruebas SAOS, este modelo emplea dos parámetros:

- Tiempo de percolación (Ec. (10)): asociado a la formación de microestructura por floculación.
- Tasa de rigidez (Ec. (11)): relacionada con la evolución de la hidratación.

$$t_{perc} = A \cdot D_{50}^{n_1} + B \cdot Sd^{n_2} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$R_{rigid} = A^* \cdot D_{50}^{m_1} + B^* \cdot Sd^{m_2} \quad \text{Ec. (11)}$$

donde:

- D_{50} : diámetro medio de las partículas
- Sd : distancia media de separación
- A, B, A^*, B^*, n, m : constantes de ajuste

Aunque este modelo proporciona un análisis detallado, su implementación práctica es compleja por la cantidad de parámetros de ajuste necesarios, haciéndolo menos conveniente en comparación con el modelo de Kruger.

- d) Modelo bilineal de Kruger et al. (2019): Kruger et al. Este modelo distingue entre dos procesos independientes:
- a. R_{thix} : tasa de refloculación (proceso reversible)
 - b. A_{thix} : tasa de estructuración por hidratación (proceso irreversible)

$$\begin{aligned} \tau_s(t) &= \tau_{D,i} + R_{thix} \cdot t, t \leq t_{rf} \\ \tau_s(t) &= \tau_{S,i} + A_{thix} \cdot t, t > t_{rf} \end{aligned} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$t_{rf} = \frac{\tau_{S,i} - \tau_{D,i}}{R_{thix}}$$

donde:

- $\tau_s(t)$: límite elástico estático al tiempo t
- $\tau_{D,i}$: límite dinámico inicial
- $\tau_{S,i}$: límite estático inicial
- t_{rf} : tiempo de refloculación

En este modelo R_{thix} caracteriza el proceso de floculación reversible de las partículas correspondiente a la influencia física que ocurre en los primeros segundos después de la eliminación del esfuerzo que induce al movimiento, es decir, la reconstrucción del esfuerzo cortante después de cesar la agitación (Kruger et al., 2019). En impresión 3D de materiales aglutinantes, este proceso de refloculación se asocia con mantener la forma de las capas extruidas (Pan et al., 2022). Por otro lado, A_{thix} caracteriza el incremento del

límite elástico estático debido a las reacciones de hidratación de los cementantes durante un periodo de tiempo más largo (Figura 9), por lo tanto, este parámetro se relaciona con el proceso irreversible de la tixotropía de los cementantes y, en consecuencia, es el responsable de definir los parámetros de impresión correspondientes al bombeo del material y a la velocidad de impresión (Bogner et al., 2020; Link et al., 2020).

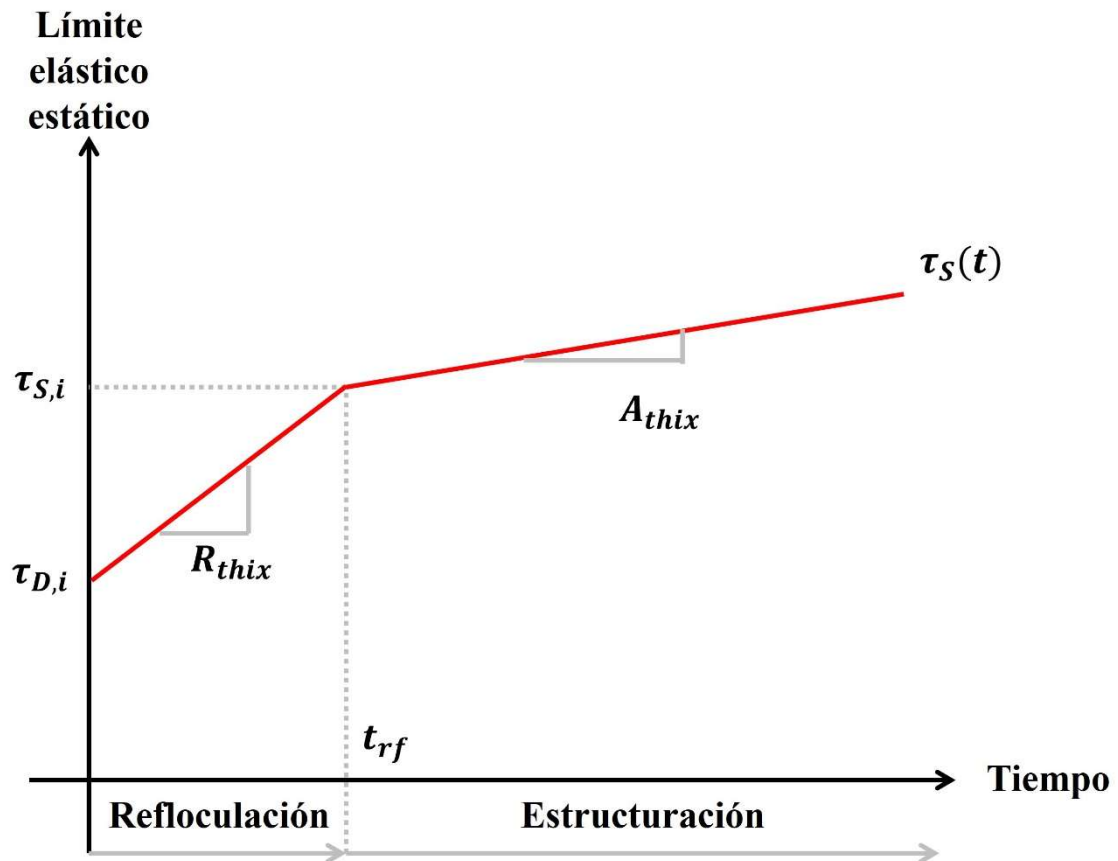


Figura 9. Refloculación y estructuración de un material cementante en función de la evolución del límite elástico.

2.5.3. Esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica

La caracterización reológica de las tintas cementantes requiere la identificación y análisis de parámetros fundamentales que gobiernan su comportamiento bajo condiciones de flujo. Entre estos, el esfuerzo de cedencia (τ_0) y la viscosidad plástica (μ_p) son considerados los más relevantes para evaluar la extrudabilidad y la edificabilidad (Mohan et al., 2021; Robayo-Salazar et al., 2024).

El esfuerzo de cedencia representa la tensión mínima necesaria para que el material comience a fluir (Thompson et al., 2018). Por debajo de este esfuerzo, el material actúa como un sólido elástico que no experimenta deformación plástica. Un esfuerzo de cedencia suficientemente alto es deseable para garantizar que el filamento extruido mantenga su forma una vez depositado, contribuyendo así a la estabilidad dimensional y a la capacidad de apilamiento sin colapso (Wu et al., 2021).

Por otro lado, la viscosidad plástica describe la resistencia interna de la tinta al flujo una vez superado el esfuerzo de cedencia (Vera-Sorroche et al., 2014). Este parámetro está relacionado con la energía requerida para transportar el material a través de la boquilla de extrusión (Abeykoon et al., 2020; Bovo et al., 2024). Una viscosidad plástica elevada puede dificultar la extrusión continua, generar atascamientos o provocar inestabilidad en el flujo; mientras que una viscosidad demasiado baja puede conducir a deformaciones excesivas o al colapso de capas impresas.

La optimización conjunta de ambos parámetros resulta crucial para el desempeño en impresión 3D. Un material idealmente imprimible presenta un alto esfuerzo de cedencia para garantizar la autoportabilidad y la forma del elemento impreso, junto con una baja viscosidad plástica que facilite su extrusión sin necesidad de presiones excesivas que comprometan el sistema de bombeo o la boquilla (Aghaee et al., 2022; Feng et al., 2022). Además, estos parámetros deben mantenerse estables durante el proceso de impresión, lo cual representa un desafío porque los aglutinantes están en constante evolución microestructural debido a la hidratación y la tixotropía (Link et al., 2020; Surehali et al., 2025).

Varios estudios han propuesto rangos óptimos para estos parámetros dependiendo de la aplicación específica. P.ej., Panda et al. (2018) y Kruger et al. (2019) han determinado que un esfuerzo de cedencia de 500 a 1500 Pa y una viscosidad plástica inferior a 100 Pa·s favorecen el equilibrio entre extruibilidad y edificabilidad. Sin embargo, estos límites dependen de los aglutinantes, la relación a/cm, el tipo de aditivos químicos utilizados (p.ej., modificadores de viscosidad, superplastificantes, etc.), así como de la temperatura y el tiempo de reposo del material.

En síntesis, tanto el esfuerzo de cedencia como la viscosidad plástica son parámetros interdependientes que deben ser ajustados cuidadosamente mediante el diseño de las tintas y la caracterización reológica sistemática. Su control asocia una adecuada la extrudabilidad, edificabilidad y calidad geométrica de los elementos impresos.

2.5.4. Influencia de las características de los aglutinantes en las propiedades de printabilidad

Las propiedades reológicas y de printabilidad de las tintas cementantes no solo dependen de la dosificación de los componentes de la mezcla ni del uso de aditivos químicos, sino también de las características intrínsecas de las materias primas utilizadas. Aspectos como la morfología de las partículas, su distribución granulométrica, el área superficial específica y su comportamiento frente a la hidratación incluyen en la extrusión, la acumulación estructural, la edificabilidad y la estabilidad dimensional (Mohan et al., 2021; M. Rahman et al., 2024). A continuación, se describe la influencia de estas propiedades físicas y químicas sobre el desempeño reológico y de printabilidad de las tintas cementantes.

- a) **Morfología de las partículas:** La forma y textura superficial de las partículas cementantes influyen en la fricción interna de la mezcla, lo cual repercute en la viscosidad, la fluidez y la trabajabilidad del material. Las partículas con morfologías angulosas y superficies rugosas tienden a generar mayor fricción interna, incrementando así la viscosidad plástica de la mezcla, reduciendo la extrudabilidad y elevando la demanda de agua para lograr una consistencia adecuada (Cheng et al., 2016; De Belie, 2018). No obstante, esta misma rugosidad puede favorecer la edificabilidad, ya que mejora el enlace mecánico entre capas y el soporte estructural en estado fresco. Por el contrario, partículas con formas esféricas o semiesféricas y superficies lisas reducen la fricción interna, facilitando la extrusión y la fluidez, aunque pueden comprometer la estabilidad post-impresión debido a la menor cohesión entre partículas (T. Yang et al., 2018).
- b) **Distribución granulométrica:** La granulometría de los materiales cementantes afecta diversos aspectos del comportamiento en estado fresco, tales como el empaquetamiento, la cohesión interna, la formación de vacíos y la interacción

reológica. Una distribución fina y continua permite una mayor densidad de empaquetamiento, lo cual mejora la estabilidad dimensional y reduce la segregación y el sangrado (Navarrete et al., 2020). Esta fineza también incrementa la fracción de volumen de sólidos, provocando un efecto espesante en la mezcla que favorece la acumulación estructural y la capacidad de carga del material extruido (Jiao et al., 2021). Sin embargo, mezclas con predominancia de partículas gruesas pueden generar vacíos y una mayor demanda de agua, lo que reduce la fluidez y puede dificultar la extrusión (Jiao et al., 2017).

- c) Área superficial específica: El área superficial específica de los materiales cementantes se relaciona con la finura de las partículas y su capacidad de interacción tanto física como química dentro del sistema. Una mayor área superficial permite un mejor empaquetamiento y una mayor cohesión, pero también incrementa la viscosidad del material debido al aumento de la fricción interna y a la mayor cantidad de agua requerida para humectar las superficies (De Belie, 2018). Esta propiedad también afecta la capacidad del sistema para desarrollar floculación y gelación, lo cual impacta en la estabilidad post-impresión y la acumulación estructural. Asimismo, una mayor área superficial está asociada con una mayor reactividad, lo cual puede acelerar los procesos de hidratación e influir en el desarrollo temprano de resistencia y la disminución del tiempo abierto (Jiao et al., 2021; Navarrete et al., 2020).
- d) Hidratación y actividad puzolánica de los aglutinantes: El proceso de hidratación y de la reacción puzolánica constituye uno de los factores más relevantes en el control de las propiedades reológicas y de printabilidad. Durante esta fase, las reacciones químicas entre las fases activas del cemento con el agua o los materiales puzolánicos dan lugar a la formación de productos de hidratación que modifican progresivamente la viscosidad de la mezcla, la acumulación estructural y el tiempo útil de impresión (Farid Ojeda-Farías, 2019). Materiales con alta reactividad generan un incremento rápido de la viscosidad debido a la acelerada formación de flóculos, acortando significativamente el tiempo en que el material mantiene una consistencia extruible (K. W. Lee et al., 2022). Por tanto, un control adecuado del calor de hidratación y de la velocidad de reacción es indispensable para garantizar una ventana de impresión

suficientemente amplia, sin comprometer la edificabilidad y la resistencia temprana del elemento impreso.

En conjunto, estos factores reflejan la complejidad del diseño de tintas cementantes. La selección y caracterización adecuada de las materias primas, en función de sus propiedades físicas y químicas, permite desarrollar mezclas balanceadas que cumplan simultáneamente con los criterios de fluidez, extrudabilidad, estabilidad y acumulación estructural requeridos para una impresión eficiente y precisa.

2.6. Propiedades mecánicas en impresión 3D

A diferencia de los sistemas tradicionales de moldeo, la impresión 3D genera elementos con anisotropía debido a la deposición en capas de los filamentos (Song et al., 2025). Esto influye notablemente en el desarrollo de las propiedades mecánicas del elemento impreso, no solo por la composición del material sino también por la geometría de deposición, la orientación de las capas y la adhesión entre ellas (C. Liu et al., 2021), por lo que, las propiedades mecánicas deben evaluarse considerando esta anisotropía, ya que tienen un impacto directo en el desempeño estructural y en la durabilidad de los elementos impresos.

2.6.1. Compresión y flexión en elementos impresos

Los ensayos de compresión y flexión son pruebas estándar para evaluar el desempeño mecánico de materiales cementantes. Sin embargo, estos ensayos deben ser adaptados para evaluar la influencia del proceso de deposición en capas (K. Liu et al., 2023). A nivel microscópico y mesoscópico, los elementos impresos no son homogéneos, sino que presentan interfaces entre capas, zonas de contacto con mayor porosidad y posibles discontinuidades.

- a) Resistencia de compresión: Puede disminuir si la carga se aplica en una dirección diferente a la deposición, debido a la debilidad en la unión entre capas (Xiao et al., 2021). No obstante, si las condiciones de impresión y los tiempos de deposición se controlan adecuadamente, se puede obtener una compacidad suficiente que minimice este efecto (Sapata et al., 2025).
- b) Resistencia de flexión: En este caso las debilidades en las interfaces suelen ser más notorias. La resistencia varía según la orientación del esfuerzo en relación con la

dirección de impresión (R. Wolfs et al., 2025). P, ej., cuando la flexión actúa perpendicular a las capas, la falla tiende a ocurrir por delaminación de las capas, resultando en resistencias inferiores comparadas con especímenes colados de forma convencional (Sapata et al., 2025).

Esto plantea la necesidad de evaluar los elementos impresos considerando la dirección de deposición y las condiciones de unión entre capas.

2.6.2. Direccionalidad y anisotropía

Una característica fundamental en elementos impresos es su anisotropía mecánica (K. Liu et al., 2023). La impresión 3D introduce una dependencia direccional en las propiedades del material, en contraste con los concretos colados que son isotrópicos (Kolawole et al., 2025). Esta anisotropía se ve influida por:

- a) Orientación de las capas: Las propiedades mecánicas son generalmente mayores en la dirección paralela al plano de deposición y deficientes en la dirección perpendicular.
- b) Condiciones de extrusión y compactación: Una extrusión no uniforme o una compactación deficiente pueden generar porosidad localizada entre las capas.
- c) Intervalo de tiempo entre capas: Si el tiempo entre la deposición de capas es muy largo, puede generarse una pérdida de adherencia, reduciendo significativamente la resistencia a esfuerzos perpendiculares.
- d) Compatibilidad reológica y cinética: La interacción entre la reología del material y el avance del fraguado también afecta la calidad de la unión interlaminar.

En la práctica, esta anisotropía implica que la orientación del proceso de impresión debe ser considerada como un parámetro de diseño estructural, influenciando incluso la dirección de cargas admisibles y los factores de seguridad.

2.6.3. Consideraciones del curado y fraguado

El proceso de curado y fraguado en impresión 3D presenta desafíos particulares que deben ser abordados para asegurar el adecuado desarrollo de las propiedades mecánicas, destacando los siguientes (Kirby et al., 2024):

- a) Curado diferencial: Las capas inferiores permanecen más tiempo en condiciones húmedas, mientras que las superiores pueden secarse más rápido debido a su exposición al ambiente. Esto genera un perfil de hidratación no uniforme.
- b) Velocidad de deposición y ganancia de resistencia: Es necesario que el material fragüe lo suficientemente rápido para sostener nuevas capas, pero no tan rápido como para obstruir la extrusión o impedir la unión entre capas.
- c) Condiciones ambientales: La temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento afectan la cinética de hidratación y, por tanto, la resistencia final. En algunos casos se emplean los curados controlados, la niebla, las cubiertas o los aditivos para mitigar estos efectos.
- d) Fraguado inicial vs. fraguado final: En impresión 3D, el fraguado inicial es especialmente relevante, ya que determina el intervalo de tiempo disponible para la acumulación estructural y la recepción de capas adicionales. Una gestión deficiente del fraguado puede conducir a fallas estructurales tempranas.

Por ello, una estrategia integral de curado que combine el diseño de la tinta con el control del entorno de impresión es esencial para maximizar el desempeño mecánico de las estructuras impresas.

2.7. Sostenibilidad y economía circular

La sostenibilidad en la construcción ha dejado de ser una tendencia para convertirse en una necesidad urgente. En este contexto, la construcción por impresión 3D es una tecnología disruptiva que no solo promete eficiencia constructiva y reducción de costos, sino también una vía para repensar los materiales utilizados desde un enfoque de economía circular (Mendoza Rangel & Díaz-Aguilera, 2023).

Este paradigma busca cerrar el ciclo de vida de los materiales, minimizando el uso de recursos vírgenes y la generación de residuos, al tiempo que se reduce el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de la edificación (Vijayenthiran et al., 2025). Con respecto del diseño de las tintas cementantes para impresión 3D, esto se traduce en el uso de subproductos industriales, agroindustriales y la optimización del contenido de cemento, el cual es responsable de una proporción significativa de las emisiones de carbono de la industria.

2.7.1. Aprovechamiento de residuos industriales y agroindustriales

Una de las estrategias más efectivas para fomentar la sostenibilidad en la impresión 3D de tintas cementantes es el uso de residuos con propiedades puzolánicas o de relleno como sustitutos parciales del cemento (Teixeira et al., 2023). Entre los residuos más estudiados destacan la CV, el MK y la CB por su actividad puzolánica y las ventajas que aportan a las propiedades de trabajabilidad, cohesión, tixotropía, resistencia mecánica y reológicas (Celik et al., 2014; Zunino & Scrivener, 2021; Alvarenga & Cordeiro, 2024). El uso de estos residuos permite una gestión responsable de subproductos que de otro modo serían dispuestos en vertederos o en sitios no controlados, (Celik et al., 2014) (Zunino & Scrivener, 2021) (Alvarenga & Cordeiro, 2024).

2.7.2. Análisis comparativo de los aglutinantes alternativos con los materiales convencionales en términos de sostenibilidad

La evaluación comparativa entre el concreto convencional y los aglutinantes alternativos desarrollados para impresión 3D debe realizarse en términos de impacto ambiental, consumo de recursos y desempeño funcional. Algunos aspectos clave en este análisis incluyen el consumo de CP, el desperdicio de material, el uso de moldes y cimbras y el diseño estructural optimizado.

En cuanto al consumo de CP, las mezclas convencionales utilizan elevados volúmenes de este material, rondando entre ~ 400 y ~ 600 kg/m³, lo cual contribuye significativamente a las emisiones de CO₂. La incorporación de materiales puzolánicos puede reducir este valor entre un 20% y 50% (Habert et al., 2020). Por otro lado, en la construcción tradicional se estima que entre el 5% y el 10% del concreto puede desperdiciarse en obra. En contraste, la impresión 3D permite una fabricación aditiva sin encofrado, lo cual reduce casi a cero los residuos durante la ejecución (F. Boss et al., 2016). Además, el concreto tradicional depende de moldes de madera o metal, cuya fabricación y disposición generan impactos ambientales adicionales. La impresión 3D elimina esta necesidad, reduciendo el consumo de materiales temporales y el costo energético asociado. Finalmente, la impresión 3D permite generar geometrías optimizadas para el uso estructural y funcional del material, minimizando zonas de sobrecarga de material y permitiendo estructuras más ligeras con igual o mejor desempeño (Teixeira et al., 2023).

Estas ventajas colocan a la impresión 3D como una solución prometedora frente a procesos constructivos convencionales, especialmente cuando se utilizan mezclas con componentes reciclados o con bajo contenido de Clínker.

2.7.3. Reducción de huella de carbono

Uno de los principales beneficios de los aglutinantes alternativos es su potencial para reducir la huella de carbono de la construcción (Winnefeld et al., 2022). La incorporación de residuos industriales y agroindustriales permite disminuir el contenido de Clínker, aprovechando materiales con menor requerimiento energético de procesamiento como las cenizas o las escorias, las cuales ya han sido calcinadas en los procesos industriales que los generaron (Dey et al., 2022; Kurniati & Kim, 2023). Asimismo, el uso de residuos industriales locales reduce la demanda de transporte y extracción de recursos vírgenes no renovables (Munir et al., 2022).

Diversos estudios han señalado que las mezclas ternarias con sustituciones de hasta 50% del CP por CV, MK o CB pueden reducir entre 30% y 60% la huella de carbono de un elemento impreso, sin comprometer significativamente sus propiedades mecánicas (Dhandapani et al., 2021; Scrivener et al., 2018). El enfoque de economía circular, además de contribuir a la descarbonización del sector construcción, se alinea con la Agenda 2030 y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente el ODS 9 de Industria, innovación e infraestructura y el ODS 12 de Producción y consumo responsables.

CAPÍTULO 3. Antecedentes

3.1. Estado del arte de aglutinantes para impresión 3D

La investigación en construcción por impresión 3D se ha centrado en dos vertientes: (1) el desarrollo tecnológico de los equipos de impresión y (2) el diseño de tintas cementantes con propiedades adecuadas para su extrusión. Por un lado, las impresoras han evolucionado hasta alcanzar un nivel de precisión y escalabilidad que permite la construcción de proyectos como: (a) *New Story*, los cuales imprimieron un barrio de viviendas de bajo costo en México (2017) (Figura 10-a); (b) el proyecto *Milestone*, conformado por cinco viviendas energéticamente eficientes en Eindhoven, Países Bajos (Figura 10-b); (c) un edificio de 640 m² impreso por la empresa Apis Cor en Dubái (Figura 10-c); y (d) el edificio *Building on Demand* (BOD) en el puerto de Copenhague (Figura 10-d) (Mobarak et al., 2023; Teixeira et al., 2023).



Figura 10. Proyectos de construcción desarrollados con impresión 3D
Tomadas de: (Bazli et al., 2023; Teixeira et al., 2023).

Por el otro lado, el diseño de aglutinantes para impresión 3D tiene como directriz prioritaria la reducción del uso de CP conforme a diversos autores (Peng & Unluer, 2023b; Mobarak et al., 2023; Teixeira et al., 2023). Con este fin, se han identificado dos estrategias: (i) la incorporación de MPS (Hojati et al., 2022) y (ii) el aumento en la proporción de agregados (C. Zhang et al., 2019), siendo la primera la opción más viable, ya que los MPS inciden significativamente sobre las propiedades de impresión debido a las interacciones químicas que involucran (Chen et al., 2022).

En consecuencia, la optimización de aglutinantes printables es un campo en auge para la investigación en impresión 3D de tintas cementantes. Esto es considerando las propiedades reológicas, la trabajabilidad, la fluidez, la bombeabilidad, la extrudabilidad, la edificabilidad, la retención de forma, el tiempo abierto, la adhesión interlaminar, de printabilidad, el esfuerzo cortante, el límite elástico (estático y dinámico) y el comportamiento tixotrópico (Chang et al., 2023; Cheng et al., 2016).

3.1.1. Avances en mezclas cementantes printables

El desarrollo de tintas cementantes basadas en materiales alternativos más estudiados en impresión 3D son los cementos a base de magnesia (MgO), cementos de aluminatos, geopolímeros, aglutinantes a base de yeso, sistemas con arcillas calcinadas y piedra caliza, así como cementos Portland con sustituciones parciales de MPS como la CV y la escoria de alto horno (Jiang et al., 2020; Peng & Unluer, 2023b; Teixeira et al., 2023). Estos materiales destacaron por sus propiedades adecuadas de extrusión, edificabilidad y endurecimiento de capas, como a continuación se detalla.

3.1.1.1 Cementos a base de MgO

Los cementos de MgO son atractivos debido a que requieren bajas temperaturas de calcinación para su fabricación y porque utilizan (Ruan & Unluer, 2016) alternativas al Clínter (Ruan & Unluer, 2016), tales como el carbonato de magnesio ($MgCO_3$) o el hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) (Mo et al., 2014).

No obstante, la hidratación del MgO tiende a formar únicamente $Mg(OH)_2$, resultando en productos de baja resistencia mecánica (Thomas et al., 2014). Para superar estas restricciones, se han propuesto la carbonatación acelerada de $Mg(OH)_2$ para generar

carbonatos de magnesio hidratado, la incorporación de fuentes de sílice para formar fases de silicato de magnesio hidratado (MSH), así como el uso de MgO como reemplazo parcial del CP, junto con aditivos acelerantes, superplastificantes y antiespumantes (Abdel-Gawwad et al., 2018; Dung et al., 2021).

En impresión 3D, la carbonatación logra mejorar la cinética de hidratación en las primeras horas, aumentando la acumulación estructural y el esfuerzo cortante de la tinta base MgO, lo que favorece su edificabilidad (Khalil et al., 2020). Sin embargo, se ha señalado que estas mezclas son poco durabilidad, especialmente cuando se emplean sin refuerzos adicionales como fibras (Carrillo et al., 2017). Por otro lado, en sistemas de MgO–SiO₂ se observó una rápida formación de MSH que mejoró la resistencia mecánica, pero comprometiendo el tiempo de impresión y la extrudabilidad (Panda et al., 2021). En combinaciones de MgO con CP, la alta demanda de agua, baja viscosidad plástica y reducido límite elástico limitaron la edificabilidad, a pesar de facilitar el proceso de extrusión (R. Zhang, 2018).

3.1.1.2 Cementos de aluminato

Los cementos de aluminato son de dos tipos: (a) los cementos de aluminato de calcio (CAC) y (b) de sulfoaluminato de calcio (CSA). Aunque difieren mineralógicamente, ambos comparten características relevantes para la impresión en 3D. Los CAC contienen aluminato monocálcico (CA), dialuminato cálcico (CA₂) y heptaluminato dodecálcico (C₁₂A₇), mientras que los CSA se componen de sulfato de calcio (CaSO₄) y silicato dicálcico (C₂S) (Huang et al., 2019; Qi et al., 2020). Su alta reactividad con el agua resulta en un fraguado acelerado, altas resistencias tempranas, de abrasión y durabilidad, incluyendo baja permeabilidad, alta resistencia a la carbonatación y menor contracción por secado (Fan et al., 2020; Guo et al., 2014). En impresión 3D, estas propiedades son deseables para favorecer la adherencia entre capas, la edificabilidad tiempos cortos (K. Liu et al., 2023).

Sin embargo, su alta reactividad también plantea retos para controlar la fluidez y la ventana de impresión, por lo que se requiere el uso de aditivos retardantes y modificadores de viscosidad. Lastimosamente, estos aditivos resultan difíciles de ajustar debido a la

complejidad de las interacciones químicas, representando un reto para la estandarización de mezclas imprimibles (M. Chen et al., 2018; Z. Ding et al., 2018).

3.1.1.3 Cementos geopoliméricos

Los geopolímeros se producen a partir de materiales aluminosilíceos, típicamente residuos industriales o arcillas calcinadas, que funcionan como precursores para activarlos mediante soluciones alcalinas. r tanto, su impacto ambiental llega a ser menor en comparación con las mezclas de CP, con propiedades mecánicas y de durabilidad similares, ha impulsado su estudio como aglutinantes para impresión 3D (Bassan de Moraes et al., 2024; Zhong & Zhang, 2022).

Sin embargo, su implementación se ve limitada por sus propiedades reológicas, siendo altamente sensible a pequeñas variaciones en las relaciones molares, arena/aglutinantes y agua/aglutinantes. En general, una mayor relación agua/aglutinantes mejora la fluidez y extrudabilidad, pero disminuye la edificabilidad (Panda & Tan, 2018), mientras que ciertas relaciones molares reducen el límite elástico, pero incrementan la cohesión (Panda et al., 2018).

Estudios recientes destacaron la importancia de la tixotropía y la tasa de acumulación estructural, las cuales dependen del tipo de puzolana utilizada. P.ej., la escoria de alto horno y el humo de sílice inducen una acumulación estructural más rápida comparada con la ceniza volante, debido a su mayor reactividad (Y. Chen, Liu, et al., 2022; Panda et al., 2018).

A pesar de estos desafíos, varios trabajos demostraron el potencial de los geopolímeros para mantener estabilidad estructural tras la impresión. Panda et al. (2019b) lograron imprimir estructuras con una geometría estable usando velocidades constantes de 90 mm/s, mientras que Bong et al. (2019) reportaron extrudabilidad adecuada en morteros de escoria y CV sin bloqueos, utilizando boquillas de 15×30 mm. Sin embargo, la rápida reacción de endurecimiento sigue representando un riesgo para la obstrucción del sistema de bombeo, lo que ha incentivado la incorporación de aditivos químicos para prolongar el tiempo de la trabajabilidad de la tinta.

3.1.2. Materiales cementantes a base de yeso

Los compuestos a base de yeso han sido considerados en impresión 3D debido a su baja densidad, alta resistencia al fuego, así como un excelente aislamiento térmico y acústico. No obstante, presentan limitaciones asociadas con su alta humectabilidad, la propensión a la aglomeración y el comportamiento reológico inestable (C. Liu et al., 2018; Santos et al., 2020).

La baja fluidez de estas mezclas demanda mayores contenidos de agua o el uso intensivo de aditivos plastificantes. Sin embargo, esto también reduce la viscosidad plástica y el límite elástico de la tinta, comprometiendo la edificabilidad (B. Ma et al., 2019). Sin embargo, algunos estudios señalaron que las tintas de yeso adecuadamente modificadas pueden lograr una densidad uniforme, baja porosidad y resistencia mecánica adecuada para elementos prefabricados y decorativos.

3.1.3. Mezclas cementantes con metacaolín, ceniza volante y ceniza de bagazo de caña

3.1.3.1 Aglutinantes a base de arcilla calcinada y piedra caliza

En los últimos años ha aumentado la atención en la arcilla calcinada y la piedra caliza como sustitutos del CP (Al-Noaimat, Chougan, et al., 2023). Las arcillas ricas en caolinita son abundantes en todo el mundo, por lo que es una materia prima relativamente barata; además, el MK asocia apenas ~ 0.3 kg de CO_2 por kg producido y su comportamiento mecánico a edades tempranas es similar al CP en mezclas cementantes (Scrivener et al., 2018; Vizcayno et al., 2010). En impresión 3D, el uso de MK como sustituto parcial del CP afecta el comportamiento reológico, la capacidad de extrusión y de bombeo, el tiempo de fraguado y la edificabilidad de la tinta (Al-Noaimat, Chougan, et al., 2023). Long et al. (2021) reemplazaron el CP en un 40% y 50% con combinaciones de MK y piedra caliza, encontrando que el límite elástico se incrementó 7 y 15 veces, respectivamente. Esto se atribuyó a la mayor absorción de agua, a la floculación inducida por la reactividad del MK y al efecto físico de las partículas angulares que requieren mayor esfuerzo de corte para fluir al incrementar la fricción interna. Además, se reportó una mayor recuperación de la tixotropía en comparación con una mezcla de CP debido a la capacidad del MK para reconstruir su estructura floculada tras el cese del esfuerzo cortante.

Resultados similares fueron reportados por Y. Chen, Chaves Figueiredo, et al. (2020), observando que a mayor contenido de MK en la tinta, el límite elástico estático y dinámico, la viscosidad plástica y la tixotropía fueron más altos. Cabe destacar que se requiere una alta tixotropía para que los filamentos extruidos puedan sostener el peso de capas sucesivas, por lo que el uso de MK resultó ventajoso en este aspecto.

Por su parte, Y. Chen et al. (2021) reportaron que la sustitución de CP por MK y piedra caliza redujo la fluidez debido al cambio en el desempeño reológico, disminuyendo la extrudabilidad y bombeabilidad de la tinta. No obstante, señalaron que la densidad de empaquetamiento mejoró con la incorporación de MK, ya que incrementó el área superficial específica y la fracción sólida, manteniendo una edificabilidad adecuada. Por esto, se sugirió que la baja trabajabilidad podría compensarse con la inclusión de otros materiales cementantes.

En otro estudio, Y. Chen, Romero Rodriguez, et al. (2020) evaluaron el comportamiento de tintas con 40% y 50% de reemplazo de CP utilizando combinaciones de piedra caliza y MK de bajo y alto grado de calcinación. Observaron que el mayor contenido de MK modificó considerablemente la fluidez debido al aumento en el área superficial específica. Sin embargo, también incrementó la edificabilidad debido a una mejor floculación, absorción de agua y la generación de calor que favoreció el fraguado temprano.

Respecto al tiempo de fraguado o ventana de printabilidad, un alto contenido de MK lo disminuyó (Y. Chen et al., (2019) debido a la aceleración de las reacciones químicas inducidas por el MK. Esto ocurrió en función de la pureza del MK, siendo baja (40–50%MK), media (~62.5%MK) y alta (~75%MK), alcanzando tiempos de fraguado iniciales de 147, 75 y 52 minutos, respectivamente. Por lo tanto, se recomendó el uso de aditivos retardantes y otros MPS complementarios.

En cuanto a la edificabilidad, Y. Chen, Jansen, et al. (2020) evaluaron el uso de dos boquillas para extruir tintas con MK: (i) una rectangular de 13.5 mm de apertura y (ii) una redonda de 8.5 mm. Los resultados mostraron que un mayor contenido de MK de alta pureza mejoró la edificabilidad con ambas boquillas, debido a la reducción de la trabajabilidad y el aumento de la estabilidad del filamento extruido (Long et al., (2021).

Aunque el comportamiento en estado fresco es esencial para las tintas cementantes, el desempeño mecánico en estado endurecido también es crucial. Se ha observado que reemplazos de CP por MK de hasta un 50% no generaron pérdidas significativas en la resistencia a compresión. De hecho, se ha reportado que la tasa de desarrollo de resistencia es superior en sistemas con MK, debido a la aceleración de la hidratación inicial (Avet et al., 2016; Y. Chen et al., 2019).

Sin embargo, la anisotropía mecánica influye notablemente. Y. Chen, Romero Rodriguez, et al. (2020) reportaron mayor resistencia a compresión cuando la carga se aplicaba paralela a la dirección de impresión, mientras que en sentido contrario se observó una reducción, causada por la formación de juntas frías atribuibles a la alta tixotropía del MK (Rahul et al., 2019). Esto también puede afectar negativamente la unión entre capas, al generar enlaces débiles por la rápida velocidad de fraguado (Roussel, 2018). Aunque se ha demostrado que el MK mejoró desempeño mecánico, algunos autores han advertido que la incorporación de aditivos químicos para mejorar la trabajabilidad puede reducir la resistencia (Y. Chen et al., 2021).

3.1.4. Aglutinantes a base de ceniza volante y ceniza de bagazo de caña

Dentro de los MPS más utilizados en impresión 3D se encuentran la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice y la CV (Lyu et al., 2021; Robayo-Salazar et al., 2023; Tu et al., 2023). La CV se clasifica en dos tipos principales según su composición química: (i) clase F, de carácter silíceo, y (ii) clase C, con un contenido de óxidos de calcio (CaO) superior al 10%, lo cual le confiere propiedades más reactivas. La clase C puede llegar a considerarse autocementante, ya que es capaz de endurecer al hidratarse sin necesidad de una fuente externa de activación como el CP (Nayak et al., 2022).

En impresión 3D, se ha priorizado el uso de CV clase F principalmente por los efectos físicos que ejerce sobre el comportamiento reológico de las tintas. De hecho, diversos estudios han omitido el uso de CV clase C, a excepción de aquellos orientados al desarrollo de cementantes geopoliméricos (T. Yang et al., 2018).

Si bien la CV no ha sido explorada ampliamente en impresión 3D, múltiples estudios documentan sus efectos sobre el estado fresco y el comportamiento reológico en otros

tipos de concreto como el concreto autocompactable o el reforzado (Bentz & Ferraris, 2010; Jiang et al., 2020; T. Yang et al., 2018).

Los beneficios de la CV en impresión 3d se relacionan con su morfología esférica, superficie lisa y tamaño de partícula relativamente uniforme. Esto promueve una mayor fluidez, la reducción del límite elástico y la viscosidad plástica, mejorando la bombeabilidad y la extruibilidad (Beycioğlu & Yilmaz Aruntaş, 2014; Jalal et al., 2013; Jiao et al., 2017). Sin embargo, el tamaño de partícula comparativamente mayor al CP puede reducir la formación de flóculos cementantes, afectando la hidratación temprana, retardando los tiempos de fraguado y disminuyendo la edificabilidad (Rashad, 2015). Además, su contenido de carbón no solo reduce la fluidez al absorber parte del agua de mezcla, sino que también interfiere en las reacciones puzolánicas al obstaculizar la interacción entre la sílice reactiva de la CV y el hidróxido de calcio. Otro aspecto importante es su capacidad para absorber aditivos químicos, lo cual puede alterar de manera negativa la trabajabilidad y consistencia de las mezclas para impresión 3D (Jiao et al., 2017).

Adicionalmente, la CB ha sido empleada en múltiples estudios orientados a mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de sistemas cementantes convencionales. No obstante, su efecto sobre el comportamiento reológico está poco explorado y no se han encontrado reportes específicos sobre su aplicación en impresión 3D. Esto abre un área de oportunidad para investigaciones que evalúen su potencial como componente de tintas cementantes.

3.1.5. Comparación entre los sistemas

Los distintos tipos de aglutinantes evaluados para impresión 3D presentan una amplia gama de propiedades, características y limitaciones que deben ser cuidadosamente considerados al momento de seleccionar un sistema viable. En la Tabla 2 se presenta una síntesis comparativa de las principales ventajas, desventajas y líneas de acción futura asociadas a cada tipo de aglutinante analizado previamente.

Tabla 2. Comparación entre aglutinantes alternativos para impresión 3D.

Sistema cementante	Ventajas	Desventajas	Acciones futuras
Cementos a base de MgO	<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de residuos • Ganancia resistencia mediante carbonatación. • Buen aislamiento térmico y resistencia al fuego. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pobre resistencia al agua. • Obstrucción de boquillas por tiempos de fraguado rápidos. • Necesidad de curado por carbonatación acelerada. • Pobre estabilidad volumétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar el proceso de fabricación de cementos de MgO. • Mejora del desempeño en impresión 3D. • Desarrollo de áreas de aplicación para usos específicos
Cementos de aluminato	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas emisiones de CO₂ durante la producción. • Resistencia mecánica rápida. • Resistencia a los sulfatos y las reacciones álcali-sílice. • Bajas contracciones por secado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de resistencia en la conversión de hidratos. • Potencialmente expansivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del costo de fabricación de clinker. • Producción de materias primas mediante el uso de residuos. • Mejora de la estabilidad de los productos de hidratación. • Controlar la estabilidad del volumen de la pasta endurecida.
Cementos geopoliméricos	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo calor de hidratación. • Resistencia al calor, a los sulfatos y a los ácidos. • Aprovechamiento de residuos industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de activadores alcalinos. • Comportamiento reológico complejo. • Contracciones volumétricas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permitir el uso de residuos industriales en un amplio espectro de aplicaciones para reemplazar el CP. • Mejora de las propiedades reológicas para cumplir con los requisitos de la impresión 3D.

Materiales a base de yeso	<ul style="list-style-type: none"> • Baja densidad. • Alta resistencia. • Resistencia térmica. • Estabilidad volumétrica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pobre resistencia al agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de la resistencia al agua. • Desarrollo de campos de aplicación específicos.
Materiales a base de arcilla calcinada y piedra caliza	<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima ampliamente disponible. • Bajas emisiones de CO₂. • Buena resistencia mecánica. • Alta durabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento reológico desafiante. • Explotación de recursos naturales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de las propiedades reológicas para cumplir con los requisitos de la impresión 3D en términos de fluidez y fraguado.
Otros materiales puzolánicos suplementarios	<ul style="list-style-type: none"> • Aprovechamiento de residuos industriales. • Bajas emisiones de CO₂. • Comportamiento reológico aceptable para extrusión y bombeo. • Buena resistencia mecánica. • Durabilidad ampliamente probada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca aplicación en impresión 3D. • Edificabilidad desafiante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permitir la mayor explotación y aplicación de los residuos en el campo de la impresión 3D. • Mejora de las propiedades reológicas para cumplir con los requisitos de la impresión 3D en términos de edificabilidad y capacidad de carga.

Tomada y adaptada de (Peng & Unluer, 2023b).

Los sistemas a base de cementos especiales (MgO, CSA, CAC) presentan bajas contracciones por secado y resistencia temprana, pero su costo es elevado, la disponibilidad y los requerimientos específicos de manipulación y curado están limitados, además de mostrar una pobre estabilidad volumétrica. Por su parte, los geopolímeros todavía no alcanzan un nivel de estandarización suficiente en términos de procesamiento, dosificación y desempeño reológico consistente, además de depender en muchos casos de activadores químicos que complejizan su implementación en obra.

En contraste, los sistemas basados en MPS como el MK, la CV y la CB, ofrecen una alternativa técnica viable, ambientalmente responsable y económicamente accesible. El MK ha demostrado una excelente capacidad para mejorar la cohesión y reducir la exudación. La CV clase F permite mejorar la fluidez y extruibilidad, aportando además una reducción significativa en la viscosidad de la tinta. Finalmente, la CB ha mostrado potencial en la mejora de propiedades mecánicas y representa un material con alto valor en términos de economía circular al ser un subproducto agrícola ampliamente disponible en países como México.

La combinación de estos tres materiales en proporciones optimizadas permite abordar simultáneamente aspectos clave del diseño de tintas, p.ej., el control de la reología, la edificabilidad, la sostenibilidad ambiental y el desempeño mecánico. Por lo tanto, la selección de un sistema ternario basado en MK, CV y CB representa una estrategia integral para el desarrollo de tintas cementantes adaptadas a los desafíos técnicos y sustentables que impone la impresión 3D actualmente.

3.2. Desafíos y oportunidades

La construcción por impresión 3D representa un cambio paradigmático en los métodos constructivos tradicionales, no obstante, la implementación efectiva de esta tecnología a nivel industrial aún enfrenta diversos desafíos técnicos, logísticos y normativos (Peng & Unluer, 2023b). A su vez, estos desafíos abren oportunidades para la innovación y el desarrollo de soluciones que mejoren la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del proceso constructivo.

A continuación, se detallan algunos de los principales retos que enfrenta esta tecnología, así como las áreas clave donde se identifican oportunidades de avance.

3.2.1. Escalabilidad de la tecnología

Uno de los principales retos de la impresión 3D radica en trasladar los desarrollos de laboratorio o prototipos a aplicaciones industriales. En muchos casos, los sistemas que han demostrado un buen desempeño en condiciones controladas no logran mantener la misma eficiencia en condiciones de obra debido a la variabilidad ambiental (p.ej.,

condiciones de temperatura y humedad), el control de los procesos y la logística de materiales (F. Bos et al., 2016; Perrot, 2022).

Además, la infraestructura requerida para operar impresoras de gran formato aún es costosa y limitada en disponibilidad, restringiendo su uso a proyectos de alta inversión (Panda & Tan, 2018). La falta de operadores capacitados y de protocolos estandarizados de construcción añade otra complejidad. Sin embargo, esto una oportunidad estratégica para el desarrollo de equipos más compactos, accesibles y adaptables, así como para materiales que no dependan de condiciones de laboratorio para ofrecer un desempeño consistente. En este contexto, el diseño de tintas optimizadas que funcionen con impresoras de menor escala, como la extrusión tipo calafateo, puede representar un primer paso hacia el escalamiento de esta tecnología.

3.2.2. Compatibilidad entre los materiales y equipos

Otro desafío crucial es la compatibilidad entre los materiales diseñados y los equipos de impresión disponibles. Las propiedades reológicas de las tintas cementantes deben estar cuidadosamente equilibradas para permitir una extrusión continua y estable (Marchment et al., 2019; Perrot, 2022). Sin embargo, los equipos de impresión no han sido diseñados específicamente para el comportamiento de mezclas cementantes. Las bombas, boquillas, sistemas de alimentación y mecanismos de control de presión deben ser adaptados o rediseñados para funcionar con aglutinantes de alta densidad y su comportamiento tixotrópico (Orsu & Shaik, 2022).

Esta limitación tecnológica también representa una ventana de oportunidad para diseñar materiales que sean compatibles con sistemas más sencillos y económicos, pero, sin comprometer el desempeño mecánico o la sostenibilidad. Asimismo, la realimentación entre el diseño del material y el equipo puede favorecer el desarrollo de soluciones que optimicen el proceso de impresión.

3.2.3. Necesidad de estandarización de los ensayos de las propiedades

Uno de los principales vacíos que enfrenta la construcción por impresión 3D es la ausencia de normativas específicas y protocolos estandarizados para evaluar las propiedades de las tintas y el desempeño del proceso. A diferencia del concreto convencional, los materiales

para impresión requieren métodos de caracterización particulares debido a sus condiciones de aplicación y a su reología compleja (Kazemian et al., 2017; Kloft et al., 2021).

Aspectos como la fluidez, la extruibilidad, la edificabilidad, el tiempo de impresión útil y la cohesión son críticos para garantizar la viabilidad del proceso, pero aún no existe un consenso técnico internacional sobre los procedimientos adecuados para su medición. Esta situación limita la comparabilidad entre estudios y el avance en la optimización de mezclas.

No obstante, esta carencia normativa constituye una gran oportunidad para la investigación aplicada, ya que permite proponer, validar y documentar metodologías de prueba reproducibles. Esta investigación busca contribuir a esta necesidad mediante la aplicación y adaptación de ensayos experimentales enfocados en evaluar las propiedades relevantes de impresión en sistemas cementantes ternarios, proponiendo criterios de validación técnica y práctica que puedan servir como referencia para futuros desarrollos.

CAPÍTULO 4. Metodología experimental

La metodología experimental se estructuró en seis etapas: La etapa I corresponde a la selección y caracterización de las materias primas, con énfasis en sus propiedades fisicoquímicas, así como al establecimiento del diseño de experimentos utilizado para orientar el proceso de optimización. Las etapas II y III abordan la evaluación de propiedades en estado fresco y del comportamiento reológico, respectivamente. La etapa IV se enfoca en la obtención del modelo de optimización de mezclas imprimibles. Finalmente, las etapas V y VI comprenden la evaluación de la capacidad de impresión de las mezclas seleccionadas y el análisis de su desempeño mecánico.

4.1. Etapa I. Diseño de Mezclas

4.1.1. Selección y caracterización de materiales

Los materiales cementantes utilizados fueron (Figura 11): (i) cemento Portland ordinario tipo CPO40R de alta resistencia inicial; (ii) MK obtenido mediante la calcinación de un caolín comercial a 750 °C durante 4 horas; (iii) CV clase F previamente cribada a través de malla No. 100 (0.149 mm) para reducir el contenido de carbón no quemado; (iv) CB tamizada con malla No. 30 (0.6 mm) y posteriormente molida en un molino de bolas por lotes de 5 kg durante 40 minutos.

Con el objetivo de verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos por las normas ASTM-C150 y ASTM-C618 para el cemento Portland y los materiales puzolánicos, respectivamente, se caracterizaron la composición química y mineralógica, la morfología de las partículas, su distribución granulométrica, área superficial específica, densidad y actividad puzolánica. El muestreo representativo de cada material se realizó conforme a la norma ASTM-C311 y las muestras recolectadas fueron reducidas mediante el método de cuarteo descrito en la norma ASTM-C702, hasta alcanzar el volumen requerido para cada ensayo de caracterización.

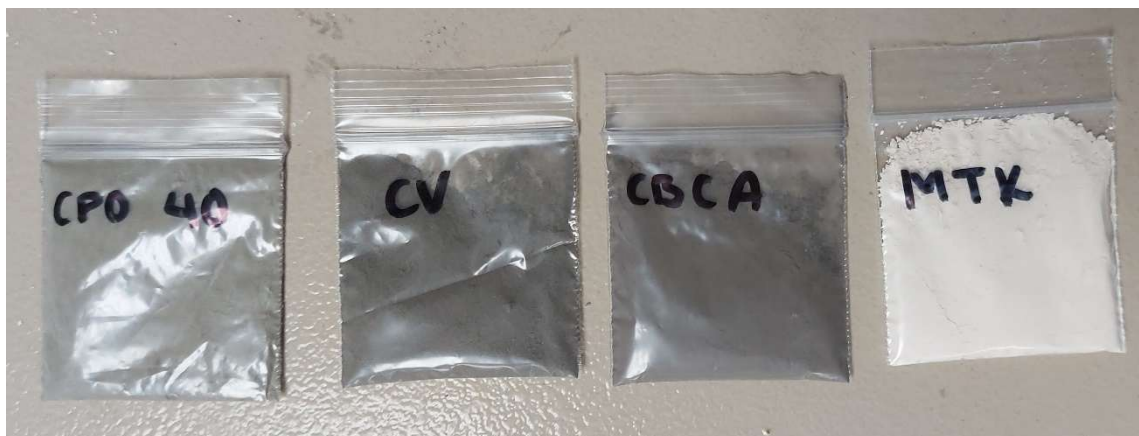


Figura 11. Muestras en polvo de los MPS utilizados como materia prima.

4.1.2. Técnicas de caracterización química

La composición química y mineralógica de las materias primas se determinaron mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX).

- a) La FRX se utilizó para obtener la composición química elemental de los materiales usando un equipo PANalytical Epsilon 3XL. Para cada análisis se prepararon pastillas prensadas, utilizando una mezcla de 10 g de muestra en polvo con 1 g de cera aglutinante. Las pastillas se compactaron aplicando una presión constante de 10 toneladas durante un minuto en una prensa hidráulica marca Atlas. La composición química se presentó en óxidos y en porcentajes en masa.
- b) La identificación de las fases minerales cristalinas mediante DRX se realizó en un equipo PANalytical Empyrean, utilizando radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). Las muestras de 2 g se colocaron en porta muestras de acrílico, previamente purgados para evitar contaminación. El ángulo de difracción $2\theta = 5^\circ - 70^\circ$, con un tamaño de pase de 0.05° . El análisis de las fases de los difractogramas se realizó mediante el software X'Pert High Score Plus.

4.1.3. Técnicas de caracterización física

Las técnicas de caracterización para las propiedades físicas de las materias primas que se utilizaron fueron:

- a) Microscopía electrónica de barrido (MEB): La morfología de las partículas fue analizada mediante un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío Jeol JSM-

6510 LV. Los análisis se realizaron con un voltaje de aceleración de 20 kV y una magnificación de 2000x. Las muestras de 2 g de polvo seco por material fueron recubiertas previamente con una aleación de oro-paladio para garantizar la conductividad eléctrica necesaria durante el análisis. El análisis se enfocó en la angularidad, porosidad superficial y grado de esfericidad de las partículas.

- b) Distribución de tamaño de partícula (DTP): Se determinó mediante difracción láser con el equipo MICROTRAC 3000. Las muestras fueron previamente dispersadas en alcohol isopropílico y sometidas a ultrasonido durante 60 segundos para evitar aglomeraciones. Se consideraron distintos índices de refracción en el análisis: (i) 1.48 para el CPO40R, (ii) 1.62 para el MK y (iii) 1.84 para la CV y la CB. Esta técnica permitió obtener los diámetros promedio de partícula, así como las distribuciones acumuladas y diferenciales.
- c) Área superficial específica por el método *Brunauer–Emmett–Teller* (BET): Fue determinada mediante el equipo Microtrac MRB Belsorp Mini X. Las muestras en polvo fueron tratadas térmicamente a 150°C durante 4 horas para eliminar la humedad y posibles contaminantes. El análisis se basó en la adsorción de nitrógeno, considerando las isothermas de adsorción-desorción en un intervalo de presiones relativas entre 0.05 y 1.
- d) Densidad de los sólidos: La densidad se determinó utilizando un multiplicómetro automático Quantachrome modelo MVP – D160E. Este equipo opera mediante el principio de desplazamiento de gases descrito por la ley de Boyle y el principio de Arquímedes, utilizando nitrógeno como gas de medición.

4.1.3.1 Índice de Actividad Puzolánica

La evaluación del índice de actividad puzolánica (IAP) se llevó a cabo con base en el procedimiento indicado en la sección 26 de la norma ASTM C 311, con modificaciones propuestas por Bentz & Ferraris (2010), realizando las sustituciones de MPS en volumen en lugar de peso, a fin de evitar alteraciones significativas en la fluidez de las mezclas de mortero.

Se evaluaron 12 cubos de mortero de 50 mm de lado, divididos en dos grupos: 6 especímenes correspondientes a la mezcla de control y 6 especímenes para la sustitución

del CP por MK, CV y CB. Las mezclas formularon con una relación arena/aglutinantes de 2.75 y una relación agua/aglutinantes de 0.485, sustituyendo el 20% del volumen de CP por MPS según el caso.

Las probetas fueron curadas mediante inmersión en agua saturada con hidróxido de calcio a temperatura ambiente durante 28 días. Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron por triplicado a los 7 y 28 días de curado.

El IAP se calculó como el cociente porcentual entre la resistencia promedio a compresión de la mezcla con MPS y la resistencia promedio de la mezcla de control en cada una de las edades consideradas, según la siguiente expresión:

$$IAP (\%) = \left(\frac{f'_{MPS}}{f'_{Control}} \right) \times 100$$

donde f'_{MPS} es la resistencia a compresión de la mezcla con MPS y $f'_{Control}$ la correspondiente a la mezcla de referencia. Este índice proporciona una estimación comparativa de la reactividad puzolánica de cada material evaluado, sirviendo como criterio de selección para su incorporación en las mezclas optimizadas para impresión 3D.

4.1.4. Diseño de experimentos

Para la optimización de las mezclas ternarias para impresión 3D, se empleó un diseño de experimentos basado en el método de superficie de respuesta aleatorizado de varianza integrada (MSR I-optimal), con el propósito de minimizar el número de experimentos requeridos en un modelo cuadrático de tres factores, sin comprometer la robustez estadística del análisis. El diseño se implementó para obtener dos modelos experimentales independientes: (i) modelo MK–CV para la optimización de mezclas compuestas por CP, MK y CV; (ii) modelo MK–CB para la optimización de mezclas compuestas por CP, MK y CB.

La Tabla 3 muestra los factores empleados en los modelos MK–CV y MK–CB, así como los niveles inferior y superior de cada uno. Estos niveles fueron determinados a partir de una evaluación visual y empírica de mezclas preliminares, considerando criterios de printabilidad, cohesión y estabilidad. La Tabla 4 resume las corridas experimentales con

los niveles codificados, mientras que la Figura 17 presenta de forma gráfica de la matriz experimental.

Tabla 3. Factores y niveles del diseño de experimentos MSR I-optimal.

Factores	Niveles codificados		Niveles decodificados	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Rel. a/cm	-1	1	0.35	0.50
Contenido de MK (%)	-1	1	0	40
Contenido de CV/CB (%)	-1	1	0	40

Tabla 4. Niveles codificados para cada factor del diseño de experimentos.

Corrida	Rel. a/cm	Sustitución de MK (%)	Sustitución de CV/CB (%)
R1	1	0.25	1
R2	-0.96	-0.1	0.1
R3	-1	1	-1
R4	1	-1	1
R5	0.1	-0.1	-0.96
R6	-1	1	1
R6.1	1	1	1
R7	1	-1	-0.25
R8	1	1	-1
R9	-1	-1	-1
R10	0.1	0.964	0.1
R11	-0.26	-1	1
R12	0.1	-0.1	-0.96

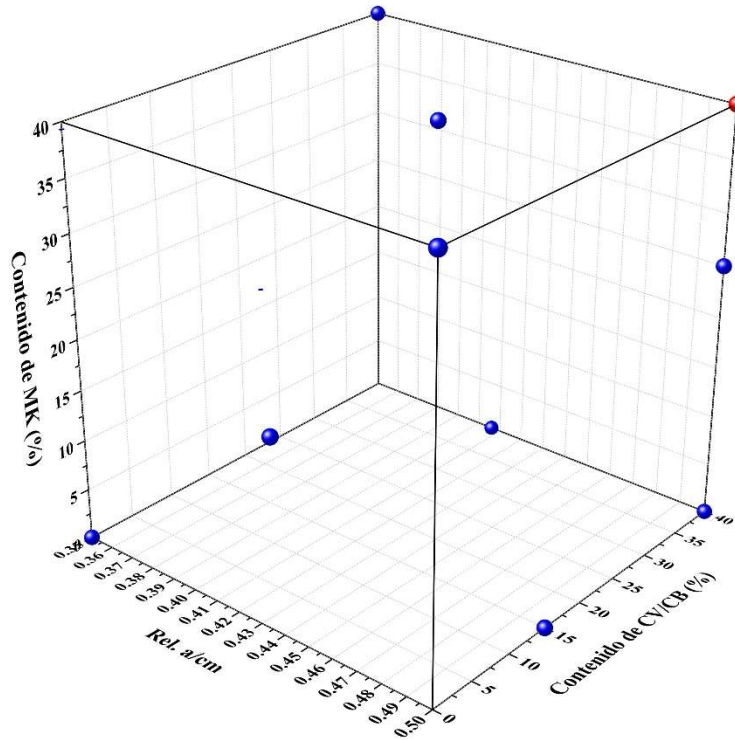


Figura 12. Valores decodificados de las corridas experimentales.

Cada mezcla diseñada fue sometida a ensayos en estado fresco, caracterización fisicoquímica y evaluación reológica, con el objetivo de identificar las formulaciones más adecuadas para su aplicación en impresión 3D. La Tabla 5 presenta las proporciones de mezcla relacionadas con ambos modelos, expresadas en porcentaje de masa de cemento. Cabe señalar que se incorporó la corrida adicional R6.1 a partir de los resultados obtenidos en algunas de las evaluaciones, esto con el fin de robustecer la precisión del modelo en un rango específico.

Tabla 5. Proporciones de mezcla para los modelos de optimización MK-CV y MK-CB.

Corrida	Rel. a/cm	CPO40R (%)	MK (%)	CV/CB (%)
R1	0.500	35.00	25.00	40.00
R2	0.353	60.00	18.00	22.00
R3	0.350	60.00	40.00	0.00
R4	0.500	60.00	0.00	40.00
R5	0.433	81.20	18.00	0.80
R6	0.350	20.00	40.00	40.00
R6.1	0.500	20.00	40.00	40.00
R7	0.500	85.00	0.00	15.00
R8	0.500	60.00	40.00	0.00
R9	0.350	100.00	0.00	0.00

R10	0.433	38.72	39.28	22.00
R11	0.406	60.00	0.00	40.00
R12	0.433	81.20	18.00	0.80

Para facilitar la interpretación y análisis de resultados, a cada corrida se le asignó una nomenclatura distintiva basada en los tres factores del diseño. Estas denominaciones se detallan en la Tabla 6, y están compuestas por los porcentajes de sustitución de MK por CV o CB según corresponde, así como por la relación a/cm empleada. Por ejemplo, la corrida 2 (R2) del modelo MK-CV está representada por la clave 18MK-22CV-0.353, lo que indica una mezcla con 18% de MK, 22% de CV y una relación a/cm de 0.353, siendo el porcentaje restante (60%) correspondiente al CPO40R.

Tabla 6. Nomenclaturas de las mezclas para cada modelo de optimización.

Corrida	Modelo MK-CV	Modelo MK-CB
R1	25MK-40CV-0.50	25MK-40CB-0.50
R2	18MK-22CV-0.353	18MK-22CB-0.353
R3	40MK-0CV-0.35	40MK-0CB-0.35
R4	0MK-40CV-0.50	0MK-40CB-0.50
R5	18MK-0.8CV-0.433	18MK-0.8CB-0.433
R6	40MK-40CV-0.35	40MK-40CB-0.35
R6.1	40MK-40CV-0.50	40MK-40CB-0.50
R7	0MK-15CV-0.50	0MK-15CB-0.50
R8	40MK-0CV-0.50	40MK-0CB-0.50
R9	0MK-0CV-0.35	0MK-0CB-0.35
R10	39.28MK-22CV-0.433	39.28MK-22CB-0.433
R11	0MK-40CV-0.406	0MK-40CB-0.406
R12	18MK-0.8CV-0.433	18MK-0.8CB-0.433

4.2. Etapa II. Evaluación en estado fresco

4.2.1. Preparación de mezclas

La preparación de las mezclas se realizó siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM-C305 para pastas de cemento hidráulico, con el objetivo de asegurar la homogeneidad y reproducibilidad entre cada corrida experimental. Las proporciones de cada mezcla fueron determinadas con base en los modelos de MK-CV y MK-CB.

El procedimiento de mezclado se llevó a cabo en un mezclador con capacidad de 5 L, con la siguiente secuencia:

- a) Mezclado en seco: Los componentes en polvo (CP, MK, CV o CB) se colocaron en el tazón del mezclador y se mezclaron en seco durante 30 segundos a velocidad baja (140 ± 5 rpm), para asegurar la dispersión inicial de los materiales.
- b) Adición de agua: Se vertió el volumen total de agua en un lapso no mayor a 10 segundos con el mezclador detenido. Una vez completada la adición, se permitió la hidratación de los componentes en reposo durante 30 segundos. Pasado el tiempo, se reinició el mezclado a velocidad baja durante 30 segundos.
- c) Reposo y mezclado final: La mezcla se dejó reposar durante 75 segundos, retirando con una espátula cualquier material adherido a las paredes del tazón dentro de los primeros 15 segundos de ese lapso. Finalmente, se mezcló a velocidad media (285 ± 10 rpm) durante 60 segundos para obtener una pasta homogénea y con adecuada trabajabilidad.

Las mezclas fueron elaboradas inmediatamente antes de su evaluación para asegurar que las propiedades en estado fresco representaran con fidelidad el comportamiento inicial de cada formulación. Se procuró mantener condiciones ambientales constantes de temperatura y humedad durante todo el proceso de mezclado. Se documentaron observaciones relevantes sobre trabajabilidad, textura y consistencia visual como parte de los experimentos.

4.2.2. Evaluación de propiedades de impresión en estado fresco

La evaluación en estado fresco se realizó mediante la fluidez, la edificabilidad y los tiempos de fraguado. Estas propiedades son esenciales para determinar la trabajabilidad y estabilidad de las mezclas desarrolladas, así como su compatibilidad con los procesos de extrusión e impresión 3D.

4.2.2.1 Fluidez

La fluidez se evaluó conforme a la norma ASTM-C1437, la cual se aplicó a pastas de cemento hidráulico. El procedimiento consistió en la colocación del molde troncocónico de 100 mm de diámetro en su base inferior sobre la mesa de fluidez especificada en la norma ASTM-C230. El molde fue llenado en dos capas de 25 mm de altura, cada una compactada mediante 20 golpes con una varilla metálica.

Una vez completado el llenado, se retiró el molde cuidadosamente y se aplicó energía de compactación mediante la caída libre de la mesa desde una altura de 12.7 ± 0.13 mm, realizando 25 caídas en un periodo de 15 segundos. La fluidez se calculó como el porcentaje de incremento del diámetro de la base respecto al diámetro inicial del molde.

4.2.2.2 Edificabilidad

La edificabilidad se evaluó conforme a Robayo-Salazar et al., 2023. Esta prueba busca estimar la capacidad del material para mantener su forma tras la extrusión sin el soporte del molde troncocónico de la prueba de fluidez. Una vez llenado y retirado el molde, se permitió que la mezcla se asentara por efecto de la gravedad durante 1 minuto. Transcurrido este tiempo, se midió la altura final del material. La edificabilidad (B) se calculó como el porcentaje de la altura final respecto a la altura inicial del molde, de acuerdo con la Ec. (13):

$$B(\%) = \left(1 - \frac{h_i - h_f}{h_i} \right) \times 100 \quad \text{Ec. (13)}$$

donde h_i es la altura inicial del molde (50 mm) y h_f es la altura final de la mezcla tras el asentamiento.

4.2.2.3 Tiempos de fraguado

Los tiempos de fraguado se determinaron conforme a la norma ASTM-C191, mediante el uso del equipo de Vicat. Las pastas se prepararon siguiendo el mismo procedimiento de mezclado descrito en el apartado 4.2.1. El tiempo de fraguado inicial se definió como el momento en el que la aguja penetró 25 mm en la pasta; cabe mencionar que se utilizó interpolación cuando no se alcanzó el valor exacto. El tiempo de fraguado final correspondió al momento en que la aguja ya no dejó marca visible sobre la superficie del material.

4.2.3. Evaluación fisicoquímica de las mezclas en polvo

La caracterización fisicoquímica se llevó a cabo con el objetivo de analizar la influencia de las propiedades intrínsecas de los MPS en el comportamiento de las mezclas ternarias. En esta etapa se evaluaron la distribución de tamaños de partícula y el área superficial

específica de las mezclas en polvo de los MPS, además de la evolución térmica de las mezclas en estado fresco mediante calorimetría isotérmica.

4.2.3.1 Distribución de tamaños de partícula

La distribución de tamaños de partícula se determinó mediante difracción láser utilizando el equipo MICROTRAC 3000. Cada muestra fue dispersada en alcohol isopropílico y sometida a ultrasonido durante 60 segundos para asegurar una adecuada desaglomeración. Con el fin de estandarizar la medición y garantizar la comparabilidad entre mezclas, se mantuvieron constantes los índices de refracción en todas las pruebas, empleando un valor de 1.86 para cada muestra.

Los resultados se reportaron en función del diámetro medio volumétrico y del diámetro medio por número, así como los percentiles característicos D10, D50 y D90, los cuales indican el diámetro por debajo del cual se encuentra el 10%, 50% y 90% del volumen total de partículas, respectivamente. Estos valores permiten analizar la homogeneidad, fineza y el rango de dispersión granulométrica de las mezclas.

4.2.3.2 Área superficial

La determinación del área superficial específica se realizó mediante análisis de adsorción de nitrógeno aplicando el método BET (*Brunauer–Emmett–Teller*), utilizando el equipo Microtrac MRB Belsorp Mini X. Las muestras en polvo fueron previamente sometidas a un pretratamiento térmico a 150°C durante 4 horas para eliminar humedad y compuestos volátiles.

Posteriormente, se realizó el análisis de la rama de adsorción de nitrógeno sobre las isotermas obtenidas, considerando el intervalo de presión relativa entre 0.05 y 1.00. Los resultados se reportaron como área superficial específica en m²/g, lo cual que se relaciona con la reactividad potencial del material y su capacidad de interacción con el agua durante la hidratación.

4.2.3.3 Calorimetría Isotérmica

La evolución térmica del proceso de hidratación de las pastas fue evaluada mediante calorimetría isotérmica de conducción, utilizando un calorímetro Calmetrix I-Cal 4000

HPC, operado a una temperatura constante de 23°C. Para cada muestra, se pesaron 50 g de material seco según la proporción definida en el diseño experimental, los cuales se mezclaron con la cantidad correspondiente de agua de acuerdo con su relación a/cm.

El procedimiento de mezclado fue estandarizado a 60 segundos para todas las mezclas. Inmediatamente después del mezclado, las muestras fueron introducidas en el calorímetro, donde se monitoreó la liberación de calor durante un periodo de 24 horas. El equipo registró tanto las curvas de liberación acumulada de calor (J/g) como las tasas instantáneas de generación de calor (mW/g), con una frecuencia de adquisición de datos de 2 segundos durante la primera hora y de 1 minuto para el resto del periodo.

Estas curvas permitieron comparar la cinética de hidratación entre las distintas formulaciones, así como identificar los efectos del contenido y tipo de material cementante suplementario sobre las distintas fases del proceso de hidratación.

4.2.4. Análisis por el método de superficies de respuesta de la de fluidez, la edificabilidad y los tiempos de fraguado

Con el objetivo de comprender el efecto combinado de las variables independientes sobre las propiedades en estado fresco de las mezclas cementantes, se llevó a cabo un análisis de superficies de respuesta. Este enfoque estadístico permitió modelar y visualizar las relaciones entre los factores de diseño (contenido de MPS, tipo de adición, y relación a/cm) y las propiedades de fluidez, edificabilidad y tiempos de fraguado.

El análisis se basó en los datos obtenidos experimentalmente en la etapa 4.2.2. Las variables de respuesta fueron tratadas como funciones de segundo orden, ajustadas mediante regresión múltiple con interacción entre variables de acuerdo con la ecuación del Modelo de Regresión Cuadrática (Ec. (14)). Para este propósito, se utilizó el software Minitab 22® para generar los modelos estadísticos, verificar su validez y representar gráficamente las superficies de respuesta.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \epsilon \quad \text{Ec. (14)}$$

donde β_0 , β_1 y β_2 son los coeficientes de regresión y ϵ es el término de error.

Cada propiedad evaluada fue sometida a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística del modelo y de cada uno de los términos incluidos (lineales, cuadráticos e interacciones). Se aceptaron como válidos los modelos que presentaron valores de $p < 0.05$, coeficientes de determinación $R^2 > 90\%$, y residuos aleatorios sin patrones discernibles.

El propósito final de este análisis fue identificar tendencias globales, puntos de máxima o mínima respuesta y regiones de comportamiento optimizado en función de las variables de diseño. Este estudio sirvió como base para la discusión de resultados, permitiendo interpretar de forma integral el comportamiento observado en las propiedades reológicas y de impresión, así como apoyar la selección de mezclas óptimas para su posterior evaluación en las etapas de printabilidad y desempeño mecánico.

4.3. Etapa III. Caracterización reológica

La caracterización reológica de las mezclas se realizó con el objetivo de comprender su comportamiento en estado fresco bajo condiciones de esfuerzo y reposo, con especial énfasis en su capacidad de estructuración, refloculación, tixotropía y recuperación estructural. Los ensayos se llevaron a cabo en un reómetro rotacional de cilindros coaxiales Anton Paar MCR 302, equipado con sistema de control de temperatura a $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ y geometría de vaso estriado con bobina helicoidal (ST22-4V-40). El procedimiento se dividió en tres bloques de análisis: (i) evaluación de la acumulación estructural tixotrópica, (ii) análisis del comportamiento viscoelástico, y (iii) pruebas complementarias para evaluar recuperación estructural y curvas de flujo.

4.3.1. Evaluación de la acumulación estructural tixotrópica

4.3.1.1 Refloculación y estructuración frente a la evolución del límite elástico estático

La acumulación estructural se analizó mediante una prueba de velocidad de corte constante (CSR, por sus siglas en inglés) con una tasa de corte de 0.05 s^{-1} , valor determinado mediante pruebas preliminares y validado con base en la literatura especializada (Y. Chen et al., 2023; Jiao et al., 2021; Kruger et al., 2019). Esta velocidad

fue seleccionada por su capacidad de reflejar adecuadamente los procesos de refloculación y estructuración en pastas base CP y mezclas puzolánicas.

El procedimiento consistió en una serie de 13 mediciones aplicadas a cada mezcla, iniciando con un precorte de 100 s^{-1} durante 30 s, seguido de un intervalo de reposo de 30 segundos antes de la primera aplicación de CSR. Cada medición posterior implicó la aplicación de la tasa de corte constante en intervalos de 60 segundos, con tiempos de reposo progresivamente mayores, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Procedimiento de prueba CSR para la determinación de R_{thix} y A_{thix} .

Edad de la mezcla después del mezclado (min:s)	Numero de prueba	Intervalo de reposo (s)	Duración CSR (s)
00:00 – 01:00	Precorte	30	30
01:00 – 02:00	1	0	60
02:10 – 03:10	2	10	60
03:30 – 04:30	3	20	60
05:00 – 06:00	4	30	60
06:40 – 07:40	5	40	60
08:30 – 09:30	6	50	60
10:30 – 11:30	7	60	60
13:00 – 14:00	8	90	60
16:00 – 17:00	9	120	60
21:00 – 22:00	10	240	60
30:00 – 31:00	11	480	60
47:00 – 48:00	12	960	60
80:00 – 81:00	13	1920	60

Nota: Adaptada de (Kruger et al., 2019).

Del procedimiento, la prueba No. 1 brindó los valores iniciales de límite elástico y dinámico. Las pruebas No. 2 a No. 9 tuvieron intervalos de reposo cortos, se usaron para calcular el índice de refloculación, mediante el ajuste lineal de la tensión de cedencia estática respecto al tiempo, según el modelo propuesto por Kruger et al. (2019). Las pruebas No. 10 a No. 13 tuvieron reposos más prolongados y permitieron determinar la tasa de estructuración, aplicando también el modelo de regresión lineal correspondiente.

La derivada de cada línea de tendencia representa las tasas de refloculación y estructuración de cada mezcla, fundamentales para evaluar su capacidad de desarrollo estructural en reposo, una propiedad esencial para mantener la forma durante la impresión.

4.3.2. Evaluación del comportamiento viscoelástico

4.3.2.1 Viscosidad dependiente del tiempo

A partir de los datos generados en las pruebas CSR descritas anteriormente, se calculó la viscosidad dependiente del tiempo como el cociente entre el esfuerzo de corte medido y la tasa de corte constante (0.05 s^{-1}). Esto permitió observar la evolución de la resistencia interna de la mezcla conforme transcurre el tiempo de reposo, reflejando el desarrollo estructural viscoelástico.

4.3.2.2 Viscosidad dependiente de la velocidad de corte

Se realizaron pruebas de flujo mediante un barrido continuo de tasas de corte desde 0 hasta 100 s^{-1} durante 60 s. Cada muestra fue preparada con 25 g de material cementante, mezclada durante 60 s y colocada en el reómetro en un tiempo máximo de 60 s. Antes del ensayo se aplicó un precorte a 100 s^{-1} durante 60 s, seguido por un reposo de 30 s. Por tanto, la viscosidad se obtuvo en función de cada tasa de corte aplicada. Este análisis permitió determinar el comportamiento no newtoniano de las mezclas y evaluar su sensibilidad al esfuerzo de cizalla.

4.3.3. Ensayos de recuperación estructural y tixotropía

El ensayo de recuperación estructural tipo *loop test* se realizó con tres etapas consecutivas:

- a) Rampa ascendente de 0.1 a 100 s^{-1}
- b) Rampa descendente de 100 a 0.1 s^{-1}
- c) Segunda rampa ascendente de 0.1 a 100 s^{-1}

Así, se determinaron los índices de tixotropía como el área entre curvas de esfuerzo-tasa de corte y el índice de recuperación estructural como el cociente entre la viscosidad al final de la tercera rampa respecto a la primera. Este ensayo fue útil para cuantificar la resiliencia estructural de las mezclas tras ser sometidas a altos esfuerzos de corte.

4.4. Etapa IV. Obtención del modelo de optimización

El modelo predictivo en función de las propiedades en estado fresco, el comportamiento reológico y de printabilidad fue desarrollado a partir del diseño de experimentos y se

validó mediante simulación y análisis estadístico para reducir la variabilidad y mejorar la confiabilidad de las mezclas seleccionadas.

4.4.1. Establecimiento de rangos óptimos

A partir del análisis de las variables respuesta obtenidas (fluidez, edificabilidad, tiempo de fraguado inicial y final, límite elástico, viscosidades, tasas de refloculación y estructuración), se establecieron los rangos óptimos de desempeño para cada una. Estos rangos se definieron con base en (Ahmed, 2023; Kruger et al., 2019; Robayo-Salazar et al., 2023; Roussel, 2018; W. Yang et al., 2023):

- a) Criterios técnicos de impresión 3D (extrusión continua, retención de forma y construcción en capas).
- b) Comportamiento promedio de las mezclas con mejor desempeño observado.
- c) Umbrales teóricos y prácticos definidos en la literatura especializada.

De forma complementaria, se realizó una evaluación cualitativa de las propiedades en estado fresco y del comportamiento reológico, considerando reportes previos, los rangos y las puntuaciones asociadas a su comportamiento y/o la aplicabilidad en impresión 3D. Esta evaluación cualitativa se realizó mediante una tabla de puntuación basada en criterios empíricos propuestos por Kwangwoo Wi (2022) (Tabla 8), donde se clasificó cada propiedad con valores de 0 a 2 puntos según su desempeño observado. La puntuación total de cada mezcla se obtuvo sumando los valores asignados a cada propiedad.

Tabla 8. Evaluaciones cualitativas de las propiedades aplicables a impresión 3D.

Evaluación (Puntuación)	Propiedad de impresión 3D		
	Fluidez	Edificabilidad	Tiempo de Fraguado
Bueno (2)	La mezcla puede ser colocada con facilidad en el molde y presenta una extensibilidad que abarca gran parte de la mesa de fluidez.	La mezcla mantiene su forma al retiro del molde o presenta un asentamiento bajo.	El endurecimiento de la mezcla se extiende, permitiendo una mayor ventana de impresión.
Pobre (1)	La mezcla puede ser colocada en el molde, pero mantiene poros	La mezcla se desploma, se inclina o se distorsiona al retirar el molde.	La mezcla endurece en los primeros minutos,

	atrapados después de la compactación. La extensión cubre un menor espacio en la mesa de fluidez.		imposibilitando su bombeo y extrusión.
Incapaz de medir (0)	La mezcla es demasiado rígida para su colocación en el molde. No presenta extensibilidad al aplicarse energía.	La mezcla se extiende completamente sin aplicación de energía, o no presenta asentamiento alguno por su rigidez.	La mezcla fragua de forma instantánea o no fragua en tiempos menores a 24 horas.

Nota: Adaptada de Kwangwoo Wi (2022).

Posteriormente, la puntuación total obtenida para cada mezcla fue complementada con un sistema de clasificación de calidad general propuesto por la Iowa State University (2020), que proporciona una evaluación holística de la mezcla en términos de su viabilidad para bombeo, extrusión y edificabilidad. Este sistema clasifica a las mezclas en una escala del 1 al 5, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Sistema de clasificación de calidad para mezclas aplicables a impresión 3D.

Clasificación	Descripción
5	La mezcla sugiere facilidad de bombeo y extrusión en función de su consistencia y fluidez, manteniendo la edificabilidad con capas lisas y uniformes.
4	La mezcla mantiene una fluidez aceptable para los procesos de extrusión y bombeo, sugiriendo una extrusión uniforme aunque un tanto rugosa.
3	La mezcla puede presentar dificultades durante los procesos de extrusión y bombeo, sugiriendo una extrusión con capas irregulares y rugosas.
2	La mezcla es capaz de ser bombeada y extruida, pero carece de edificabilidad.
1	La mezcla sugiere incapacidad para ser impresa.

Nota: Adaptada de (Iowa State University, 2020).

Aunque estas evaluaciones se enfocan principalmente en propiedades físicas en estado fresco, es importante destacar que el comportamiento reológico también influye directamente en dichas propiedades. En este sentido, se tomaron en cuenta los valores obtenidos de las tasas de refloculación y estructuración de cada mezcla, como indicadores indirectos de su printabilidad.

Finalmente, a partir de las propiedades físicas y el comportamiento reológico, se definieron los rangos de desempeño óptimos para cada propiedad evaluada. Estos rangos se contrastaron con reportes previos, lo cual permitió establecer los límites aceptables que guiarán la optimización del modelo propuesto en esta investigación.

4.4.2. Validación del modelo de predicción

La validación experimental de los modelos de regresión se realizó para comprobar la predictibilidad del modelo. Con este fin, se seleccionaron mezclas representativas dentro del dominio experimental para corroborar las propiedades en estado fresco (fluidez, edificabilidad por gravedad, tiempo de fraguado).

La validación consistió en comparar los valores predichos por los modelos estadísticos con los resultados reales obtenidos en laboratorio. Esta comparación permitió identificar desviaciones o inconsistencias entre los datos experimentales y los valores predichos por el modelo, proporcionando evidencia sobre el grado de ajuste y la confiabilidad estadística.

En aquellos casos donde se detectaron desviaciones significativas, se procedió a ajustar los modelos de regresión mediante la incorporación de puntos adicionales o la reponderación de términos, buscando mejorar el coeficiente de determinación (R^2) y los valores de predicción (Pred- R^2 y Adj- R^2).

De este modo, se fortaleció la confiabilidad predictiva del modelo, asegurando que las ecuaciones obtenidas no solo representaran adecuadamente la tendencia de los datos dentro del dominio experimental, sino que también fueran aplicables para predecir el desempeño de nuevas mezclas con un alto grado de precisión. Esto fue fundamental para el proceso de optimización, ya que garantizó que los valores utilizados como referencia en la simulación respondieran a condiciones reales y verificadas.

4.4.3. Optimización mediante simulación

Una vez validados los modelos de predicción y establecidos los rangos óptimos de desempeño, se procedió a la etapa de optimización mediante simulación computacional utilizando el software Design Expert. Esta herramienta permitió explorar de forma

sistemática el espacio de formulaciones posibles a partir de los modelos ajustados y los criterios previamente definidos para las propiedades clave de impresión 3D.

La simulación consistió en generar múltiples combinaciones teóricas de proporciones entre los componentes de cada sistema ternario (MK-CV y MK-CB), aplicando restricciones de factibilidad en función de los rangos óptimos de fluidez, edificabilidad, tiempo de fraguado y parámetros reológicos.

4.4.4. Selección estadística de mezclas

Las formulaciones obtenidas fueron analizadas estadísticamente para identificar aquellas con mayor potencial de desempeño. El análisis se basó en la evaluación de medidas de tendencia central (media, mediana, moda), dispersión (rango, varianza, desviación estándar), y consistencia relativa (coeficiente de variación), así como en la identificación de valores extremos (mínimos y máximos) por cada factor de mezcla.

Del conjunto inicial de simulaciones obtenidas, se aplicó una depuración estadística con el objetivo de reducir el número de mezclas a aquellas que cumplieron con los criterios establecidos (Iowa State University, 2020; Kwangwoo Wi, 2022): $90\% < \text{fluidez} < 100\%$, $\text{edificabilidad} > 90\%$ y $\text{tiempo de fraguado inicial} > 145 \text{ min}$.

Posteriormente, estas formulaciones seleccionadas fueron preparadas y evaluadas experimentalmente, verificando su comportamiento en estado fresco y su respuesta en la extrusión manual mediante sistema de pistón. Posteriormente, se identificaron las mezclas que demostraron un desempeño satisfactorio en términos de extrudabilidad, edificabilidad y tiempo adecuado de fraguado. Finalmente, se seleccionaron las mezclas con mayor potencial de impresión y fueron sometidas a los ensayos de comportamiento mecánico.

4.5. Etapa V. Evaluación de printabilidad

La etapa de evaluación de printabilidad tuvo como objetivo verificar experimentalmente la viabilidad de las mezclas seleccionadas para su aplicación en impresión 3D, mediante la observación de su comportamiento durante el proceso de extrusión y deposición en capas sucesivas. Si bien no se contó con un sistema automatizado de impresión, se empleó una metodología controlada que simula las condiciones básicas de un proceso de extrusión

continua, permitiendo analizar de forma cualitativa parámetros clave como la estabilidad del material, su capacidad de formar capas y la aparición de defectos durante la impresión.

4.5.1. Procedimiento de impresión

El procedimiento experimental se llevó a cabo utilizando un sistema de extrusión conformado por una bomba tipo calafateo de alta capacidad, diseñada para la aplicación de morteros y lechadas. El equipo fue adaptado con una boquilla rectangular de salida de 50 mm de ancho por 10 mm de espesor (Figura 13), lo que permitió obtener filamentos de extrusión con dimensiones similares a las usadas en aplicaciones prácticas de impresión 3D a escala de laboratorio.



Figura 13. Boquilla de impresión.

Para simular un proceso continuo de extrusión, se diseñó un protocolo estandarizado que consistía en la aplicación manual del material a lo largo de líneas rectas, siguiendo trayectorias predefinidas sobre una superficie rígida nivelada. Se mantuvo una velocidad de desplazamiento constante, guiada mediante referencias visuales marcadas previamente en un riel, mientras que la presión aplicada sobre el émbolo se controló de forma uniforme a través de una técnica de presión progresiva continua.

Aunque la presión de extrusión no fue generada por un sistema automatizado, se estimó en el rango de 2 a 3 bar de forma indirecta a partir del área transversal del émbolo y el esfuerzo aplicado, tomando como referencia estudios previos de bombeo manual en

mezclas cementantes. El control de la trayectoria se logró mediante un riel guía y una distancia de referencia lateral, lo que permitió mantener líneas rectas uniformes y minimizar desviaciones laterales durante la deposición (Figura 14).



Figura 14. Sistema de impresión

4.5.2. Extrusión y análisis cualitativo de deposición

Una vez establecida la metodología de extrusión, se procedió a imprimir filamentos con las mezclas seleccionadas, evaluando visualmente el comportamiento del material durante y después de la deposición. Los criterios de evaluación cualitativa consideraron principalmente: (i) la estabilidad geométrica del filamento, observando si mantenía su sección transversal sin deformaciones excesivas; (ii) la edificabilidad, identificando si el filamento colapsaba, se aplastaba o presentaba pérdida de altura inmediatamente después de la extrusión; (iii) la uniformidad del filamento, evaluando la presencia de interrupciones, variaciones de espesor o segregación visible; y (iv) la consistencia superficial, analizando defectos como grietas, vacíos, textura irregular o exudación de

agua. Estos criterios permitieron identificar de manera preliminar la imprimibilidad de cada mezcla antes de proceder a su análisis cuantitativo.

4.5.3. Limitaciones del sistema de extrusión

A pesar de las adaptaciones implementadas, el sistema de extrusión presentó ciertas limitaciones inherentes a la ausencia de automatización. Entre ellas se identificaron:

- a) Variaciones menores en la presión de extrusión a lo largo del filamento.
- b) Imposibilidad de realizar trayectorias complejas o con cambios de dirección.
- c) Dependencia del operador para mantener la velocidad de extrusión constante.

No obstante, la estrategia implementada permitió generar datos representativos sobre el comportamiento de las mezclas en condiciones de extrusión continua.

4.5.4. Evaluación visual y deformación por peso propio del filamento

La capacidad de mantener la forma de cada mezcla se evaluó durante la deposición de múltiples capas, imprimiendo barras rectas de cinco capas, cada una con una altura nominal de 10 mm, alcanzando una altura teórica de 50 mm. Posteriormente, se midió la altura real alcanzada para determinar el grado de asentamiento por peso propio. Además, se registraron observaciones cualitativas sobre la cohesión entre capas, presencia de deformaciones, pérdida de sección transversal y desplazamientos laterales.

4.5.5. Observación de defectos típicos de los elementos impresos: pandeo, colapso y vibración

Durante la impresión de las barras, se identificaron y registraron defectos comunes en mezclas no optimizadas para impresión 3D, incluyendo:

- a) Pandeo lateral: deformaciones progresivas hacia los costados debido a baja resistencia a esfuerzos de corte.
- b) Colapso: pérdida total de forma estructural por fluidez excesiva o fraguado inadecuado.
- c) Vibración o inestabilidad superficial: aparición de ondulaciones o irregularidades durante la extrusión, indicando una reología inadecuada o efectos por el aire atrapado.

Estas observaciones se documentaron fotográficamente y servirán de base para la discusión en los resultados, donde se analizarán los mecanismos responsables de los defectos y el impacto de los parámetros evaluados.

4.6. Etapa VI. Evaluación del comportamiento mecánico

La última etapa experimental del presente trabajo consistió en la evaluación del comportamiento mecánico de las mezclas seleccionadas, tras comprobar su viabilidad de impresión. Para ello, se diseñaron especímenes impresos en condiciones controladas y se realizaron ensayos de compresión y flexión con el objetivo de analizar su desempeño estructural, considerando la anisotropía inducida por la deposición por capas.

4.6.1. Diseño de especímenes y trazado

Los especímenes fueron extruidos siguiendo el procedimiento establecido en la etapa de evaluación de printabilidad, utilizando capas consecutivas de material depositado horizontalmente. Para los ensayos de compresión, se elaboraron cubos por triplicado, compuestos por cinco capas superpuestas de 10 mm de espesor cada una, con una sección transversal de 50×50 mm, alcanzando una altura nominal de 50 mm (Figura 15-a). En el caso del ensayo de flexión, se fabricaron barras rectas de 160 mm de longitud por triplicado, conformadas por cinco capas de 10 mm de espesor y 50 mm de ancho, manteniendo dimensiones adecuadas para el ensayo a flexión en tres puntos (Figura 15-b). Todos los especímenes fueron curados en húmedo con condiciones ambiente controladas por periodos de 7 y 28 días antes del ensayo.

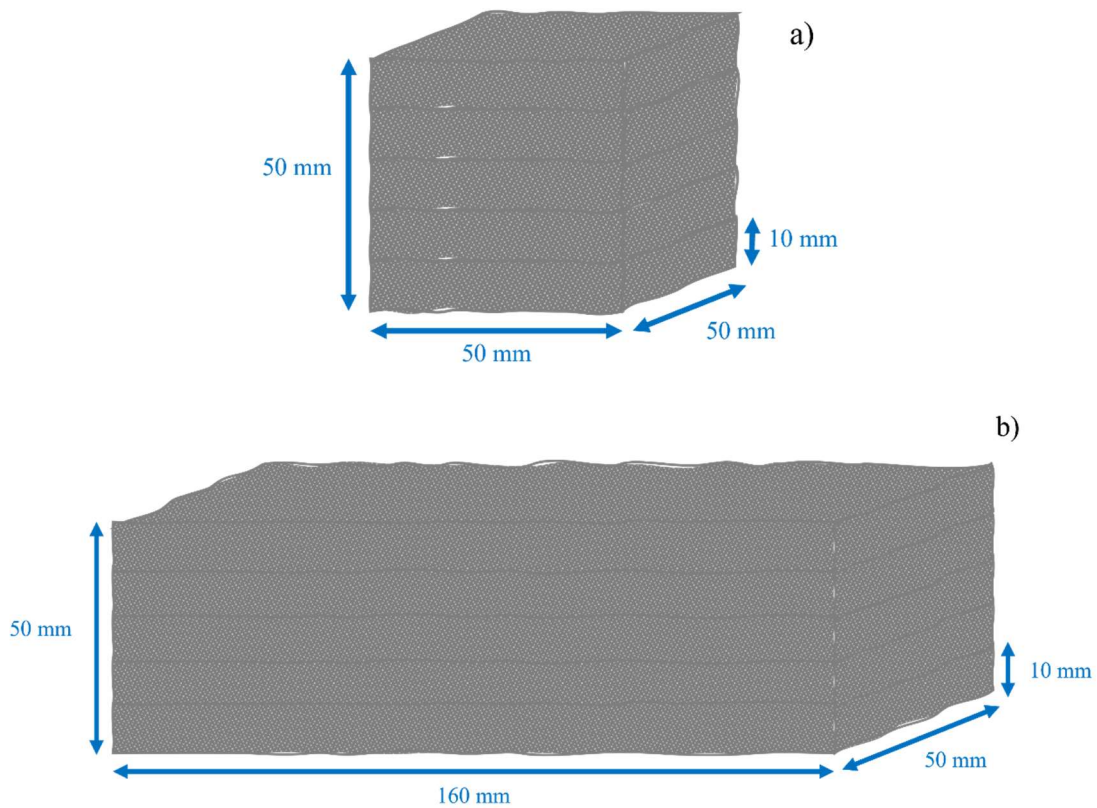


Figura 15. Diseño de especímenes para pruebas de a) compresión y b) tensión.

4.6.2. Resistencia a la compresión en dos direcciones

Se realizaron ensayos de compresión simple en dos configuraciones para cada mezcla (Figura 16), con el fin de identificar el comportamiento anisotrópico asociado al proceso de impresión:

- a) Compresión perpendicular a las capas: aplicada en dirección vertical, transversal a las capas de impresión.
- b) Compresión paralela a las capas: aplicada en dirección horizontal, siguiendo la orientación de deposición.

Cada configuración fue evaluada en una prensa universal con velocidad de carga constante de 90 kg/s de acuerdo con la norma ASTM-C109, adaptando el protocolo a las dimensiones y procedimientos de elaboración de los especímenes. La resistencia a compresión se determinó mediante la Ec. (15):

$$f_c = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. (15)}$$

donde f_c es la resistencia a compresión (MPa), P es la carga máxima aplicada (kgf) y A es el área de carga del espécimen (cm^2).

La comparación entre las dos configuraciones permitió evaluar la influencia de la dirección de impresión en la resistencia de las mezclas impresas.

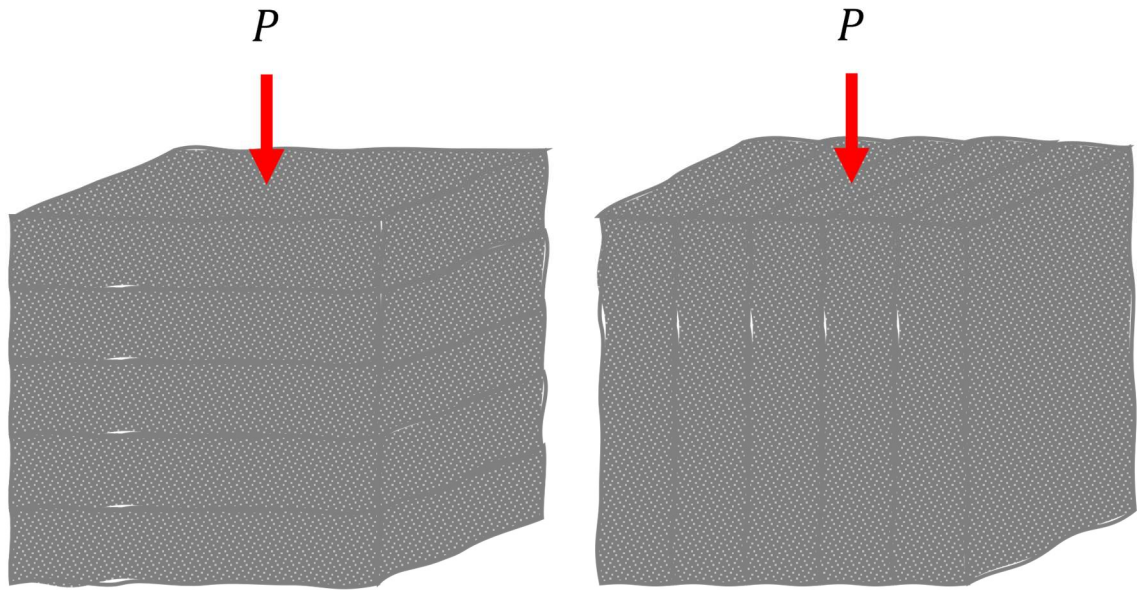


Figura 16. Dirección de aplicación de carga en ensayos de resistencia a compresión.

4.6.3. Resistencia a la flexión por ensayo de tres puntos

Los ensayos de flexión por tres puntos se realizaron conforme al procedimiento descrito en la norma ASTM-C348, adaptado para mezclas cementantes con geometrías rectangulares (Figura 17). Cada barra fue colocada sobre dos apoyos separados por 140 mm, aplicando una carga en el centro del claro hasta alcanzar la rotura. La velocidad de carga utilizada se estableció en 3 in/min, ya que velocidades menores (<10 mm/min) generaron tiempos de ensayo excesivos (>180 segundos), fuera del rango recomendado por la normativa. La resistencia a la flexión fue determinada mediante la Ec. (16):

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Ec. (16)}$$

donde: f_r es la resistencia a la flexión (MPa), P es la carga máxima aplicada (kgf), L es la longitud del claro (cm), b es el ancho del espécimen (cm) y d es la altura del espécimen (cm).

Durante el ensayo se evaluaron los modos de falla predominantes y la posible aparición de desprendimientos entre capas, fisuración paralela a la dirección de impresión o fracturas diagonales.

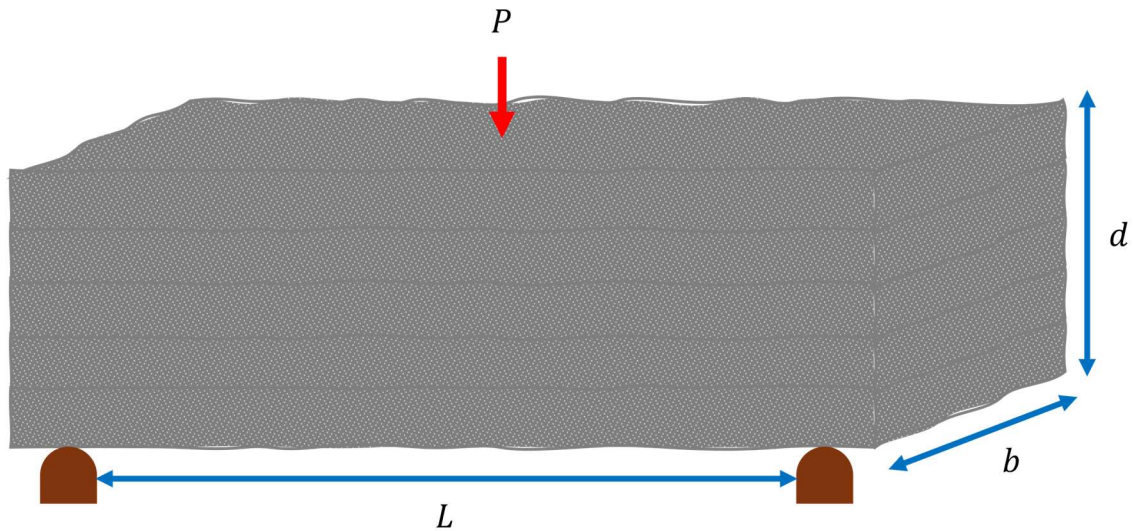


Figura 17. Esquematización de ensayo de flexión por tres puntos.

4.6.4. Comparativa de resultado entre mezclas

La resistencia a compresión y flexión fue comparada entre las diferentes mezclas de MK-CV y MK-CB, analizando la dispersión de los resultados, además de su correspondencia con las características reológicas y de printabilidad previamente determinadas.

Así, se identificaron las mezclas con mejor desempeño estructural y se establecieron correlaciones entre los modos de falla y los parámetros de impresión (como asentamiento, cohesión, deformación por peso propio y extrudabilidad). Además, se discutió la influencia de la dirección de carga en los resultados de compresión y las diferencias observadas en el comportamiento de flexión. Este análisis permitió validar la selección de mezclas realizadas en etapas anteriores y establecer directrices para futuras formulaciones de materiales printables con alto desempeño mecánico.

CAPÍTULO 5. Resultados y Discusión

5.1. Caracterización de materiales

La caracterización de las materias primas es esencial para comprender su influencia sobre las propiedades frescas, reológicas, mecánicas y de printabilidad. En este apartado se presentan los resultados del análisis químico, mineralógico, físico y de reactividad puzolánica de las materias primas utilizadas en la formulación de los sistemas MK-CV y MK-CB.

5.1.1. Propiedades químicas

5.1.1.1 Composición química

En la Tabla 10 se muestra la composición química determinada mediante FRX del CP y del MK, CV, CB. Los resultados mostraron que los tres MPS cumplieron con el contenido mínimo de los óxidos principales de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$, asimismo los contenidos de SO_3 y CaO se mantienen por debajo de los límites máximos establecidos en la norma ASTM C618. Esto respalda su actividad puzolánica. En función de su composición: (i) La CV empleada se clasifica como tipo F debido a su bajo contenido de cal ($\text{CaO} < 10\%$), indicando su origen silíceo y una baja reactividad hidráulica primaria (Al-Shmaisani et al., 2022; Suraneni, 2021); (ii) tanto el MK como la CB se clasifican como puzolanas naturales (tipo N), en virtud de su bajo contenido de cal y origen no derivado de procesos de combustión industrial (Sinngu et al., 2023; Q. Xu et al., 2018).

Respecto del CPO40R, su composición se ajusta a los parámetros definidos por la norma ASTM C150, presentando un contenido de SiO_2 y CaO cercano al 20% y 60%, respectivamente, asimismo, el Al_2O_3 , Fe_2O_3 y MgO fueron inferiores al 6%, mientras que el contenido máximo de SO_3 fue del 3%. Estos contenidos confirmaron que el cemento cumple con los requisitos químicos para ser considerado un CPO tipo I de alta resistencia inicial.

Estas características químicas son fundamentales para prever las interacciones entre el cemento y los MPS durante el proceso de hidratación, además de correlacionar su comportamiento mecánico y reológico en los sistemas ternarios evaluados.

Tabla 10. Composición química del CPO40R y los MPS.

	CPO40R	MK	CV	CB
CaO	67.010	0.599	2.919	4.649
SiO₂	18.507	49.13	60.98	68.986
Al₂O₃	5.083	46.963	25.536	7.244
Fe₂O₃	3.112	0.496	6.111	5.146
TiO₂	0.285	1.901	1.105	0.645
Na₂O	0.185	-	0.137	0.818
K₂O	1.149	994.3 ppm	1.490	8.808
MgO	0.969	0.336	0.858	2.903
SO₃	3.176	0.293	0.578	313.9 ppm
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃		96.589	92.627	81.376

5.1.1.2 Composición mineralógica

La composición mineralógica del cemento y los MPS desempeña un papel clave en los mecanismos de hidratación, las reacciones puzolánicas y, en consecuencia, en las propiedades reológicas y mecánicas de los sistemas aglutinantes. Por tanto, la Figura 18 se presenta los difractogramas de rayos X del CPO40R, el MK, la CV y la CB.

En el CPO40R se identificaron las fases minerales relacionadas con los óxidos de calcio y sílice del análisis de FRX, tales como la alita (C₃S) y la belita (C₂S). Adicionalmente, se detectaron fases minoritarias como celita (C₃A) y ferrita (C₄AF), correspondientes a óxidos de aluminio (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃), respectivamente. Estas fases son de interés porque influyen en mayor o menor medida en el calor de hidratación y en la cinética del fraguado.

En el caso de la CV, se identificaron principalmente las fases de cuarzo y mullita, pero también se observaron picos asociados a hematita (Fe₂O₃). Un rasgo característico del difractograma es la presencia de un halo de amorficidad para un ángulo de difracción $2\theta=12.5^{\circ}$ - 37.5° , indicando una fracción de fase amorfa potencialmente reactiva con materiales cementantes.

La CB muestra una mineralogía más compleja, con fases cristalinas de cristobalita (SiO₂), cianita (Al₂SiO₅), maghemita (Fe₂O₃) mullita de triple celda, además de óxido de potasio (K₂O). La cristobalita es el mineral dominante, reflejando el elevado contenido de sílice de esta puzolana. También se observó un halo de amorficidad para un ángulo de difracción

$2\theta=15^\circ-37.5^\circ$, aunque menor comparada con la CV, lo que indica una actividad puzolánica potencial.

En cuanto al MK, se observó una amplia región amorfa para un ángulo de difracción $2\theta=12.5^\circ-40^\circ$, atribuible a la fase reactiva de MK. No obstante, también se detectaron fases de cuarzo, mullita y anatasa (TiO_2). Estos resultados permitieron identificar las fases potenciales con reactividad puzolánica de cada material.

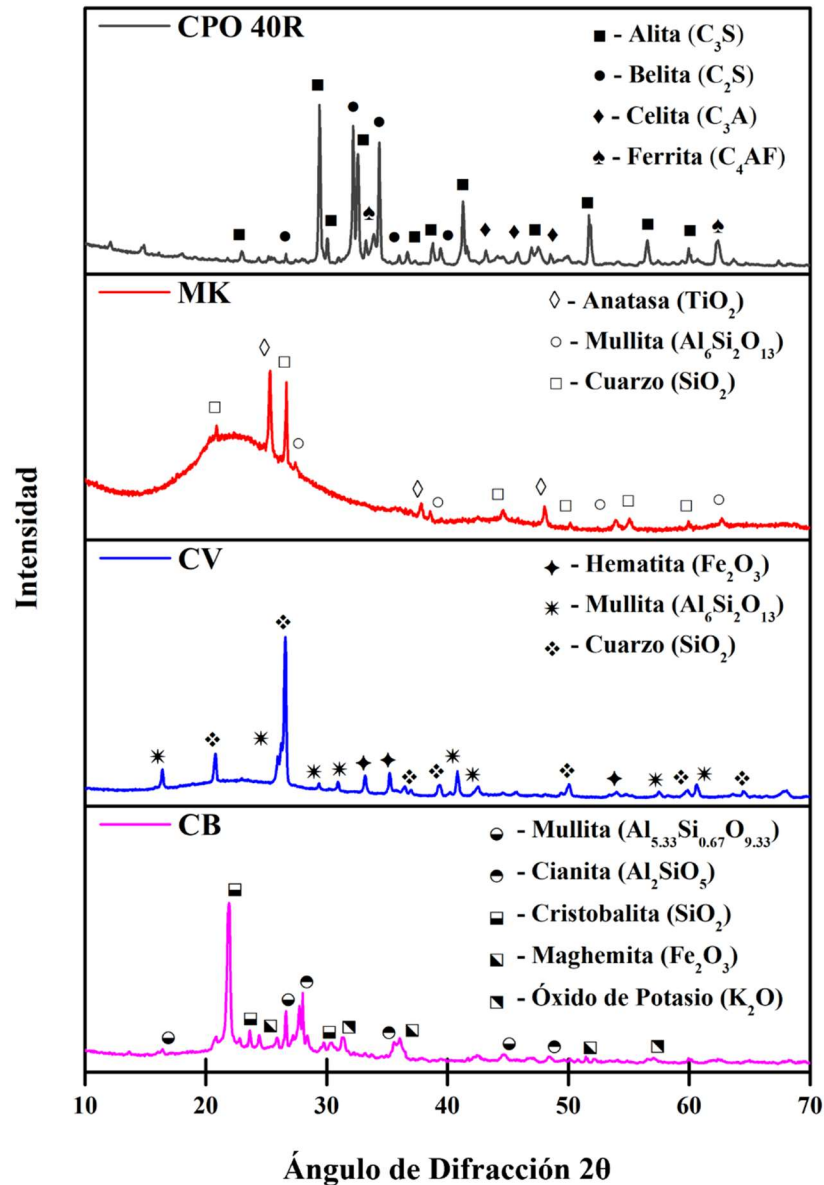


Figura 18. Difractogramas del CPO40R y los MPS.

5.1.2. Propiedades físicas

5.1.2.1 Morfología de las partículas

La morfología de las partículas de los materiales cementantes es un factor determinante en el comportamiento reológico, la trabajabilidad y el empaquetamiento de las mezclas (Mehdipour & Khayat, 2018; Yin et al., 2025). En la Figura 19 se presentan las micrografías obtenidas mediante MEB para el CPO40R, el MK, la CV y la CB.

El CPO40R presentó partículas de forma angular y rugosa, lo cual contribuye a una mayor cohesividad y adhesión dentro de los sistemas cementantes, aunque puede incrementar la fricción interna en estado fresco.

El MK exhibió partículas de morfología laminar, lo que puede incidir en el comportamiento reológico de la tinta. La fricción generada entre partículas planas tiende a aumentar la viscosidad plástica y la tixotropía de las mezclas, dificultando el flujo, pero también favoreciendo la edificabilidad al mejorar la resistencia a la deformación plástica.

En el caso de la CV, se observó una morfología esférica uniforme, típica de los residuos generados en plantas carboeléctricas mediante procesos de combustión y vitrificación. Esta forma redondeada favorece el efecto de esferas rodantes, lo cual reduce la fricción entre partículas, disminuye la demanda de agua y mejora la homogeneidad y trabajabilidad de las mezclas. Además, la esfericidad de las partículas ayuda a mitigar fenómenos como la segregación y el sangrado.

Finalmente, la CB mostró una morfología angular e irregular, con superficies fracturadas producto del proceso de molienda posterior a la calcinación. Aunque sus partículas no son perfectamente esféricas, presentaron una ligera esfericidad y rugosidad, lo cual contribuye moderadamente a la cohesión y al empaquetamiento de las partículas en una matriz cementante. Esta morfología puede ser beneficiosa para lograr mezclas con distribución densa y comportamiento fresco estable.

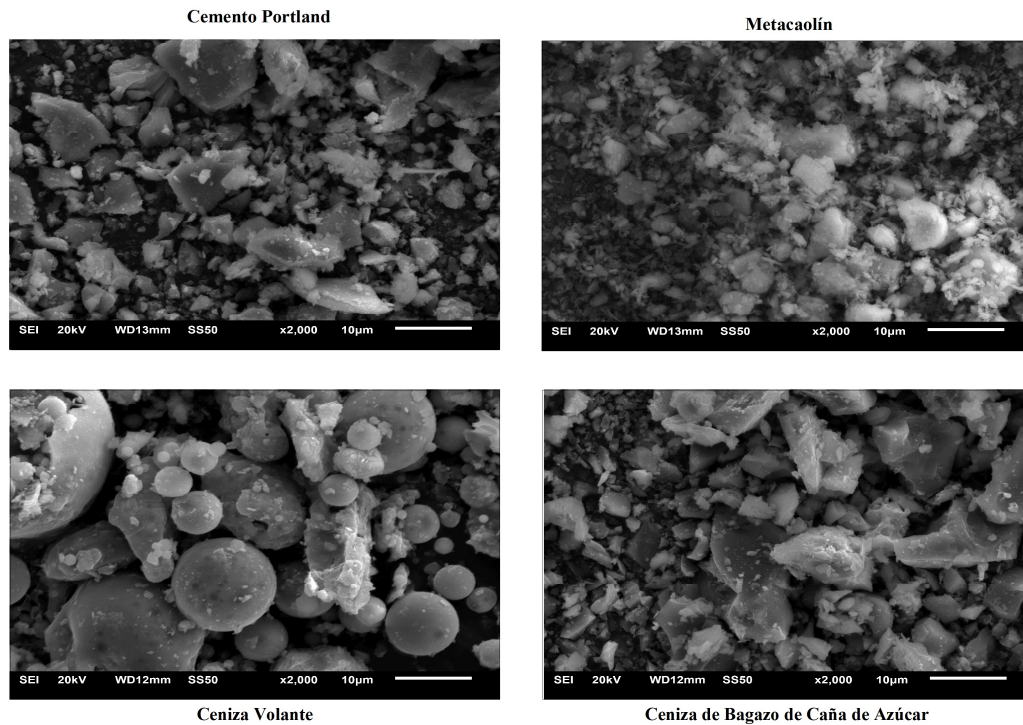


Figura 19. Morfología de las partículas del CPO40R y los MPS.

5.1.3. Distribución de tamaño de partícula

La DTP de los materiales cementantes influye directamente en propiedades como la reactividad puzolánica, la trabajabilidad, el empaquetamiento de partículas y la demanda de agua. En la Figura 20 se presentan las curvas granulométricas del CPO40R y los MPS evaluados.

Entre los materiales evaluados, el MK mostró la mayor fineza con un diámetro medio de partícula de aproximadamente 6 µm. Este valor se relaciona con el proceso de calcinación al que fue sometido el caolín, en el cual sus partículas originales de 3 µm, tienden a aglomerarse por efecto de la plasticidad desarrollada durante la deshidroxilación térmica, dando lugar a una distribución de tamaño de partícula más homogénea y controlada (Inocente et al., 2021). Este tamaño de partícula favorece una mayor reactividad y una contribución significativa a la formación temprana de productos cementantes.

En contraste, la CV presentó una DTP más gruesa, con un diámetro medio de partícula cercano a los 61 µm. Este tamaño considerablemente mayor puede influir en una menor

reactividad inicial y tiempos de fraguado más largos, lo cual puede contribuir a mantener una misma trabajabilidad por más tiempo.

El CPO40R mostró una distribución granulométrica intermedia entre las materias primas, con un diámetro medio de aproximadamente 15 μm , lo cual es consistente con los valores típicos reportados para cementos Portland tipo I o tipo R. Finalmente, la CB mostró un diámetro medio de partícula de aproximadamente 18 μm , pero su curva de distribución sugiere una menor proporción de partículas ultrafinas, lo que podría tener implicaciones tanto en la reactividad como en el empaquetamiento dentro de la mezcla.

La evaluación conjunta de estos resultados permite inferir que la combinación estratégica de estos materiales, considerando su morfología y granulometría, puede optimizar el desempeño reológico y mecánico de los aglutinantes ternarios propuestos para impresión 3D.

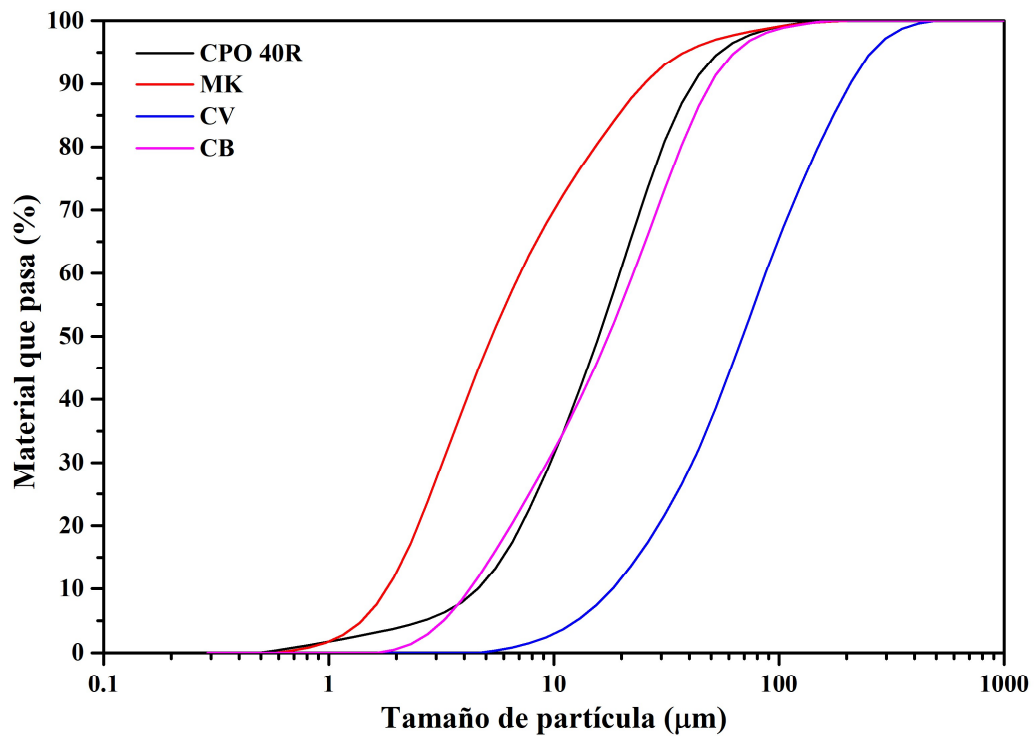


Figura 20. Distribución del tamaño de partícula del CPO40R y los MPS.

5.1.3.1 Densidad y área superficial específica

La Tabla 11 presenta los resultados obtenidos de densidad y área superficial específica para el CPO40R y los MPS. Estos parámetros son fundamentales para comprender el comportamiento físico de los materiales en estado fresco y endurecido, ya que influyen en la relación agua/aglutinantes, la distribución de vacíos y la velocidad de las reacciones de hidratación.

En cuanto a la densidad, el CPO40R presentó un valor de 3.09 g/cm^3 , el cual se encuentra dentro del rango típico reportado de $2.90\text{--}3.16 \text{ g/cm}^3$ según Sutar et al. (2021), confirmando su conformidad con los estándares comunes de calidad.

Respecto a los MPS, la CV mostró la densidad más baja entre las materias primas de 2.01 g/cm^3 , atribuida a la presencia de partículas residuales de carbono no quemado. No obstante, este valor sigue dentro del rango aceptado para la CV de $1.30\text{--}2.80 \text{ g/cm}^3$ como lo indica De Belie (2018). El MK presentó una densidad media de 2.55 g/cm^3 , en concordancia con los valores típicos reportados para metacaolines de $2.49\text{--}2.65 \text{ g/cm}^3$, cuya variación depende tanto del tipo de caolín como del proceso de calcinación (Samson et al., 2017; San Nicolas et al., 2014; Teklay et al., 2015). En cuanto a la CB, su densidad fue de 2.48 g/cm^3 . Este valor puede asociarse con una menor concentración de óxidos densos como el SiO_2 , así como a un ligero aumento del contenido de Fe_2O_3 , lo cual ha sido corroborado mediante comparaciones con muestras de composición distinta.

Con relación al área superficial específica, el CPO40R mostró un valor de $1.04 \text{ m}^2/\text{g}$, lo cual se encontró dentro del rango típico para CP de $1.00\text{--}1.20 \text{ m}^2/\text{g}$ según Abrão et al. (2020). La CV y la CB presentaron valores de $2.56 \text{ m}^2/\text{g}$ y $1.47 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente, lo cual puede estar influido por sus características morfológicas y granulométricas. Sin embargo, el MK destacó por presentar el mayor valor de área superficial específica de $16.52 \text{ m}^2/\text{g}$, probablemente asociado con su elevada fineza.

En términos generales, se puede establecer que, a menores tamaños de partícula, mayor será el valor de área superficial específica, favoreciendo a la reactividad (Güneyisi et al., 2012). Esta tendencia se valida con los resultados de la distribución granulométrica presentados en el apartado 5.1.3. No obstante, la morfología de las partículas también

influye significativamente, ya que las partículas más lisas y esféricas, como la CV, tienden a presentar un área superficial mayor en comparación con partículas de mayor rugosidad y angularidad, como las del CPO 40R y la CB (Navarrete et al., 2020). Esta combinación de propiedades permite explicar por qué la CV presentó un área superficial superior al CPO40R y la CB, a pesar de tener un mayor tamaño medio de partícula.

Tabla 11. Densidad y área superficial del CPO 40R y los MPS.

	CPO40R	MK	CV	CB
Densidad (g/cm³)	3.09	2.55	2.01	2.48
Área superficial (m²/g)	1.04	16.52	2.56	1.47

5.1.4. Índice de actividad puzolánica

La Tabla 12 presenta los resultados del IAP de los MPS utilizados en este estudio, evaluados a 7 y 28 días para un porcentaje de sustitución de CP del 20 %. Es importante señalar que la sustitución se realizó en volumen y no en peso a diferencia de lo indicado por la norma ASTM-C311, esto con el propósito de mantener constante la relación agua/aglutinante, tal como lo sugieren Bentz et al. (2011).

De acuerdo con la norma ASTM-C618, un material puede ser considerado puzolánico si alcanza un IAP mínimo de 75% tanto a 7 como a 28 días. En esta evaluación, se consideró como referencia la resistencia a compresión del CP sin sustitución, asignándole un valor del 100 % a cada edad evaluada.

La CV fue el material que mostró menor reactividad a edad temprana, con un IAP de 79% a los 7 días, valor apenas superior al umbral mínimo. Esta baja reactividad inicial es coherente con lo reportado en la literatura, donde se señaló que las reacciones de los compuestos presentes en la CV se desarrollaron predominantemente después de los 14 días debido a su morfología, composición y fase vítrea (Cheng et al., 2017; Nguyen et al., 2023). A los 28 días, la CV mostró una mejora en su IAP alcanzando 83 %, lo cual indicó una progresiva, lo cual aún se puede considerar una actividad puzolánica limitada a esa edad.

El MK presentó los IAP más altos, alcanzando 125% a los 7 días, atribuible a su alto contenido de SiO₂ y Al₂O₃, lo cual pudo haber favorecido la formación acelerada de productos de hidratación como CSH y CASH (Saboo et al., 2019). Sin embargo, a los 28

días el IAP del MK mostró una ligera disminución a 121%, lo cual es consistente con el hecho de que su máxima reactividad ocurre a edades tempranas, estabilizándose posteriormente.

En cuanto a la CB, se observó un comportamiento lineal en su actividad puzolánica, alcanzando un IAP de 85% a los 7 días y 84% a los 28 días, lo cual indicó una evolución casi constante en el tiempo. Esta tendencia se debe a la reactividad tardía de sus componentes, la cual se ha reportado en edades superiores a 90 días. No obstante, la CB mostró una menor pérdida de resistencia mecánica en comparación con la CV, lo cual puede explicarse por su DTP más fina y similar a la del CP, propiciando un efecto *filler*. Este efecto consiste en el relleno de poros de la matriz cementante por partículas inertes que mejora la compactación y densificación, aunque no se generen nuevos productos de hidratación en esas edades.

En resumen, todos los materiales evaluados cumplieron con el requisito mínimo de la norma ASTM-C618 a ambas edades, aunque con diferentes mecanismos de acción y grados de reactividad, siendo el MK el de mayor potencial puzolánico a corto plazo, seguido por la CB y la CV con comportamientos más progresivos.

Tabla 12. Índice de actividad puzolánica de los MPS.

	Resistencia (MPa)		IAP (%)	
	7 días	28 días	7 días	28 días
CPO40R	36.57	43.14	100	100
MK	45.90	52.13	125	121
CV	28.74	35.66	79	83
CBCA	31.06	36.28	85	84

5.2. Análisis de propiedades en estado fresco

5.2.1. Resultados de fluidez

En la Figura 21 se presenta la fluidez de las mezclas para cada modelo del diseño experimental. En el modelo MK-CV (Figura 21-a), la fluidez varió entre 81% y 147%. No obstante, las mezclas R3 y R6 salieron del rango con valores de 27.8 y 60%, respectivamente, debido a dificultades en su elaboración y evaluación ya que durante el mezclado se generó una masa altamente rígida, posiblemente producto de una rápida

absorción de agua por parte del metacaolín (H. N. Geng & Li, 2017; Q. Huang et al., 2025).

Considerando el resto de las mezclas, la fluidez menor que 100% la alcanzaron R2 (90%), R8 (95%) y R10 (81%), las cuales tuvieron un alto contenido de MK. Es bien conocido que el MK tiende a reducir la fluidez en mezclas cementantes debido a su elevada finura y área superficial, lo cual provoca una mayor absorción de agua y fricción entre partículas (Barkat et al., 2019; Dou et al., 2023; S. Zhang et al., 2021). Resaltó que R8 contiene más MK y menos CV que R10, lo cual debería disminuir su fluidez, no obstante, es probable que una mayor relación a/cm de la primera permitió mejorar esta propiedad. Comparativamente, R2 presentó una baja relación a/cm, pero también un contenido moderado de MK, resultando en un comportamiento intermedio de la fluidez.

En contraste, las mezclas con mayor fluidez fueron aquellas con altos contenidos de CV, como R1 (135%), R4 (147%), R7 (145%) y R11 (141%). Esto es esperado ya que la CV mejora la fluidez por su morfología esférica (Jiang et al., 2020; D. peng Zheng et al., 2017). Asimismo, las variaciones de la fluidez entre estas mezclas se pueden explicar en función del contenido de MK y en la relación a/cm.

El resto de las mezclas se mantuvo dentro del rango especificado por la norma ASTM-C109 ($110 \pm 5\%$), incluyendo R5 (114%), R9 (113%) y R12 (108%), mientras que R6.1 presentó un valor ligeramente inferior (103%). Cabe mencionar que estas mezclas tuvieron niveles intermedios para los factores del contenido de MK y las relaciones a/cm, excepto R6.1 que combinó altos contenidos de MK y CV, lo que exigió una relación a/cm en el nivel más alto.

En cuanto a los resultados de fluidez para el modelo MK-CB (Figura 21-b), los resultados fueron similares al modelo MK-CV. R3 y R6 presentaron fluidez de 27.8 y 60%, respectivamente, por las dificultades en su elaboración. Considerando el resto de las mezclas, la fluidez varió entre 77% y 149%, siendo R2 (85%), R8 (95%) y R10 (77%) las mezclas con fluidez menor que 100%. A diferencia del efecto observado con la CV, la incorporación de CB redujo ligeramente la fluidez, aun considerando niveles similares del contenido de MK y las relaciones a/cm. Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p\text{-value} < 0.05$). Por otro lado, las mezclas con mayor

fluidez fueron R1 (138%), R4 (149%), R7 (145%) y R11 (142%), mientras que R6.1 (111%), R9 (113%) y R12 (111%) se ubicaron dentro del rango de $110 \pm 5\%$, aunque R5 registró un valor ligeramente superior de 116%.

En general, la fluidez para ambos modelos fue estadísticamente comparables. Sin embargo, el contenido de CV tendió a incrementar ligeramente la fluidez con respecto de la CB, probablemente debido a que, a diferencia de la esfericidad de la CV, la CB tiene una morfología de partícula más irregular y una mayor absorción (Jiménez-Quero et al., 2013; T. Yang et al., 2018), lo que demanda más agua para alcanzar la misma trabajabilidad que una mezcla con CV.

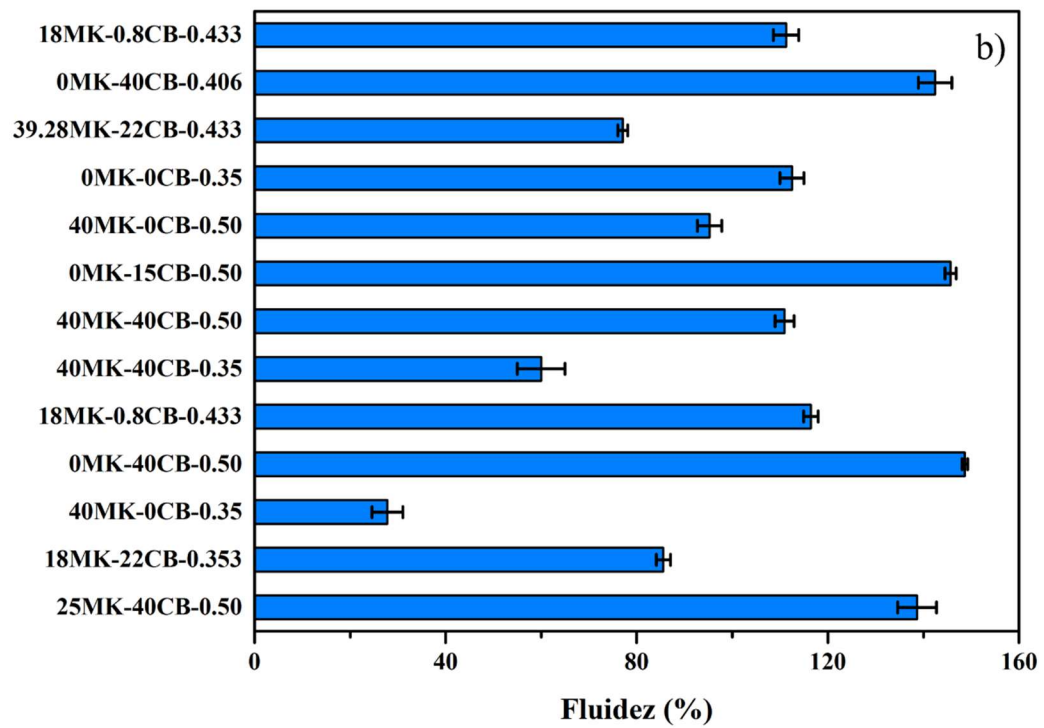
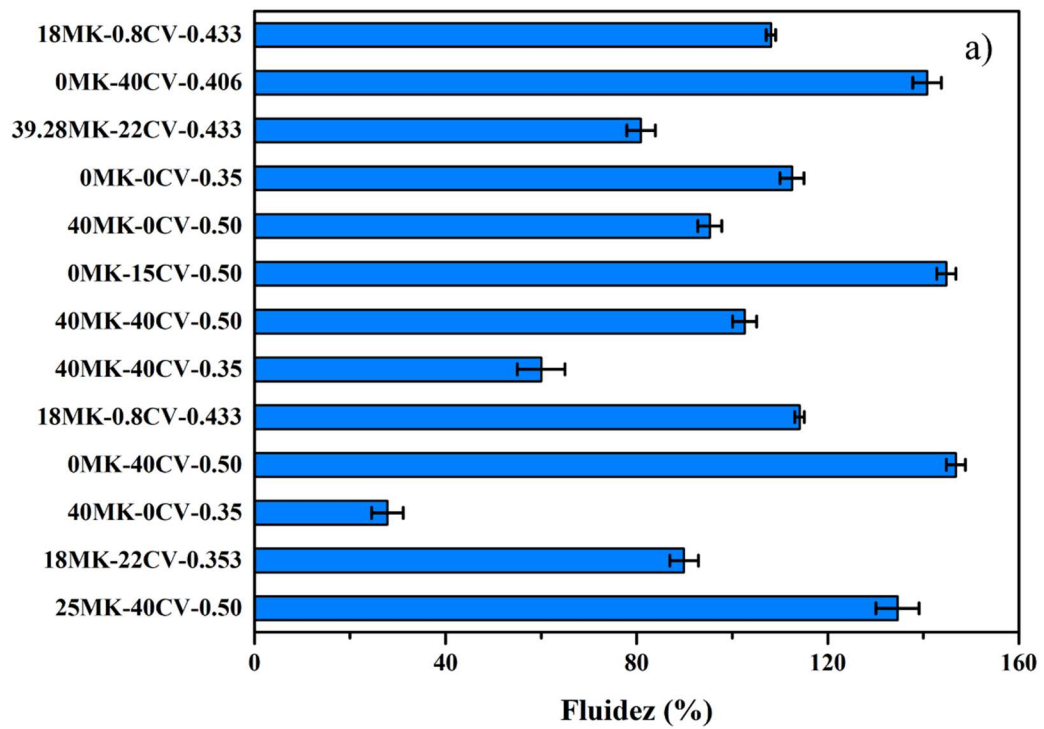


Figura 21. Fluidez de las mezclas de los modelos de optimización: a) MK-CV; b) MK-CB.

Según la Tabla 13, los modelos presentaron R^2 ajustado de 0.9827 para MK-CV y 0.9902 para MK-CB. Los diagramas de Partero (Figura 22) mostraron que, en ambos casos, los factores más influyentes sobre la fluidez fueron la relación a/cm y el contenido de MK. Seguidos de un efecto significativo (p-value <0.01) tanto de la CV como de la CB y de la interacción entre el MK y la rel. a/cm, lo que resulta congruente con lo discutido anteriormente.

Tabla 13. Resumen del ANOVA para los modelos de fluidez.

Factor	p-value		
	MK-CV	MK-CB	
Modelo	< 0.01	< 0.01	Significativo
A – MK	< 0.01	< 0.01	
B – CV/CB	< 0.01	< 0.01	
C – Rel. a/cm	< 0.01	< 0.01	
AB	0.04	< 0.01	
AC	< 0.01	< 0.01	
BC	< 0.01	< 0.01	
A ²	< 0.01	< 0.01	
B ²	> 0.05	< 0.01	
C ²	> 0.05	< 0.01	
Residual			
Falta de ajuste	0.57	0.49	No significativo
Coefficiente de Determinación (R²)			
R ²	0.9859	0.9925	
R ² Ajustado	0.9827	0.9902	
R ² de Predicción	0.9783	0.9868	

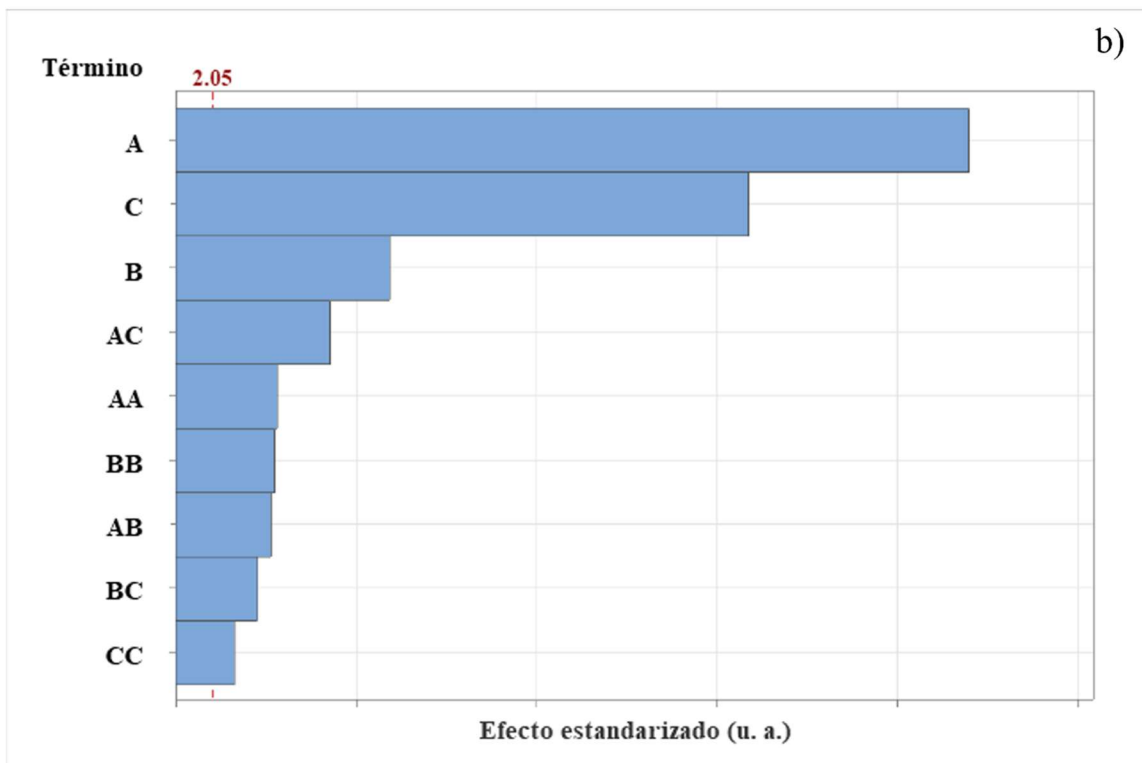
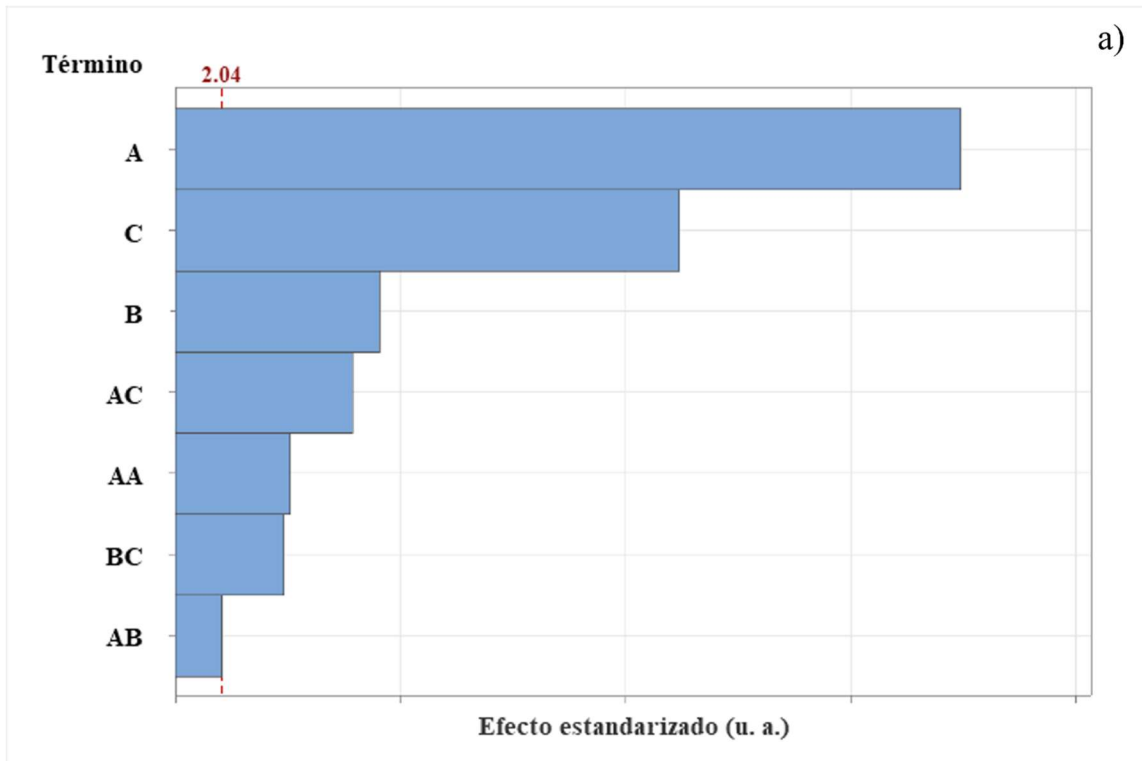


Figura 22. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de fluidez: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).

La Figura 23 representa gráficamente el ajuste por el MSR de la fluidez para los modelos de MK-CV y MK-CB. En ambos modelos, se observó que el MK presentó el efecto más dominante y negativo, reduciendo la fluidez hasta un mínimo cercano al 70%. Esta reducción se asocia a que el MK posee la mayor finura y área superficial entre los aglutinantes, lo que incrementó la demanda de agua y redujo la trabajabilidad de las mezclas (Homayoonmehr et al., 2021; Madandoust & Mousavi, 2012). Por su parte, la relación a/cm mostró un efecto positivo y lineal, confirmando que el agua disponible es el otro principal controlador de la fluidez, resultando en que la interacción de estos factores fue significativa en ambos modelos, demostrando que el efecto perjudicial del alto contenido de MK puede ser compensado eficazmente por un aumento en la relación a/cm , resaltando la necesidad de ajustar la dosificación de agua en función del porcentaje de MK para mantener una consistencia viable en las tintas de impresión.

Por otro lado, en el modelo MK-CV (Figura 23a), la incorporación de CV tuvo un efecto positivo y significativo, aumentando la fluidez de manera aproximadamente lineal, lo que es atribuible a la morfología esférica de la CV, que genera un efecto lubricante en la mezcla (J. Ma et al., 2021). Por su parte, la CB también fue significativa en el modelo MK-CB (Figura 23b), sin embargo, presentó un comportamiento cuadrático ascendente, sugiriendo que la fluidez disminuye a un nivel intermedio menor a 20% de CB para luego recuperarse a altos contenido.

Esta diferencia ratifica que la CV es un promotor de la fluidez más eficaz que la CB, debido a que la CB tiende a ser un material hidrofílico con una mayor capacidad de absorción de agua que el CP (Gupta et al., 2022), lo que tiende a reducir la fluidez (D. H. Le et al., 2018; SANTOS et al., 2019). Por ello, si bien el efecto positivo de la CB existe, solo se manifiesta plenamente y mejor la fluidez cuando se combina con una alta relación a/cm , como lo evidencia la interacción CB-Rel. a/cm .

En síntesis, los resultados demostraron que altos contenidos de MK combinados con bajas relaciones a/cm provocan una disminución notable en la fluidez, limitando el rango de combinaciones viables para las tintas de impresión. Sin embargo, aunque el efecto de la CV y la CB fue moderado comparado con el MK y el a/cm , su incorporación contribuyó

significativamente a ampliar el rango la fluidez, siendo la CV la adición más efectiva para este propósito.

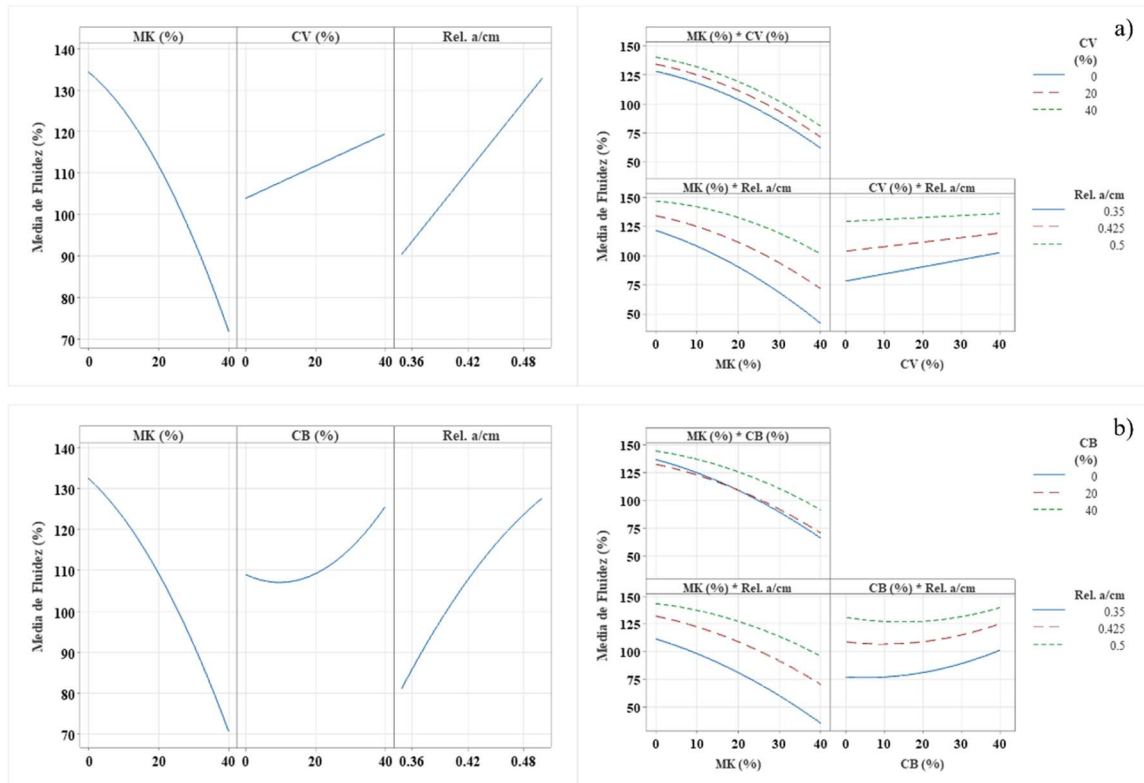


Figura 23. Efectos principales e interacción de factores para la fluidez de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.2. Resultados de edificabilidad

La Figura 24 presenta los resultados de edificabilidad obtenidos para las mezclas de los modelos ternarios de MK-CV y MK-CB. En correlación con la fluidez, las mezclas R3 y R6 formaron pastas densas con complejidad para ser moldeadas y sin evidencia de asentamiento por gravedad, indicando una alta retención de forma al momento de su deposición, presentando las más altas edificabilidad de ambos modelos con 98.3 y 97.7%, respectivamente.

En el caso del modelo MK-CV (Figura 24a), la edificabilidad estuvo entre 77% y 96%, con una tendencia inversa con relación a la fluidez, es decir, conforme mayor fue la fluidez, menor fue la estabilidad de forma. Para facilitar el análisis, se agruparon los resultados en tres rangos: (i) edificabilidad pobre ($\leq 80\%$), (ii) edificabilidad aceptable (80–90%) y (iii) edificabilidad buena ($>90\%$). Dentro del primer grupo se encontraron las

mezclas R4 y R7 con una edificabilidad del 77–80%, las cuales tuvieron altos contenidos de CV y relaciones a/cm, respondiéndose con reportes previos que señalan que ambos factores disminuyen la capacidad de retención de forma, ya que la ceniza volante, por su morfología esférica y su menor demanda de agua, reduce la fricción interna entre partículas y favorece un comportamiento más fluido (Hemalatha & Ramaswamy, 2017; Z. Zhou et al., 2024). Adicionalmente, una mayor relación a/cm incrementa la fase líquida disponible, disminuye la cohesión y el esfuerzo de cedencia del sistema, retrasando el desarrollo de estructuras floculadas responsables de la estabilidad geométrica inmediata (Zuo et al., 2018).

Las mezclas con edificabilidad aceptable fueron R1 (83%), R5 (88%), R6.1 (89%), R9 (88%) y R11 (84%), las cuales tuvieron niveles intermedios del contenido de MK y las relaciones a/cm, sugiriendo un equilibrio entre cohesión interna y trabajabilidad, salvo R6.1 con los mayores niveles de cada factor, indicando una compensación favorable entre la a/cm y la CV sobre el efecto del MK. Finalmente, el grupo con edificabilidad buena y consistencia trabajable incluyó a R2 (93%), R8 (94%), R10 (96%) y R12 (92%), siendo mezclas con los mayores contenidos de MK y relaciones a/cm intermedias o bajas, las cuales favorecieron una menor fluidez y un mayor mantenimiento de forma. Lo anterior puede deberse a que un mayor contenido de metacaolín incrementa la superficie específica y la demanda de agua del sistema, promoviendo la formación temprana de estructuras floculadas más densas, lo que mejora la estabilidad geométrica de los filamentos (H. Geng et al., 2019). Al mismo tiempo, relaciones a/cm controladas limitan el exceso de fase líquida, evitando la segregación y la deformación plástica del material (Sun et al., 2022). Esta combinación puede favorecer un equilibrio entre rigidez inicial y trabajabilidad, esencial para lograr impresiones estables con adecuada cohesión y capacidad de soportar su propio peso.

Con respecto del modelo MK-CB (Figura 24b) presentó una ligera disminución de la edificabilidad, variando entre 53% y 95%. Así, la edificabilidad más baja se registró en las mezclas R4 (53%), R7 (62%), R11 (74%) y R1 (77%), todas con altos contenidos de CB y relaciones a/cm. Esto puede explicarse por la morfología irregular y el pobre efecto de empaquetamiento provocado por la CB (Alvarenga & Cordeiro, 2024).

Las mezclas con edificabilidad aceptable en este modelo fueron R5, R6.1, R9 (todas con 87%) y R12 (85%), en las cuales los niveles del contenido de MK y las relaciones a/cm se mantuvieron controladas. Por otro lado, la edificabilidad más alta se logró con las mezclas R2 (92%), R8 (93%) y R10 (95%), las cuales tuvieron altos contenidos de MK y relaciones a/cm de intermedias a altas, confirmando la influencia positiva de estos factores en la compensación de uno sobre otro en la estabilidad estructural tras la extrusión. Esto puede deberse a que el aumento del MK favorece la absorción de agua en la fase sólida, promoviendo la formación temprana de redes flocculadas (Shi et al., 2024), al mismo tiempo que relaciones a/cm bajas reducen la cantidad de agua libre, disminuyen la fluidez y evitan la deformación de las tintas por peso propio después de ser depositado (da Silveira Júnior et al., 2024; H. Lee et al., 2021), generando mezclas con mayor rigidez inicial, mejor cohesión interna y una capacidad superior de mantener su forma bajo su propio peso, lo que se traduce en índices de edificabilidad más elevados.

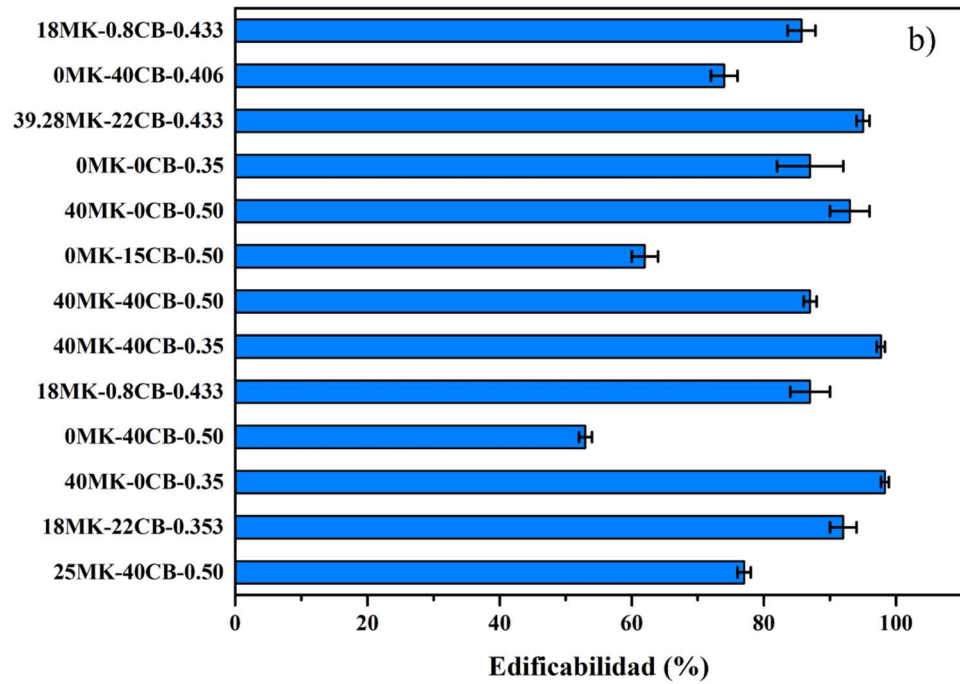
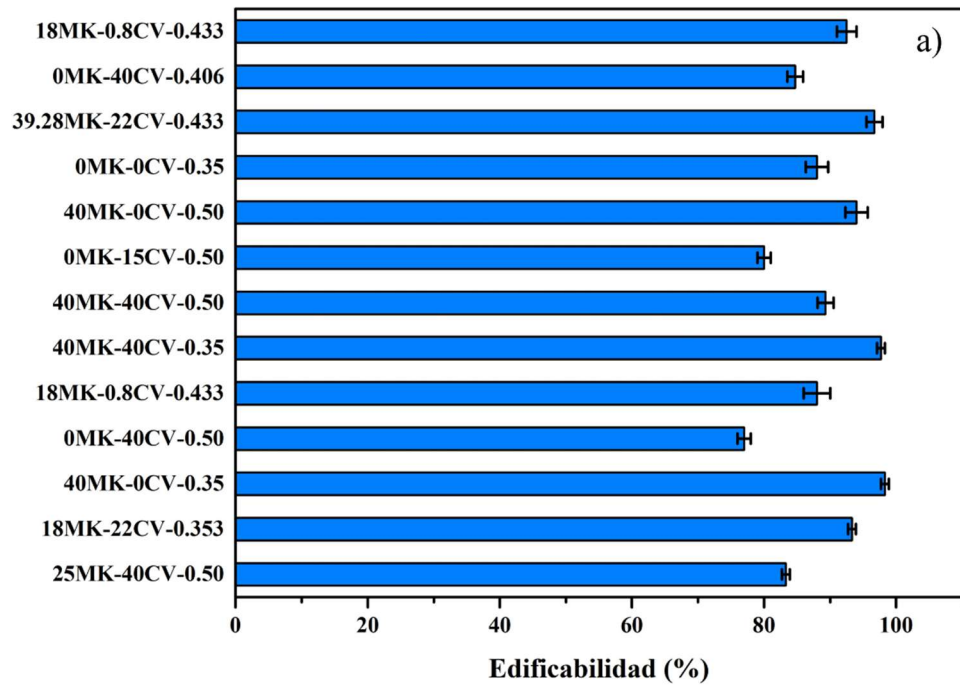


Figura 24. Edificabilidad de las mezclas de los modelos de optimización: a) MK-CV; b) MK-CB.

El resumen del ANOVA para los modelos obtenidos por MRS se presentan en la Tabla 14. En ambos casos, los factores estadísticamente significativos fueron el contenido de MK y la relación a/cm, mientras que la CV y la CB no mostraron una contribución significativa. Los R^2 ajustados fueron de 0.9328 para el modelo MK-CV y de 0.9688 para MK-CB, evidenciando un mejor ajuste de los valores experimentales en el segundo.

Tabla 14. Resumen del ANOVA para los modelos de edificabilidad.

Factor	p-value		
	MK-CV	MK-CB	
Modelo	< 0.01	< 0.01	Significativo
A – MK	< 0.01	< 0.01	
B – CV/CB	< 0.01	< 0.01	
C – Rel. a/cm	< 0.01	< 0.01	
AB	> 0.05	0.04	
AC	> 0.05	< 0.01	
BC	< 0.01	< 0.01	
Residual			
Falta de ajuste	0.57	0.49	No significativo
Coefficiente de Determinación (R^2)			
R^2	0.9399	0.9737	
R^2 Ajustado	0.9328	0.9688	
R^2 de Predicción	0.9246	0.9589	

Los diagramas de Pareto (Figura 25) y las gráficas de efectos principales (Figura 26) muestran que el incremento del contenido de MK mejoró la edificabilidad, mientras que el aumento de la relación a/cm la reduce, siendo, en ambos modelos, los factores más significativos para esta propiedad. Estas tendencias están directamente relacionadas con las propiedades físicas y químicas del MK (DTPFigura 20, área superficial específica y actividad puzolánica)Tabla 12. Estas características resultaron en una alta demanda de agua, lo que reduce la fluidez y aumenta la cohesión, contribuyendo así a la estabilidad dimensional de las mezclas. Además, su morfología en placas incrementa el rozamiento interno y disminuye la tendencia al colapso post-extrusión (Khaleel & Abdul Razak, 2012; Sonebi et al., 2022). Por el contrario, una mayor relación a/cm implicó una mayor cantidad de agua libre en la mezcla, formando una película lubricante sobre las partículas del aglutinante. A medida que esta película se engrosa, se incrementa la fluidez y disminuye la capacidad de la mezcla para mantener su forma (Sadrmomtazi et al., 2019).

Por otro lado, la CV, probablemente mejoró el empaquetamiento en conjunto con las partículas finas del MK y el CP, contribuyendo a una mayor edificabilidad (Güllü & Ali Agha, 2021). En cambio, la CB con partículas angulosas y porosas, tiende a absorber más agua y a dificultar el flujo, lo que incrementa la edificabilidad (Singh et al., 2023). Sin embargo, su baja capacidad de empaquetamiento y la similitud en tamaño de partícula con el CP impidieron alcanzar una estabilidad comparable con la CV (Chuewangkam et al., 2022; De Lima et al., 2021). No obstante, algunas mezclas con CB lograron resultados estadísticamente similares a la CV, lo cual se asoció con un menor contenido de esta ceniza en la mezcla, en concordancia con lo reportado por Anjos et al. (2020) y Jiménez-Quero et al. (2013), los cuales atribuyen esto a que la reducción de la fracción de CB disminuye la interferencia generada por su alta absorción y su morfología irregular, permitiendo que las partículas más densas y finas del sistema (principalmente CP y MK) dominen el empaquetamiento y la cohesión inicial, favoreciendo la formación de estructuras floculadas más estables, una mejor distribución de la fase líquida y una menor sensibilidad a la variabilidad del material agroindustrial, lo que resulta en comportamientos frescos más comparables a los obtenidos con CV.

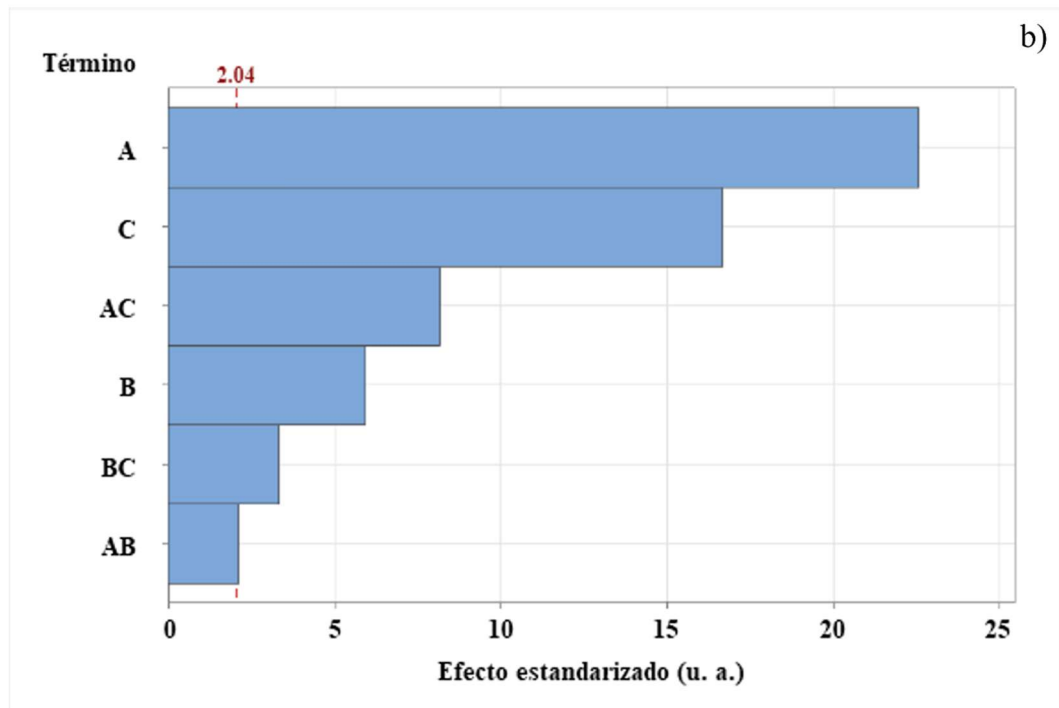
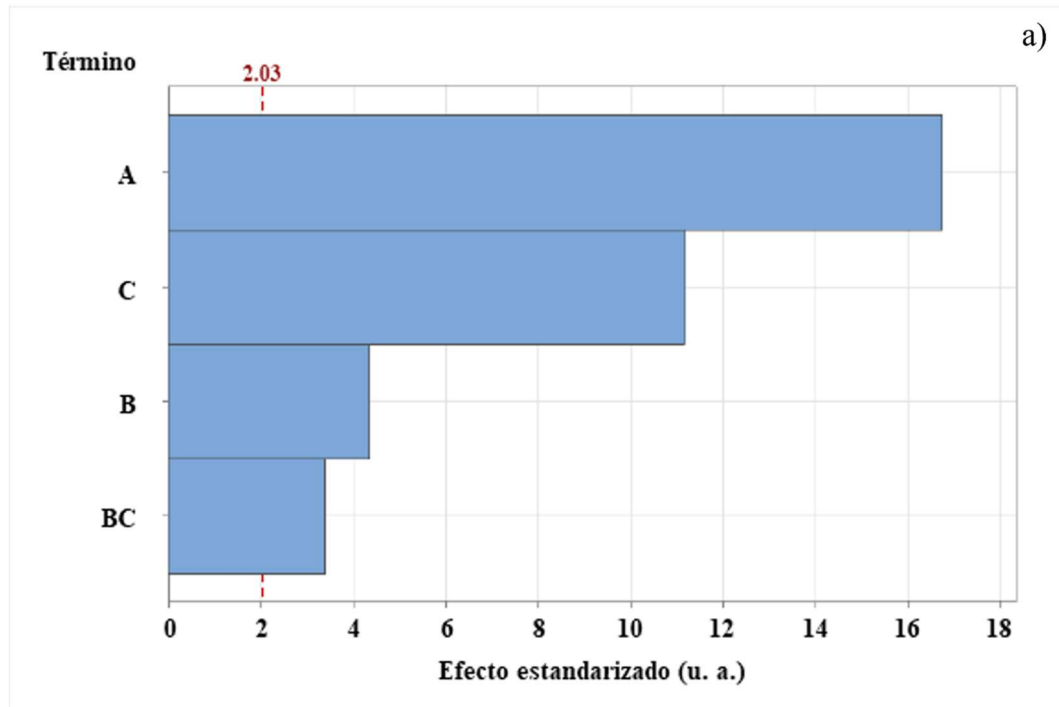


Figura 25. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de edificabilidad: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).

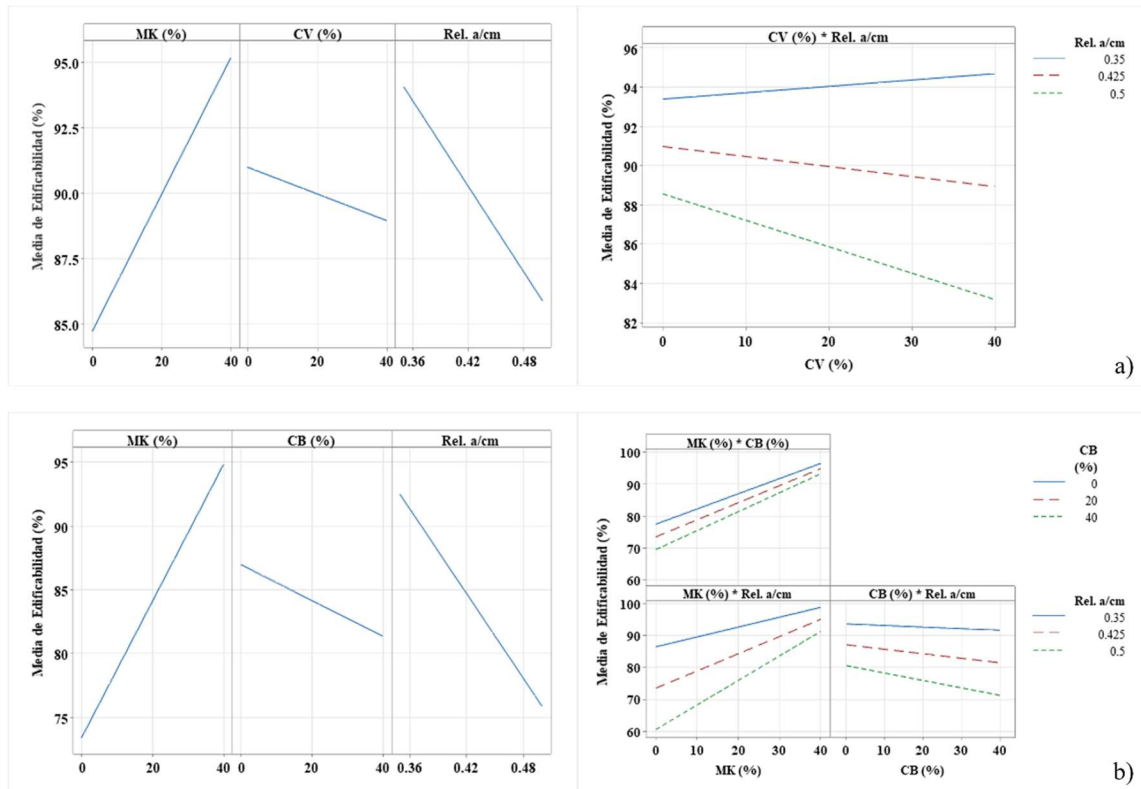


Figura 26. Efectos principales e interacción de factores para la edificabilidad de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.3. Resultados de tiempo de fraguado

La Figura 27 muestra los tiempos de fraguado inicial y final correspondientes a los modelos de (a) MK-CV y de (b) MK-CB. Para el primero, los tiempos de fraguado inicial variaron entre 145 y 471 minutos. La mayoría de las mezclas se ubicaron por debajo de las 3.5 horas (210 min), siendo R10 (145 min), R3 (148 min) y R6 (169 min) las mezclas de menor tiempo, seguidas por R2, R6.1, R8 y R9 con 193, 198, 194 y 204 minutos, respectivamente. Estas mezclas presentaron una combinación de altos contenidos de MK y relaciones a/cm bajas, sin una influencia aparente del contenido de CV. Este comportamiento se puede asociar con el efecto del MK para acelerar el fraguado inicial debido a que su elevada área superficial y su estructura altamente reactiva favorecen la absorción de iones Ca^{2+} y la formación temprana de núcleos de productos de hidratación, incrementando la velocidad de reacción en la etapa inicial. Además, cuando la relación a/cm es baja, la disponibilidad de agua libre disminuye aún más, promoviendo la coagulación rápida de la suspensión y acelerando la transición desde el comportamiento

fluido hacia un sistema rígido. (Nawab et al., 2023; Zhao et al., 2021; Y. Zhou et al., 2022).

Por otro lado, se identificaron mezclas con tiempos intermedios entre 210 y 360 minutos como R1 (352 min), R5 (276 min), R11 (257 min) y R12 (255 min), en las cuales no se observó un patrón claro en el efecto de los factores. Asimismo, las mezclas R7 (425 min) y R4 (471 min) presentaron los mayores tiempos de fraguado inicial, superando las 7 horas. Estas mezclas se caracterizaron por la ausencia de MK, altos contenidos de CV, mayores relaciones a/cm y una formulación con una pobre activación inicial del sistema cementante. Investigaciones previas han demostrado que la adición de CV puede retardar el fraguado debido a su lenta reactividad (Shahzad et al., 2020; Silva et al., 2022; Szostak & Golewski, 2020).

Respecto a los tiempos de fraguado final, variaron entre 300 y 705 minutos para el modelo MK-CV. Las mezclas con tiempos inferiores a 7 horas incluyeron R2, R3, R6, R10, R11 y R12, con 320, 385, 310, 300, 420 y 405 minutos, respectivamente. R10 y R6 con mayores contenidos de MK, registraron los menores tiempos. En el intervalo de 420 a 600 minutos se situaron R1 (555 min), R5 (435 min), R6.1 (435 min), R8 (485 min) y R9 (505 min), caracterizadas por contenidos intermedios de MK y CV, así como relaciones a/cm moderadas. Los mayores tiempos correspondieron a mezclas con altos contenidos de CV y de las relaciones a/cm, como R7 (630 min) y R4 (705 min).

Para el modelo MK-CB, se observó un ligero incremento en los tiempos de fraguado respecto del modelo MK-CV, aunque el comportamiento general fue similar. Los tiempos de fraguado inicial variaron entre 148 y 678 minutos, siendo las mezclas con tiempos inferiores a 3.5 horas la R2 (211 min), R3 (148 min), R6 (169 min), R6.1 (205 min), R8 (194 min), R9 (204 min) y R10 (181 min). Destacó que R3 fue la mezcla con el menor tiempo, asociada con el mayor contenido de MK, la menor relación a/cm y sin incorporación de CB. Entre 210 y 420 minutos se ubicaron R5 (271 min) y R12 (268 min), ambas con contenidos intermedios de MK y agua. Las mezclas con los tiempos más prolongados fueron R1 (452 min), R4 (678 min), R7 (609 min) y R11 (528 min), todas con altos contenidos de CB, mayores relaciones a/cm y sin contenido de MK. La incorporación de CB puede aumentar los tiempos de fraguado debido a que su mayor

porosidad y absorción de agua reducen la disponibilidad inmediata de humedad para las reacciones iniciales, retrasando la formación de geles hidratados y prolongando la pérdida de plasticidad del sistema (Eldin et al., 2015; D. H. Le et al., 2018; Murthi et al., 2020).

Los tiempos de fraguado final relacionados con el modelo MK-CB se extendieron de 310 a 985 minutos. R6 registró el menor valor (310 min), siendo la única por debajo de las 7 horas, seguido por R3 (385 min), R10 (455 min), R2 (465 min), R6.1 (480 min) y R8 (485 min). En el rango de 500 a 530 minutos se encontraron R5 (525 min), R9 (505 min) y R12 (510 min). Las mezclas con tiempos superiores a 11 horas fueron R1 (690 min) y R11 (688 min), mientras que R4 (985 min) y R7 (889 min) presentaron los mayores tiempos, asociando el máximo contenido de CB, pero sin contenido de MK.

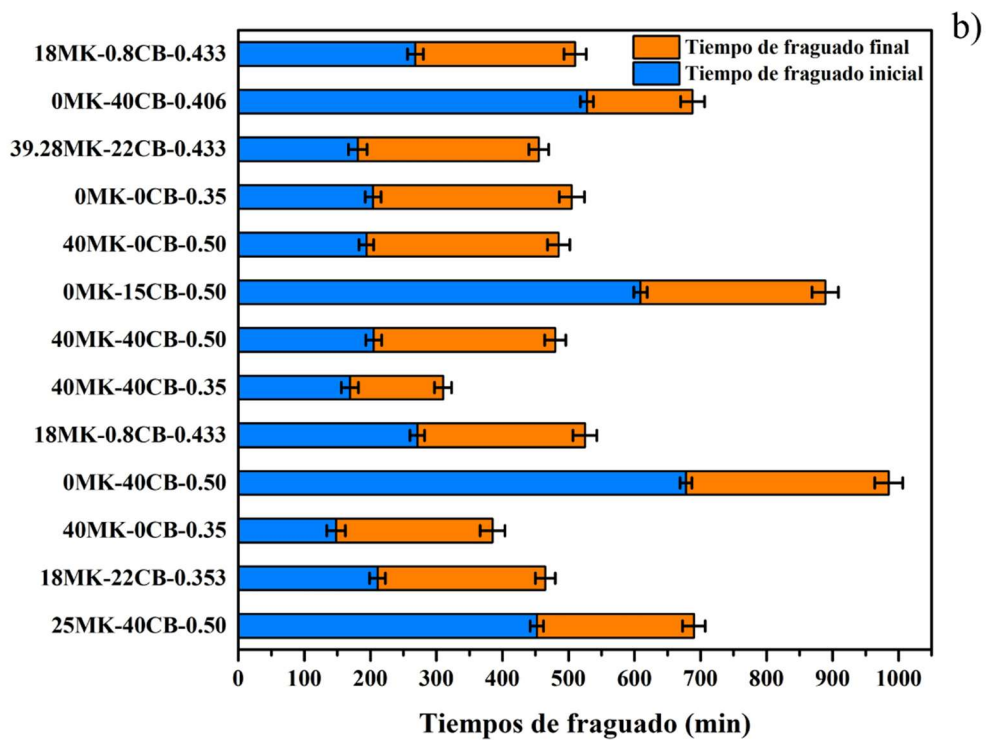
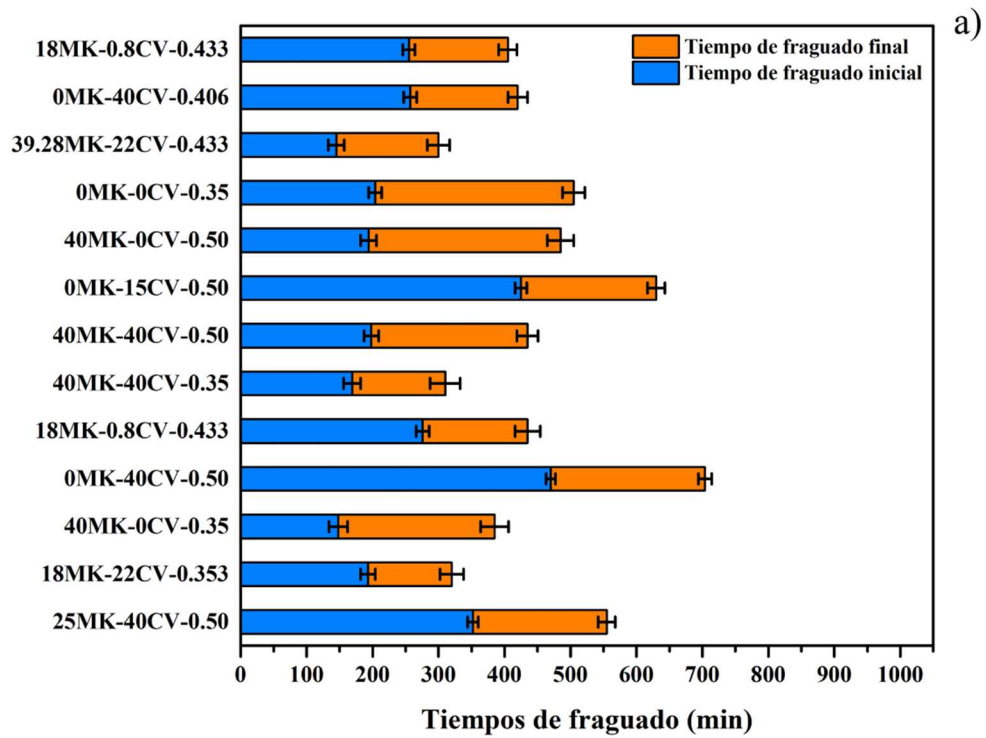


Figura 27. Tiempos de fraguado de las mezclas relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.

La Tabla 15 presenta el resumen del ANOVA para los tiempos de fraguado inicial. En el modelo MK-CV presentó un R^2 ajustado de 0.9890, pero las interacciones del MK con la relación a/cm y la CV no resultaron significativas. Por el contrario, en el modelo MK-CB, estas interacciones sí resultaron significativas, pero la interacción de la CB con la relación a/cm no lo fue, además, el modelo MK-CB alcanzó un R^2 ajustado de 0.9837. En ambos casos, los factores más influyentes fueron el contenido de MK y la relación a/cm. De forma similar, la significancia del contenido de MK, la relación a/cm y de la CB se replicó en los modelos de fraguado final (Tabla 16). Los resultados experimentales se ajustaron con el MSR para ambos sistemas con un R^2 ajustados de 0.9765 y 0.9945 para los modelos de MK-CV MK-CB, respectivamente, aunque para el modelo MK-CB los términos cuadráticos no resultaron significativos a diferencia del modelo MK-CV.

Tabla 15. Resumen del ANOVA para los modelos de fraguado inicial.

Factor	p-value		
	MK-CV	MK-CB	
Modelo	< 0.01	< 0.01	Significativo
A – MK	< 0.01	< 0.01	
B – CV/CB	< 0.01	< 0.01	
C – Rel. a/cm	< 0.01	< 0.01	
AB	> 0.05	< 0.01	
AC	< 0.01	< 0.01	
BC	> 0.05	> 0.05	
A ²	< 0.01	> 0.05	
B ²	< 0.01	> 0.05	
C ²	< 0.01	> 0.05	
Residual			
Falta de ajuste	0.48	0.42	No significativo
Coefficiente de Determinación (R²)			
R ²	0.9910	0.9859	
R ² Ajustado	0.9890	0.9837	
R ² de Predicción	0.9857	0.9810	

Tabla 16. Resumen del ANOVA para los modelos de fraguado final.

Factor	p-value		
	MK-CV	MK-CB	
Modelo	< 0.01	< 0.01	Significativo
A – MK	< 0.01	< 0.01	
B – CV/CB	< 0.01	< 0.01	
C – Rel. a/cm	< 0.01	< 0.01	

AB	> 0.05	< 0.01	
AC	< 0.01	< 0.01	
BC	0.04	< 0.01	
A ²	< 0.01	0.03	
B ²	< 0.01	< 0.01	
C ²	< 0.01	< 0.01	
Residual			
Falta de ajuste	0.31	0.20	No significativo
Coefficiente de Determinación (R²)			
R ²	0.9814	.9958	
R ² Ajustado	0.9765	0.9945	
R ² de Predicción	0.9697	0.9927	

La Figura 31 y la Figura 29 muestran los diagramas de Pareto y los efectos e interacciones de los factores para los tiempos de fraguado inicial de los modelos de MK-CV y MK-CB basados en el MSR. En ambos sistemas se observó que el contenido de MK y la relación a/cm fueron los factores más influyentes, con efectos altamente significativos. El incremento en MK redujo el tiempo de fraguado inicial, mientras que una mayor relación a/cm lo prolongó, lo cual coincide con los efectos principales donde el MK actuó como acelerante y el agua como retardador (W. Li et al., 2022; Sonebi et al., 2013). Esta tendencia puede explicarse por el comportamiento reológico e hidratante del MK. Su elevada finura y morfología laminar favorecen el empaquetamiento y la densificación temprana (Duan et al., 2022b), incrementando la resistencia inicial del sistema y generando un aparente fraguado más rápido en el ensayo Vicat debido a la mayor resistencia a la penetración. A nivel químico, la sílice y alúmina reactiva del MK aceleran la gelación por su capacidad para consumir Ca²⁺ y generar productos hidratados de manera temprana (Kim et al., 2021). Por su parte, una mayor relación a/cm disminuye la concentración iónica y diluye los productos de hidratación iniciales, alargando el tiempo requerido para alcanzar la rigidez crítica (Durán-Herrera et al., 2011), lo que explica su fuerte efecto retardante.

En el sistema MK-CV, el efecto principal de la CV no resultó estadísticamente significativo y su influencia fue limitada, mostrando sólo una ligera variación no lineal en los tiempos de fraguado. En contraste, en el sistema MK-CB el contenido de CB sí fue un factor significativo, mostrando que su incremento prolongó de manera consistente el fraguado inicial. Este efecto retardante se relaciona tanto con su menor reactividad como

con su morfología irregular y mayor porosidad, que reducen la densificación y la nucleación temprana, además de la presencia probable de materia orgánica que interfiere con los mecanismos de hidratación (Akkarapongtrakul et al., 2017; D. H. Le et al., 2018).

Por otro lado, la interacción MK-a/cm fue significativa en ambos sistemas, indicando que el efecto acelerante del MK disminuye cuando la relación a/cm es alta. En otras palabras, la acción del MK como acelerante depende estrechamente del nivel de agua disponible, siendo mitigada cuando el sistema es más diluido (Papp et al., 2023). En el modelo MK-CB, la interacción MK-CB fue similar, mostrando que la CB desplaza el tiempo de fraguado hacia valores mayores independientemente del nivel de MK, sin alterar la tendencia acelerante de este último.

En conjunto, los resultados indicaron que el tiempo de fraguado inicial está controlado por el balance entre el efecto acelerante del MK y los efectos retardantes de la relación a/cm y, en su caso, de la CB. Mientras la CV no muestra un papel significativo en esta propiedad, la CB sí actúa como retardante adicional, lo que debe considerarse en el diseño de mezclas para impresión 3D, particularmente en formulaciones con altos contenidos de MK donde un retardo controlado puede ser deseable para la extrusión.

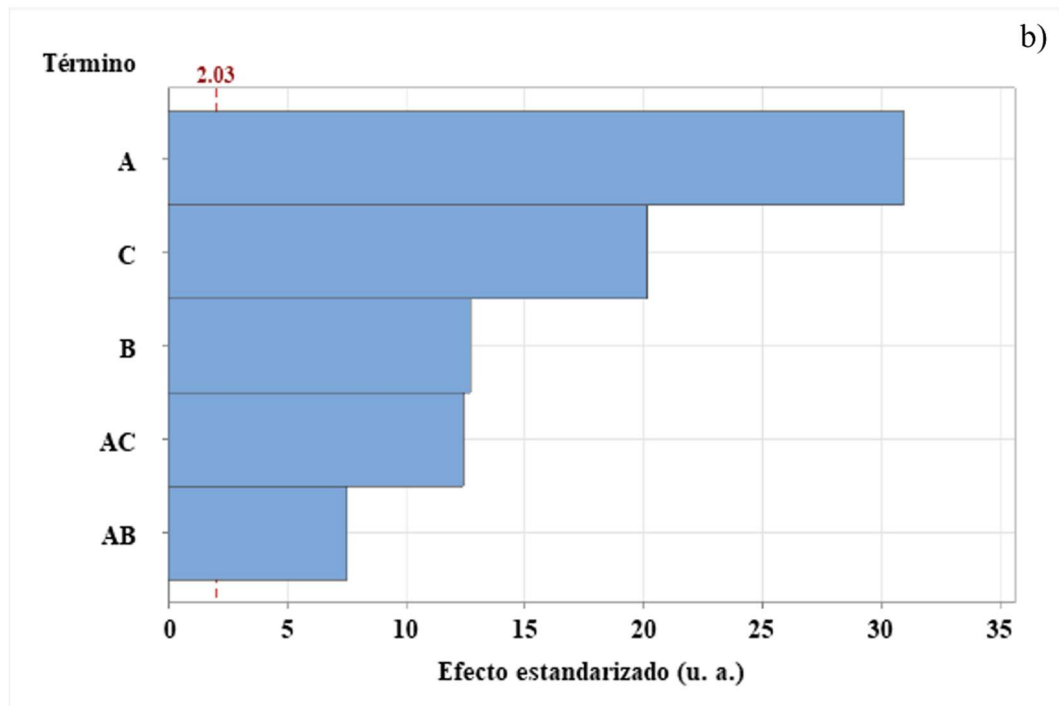
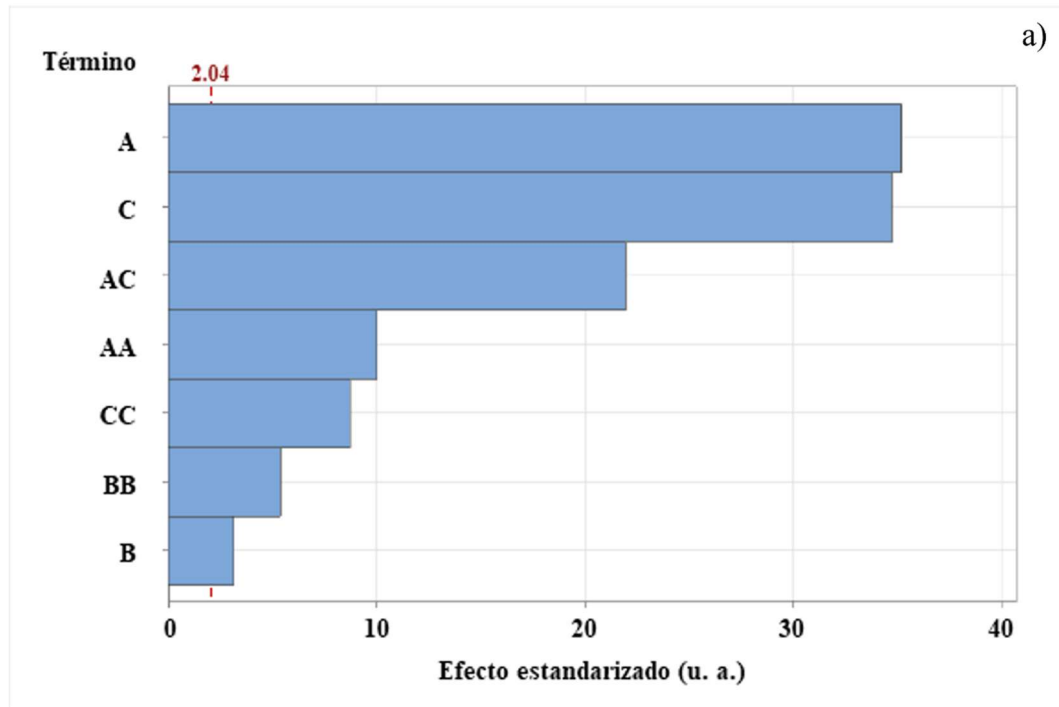


Figura 28. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de tiempo de fraguado inicial: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).

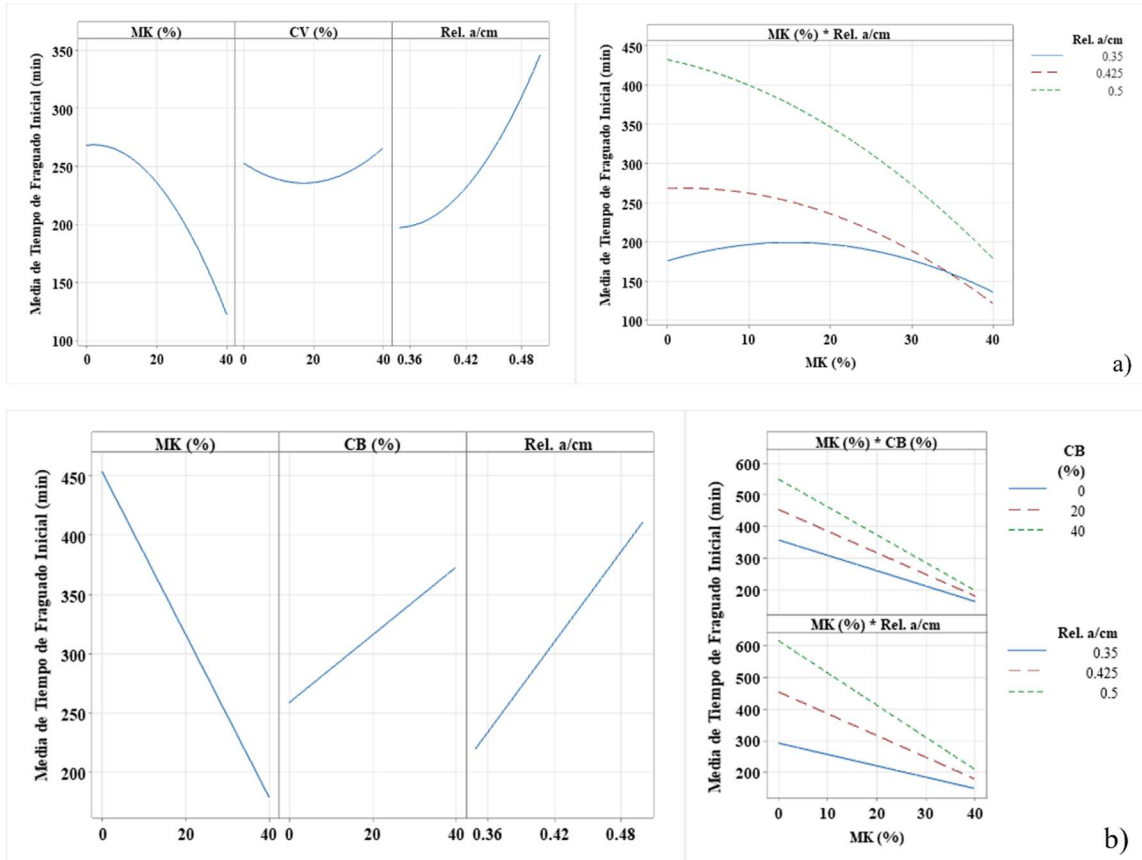


Figura 29. Efectos principales e interacción de factores para la fluidez de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.

Conforme a los diagramas de Pareto (Figura 30) y las gráficas de efectos e interacciones (Figura 31) de los tiempos de fraguado final, aunque con una influencia más marcada de los efectos cuadráticos y las interacciones. La relación a/cm fue el factor más influyente en el modelo MK-CV, mientras que en el modelo MK-CB el contenido de MK recuperó el dominio como principal regulador del tiempo de fraguado final. En ambos casos, el incremento en la relación a/cm prolongó el tiempo de fraguado, consistente con el efecto diluyente que retrasa el desarrollo de la rigidez y la formación de la microestructura (Kasaniya et al., 2024; S. Zheng et al., 2021).

Asimismo, tanto la CV como la CB mostraron efectos retardantes, aunque con distinta magnitud. La CV presentó un comportamiento no lineal con un punto mínimo cercano al 20%, mientras que la CB generó un retardo más pronunciado, especialmente cuando se combinó con niveles intermedios y altos de agua, como lo evidencian los términos cuadráticos y la interacción. En contraste, un mayor contenido de MK redujo de forma

significativa el tiempo de fraguado final en ambos modelos, actuando como acelerante por su finura, su capacidad de densificación y su reactividad puzolánica temprana, lo cual favorece la gelación y la formación inicial de productos hidratados (Q. Huang et al., 2025; W. Li et al., 2022). No obstante, las gráficas de interacción muestran que el efecto acelerante del MK se ve parcialmente mitigado cuando la relación a/cm es elevada, lo que explica la importancia de la interacción de estos factores en ambos modelos.

En conjunto, la evolución del fraguado final dependió del equilibrio entre el efecto acelerante del MK y los efectos retardadores de la relación a/cm y de la ceniza utilizada; controlar adecuadamente estos factores es esencial para evitar tiempos excesivos de fraguado que puedan comprometer la estabilidad y continuidad del proceso de impresión 3D.

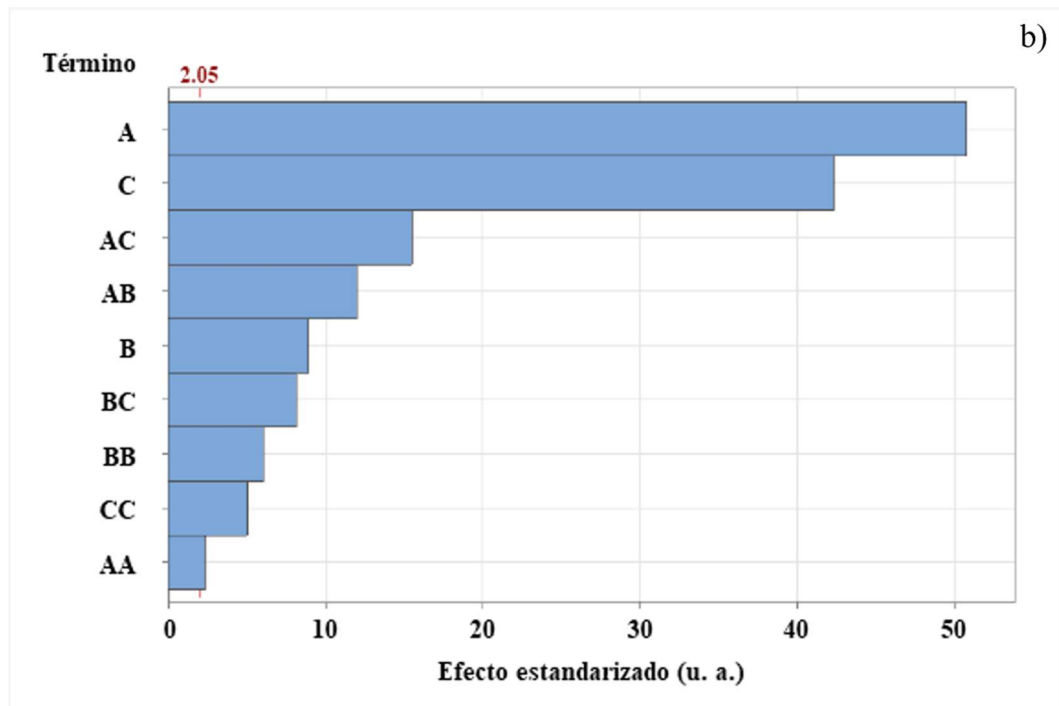
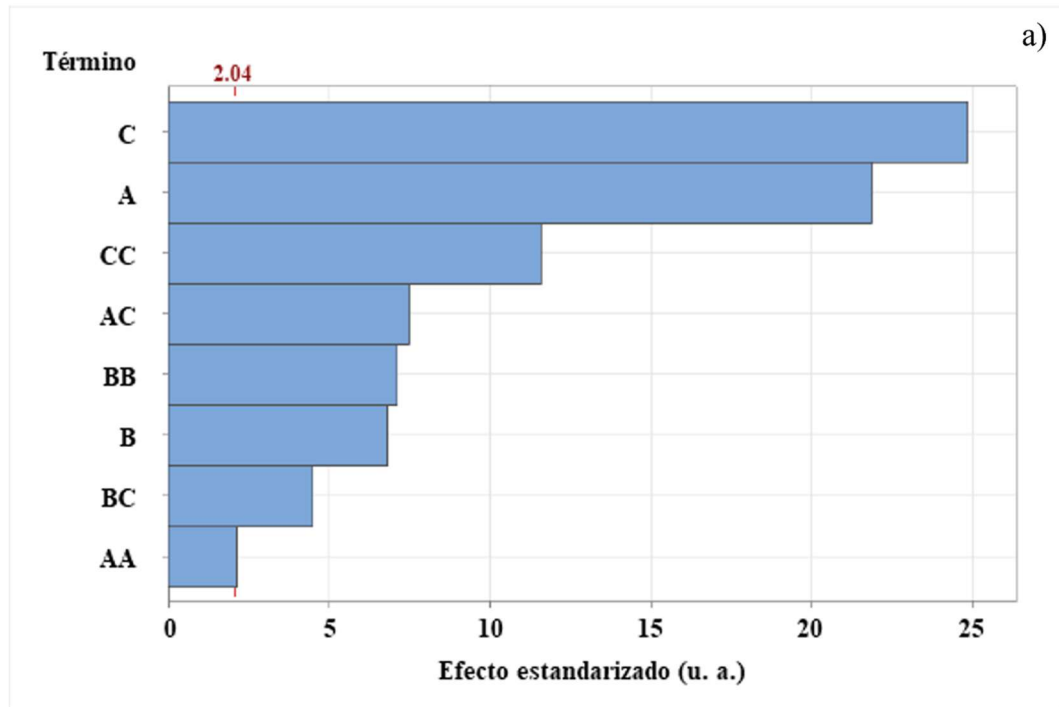


Figura 30. Diagramas de Pareto de efectos estandarizados de los modelos de tiempo de fraguado final: a) MK-CV y b) MK-CB (A – MK (%), B – CV/CB (%), C – Rel. a/cm).

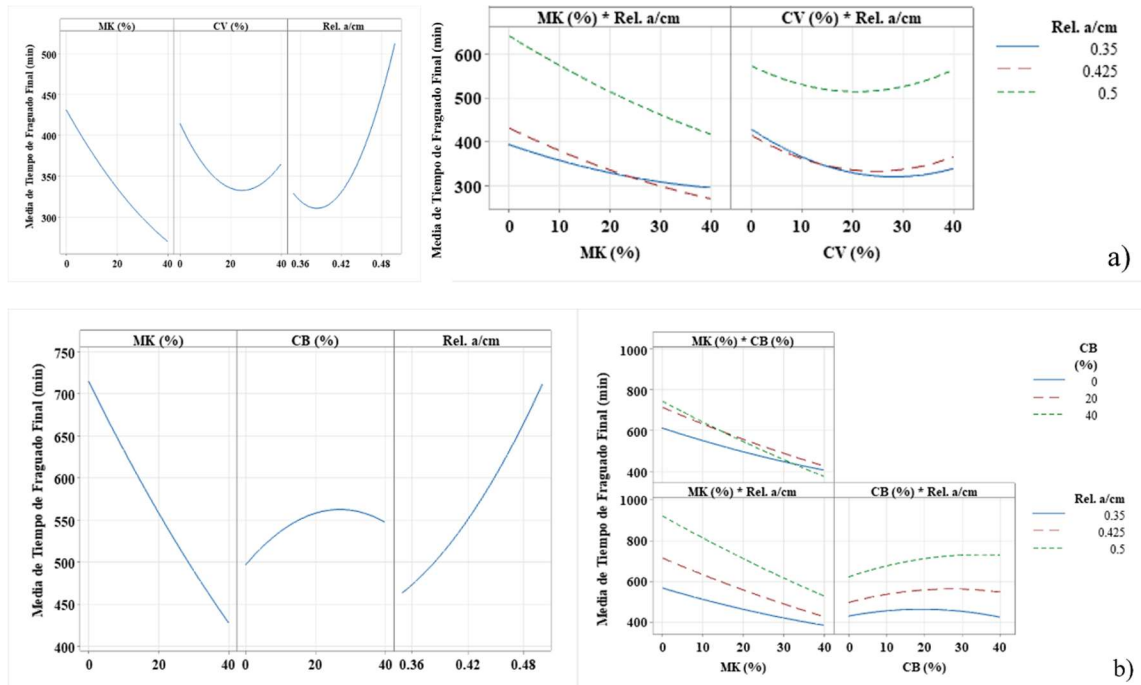


Figura 31. Efecto principales e interacciones de los factores para el tiempo de fraguado final de las mezclas: a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.4. Influencia fisicoquímica de los MPS en las propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco de las mezclas cementantes están influenciadas por las características físicas y químicas de las materias primas. Entre estas propiedades destacan la distribución de tamaño de partícula, la morfología, el área superficial específica y la actividad térmica inicial evidenciada mediante calorimetría isotérmica. La comprensión de estas variables resulta fundamental para interpretar el comportamiento observado en el desempeño de las mezclas durante la impresión 3D.

5.2.4.1 Distribución de tamaños de partícula

La Figura 32 muestra la DTP por difracción laser de la combinación de los polvos secos conforme el diseño experimental.

Para el modelo de MK-CV (Figura 32a), se observaron curvas granulométricas en función de los contenidos de sustitución de CPO40R por MK y CV. Inicialmente, la mezcla sin adiciones presentó un mayor volumen retenido en el intervalo de ~ 10 a $15 \mu\text{m}$. A partir de esta distribución base, la incorporación de MK mostró (i) una curva correspondiente a las partículas de CPO40R con disminuciones progresivas en el volumen retenido conforme aumentó el contenido de MK, y (ii) una nueva curva entre ~ 4 y $10 \mu\text{m}$, atribuida

a las partículas más finas del MK. Por su parte, la adición de CV produjo un desplazamiento de la curva hacia tamaños superiores de $\sim 100 \mu\text{m}$ o más, como reflejo de su distribución granulométrica más gruesa 5.1.3.

Como resultado de estas interacciones, la combinación ternaria de CPO40R, MK y CV dio lugar a una DTP más extendida con tamaños que abarcaron un rango de ~ 5 a $120 \mu\text{m}$ y volúmenes retenidos relativamente similares a lo largo del espectro. Esta DTP indicó una mejor compacidad entre partículas de distintos tamaños, lo cual puede contribuir a una reducción de la porosidad, una mayor densificación de la mezcla y una mejor cohesión en estado fresco de acuerdo con Binici et al. (2007). Asimismo, esto podrían influir favorablemente en la evolución del calor de hidratación, las cinéticas de reacción, los tiempos de fraguado, las tasas de refloculación y acumulación estructural, e incluso en el desarrollo de resistencias mecánicas a edades tempranas, debido a que una distribución granulométrica amplia y bien balanceada favorece una mayor eficiencia en el empaquetamiento, reduce el volumen de vacíos iniciales y mejora el contacto sólido-sólido entre partículas. Esto, a su vez, incrementa la superficie reactiva disponible para la hidratación temprana del cemento, optimiza la nucleación y crecimiento de productos hidratados y promueve la formación de una microestructura más continua y rígida desde las primeras horas, lo que se traduce en un mejor desempeño tanto en estado fresco como endurecido (Ardoğa et al., 2019; Chindaprasirt et al., 2014; Cordeiro et al., 2011).

Para el modelo MK-CB (Figura 32b), el MK generó un efecto similar al modelo MK-CV para la mezcla sin adiciones, ya que se observó (i) una disminución del volumen de partículas en torno a los $\sim 10 \mu\text{m}$, correspondiente al CPO40R, y (ii) un incremento de partículas finas ($\sim 6 \mu\text{m}$) atribuible a la incorporación del contenido de MK. Sin embargo, la adición de CB tuvo poca o nula incidencia en la modificación de la curva, debido a que su DTP es muy similar al CP5.1.3. En este sentido, la CB completó la DTP, incrementando el volumen total retenido cerca de los $\sim 10 \mu\text{m}$ sin generar nuevas fracciones significativas en otros tamaños.

A diferencia de las mezclas de MK-CV, los polvos de MK-CB presentaron una distribución granulométrica más homogénea entre los ~ 5 y $15 \mu\text{m}$. Esto puede significar un comportamiento más controlado en términos de hidratación y evolución estructural,

con potencial para favorecer una mayor generación de calor, una mayor reactividad global de la mezcla y la formación de estructuras floculadas, conforme a lo reportado por Ardoğa et al. (2019) y Cordeiro et al. (2011), ya que una fracción fina concentrada en ese intervalo de tamaños incrementa la superficie específica disponible para la hidratación temprana, facilita la dispersión y el contacto íntimo entre las partículas y promueve una rápida formación de puentes físicos y químicos entre ellas. Esta condición acelera los procesos de nucleación y crecimiento de productos hidratados, favorece la consolidación inicial de la microestructura y aumenta la tendencia del sistema a desarrollar redes floculadas más estables, lo cual puede traducirse en un comportamiento reológico más estructurado y en un endurecimiento inicial más marcado.

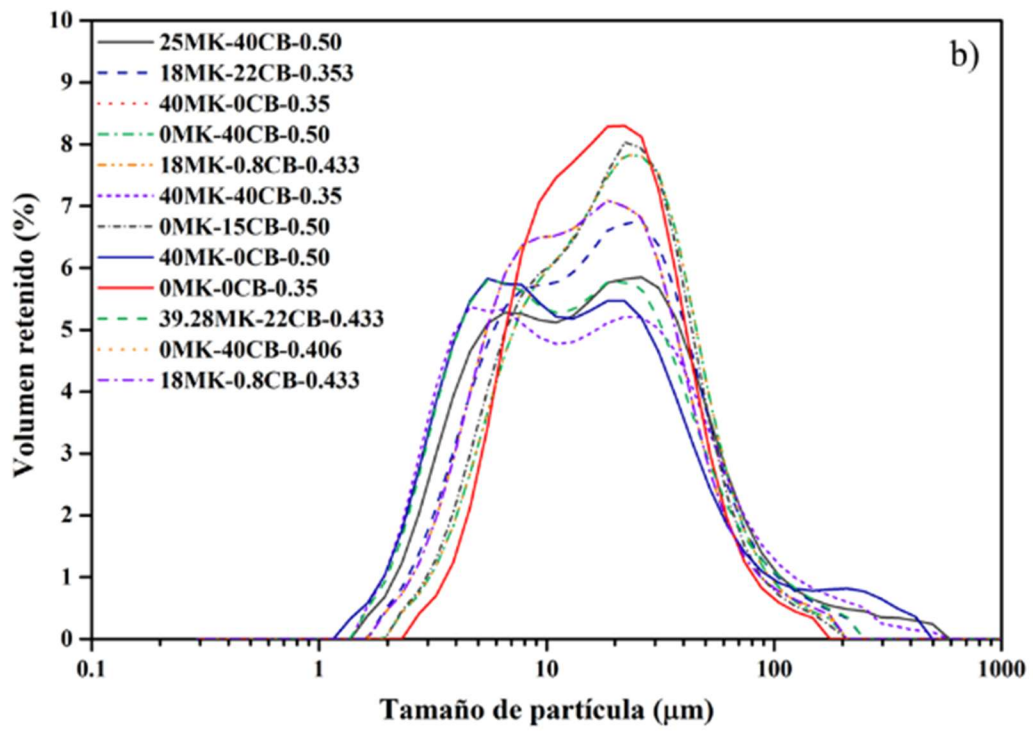
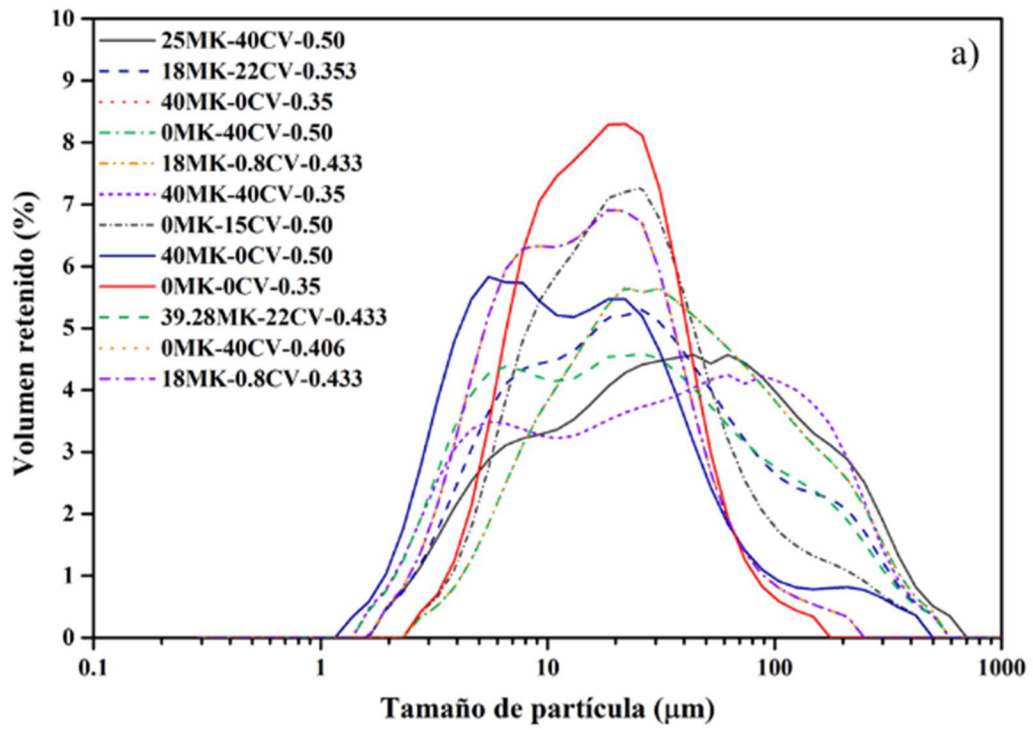


Figura 32. Distribución de tamaños de partículas de las mezclas en de los aglutinantes asociadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.4.2 Área superficial específica

La Figura 33 presenta los resultados del área superficial específica de las combinaciones de polvos de aglutinantes en seco conforme el diseño experimental. En este caso, el área superficial fue similares para ambos modelos, aunque con variaciones atribuibles a la naturaleza de los MPS utilizados. En particular, el MK mostró la mayor influencia en el incremento del área superficial de las mezclas de polvos, alcanzando entre 7.5 y 8 m²/g. Resultados similares fueron reportados por Navarrete et al. (2020), quienes relacionaron el alto desarrollo de área superficial del MK con su estructura laminar desordenada, su grado de deshidroxilación y su elevada finura respecto al CPO40R.

Por otro lado, la CV generó un ligero incremento en la superficie específica en comparación con la CB5.1. La CV mostró una mayor área superficial específica que la CB al presentar partículas más finas y una mayor porosidad interna. No obstante, la CB no introdujo modificaciones relevantes a esta propiedad debido a su similitud física con el CPO40R en términos de morfología y tamaño de partícula.

El aumento del área superficial específica en los sistemas ternarios tiene implicaciones significativas en el desempeño de los materiales en estado fresco y durante en la cinética de hidratación. Una mayor área superficial está asociada con un incremento en la cantidad de sitios disponibles para la hidratación y adsorción de agua, lo cual puede acelerar o modificar las reacciones de hidratación y afectar la cinética de formación de productos cementantes como el CSH y el CASH. Estas interacciones repercuten en propiedades relevantes para la impresión 3D, como los tiempos de fraguado, las tasas de refloculación y acumulación estructural, así como en el desarrollo de la cohesión y adherencia interlaminar entre capas extruidas (Bai et al., 2021; Mehdipour & Khayat, 2017).

Asimismo, los materiales con mayor área superficial pueden actuar como agentes de nucleación, promoviendo una hidratación más temprana y homogénea, lo cual favorece tanto la resistencia inicial por el desarrollo de una microestructura densa y continua (Zunino & Scrivener, 2021). En consecuencia, aunque el área superficial no varió drásticamente con relación a ambos modelos, su ajuste mediante el contenido de MK resulta clave para controlar el comportamiento reológico, la estabilidad dimensional y la capacidad de edificabilidad.

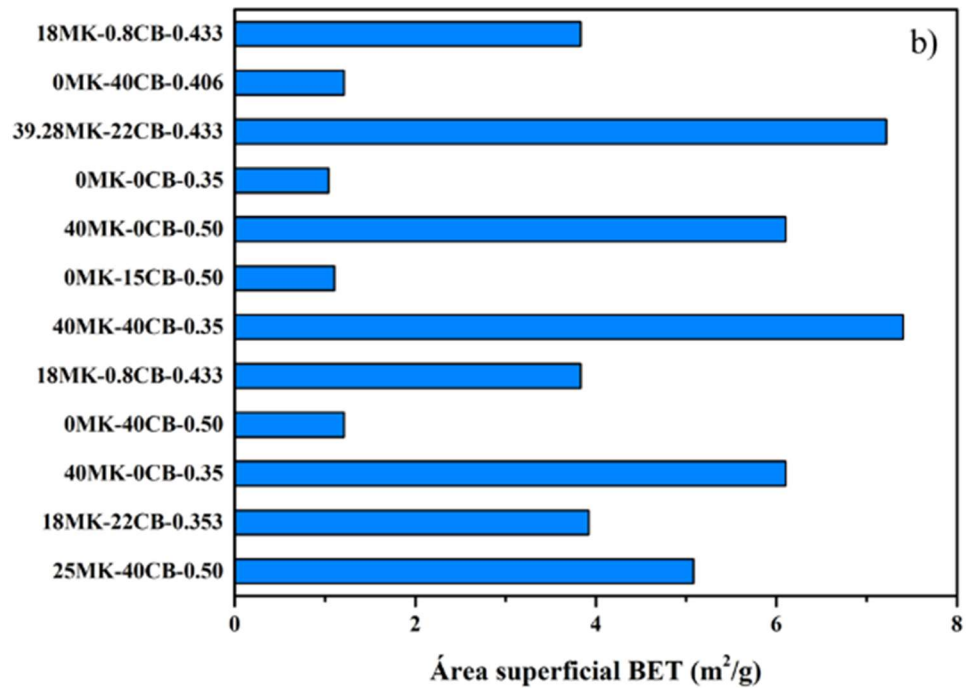
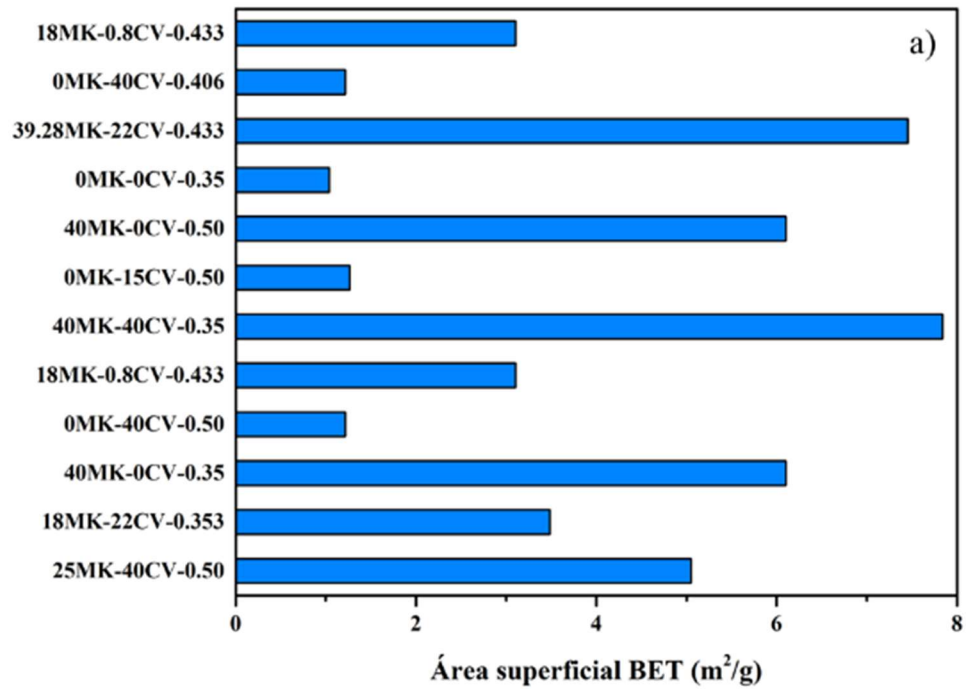


Figura 33. Área superficial específica (BET) de las mezclas de aglutinantes en seco relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.4.3 Calorimetría isotérmica

La evolución del calor de hidratación para las mezclas relacionadas con los modelos de MK-CV y MK-CB se muestra en la Figura 34. Para el modelo MK-CV (Figura 34a), se observó que la curva correspondiente a la muestra de referencia exhibe los tres picos característicos de la hidratación de mezclas de 100%CP (He et al., 2020; Moghaddam et al., 2019): (i) el pico I, registrado en los primeros minutos tras el contacto con el agua, probablemente relacionado con la hidratación temprana del C_3A en presencia de sulfatos disueltos; (ii) el pico II, principalmente asociado con la formación de CSH, resultante de la hidratación de la C_3S entre los primeros 30,000 y 40,000 segundos; y (iii) el pico III, relacionado nuevamente con la hidratación progresiva del C_3A y la formación de etringita alrededor de los 50,000 segundos (He et al., 2020; Moghaddam et al., 2019).

Con la incorporación del contenido de CV, se observó una disminución progresiva en la tasa de liberación de calor, particularmente en los picos II y III a medida que aumentó su contenido en la mezcla. Por un lado, esto se atribuyó al efecto de dilución, ya que la sustitución parcial del CP redujo la cantidad de las fases de clinker disponibles para reaccionar (Kumar et al., 2012). Por otro lado, la CV presentó una cinética de disolución lenta al tratarse de una puzolana de baja reactividad inicial, limitando su participación temprana en las reacciones de hidratación (Cai et al., 2020). Este fenómeno también se reflejó en la atenuación del tercer pico porque la CV probablemente redujo la disponibilidad de sitios de nucleación, inhibiendo parcialmente la formación de productos secundarios como la etringita (Moghaddam et al., 2019). Esta reducción progresiva de picos se ha relacionado positivamente con una mayor densificación del sistema en estado fresco, lo cual mejoró la estabilidad estructural del material extruido en investigaciones previas (K. Chen et al., 2024).

Por su parte, el contenido de MK generó una disminución notable en la intensidad del pico II, concentrando la máxima tasa de liberación de calor alrededor de los 35,000 segundos y provocando la desaparición del pico III. Esto se asoció con su alta demanda de agua del MK, limitando su disponibilidad para la hidratación completa del C_3S y C_3A restantes (Snelson et al., 2008). Conforme a Cai et al. (2020), aunque el MK posee una alta reactividad puzolánica, esta se activa significativamente sólo en presencia de una

adecuada concentración de iones de Ca^{2+} y agua libre. Así, la reacción entre el MK y el Ca^{2+} disuelto generó una fase amorfa de tipo CASH que contribuyó a la rigidez temprana del sistema. No obstante, tras esta etapa, la escasa disponibilidad de calcio limitó la continuidad de las reacciones, lo que explica la ausencia del pico III.

La interacción del MK y la CV evidenció un dominio del efecto del primero conforme al pico II de los $\sim 35,000$ s, aunque su intensidad y desplazamiento temporal se vieron influenciados por el contenido de CV. En las mezclas con un contenido de CV mayor comparado con el MK, el pico II tiende a desplazarse entre los 40,000 y 45,000 segundos. Este fenómeno reflejó un efecto de dilución más pronunciado, junto con una menor liberación temprana de iones de Ca^{2+} y un retardo en la disolución de la CV, afectando el entorno iónico del sistema (Samson et al., 2017). Además, la CV tiende a competir por el agua disponible en el medio, retrasando parcialmente la reacción del MK, ampliando el pico y desplazándolo (Šmilauer et al., 2011).

Con respecto del modelo MK-CB (Figura 34b), la presencia de CB asoció un comportamiento similar que la CV en cuanto al efecto de dilución, pero con diferencias en los tiempos de activación térmica. A medida que se incrementó el contenido de CB, las curvas calorimétricas se desplazaron significativamente hacia tiempos mayores. Este retraso puede explicarse no solo por la reducción del contenido de C_3S y C_3A , sino también por la baja área superficial específica de la CB, lo cual limitó su capacidad de disolución y nucleación, haciéndola menos reactiva en comparación con la CV (Moghaddam et al., 2019). Aunque presentó una granulometría fina, su morfología, textura superficial y el posible contenido de carbono pueden inhibir la reacción puzolánica y actuar como un relleno inerte.

Adicionalmente, la CB se caracterizó por su comportamiento hidrofílico, relacionando una alta demanda de agua en la mezcla (Gupta et al., 2022). Esta condición redujo aún más la cantidad de agua disponible para las reacciones del MK, dificultando la disolución de sus componentes y ralentizó la formación de fases cementantes (Nikhade & Nag, 2022). Como resultado, se produjo una inhibición de las reacciones de hidratación que afectaron la liberación de energía térmica, retrasando significativamente la aparición del pico II e incluso anulando el pico III para ciertas mezclas. Lo anterior permite concluir

que la CB en mezclas ternarias con MK puede comprometer la reactividad temprana del sistema si no se ajusta adecuadamente la relación a/cm y el contenido de los materiales finos más reactivos.

En conjunto, los resultados sugirieron que el MK tiene una participación clave en la activación temprana de las reacciones exotérmicas, mientras que la CV y la CB actuaron como moduladores de las reacciones de hidratación. Las curvas obtenidas pueden relacionarse no solo la dinámica química de las mezclas, sino también con las implicaciones prácticas en impresión 3D, donde los tiempos de fraguado, la ganancia de resistencia temprana y la estabilidad estructural deben ser cuidadosamente equilibrados para garantizar la edificabilidad.

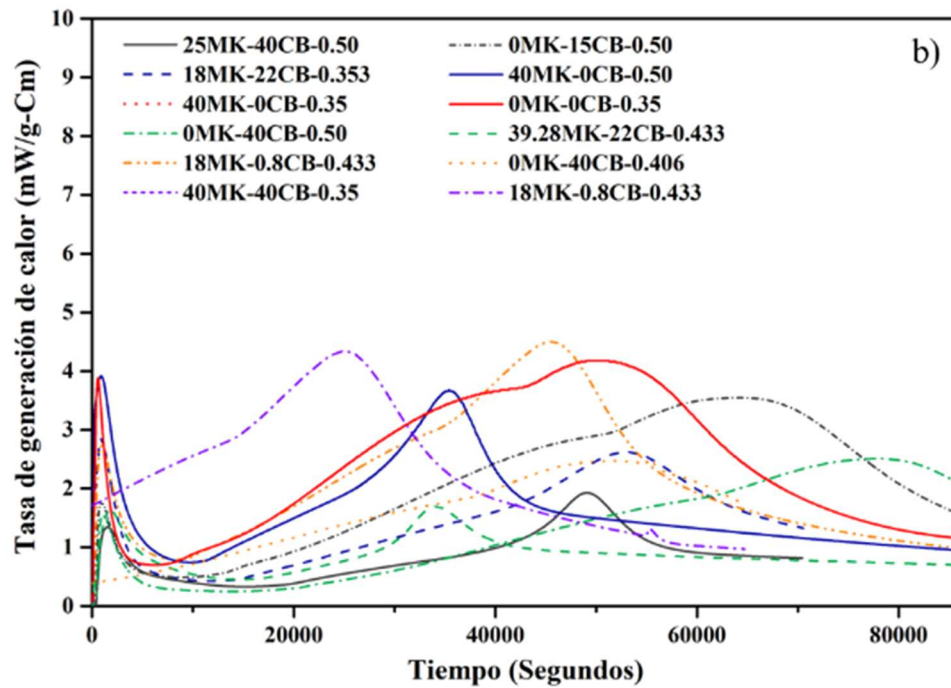
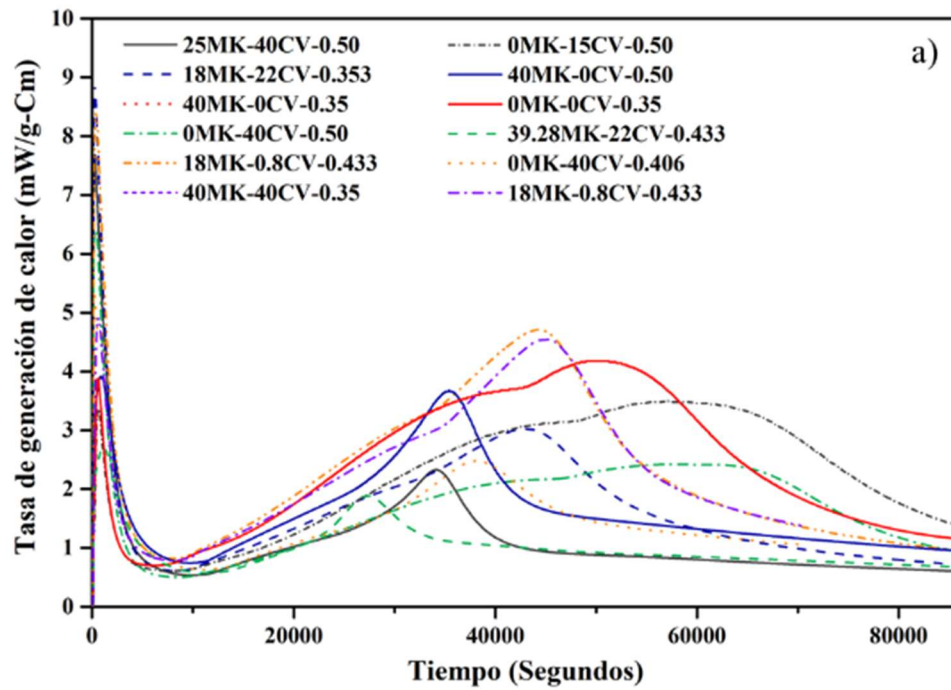


Figura 34. Tasa de generación de calor de las mezclas cementantes relacionadas con los modelos de a) MK-CV y b) MK-CB.

5.2.5. Comparación de las propiedades en estado fresco de las mezclas de MK-CV y MK-CB

Con base en los resultados obtenidos para los modelos ternarios de MK-CV y de MK-CB, se realizó un análisis comparativo integral de sus propiedades en estado fresco, considerando la fluidez, la edificabilidad y los tiempos de fraguado.

- a) Ambos modelos evidenciaron una reducción progresiva de la fluidez con el incremento del contenido de los MPS. Sin embargo, la disminución fue más acentuada en las mezclas con CB, lo cual se puede atribuir a su mayor demanda de agua, comportamiento hidrofílico y características físicas como una mayor porosidad y la forma irregular de las partículas. En contraste, las mezclas con CV presentaron un descenso más moderado de la fluidez, dado que su morfología esférica facilitó la dispersión de las partículas y redujo la fricción interna. Asimismo, la presencia de MK en ambos casos contribuyó a una disminución general de la fluidez debido a su elevada área superficial y demanda de agua, aunque esta influencia fue medida al incorporar la CV.
- b) La edificabilidad fue favorecida en aquellas mezclas con mayores contenidos de MK, especialmente en combinación con la CV. La alta finura y reactividad del MK permitió una mayor cohesión estructural en las capas extruidas, generando estabilidad geométrica tras la deposición. Para el modelo de MK-CV se observó un mejor desempeño comparado con el modelo MK-CB, ya que la CB retrasó la generación de una gelación temprana al requerir mayor cantidad de agua y presentar menor reactividad inicial. Además, las mezclas con mayores contenidos de CB presentaron colapsos o deformaciones en capas sucesivas debido a su menor resistencia inicial, evidenciando una menor capacidad de apilamiento vertical.

En términos generales, las mezclas relacionadas con el modelo de MK-CV presentaron tiempos de fraguado más cortos comparados con el modelo de MK-CB, probablemente debido al menor efecto retardante de la CV y a su interacción favorable con el MK. Las mezclas con mayores contenidos de MK para las mezclas de MK-CV permitieron una rápida adquisición de rigidez. Por el contrario, la CB asoció un retardo en el fraguado al presentar una menor área superficial y una interacción menos eficiente con los iones de

Ca²⁺, alcanzando en algunos casos tiempos superiores a los 150 minutos. Esto fue más evidente para un contenido de CB mayor al MK, generando mezclas con menor velocidad de hidratación temprana.

La comparación entre ambos modelos permite concluir que las mezclas de MK-CV presentaron mejores propiedades en estado fresco para su uso en impresión 3D, esto debido a una fluidez adecuada, los tiempos de fraguado más cortos y una mejor edificabilidad. Con respecto de las mezclas de MK-CB, aunque también son viables, requieren ajustes adicionales en su dosificación y la relación a/cm para compensar su menor reactividad inicial y mayor retardo en el desarrollo estructural temprano para lograr una adecuada edificabilidad. Esta diferencia de desempeño puede atribuirse tanto a las propiedades fisicoquímicas de cada MPS como a su sinergia con el MK y el CP.

5.2.6. Evaluación cualitativa de las tintas según los criterios de printabilidad

Con el objetivo de identificar las mezclas con mayor potencial para su aplicación en impresión 3D, se llevó a cabo una evaluación cualitativa basada en la fluidez, la edificabilidad y los tiempos de fraguado. A cada criterio se le asignó una puntuación en una escala de 0 (deficiente) a 2 (adecuado) y se obtuvo una puntuación total para cada corrida experimental. Posteriormente, se clasificaron cualitativamente en una escala del 1 al 4, donde 1 indica printabilidad no viable, y 4 corresponde a mezclas aptas para impresión.

5.2.6.1 Modelo MK-CV

En la Tabla 17 se resumen los resultados de la evaluación para las mezclas del modelo MK-CV. La mayoría de las mezclas alcanzaron puntuaciones totales de 4 o 5, con clasificaciones de nivel 2 o 3, lo que indica un desempeño aceptable o moderadamente favorable para impresión 3D. Solo dos mezclas, 40MK-0CV-0.35 (R3) y 40MK-40CV-0.35 (R6), obtuvieron la clasificación de 1, debido a deficiencias importantes en la fluidez y la edificabilidad, relacionado con su bajo contenido de agua y alto contenido de MK que generaron mezclas secas, poco extruibles y con pobre capacidad de apilamiento.

En contraste, las mezclas 25MK-40CV-0.50 (R1), 0MK-40CV-0.50 (R4), 0MK-15CV-0.50 (R7), 0MK-40CV-0.406 (R11) y 18MK-0.8CV-0.433 (R12) alcanzaron una

puntuación de 5, destacando por una buena combinación de fluidez adecuada, fraguado oportuno y suficiente edificabilidad. Sin embargo, ninguna mezcla del modelo MK-CV fue clasificada con el nivel 4, reflejando que aún pueden mejorarse para alcanzar el nivel óptimo de printabilidad a pesar de un buen desempeño en general.

5.2.6.2 Modelo MK-CB

Para el modelo MK-CB, los resultados para la evaluación cualitativa de printabilidad se presentan en la Tabla 18, identificándose mezclas con puntuaciones totales de 4 o 5, lo cual indicó que es posible obtener mezclas adecuadas para impresión. Similar al modelo MK-CV, se observó que las mezclas con contenidos altos de MK y baja relación a/cm, como en el caso de 40MK-0CB-0.35 (R3) y 40MK-40CB-0.35 (R6) obtuvieron clasificación 1 debido a las deficiencias mencionadas con anterioridad.

A pesar de la menor edificabilidad, algunas formulaciones como 25MK-40CB-0.50 (R1), 0MK-40CB-0.406 (R11), y 18MK-0.8CB-0.433 (R5) obtuvieron la máxima puntuación de 5. No obstante, sólo 40MK-40CB-0.50 (R6.1) y 18MK-0.8CB-0.433 (R12) alcanzaron la clasificación 4, lo que sugiere un mayor rango de variabilidad y sensibilidad a los parámetros de diseño debido a que pequeñas modificaciones en la proporción de sólidos finos, el contenido de agua y la relación MK-CB generarían cambios significativos en la consistencia, la estabilidad de los filamentos y la capacidad de retención de forma. Estas mezclas, sin embargo, no presentaron los mejores valores individuales en todos los criterios, mostrando que la clasificación cualitativa responde a un equilibrio entre las propiedades.

5.2.6.3 Análisis comparativo de ambos modelos

Ambos modelos presentaron un conjunto amplio de mezclas clasificadas como nivel 2 o 3, lo que indica una viabilidad general aceptable para impresión 3D. Sin embargo, el modelo MK-CV mostró una menor cantidad de mezclas clasificadas como no viables (nivel 1) y una mayor proporción de mezclas con buena fluidez y fraguado controlado. Por su parte, el modelo MK-CB evidenció un desempeño más irregular, influenciado por la heterogeneidad de la CB y su mayor absorción de agua, lo cual impacta negativamente en la cohesión estructural inicial y la extrudabilidad.

Aunque ninguno de los modelos alcanzó de forma consistente la clasificación más alta (nivel 4), el análisis cualitativo permite identificar tendencias y comportamientos recurrentes que se orientan hacia la selección y optimización de las mezclas con mejores condiciones para su impresión. En este sentido, se destacaron como candidatas las mezclas con puntuaciones totales de 5 y clasificaciones superiores, que serán objeto de un estudio más detallado en los apartados siguientes.

Tabla 17. Evaluación cualitativa de las propiedades aplicables a la impresión 3D de las mezclas de MK-CV.

Corrida experimental	Propiedades aplicables a la impresión 3D			Puntuación total	Clasificación
	Fluidez	Edificabilidad	Tiempos de fraguado		
25MK-40CV-0.50	2	1	2	5	2
18MK-22CV-0.353	1	2	1	4	3
40MK-0CV-0.35	0	0	1	1	1
0MK-40CV-0.50	2	1	2	5	2
18MK-0.8CV-0.433	2	1	2	5	2
40MK-40CV-0.35	0	0	1	1	1
40MK-40CV-0.50	1	2	1	4	3
0MK-15CV-0.50	2	1	2	5	2
40MK-0CV-0.50	1	2	1	4	3
0MK-0CV-0.35	2	1	1	4	2
39.28MK-22CV-0.433	1	2	1	4	3
0MK-40CV-0.406	2	1	2	5	2
18MK-0.8CV-0.433	1	2	2	5	4

Tabla 18. Evaluación cualitativa de las propiedades aplicables a la impresión 3D de las mezclas de MK-CB.

Corrida experimental	Propiedades aplicables a la impresión 3D			Puntuación total	Clasificación
	Fluidez	Edificabilidad	Tiempos de fraguado		
25MK-40CB-0.50	2	1	2	5	2
18MK-22CB-0.353	1	2	1	4	3
40MK-0CB-0.35	0	0	1	1	1
0MK-40CB-0.50	2	0	2	4	2
18MK-0.8CB-0.433	2	1	2	5	3
40MK-40CB-0.35	0	0	1	1	1
40MK-40CB-0.50	2	1	1	4	4
0MK-15CB-0.50	2	0	2	4	2

40MK-0CB-0.50	1	2	1	4	3
0MK-0CB-0.35	2	1	1	4	3
39.28MK-22CB-0.433	1	2	1	4	3
0MK-40CB-0.406	2	1	2	5	2
18MK-0.8CB-0.433	1	1	2	4	4

5.3. Caracterización reológica

La evaluación reológica de las mezclas desarrolladas se presenta como una etapa crucial para comprender el comportamiento de los sistemas cementantes de MK-CV y MK-CB bajo condiciones de flujo y reposo. Este apartado se enfoca en evaluar los parámetros relacionados con la acumulación estructural, la viscosidad dependiente del tiempo y de la tasa de corte, así como las relaciones microestructurales que condicionan dichos comportamientos.

5.3.1. Acumulación estructural

La acumulación estructural describe el fenómeno de recuperación parcial o total de la red interna de la mezcla cementante tras una perturbación mecánica, lo cual tiene una influencia directa sobre su edificabilidad y estabilidad durante el proceso de impresión. La evaluación se realizó con base en la tasa de refloculación (R_{thix}) y la tasa de estructuración (A_{thix}), los cuales reflejan el grado y velocidad con que se restablece la microestructura del sistema una vez cesado el esfuerzo cortante (Kruger et al., 2019).

5.3.1.1 Tasa de refloculación

Las R_{thix} para las mezclas del modelo MK-CV se muestran en la Figura 35a y las tasas correspondientes se resumen en la Tabla 19, observándose que los esfuerzos de corte iniciales se distribuyeron en un rango de 14.45 a 995.04 Pa. Las tensiones más bajas se asociaron con las mezclas R4 y R11 con los mayores contenidos de CV y agua, ambas por debajo de los 100 Pa. Lo anterior puede relacionarse con la menor cohesión inicial del sistema debido al carácter esférico y poco reactivo de la CV, la cual reduce la fricción interna y favorece la dispersión de partículas; adicionalmente, el mayor contenido de agua disminuye la concentración efectiva de sólidos y limita la formación temprana de estructuras floculadas, resultando en esfuerzos de corte iniciales significativamente menores (Jiang et al., 2020; Yuan et al., 2018). En contraste, las tensiones iniciales más

elevadas se registraron en las mezclas R5, R8 y R12 con el mayor contenido de MK y las menores relaciones a/cm, alcanzando 423.36, 497.1 y 995.04 Pa, respectivamente.

Durante la evaluación del esfuerzo de corte inicial, las partículas del aglutinante son sometidas a movimientos rotacionales hasta alcanzar el inicio del flujo. En esta etapa, factores físicos como la morfología, la fineza y el área superficial de los materiales cementantes influyeron notablemente en las propiedades reológicas (Ibrahim et al., 2023b; Panda et al., 2019b; Robayo-Salazar et al., 2024). Las partículas esféricas de la CV proporcionaron un efecto lubricante por su capacidad de rodamiento bajo esfuerzo, lo que disminuyó la fricción y disminuyó el esfuerzo requerido para lograr el corte (Robayo-Salazar et al., 2024). Por el contrario, el MK aumentó la fricción interna por las partículas angulares y la elevada área superficial, y la resistencia al inicio del flujo (Jaji, 2023).

Además, la presencia de agua libre en las mezclas con alto contenido de CV, sumado a su baja demanda de agua, facilitó la formación de una película acuosa entre partículas que redujo el contacto directo y las fricciones, disminuyendo así el esfuerzo de corte (Jiao et al., 2021). En oposición, el MK presentó una alta demanda de agua que limitó la formación de una película lubricante y elevó el esfuerzo requerido para iniciar el flujo (Robayo-Salazar et al., 2024).

Destacó que las mezclas R1, R2, R6.1, R7 y R10 alcanzaron 158.22, 280.51, 242.46, 271.45 y 180.91 Pa, respectivamente, cercanos a los 173 Pa obtenidos para la mezcla de referencia R9. Esto es interesante porque sugiere que, aun con variaciones en las proporciones de MK, CV y la relación a/cm, estas formulaciones desarrollaron una estructura inicial comparable, lo que indica una capacidad similar de floculación y reconstrucción temprana de la red particulada. En consecuencia, dichas mezclas podrían mantener un desempeño estable durante la extrusión y el depósito capa a capa, al conservar niveles de cohesión inicial próximos a los de la mezcla patrón.

Las R_{thix} variaron entre 1.65 y 19.82 Pa/s pero la mayoría de las mezclas permanecieron por debajo de 5.11 Pa/s, siendo R10 la mezcla con la menor tasa, mientras que R5 y R12 alcanzaron las tasas más altas de 19.82 y 19.55 Pa/s, respectivamente. Estos resultados indicaron que no existe una correlación directa entre ambos parámetros, aunque las tasas más elevadas de refloculación suelen coincidir con mezclas de mayor esfuerzo inicial.

P.ej., la mezcla R8 presentó un alto esfuerzo inicial, pero una R_{thix} media de 5.08 Pa/s. Inversamente, R11 mostró una baja tensión inicial pero una R_{thix} comparable (4.44 Pa/s). Esto sugirió que la refloculación estuvo más relacionada con la naturaleza de los materiales utilizados que con el esfuerzo de corte inicial, probablemente debido a que la reconstrucción estructural depende de la cinética de interacción entre partículas finas y del grado de atracción electrostática y puenteo físico generado por las fases suplementarias. (Al-Noaimat, Ghaffar, et al., 2023; Ibrahim et al., 2023a; Jiao et al., 2021).

El proceso de refloculación estuvo controlado predominantemente por las interacciones físicas, ya que se relacionó con la recuperación de la resistencia al corte en intervalos cortos de tiempo, a diferencia de la tasa de estructuración que estuvo más influida por fenómenos químicos asociados a la hidratación (Bayat & Kashani, 2023; Peng & Unluer, 2024). En este contexto, las fuerzas coloidales (p.ej., la atracción de van der Waals y las repulsiones electrostáticas) y los movimientos brownianos jugaron un papel fundamental, es decir, conforme mayores son la atracción coloidal y la fuerza de unión entre partículas frente al movimiento browniano, mayor será la resistencia inicial del aglutinante (Kruger et al., 2019).

La CV actuó principalmente como material de relleno debido a su baja reactividad inicial, lo que redujo la demanda de agua y dejó mayor cantidad de agua libre en la suspensión. Esto generó una película acuosa más gruesa entre partículas, disminuyendo la posibilidad de formar puentes de floculación y redujo la tasa de refloculación (Jiao et al., 2021). En cambio, materiales finos y angulares como el MK incrementaron la refloculación por su alta demanda de agua y la generación de superficies de contacto más extensas por unidad de volumen (Bayat & Kashani, 2023).

En síntesis, la refloculación estuvo influenciada por la morfología, la DTP, la rugosidad de las partículas y la relación a/cm de las mezclas. De hecho, las relaciones a/cm más altas implicaron una menor fracción de sólidos suspendidos, lo que incrementó la distancia entre partículas, debilitando la floculación y disminuyendo la tasa de refloculación; el efecto opuesto ocurrió con relaciones a/cm más bajas (R. Liu et al., 2021; C. Zhang et al., 2023). De todo lo anterior, se concluyó que las combinaciones adecuadas entre MK, CV y la relación a/cm permitieron asociar aglutinantes con la capacidad de refloculación

suficiente para obtener propiedades probablemente adecuadas para procesos de bombeo y edificabilidad.

Con respecto de las mezclas de MK-CB, la Figura 35b presenta las curvas de refloculación y la Tabla 20 resume los resultados del esfuerzo de corte inicial y la tasa de refloculación. Los esfuerzos de corte inicial estuvieron influenciados por los contenidos de MK, CB y agua, identificándose menores esfuerzos en aquellas mezclas con alto contenido de CB y agua, mientras que los esfuerzos más altos se asociaron a un mayor contenido de MK y una menor relación a/cm. Los esfuerzos de corte inicial variaron entre 58.08 y 1148.6 Pa, aunque un mayor número de mezclas de MK-CB registraron valores por debajo de 100 Pa a diferencia de las mezclas MK-CV. Tal es el caso de las mezclas R1, R4, R7 y R11, que alcanzaron 59.06, 58.08, 98.16 y 97.94 Pa, respectivamente, siendo R4 la mezcla con el menor esfuerzo por un contenido nulo de MK y un mayor contenido de CB y agua.

En contraste, las mezclas R6.1, R8 y R12 presentaron los esfuerzos de corte inicial más altos de 434.2, 497.1 y 1148.6 Pa, respectivamente. Cabe destacar que R5 mostró un comportamiento cercano a este grupo con 372.99 Pa, mientras que las demás mezclas se mantuvieron por debajo de los 300 Pa, como es el caso de R2, R9 y R10, con 282.32, 173.0 y 241.02 Pa, respectivamente.

En correspondencia con los resultados de edificabilidad (sección 5.2.2), se observó que la incorporación del contenido de CB propició la formación de mezclas con menor estabilidad estructural, lo cual se asoció con una menor viscosidad en comparación con las mezclas de MK-CV. Esto se atribuyó a la limitada capacidad de empaquetamiento de las partículas de CB, dado que su tamaño es comparable al CP5.1.2.15.1.3. En contraste, el MK incrementó la viscosidad de las mezclas (Amjad et al., 2025; Bheel et al., 2022).

Con respecto de las R_{thix} para las mezclas de MK-CB, los resultados variaron de 2.5 a 30.12 Pa/s. La mezcla R5 registró la mayor tasa de refloculación, superando incluso a R12, que solo alcanzó una tasa de refloculación de 11.17 Pa/s a pesar de su alto esfuerzo de corte inicial. Además, las mezclas con los menores esfuerzos de corte inicial (R1, R4, R7 y R11) presentaron tasas elevadas de refloculación de 18.42, 15.6, 17.75 y 19.86 Pa/s, respectivamente. En cambio, el resto de las mezclas reportaron tasas menores a 7.82 Pa/s. Esto es interesante porque confirma que, en el sistema MK-CB, la velocidad de

reconstrucción estructural no depende directamente del esfuerzo inicial, sino del comportamiento propio de la CB, cuya morfología porosa y altamente angular favorece la rápida formación de puentes físicos entre partículas tras el corte, incluso cuando la mezcla presenta baja cohesión inicial.

Este comportamiento resulta contrario al observado en las mezclas MK-CV, donde existía una relación directa entre los contenidos de las materias primas y la tasa de refloculación. Sin embargo, algunos autores reportaron fenómenos similares en otros tipos de aglutinantes (Al-Noaimat, Ghaffar, et al., 2023; Jiao et al., 2021), lo cual puede explicarse por las interacciones coloidales entre las partículas de los materiales aglutinantes (Peng & Unluer, 2024). Aunque las mezclas presentaron una cohesión reducida, la combinación MK-CB mostró menores distancias entre las partículas debido al tamaño fino del MK y la CB en comparación con la CV5.1.3. Esta proximidad facilitó la formación de puentes entre las partículas y las fuerzas de atracción tipo Van der Waals en lapsos cortos de tiempo, generando estructuras con una mayor resistencia al corte, es decir, con una mayor tasa de refloculación (Kruger et al., 2019).

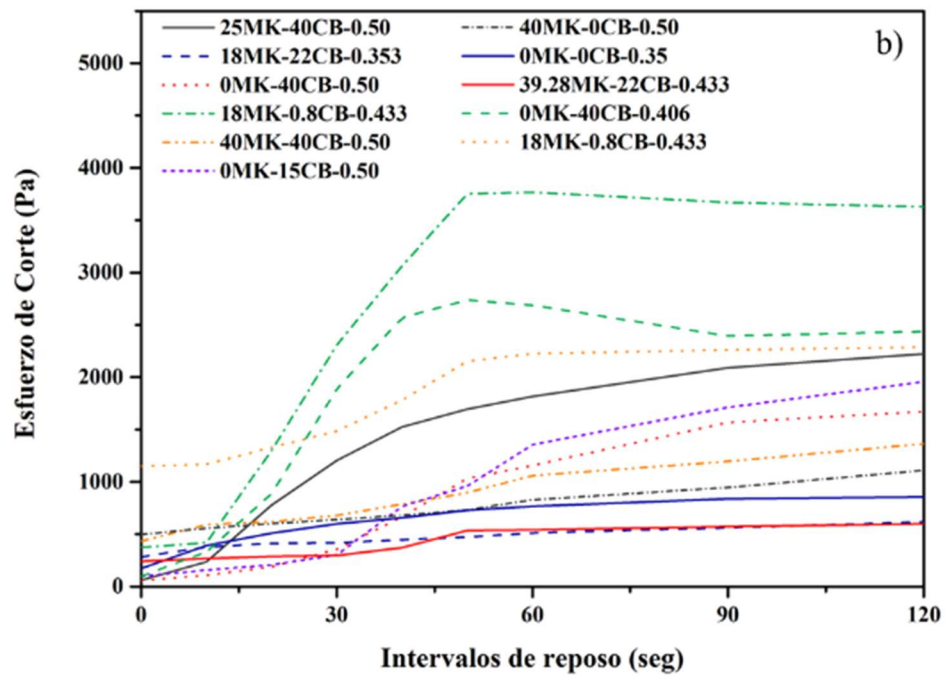
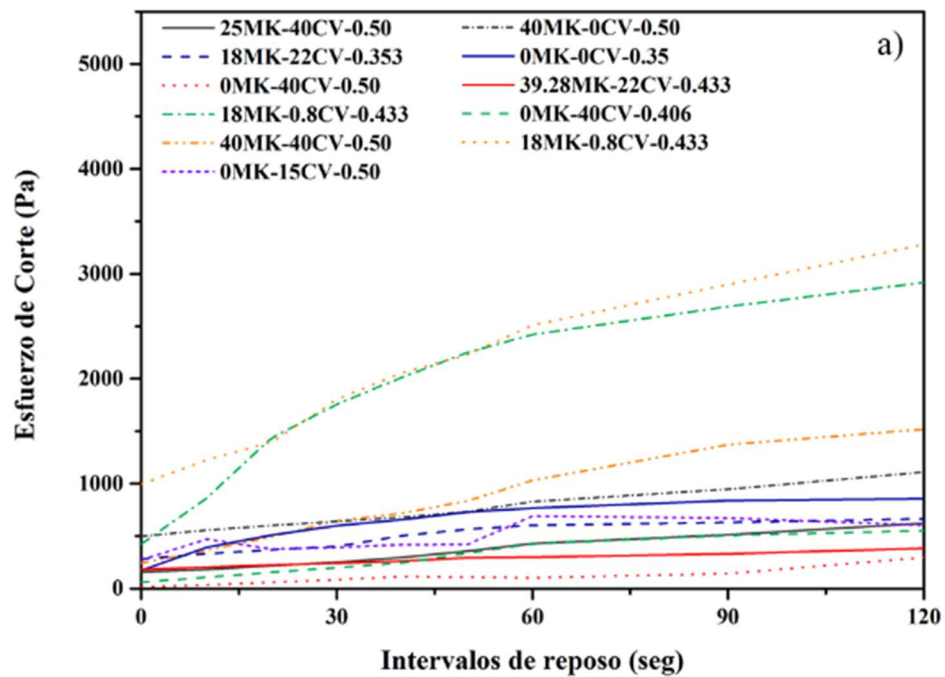


Figura 35. Refloculación a corto plazo en función del esfuerzo de corte para las mezclas de a) MK-CV y de b) MK-CB.

Tabla 19. Esfuerzo de corte inicial y R_{thix} de mezclas de MK-CV.

Corrida experimental	Esfuerzo de corte inicial (Pa)	R_{thix} (Pa/s)
----------------------	--------------------------------	-------------------

25MK-40CV-0.50	158.22	4.06
18MK-22CV-0.353	280.51	3.40
40MK-0CV-0.35	-	-
0MK-40CV-0.50	14.45	1.99
18MK-0.8CV-0.433	423.36	19.82
40MK-40CV-0.35	-	-
40MK-40CV-0.50	242.46	11.16
0MK-15CV-0.50	271.45	2.89
40MK-0CV-0.50	497.10	5.08
0MK-0CV-0.35	173.00	5.11
39.28MK-22CV-0.433	180.91	1.65
0MK-40CV-0.406	60.89	4.44
18MK-0.8CV-0.433	995.04	19.55

Tabla 20. Esfuerzo de corte inicial y R_{thix} de las mezclas de MK-CB.

Corrida experimental	Esfuerzo de corte inicial (Pa)	R_{thix} (Pa/s)
25MK-40CB-0.50	59.06	18.42
18MK-22CB-0.353	282.32	2.50
40MK-0CB-0.35	-	-
0MK-40CB-0.50	58.08	15.60
18MK-0.8CB-0.433	372.99	30.12
40MK-40CB-0.35	-	-
40MK-40CB-0.50	434.20	7.82
0MK-15CB-0.50	98.19	17.75
40MK-0CB-0.50	497.10	5.089
0MK-0CB-0.35	173.00	5.11
39.28MK-22CB-0.433	241.02	3.46
0MK-40CB-0.406	97.94	19.86
18MK-0.8CB-0.433	1148.60	11.17

5.3.1.2 Tasa de estructuración

Las A_{thix} para las mezclas de MK-CV se presentan en la Figura 36a, mientras que los esfuerzos de corte iniciales y las tasas de estructuración se resumen en la Tabla 21. Se observó que las A_{thix} más bajas se correspondieron con las mezclas de mayor relación a/cm y sin contenido de MK, como R7 (0.10 Pa/s) y R4 (0.13 Pa/s). En contraste, la incorporación del contenido de MK provocó un incremento significativo en la estructuración de las mezclas, p.ej., R2 (0.21 Pa/s), R5 (0.46 Pa/s), R9 (0.42 Pa/s), R11 (0.37 Pa/s) y R12 (0.26 Pa/s). Las mezclas con mayor contenido de MK superaron tasas de 0.5 Pa/s independientemente de la cantidad de agua o de CV, p.ej., R1 (1.00 Pa/s), R6.1 (0.62 Pa/s), R8 (1.21 Pa/s) y R10 (0.53 Pa/s).

A diferencia del proceso de refloculación, la tasa de estructuración está fuertemente influenciada por los factores químicos relacionados con la hidratación del CP. Esta transformación progresiva de una suspensión fluida hacia un estado elástico sólido ocurrió en escalas de tiempo más prolongadas, y los valores A_{thix} representaron el ritmo del incremento del límite elástico como resultado directo de este proceso (Kruger et al., 2019; Peng & Unluer, 2024). Estudios previos han reportado que los MPS influyeron en esta tasa en función de su DTP, morfología, rugosidad, composición química y reactividad (Bayat & Kashani, 2023; Jaji, 2023).

En este sentido, el MK se comportó como un material más reactivo que la CV, lo que resultó en mezclas con mayor fracción de sólidos y una elevada generación de calor (Figura 34). Estas características propiciaron una mayor interacción entre partículas, con fuerzas de fricción interna más significativas, generando una rápida floculación y densificación microestructural mediante la formación de productos de reacción. Es decir, se crearon enlaces entre las partículas más resistentes al corte en menor tiempo, lo cual incrementó la tasa de estructuración (Bheel et al., 2021; Dvorkin et al., 2022b; T. Yang et al., 2017).

Por el contrario, la CV presentó propiedades opuestas al MK (p.ej., sus partículas esféricas de mayor tamaño, baja reactividad y escasa generación de calor dificultan la interacción efectiva entre partículas, al permitir la presencia de capas espesas de agua libre), limitando la formación de puentes estructurales y la reducción de la capacidad de densificación microestructural, ralentizando así el proceso de estructuración de la mezcla cementante (Jaji, 2023; Jiao et al., 2021).

A partir de los resultados obtenidos y las curvas de estructuración, se concluyó que existen combinaciones de MK-CV regulables mediante la dosificación de agua que permitieron obtener un comportamiento tixotrópico favorable para impresión 3D. Mezclas con una A_{thix} superior a 0.5 Pa/s pueden considerarse adecuadas tanto para el bombeo y extrusión como para mantener su forma bajo el peso de capas sucesivas (Kruger et al., 2019; Paritala et al., 2023; Roussel, 2018).

Un aspecto importante fue la falta de correlación directa entre los esfuerzos de corte iniciales y las tasas de estructuración. Los aglutinantes con alta relación a/cm y contenido

de CV mostraron menores esfuerzos iniciales debido a su mayor fluidez (p.ej., R4, R7 y R11); pero su estructuración fue pobre en ausencia de MK. Al contrario, la incorporación del contenido MK o la reducción de la relación a/cm incrementaron la viscosidad inicial, aunque no necesariamente condujeron a una mayor estructuración como evidenciaron R5 (0.46 Pa/s) y R12 (0.26 Pa/s), a pesar de sus altos esfuerzos de corte iniciales (~3000 Pa). En contraste, mezclas con esfuerzos iniciales más bajos como R6.1 (1518.1 Pa) y R8 (1110.4 Pa) presentaron tasas de estructuración superiores (0.62 y 1.21 Pa/s), destacando el efecto del contenido de MK.

Esto sugiere una correlación entre la fluidez inicial y la tasa de estructuración, es decir, conforme mayor es la fluidez, mayor es el incremento posterior en la estructuración. Kruger et al. (2019) reportaron esta relación en mezclas con superplastificantes, modificadores de viscosidad y nanosílice. El razonamiento detrás de esto es que una mezcla con baja viscosidad inicial y alta reactividad puede alcanzar un endurecimiento igual o superior a las mezclas más viscosas en el mismo intervalo de tiempo, lo cual significa una mayor tasa de estructuración.

El mismo patrón de comportamiento se reflejó en los esfuerzos de corte finales, ya que se obtuvieron resultados superiores a 1000 Pa, excepto en R4 y R7 (537.94 y 777.63 Pa) que presentaron las mayores relaciones a/cm, el mayor contenido de CV y la ausencia de MK. Por otro lado, las mezclas R5, R6.1, R8 y R12 alcanzaron esfuerzos finales de 3766.8, 2825.1, 3386 y 3766.8 Pa, respectivamente, utilizando un menor contenido de agua y un mayor contenido de MK. El resto de las mezclas alcanzaron un esfuerzo intermedio entre 1066.6 a 2453.8 Pa (p.ej., R1, R2, R9, R10 y R11). Esto se puede relacionar con la capacidad del MK para promover una estructura floculada más densa y estable en estado fresco debido a su alta reactividad y elevada superficie específica, lo que favorece la formación de puentes interparticulares y una mayor resistencia interna al flujo (Jiang et al., 2020; M. K. Rahman et al., 2014; Yuan et al., 2018).

En el caso de las mezclas de MK-CB, los esfuerzos de corte iniciales (Tabla 22) variaron de 598.39 a 3628 Pa, finalizando entre 1342 y 3938.3 Pa. Estos resultados sugirieron que la incorporación del contenido de CB promovió un incremento significativo de los esfuerzos de corte con el tiempo, en comparación con las mezclas de MK-CV. Esto se

reflejó con mayor claridad en la tasa de estructuración, ya que la mayoría de las mezclas superaron los 0.5 Pa/s, evidenciando una estructuración apreciable.

Similar que las mezclas de MK-CV, la tasa de estructuración de las mezclas MK-CB (Figura 36b) se afectó por los esfuerzos de corte iniciales. En particular, se observó que mezclas con bajos esfuerzos de corte inicial alcanzaron una A_{thix} más alta, debido a que una mayor fluidez inicial favoreció el incremento progresivo de la estructuración (Kruger et al. (2019)).

En este sentido, las tasas más altas de estructuración se asociaron directamente con una dosificación de agua adecuada, p.ej., en las mezclas R6.1 y R8 que alcanzaron 1.28 y 1.21 Pa/s, respectivamente. La presencia de MK favoreció este fenómeno debido a su alta capacidad de reacción y generación de calor, promoviendo la formación de productos de hidratación y los enlaces entre las partículas en periodos cortos de tiempo (Y. Chen et al., 2023; Tebbal & Abidine Rahmouni, 2019).

Esto también fue evidente en mezclas como R12 que lograron una tasa de estructuración de 0.57 Pa/s a pesar del esfuerzo de corte inicial elevado (2261.7 Pa). Lo anterior se atribuyó a la sinergia entre la actividad puzolánica del MK, la generación de calor y la interacción con el CP, que en conjunto favorecieron una estructuración acelerada. Análogamente, la mezcla R10 alcanzó un valor A_{thix} de 0.55 Pa/s con un esfuerzo de corte inicial bajo (598.39 Pa), confirmando que el MK otorgó una capacidad estructurante superior a la CB.

No obstante, algunas mezclas de CB con 0%MK lograron también tasas de estructuración superiores a 0.5 Pa/s, p.je., R4 y R11 con 0.62 y 0.52 Pa/s, respectivamente. El factor determinante en estos casos fue el contenido de agua. Aunque la CB presentó una reactividad limitada, su elevada porosidad y tortuosidad permitieron una notable absorción de agua, lo que redujo el contenido de agua libre con el tiempo y aumentó la viscosidad de la mezcla. Esta condición favoreció una mayor interacción entre partículas, permitiendo la formación de redes físicas parcialmente estructuradas sin requerir una hidratación significativa (Gupta et al., 2022; D. H. Le et al., 2018).

Por el contrario, algunas mezclas mostraron tasas de estructuración inferiores a 0.5 Pa/s, siendo que R1 y R5 presentaron los valores más bajos de 0.25 y 0.18 Pa/s, respectivamente, a pesar de sus altos esfuerzos de corte inicial (2223.3 y 3628 Pa), respaldando la correlación inversa entre fluidez inicial y estructuración. Otras mezclas como R2, R7 y R9 alcanzaron valores intermedios de ~ 0.4 Pa/s, pero en estos casos los esfuerzos de corte iniciales fueron moderados (617.41, 1957.5 y 855.19 Pa), lo cual podría parecer contradictorio con la tendencia observada. Sin embargo, estas mezclas presentaron bajos contenidos de MK, lo cual limita significativamente la formación de puentes estables y la producción de hidratos estructurantes, como se evidenció en los tiempos de fraguado y en las curvas de calorimetría. Dado que la CB es un material de baja reactividad, su contribución a la estructuración depende más de mecanismos físicos que químicos, resultando en tasas de estructuración más bajas (Akkarapongtrakul et al., 2017; Olumide Olu et al., 2020).

En síntesis, los resultados evidenciaron que la CB promovió mayores tasas de estructuración que la CV, sugiriendo una mejor edificabilidad de las mezclas de MK-CB. Además, el incremento en los esfuerzos de corte iniciales relacionado con la presencia de la CB podría favorecer los procesos de bombeo y extrusión (Batoool et al., 2020; Subhani et al., 2024). No obstante, en ambos casos se comprobó que la estructuración más adecuada se alcanzó mediante una combinación idónea de los aglutinantes y un control preciso de la relación a/cm.

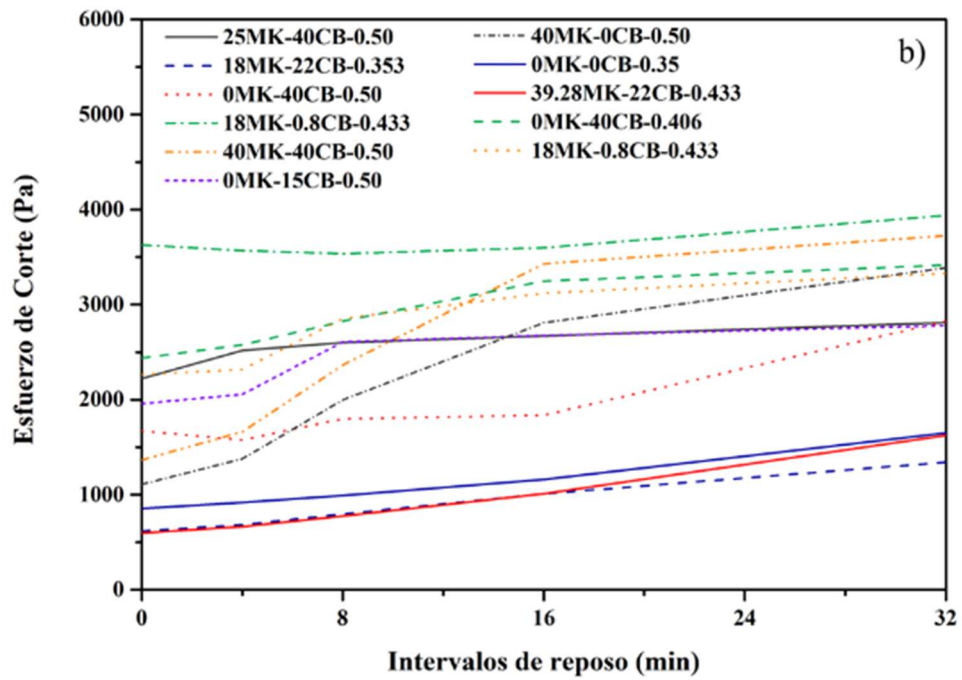
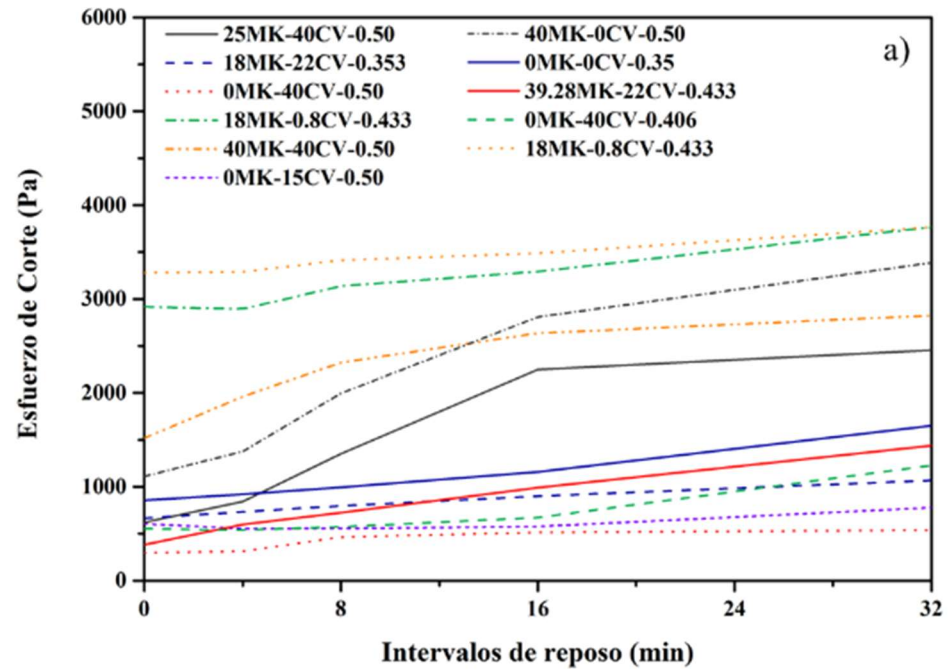


Figura 36. Estructuración a largo plazo en función del esfuerzo de corte para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.

Tabla 21. Esfuerzos de corte iniciales y finales, así como la tasa de estructuración (A_{thix}) de las mezclas de MK-CV.

Corrida experimental	Esfuerzo de corte inicial (Pa)	Esfuerzo de corte final (Pa)	A_{thix} (Pa/s)
25MK-40CV-0.50	622.00	2453.80	1.00
18MK-22CV-0.353	665.07	1066.60	0.21
40MK-0CV-0.35	-	-	-
0MK-40CV-0.50	295.71	537.94	0.13
18MK-0.8CV-0.433	2917.70	3766.80	0.46
40MK-40CV-0.35	-	-	-
40MK-40CV-0.50	1518.10	2825.10	0.62
0MK-15CV-0.50	604.64	777.63	0.10
40MK-0CV-0.50	1110.40	3386.00	1.21
0MK-0CV-0.35	855.19	1649.50	0.42
39.28MK-22CV-0.433	382.42	1438.50	0.53
0MK-40CV-0.406	552.95	1228.80	0.37
18MK-0.8CV-0.433	3279.50	3766.80	0.26

Tabla 22. Esfuerzos de corte iniciales y finales, así como la tasa de estructuración (A_{thix}) de las mezclas de MK-CB.

Corrida experimental	Esfuerzo de corte inicial (Pa)	Esfuerzo de corte final (Pa)	A_{thix} (Pa/s)
25MK-40CB-0.50	2223.30	2809.80	0.25
18MK-22CB-0.353	617.41	1342.00	0.39
40MK-0CB-0.35	-	-	-
0MK-40CB-0.50	1671.30	2825.10	0.62
18MK-0.8CB-0.433	3628.00	3938.30	0.18
40MK-40CB-0.35	-	-	-
40MK-40CB-0.50	1363.50	3725.10	1.28
0MK-15CB-0.50	1957.50	2779.10	0.41
40MK-0CB-0.50	1110.40	3386.00	1.21
0MK-0CB-0.35	855.19	1649.50	0.42
39.28MK-22CB-0.433	598.39	1624.20	0.55
0MK-40CB-0.406	2437.10	3415.60	0.52
18MK-0.8CB-0.433	2261.70	3328.70	0.57

5.3.2. Comportamiento viscoelástico

El comportamiento viscoelástico de las mezclas cementantes desarrolladas constituye un parámetro clave para evaluar su desempeño en tecnologías de impresión 3D, ya que determinó la capacidad del material para mantener su forma tras la deposición capa por capa, resistir deformaciones y recuperar su estructura bajo sollicitaciones mecánicas. Este comportamiento resultó de la interacción entre el componente de la viscosidad

(relacionado con el flujo plástico del material) y el componente elástico (que representa la recuperación estructural ante esfuerzos aplicados).

5.3.2.1 Viscosidad dependiente del tiempo

El comportamiento de la viscosidad de las mezclas fue evaluado bajo una tasa de corte constante, con el fin de observar su evolución a lo largo del tiempo. Las curvas de viscosidad dependiente del tiempo para las mezclas MK-CV se presentan en la Figura 37a, mostrando una variación entre 2.89×10^5 y 2.05×10^7 MPa·s, con la viscosidad aumentando conforme avanzaba el tiempo. Las mezclas R4 y R11 registraron la viscosidad inicial más baja de 2.89×10^5 y 1.22×10^6 MPa·s, sugiriendo que mayores contenidos de CV y agua redujeron la viscosidad inicial. Sin embargo, se identificaron excepciones como R7 que presentó una viscosidad inicial de 5.56×10^6 MPa·s a pesar de tener la relación a/cm más alta, 15% de CV y 0% de MK. Además, R2 alcanzó el mismo valor, pero con un 18% de MK, 22% de CV y una relación a/cm de 0.353.

La viscosidad de los aglutinantes a base de CP está fuertemente influenciada por múltiples factores, incluyendo la tasa de corte, las condiciones de mezclado, el uso de aditivos y las propiedades físicas y químicas de las materias primas (Ouyang, Wang, et al., 2021). En particular, la incorporación de CV afectó la reología por sus características físicas (H. Ye et al., 2019). Así, el alto contenido de CV aumentó la separación entre partículas debido a su DTP más amplia y su baja reactividad temprana. Esto generó capas más gruesas de agua libre, disminuyendo la fricción entre las partículas durante el corte y favoreció el flujo (Vance et al., 2013). En contraste, un menor contenido de CV redujo el espacio entre las partículas, incrementando el empaquetamiento y la fricción interna, lo que incrementó la resistencia al flujo (T. Yang et al., 2018).

Consistentemente, una viscosidad inicial más alta se relacionó con bajos contenidos de CV y altos contenidos de MK, siendo la cantidad de agua el principal parámetro de ajuste. Tal es el caso de R5, R8 y R12, la cual es la mezcla con la mayor viscosidad inicial (2.05×10^7 MPa·s) y que incorporó 18% de MK y una relación a/cm de 0.433. Asimismo, la mezcla R8 con mayores contenidos de MK y de agua, presentó una viscosidad inicial de 1.02×10^7 MPa·s. Esto se atribuyó tanto a la microestructura del MK como a su alta

demanda de agua que reduce la formación de capas de agua libre y aumentó la fricción entre partículas (S. Zhou et al., 2021).

En resumen, se observó que la incorporación del contenido de CV redujo la viscosidad inicial, mientras que el MK la incrementó. La relación a/cm actuó como factor modulador, es decir, conforme mayor es el contenido de agua, menor es la viscosidad debido a la mejor dispersión de los aglutinantes y la menor fricción interna (H. Ye et al., 2019). Un comportamiento intermedio se reflejó en mezclas como R1, R6.1, R9 y R10, asociado con la viscosidad inicial de 2.73×10^6 , 4.85×10^6 , 3.48×10^6 y 3.61×10^6 MPa·s, respectivamente.

Con respecto de la viscosidad finales, la mayoría de las mezclas presentó una fase de rápido incremento entre los 400 y 1200 segundos, con una posterior estabilización de las curvas. Durante esta fase, se observaron perturbaciones en las curvas, posiblemente relacionadas con el choque entre las partículas antes de alinearse al flujo inducido por el corte (Ouyang, Wang, et al., 2021; Ouyang, Wu, et al., 2021).

En general, las mezclas con mayor contenido de agua y CV, pero sin MK mostraron una menor viscosidad final, p.ej., R4, R7 y R11 con 5.01×10^6 , 1.31×10^7 MPa·s y valores similares, respectivamente. Esto se relacionó con la baja reactividad inicial de la CV que retardó la formación de los productos de hidratación, limitando el crecimiento de la viscosidad a lo largo del tiempo (S. Zhou et al., 2021).

En contraposición, las mezclas con MK de R1, R5, R6.1, R8 y R12 alcanzaron las mayores viscosidades finales. Particularmente, R6.1 alcanzó 8.06×10^{10} MPa·s a pesar de tener los mayores contenidos de CV y de agua. Esto se atribuyó a la estructura densa formada por la combinación de MK, CP y CV, que generó una alta fricción interna entre las partículas (Kwan & McKinley, 2014; T. Yang et al., 2018). Además, el MK liberó altas cantidades de calor en los primeros minutos de hidratación, lo cual aceleró la formación de los compuestos hidratados difíciles de romper mediante el esfuerzo de corte. Mezclas como R5 y R12 exhibieron picos de viscosidad superiores a 9.09×10^7 y 5.10×10^9 MPa·s, respectivamente. Por otro lado, mezclas con contenidos moderados de MK y CV como R2 y R10, alcanzaron viscosidades finales de 2.44×10^7 y 2.19×10^7 MPa·s.

En cuanto a las mezclas de MK-CB (Figura 37b), se observó un comportamiento similar a las mezclas de MK-CV para la viscosidad inicial, ya que se redujo la viscosidad conforme los contenidos de CB, MK y agua fueron mayores. Las mezclas R1, R4, R7 y R11 presentaron esta tendencia con una viscosidad inicial entre 1.17×10^6 y 1.98×10^6 MPa·s. No obstante, la viscosidad de R7 y R11 sugirieron una compensación entre los efectos del contenido del CB y el agua, aunque un mayor contenido de ceniza de bagazo tiende a elevar la fricción interna por su morfología irregular y su superficie altamente porosa, el incremento simultáneo en la relación a/cm favoreció la dispersión del sistema y redujo la cohesión entre partículas, resultando en una viscosidad final más baja que la esperada (Amjad et al., 2025; Jittin & Bahurudeen, 2022). Por otro lado, R5, R6.1, R8 y R12 mostraron la viscosidad inicial más alta con valores de hasta 2.67×10^7 MPa·s. Lo anterior puede atribuirse a la combinación de un menor contenido de agua y un mayor porcentaje de MK, lo cual promueve una red floculada densa debido a la elevada finura y reactividad (Q. Li & Fan, 2022; Ojeda-Farías et al., 2024).

La viscosidad final de las mezclas de MK-CB presentó resultados distintos a las mezclas de MK-CV, alcanzando tasas de incremento elevadas en un mayor número de mezclas. La viscosidad final más alta se alcanzó para R4 y R11 con 1.60×10^6 y 5.85×10^9 MPa·s, respectivamente, ambas sin contenido de MK. Asimismo, R5, R6.1, R8 y R12 alcanzaron una viscosidad entre 5.57×10^7 y 3.99×10^8 MPa·s, indicando que la CB tuvo un rol activo en el desarrollo de viscosidad, posiblemente debido a sus características físicas o reactividad incipiente. Comparativamente, las mezclas con CB de R7 y R9 contribuyeron a sustentar esta hipótesis, presentando una viscosidad que mantuvo o superó los resultados para las mezclas con MK.

Hasta este punto, se discutieron los efectos inducidos por las propiedades del MK y la cantidad de agua de las mezclas sobre la viscosidad de las mezclas. Con respecto de la incorporación de la CB, este no tiende a reaccionar rápidamente al hidratarse a diferencia del MK y la CV, pero se comporta como un material hidrófilo debido a su alta porosidad (Gupta et al., 2022).

Lo anterior le confieren una capacidad de absorción de agua gradual, lo cual implica que las mezclas presentaron una baja resistencia al flujo en los primeros minutos posteriores

al mezclado. No obstante, la demanda de agua se incrementó con el paso del tiempo, mientras que el espesor de las capas de agua libre disminuyó, afectando progresivamente la viscosidad de la mezcla (Anjos et al., 2020; D.-H. Le et al., 2022).

Por tanto, fue posible la formación de mezclas cohesivas de MK-CB con capacidad de edificación y propiedades adecuadas de extrusión y bombeo (J. Li et al., 2022; Z. Liu et al., 2024). Esto debido a que la elevada viscosidad que desarrollaron las mezclas no se asoció enteramente con la formación de productos de hidratación difíciles de romper mediante el esfuerzo de corte, sino más bien con la fricción inducida por el choque entre las partículas sólidas, siempre que se controlen las tasas de incremento de la viscosidad mediante el ajuste de los factores del modelo (Bheel et al., 2022; Saleh Ahari et al., 2015; Yeluri et al., 2025).

Es importante resaltar que las mezclas de MK, CB y relaciones a/cm intermedias y bajas mostraron tasas de incremento de la viscosidad más reducidas, así como viscosidades finales más moderadas. Esto pudo deberse a un efecto combinado de los factores: la limitada disponibilidad de agua, derivada tanto de la dosificación como del consumo progresivo por parte de la CB que inhibió la reacción del MK, prolongando su actividad puzolánica a lo largo del tiempo. Como consecuencia, se mitigó la tasa de incremento y la viscosidad final, con pendientes de crecimiento menos pronunciadas durante la evaluación.

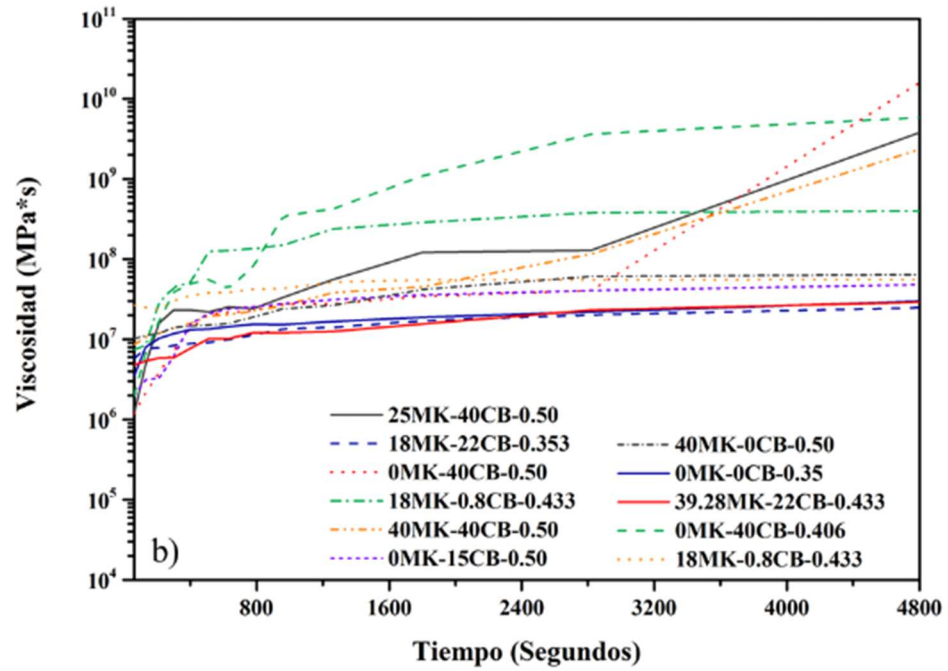
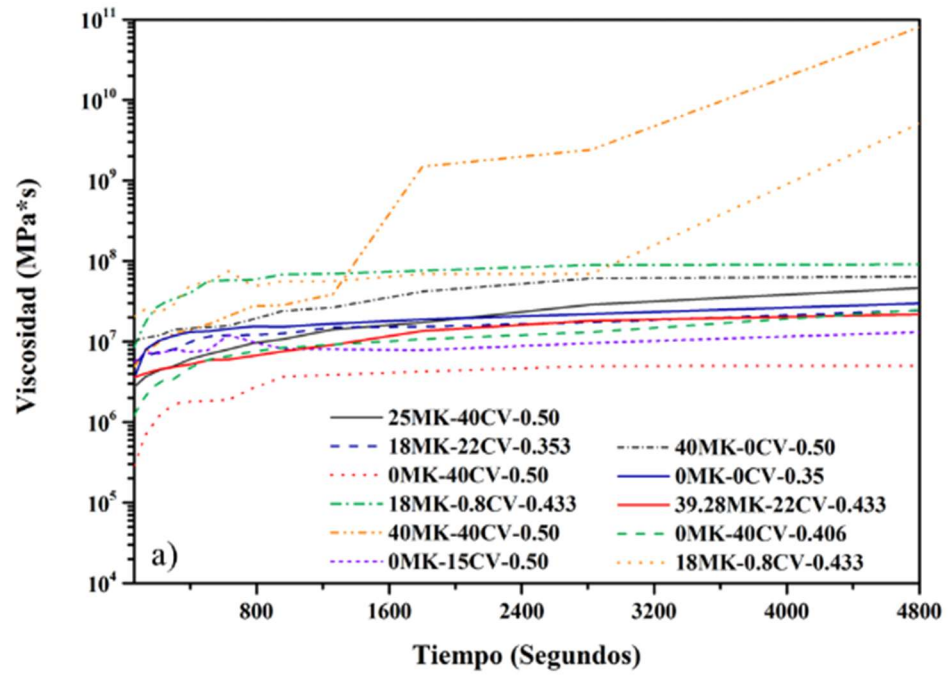


Figura 37. Viscosidad en función del tiempo para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.

5.3.2.2 Viscosidad dependiente de la tasa de corte

La Figura 38a muestra las curvas de viscosidad en función de la velocidad de corte para las mezclas de MK-CV, presentando comportamientos similares de inicio a fin en la mayoría de los casos. Las mezclas R5, R8 y R12 iniciaron en un rango de 2.36×10^5 a 2.56×10^5 MPa·s y concluyeron en el intervalo de 6.20×10^3 a 6.75×10^3 MPa·s, alcanzando los resultados de viscosidad más altos y compartiendo como factores comunes un alto contenido de MK y un bajo o nulo contenido de CV. Adicionalmente, la relación a/cm también se distinguió como un factor relevante porque, al encontrarse en valores relativamente bajos para estas mezclas, limitó la cantidad de agua disponible para lubricar el sistema, favoreciendo la formación de redes floculadas más compactas y un incremento en la resistencia interna al flujo (Karahan et al., 2012; Rojo-López et al., 2023). Cabe señalar que R1, R5 y R10 presentaron distorsiones entre 50 y 70 s^{-1} , las cuales son consideradas errores de medición aceptables, atribuidos al choque entre las partículas previo a la orientación molecular en la dirección del esfuerzo cortante (Ouyang, Wu, et al., 2021).

Entre el resto de las mezclas, R6.1 obtuvo la viscosidad más alta, iniciando en 5.79×10^4 MPa·s y concluyendo en 2.31×10^3 MPa·s; además, esta mezcla combinó los mayores niveles de los tres factores del modelo. En contraste, R4, R7 y R10 presentaron los resultados de viscosidad inicial más bajos, siendo R4 y R7 prácticamente idéntico al comenzando en 1.22×10^4 MPa·s y finalizar en torno a 5.50×10^2 MPa·s. Sin embargo, R4 presentó un ligero efecto espesante entre los 50 y 85 s^{-1} , antes de retomar su tendencia descendente. Ambas mezclas carecían de contenido de MK, diferenciándose únicamente por el contenido de CV (R4 con 40% y R7 con 15%). Por su parte, R10 con 39.28% de MK, 22% de CV y una relación a/cm de 0.433, alcanzó la menor viscosidad de todas las mezclas de 1.16×10^4 MPa·s al inicio y 1.67×10^2 MPa·s al final del ensayo.

Otras mezclas de interés fueron R2, R9 y R11, las cuales presentaron resultados de viscosidad inicial similares entre 2.38×10^4 y 3.39×10^4 MPa·s. Las mezclas R9 y R11 no contenían MK, mientras que R2 sí incorporó MK y CV, resultando en una mayor tasa de reducción de viscosidad al aumentar la velocidad de corte (hasta 4.42×10^2 MPa·s), en comparación con R9 (1.02×10^3 MPa·s) y R11 (9.99×10^2 MPa·s). Contrariamente, R1

mostró un incremento de viscosidad entre 40 y 60 s⁻¹, con contenidos mayores de MK y de CV.

Así, se identificaron los siguientes efectos de los factores del modelo: (i) un mayor valor de la relación a/cm condujo a una disminución de la viscosidad; (ii) el incremento del contenido de MK elevó la viscosidad inicial, pero no afectó la tendencia decreciente de la viscosidad a mayores velocidades de corte; (iii) la CV tiene un comportamiento reológico dual, ya que se comporta como un fluidificante para contenidos menores al 20% y como espesante para contenidos superiores al 20%.

Estos efectos están asociados a la cinética de hidratación, lo cual influye principalmente en la viscosidad dependiente del tiempo. No obstante, la viscosidad en función de la tasa de corte se relacionó con las características físicas de las materias primas. Para las mezclas de 100%CP, el comportamiento más frecuente es la reducción de viscosidad al incrementar la velocidad de corte debido al fenómeno de adelgazamiento aparente, en el cual las partículas suspendidas tienden a orientarse en la dirección del flujo (Ouyang, Wang, et al., 2021). En este contexto, todas las mezclas presentaron un comportamiento de tipo pseudoplástico, es decir, los fluidos se tornaron más líquidos al aplicar el esfuerzo cortante (Ouyang, Wu, et al., 2021).

Asimismo, el efecto de los factores se analizó como sigue: un aumento en la relación a/cm condujo a una mayor cantidad de agua libre en la mezcla, lo que redujo la fricción entre las partículas y facilitó el flujo (H. Ye et al., 2019). En contraparte, la presencia de los MPS con alta absorción de agua como el MK, disminuyó el espesor de las capas de agua libre y provocó un aumento de la viscosidad inicial (Vance et al., 2013; S. Zhou et al., 2021). Por otro lado, la CV no absorbió el agua de manera significativa y contribuyó a la fluidez por su efecto de rodamiento (T. Yang et al., 2018; H. Ye et al., 2019). No obstante, contenidos altos de CV generaron una mayor tortuosidad por la colisión entre las partículas gruesas, lo que incrementó la viscosidad en ciertos casos (Vance et al., 2013; H. Ye et al., 2019).

En cuanto a las mezclas de MK-CB, la Figura 38b presentó las curvas de viscosidad. Las mezclas R5, R8, R10 y R12 presentaron la mayor viscosidad inicial y final, variando entre 2.26×10^5 y 2.70×10^5 MPa·s al inicio, y entre 2.97×10^3 y 6.75×10^3 MPa·s al final. Se

observaron efectos espesantes puntuales en R12 (a $\sim 40 \text{ s}^{-1}$) y en R5 (a $\sim 70 \text{ s}^{-1}$); asimismo, R10 mostró la mayor reducción de la viscosidad, mientras que R8 mantuvo la mayor viscosidad final, destacando por su alto contenido de MK y nula presencia de CB. La mezcla R6.1 también mostró un comportamiento típico, iniciando en $9.06 \times 10^4 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ y terminando en $1.87 \times 10^3 \text{ MPa}\cdot\text{s}$, sin distorsiones notables.

En contraste, la mezcla R4 tuvo la menor viscosidad inicial, seguida de R1. No obstante, sus comportamientos diferían al final del ensayo porque R4 presentó una fuerte disminución hasta 30 s^{-1} , seguida de una pendiente más suave hasta $4.74 \times 10^2 \text{ MPa}\cdot\text{s}$. Esta mezcla tuvo los mayores niveles para los contenidos de CB y de agua, sin MK. Por su parte, R1 presentó un efecto espesante entre 40 y 70 s^{-1} , similar al observado para el modelo de MK-CV. Por otro lado, las mezclas R2, R7, R9 y R11 mostraron una viscosidad inicial alrededor de $4.22 \times 10^4 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ y una viscosidad final próxima a $1.13 \times 10^3 \text{ MPa}\cdot\text{s}$. Todas carecían del contenido de MK excepto R2, la cual mostró la mayor reducción de viscosidad con el aumento de la velocidad de corte.

Los patrones de comportamiento observados para las mezclas de MK-CB concuerdan con las mezclas de MK-CV. El MK mantuvo un efecto espesante inicial sin interferir con la reducción de viscosidad a altas velocidades de corte. En cambio, el CB redujo la viscosidad general debido a su DTP que fue similar al CP, lo que favoreció la orientación en la dirección del flujo (Anjos et al., 2020; D.-H. Le et al., 2022). Aunque se ha reportado que la CB es un material absorbente, su absorción es lenta comparada con el MK, volviéndola menos relevante en la viscosidad dependiente de la tasa de corte (Gupta et al., 2022). Asimismo, se corroboró que el incremento de la relación a/cm tuvo un efecto reductor sobre la viscosidad, completando así la tendencia observada en los tres factores analizados.

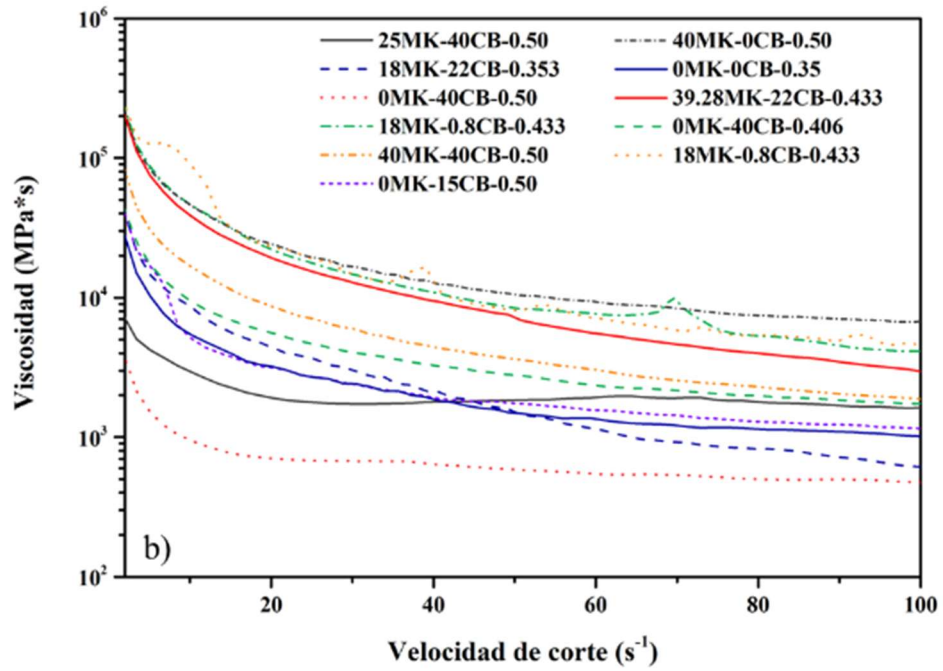
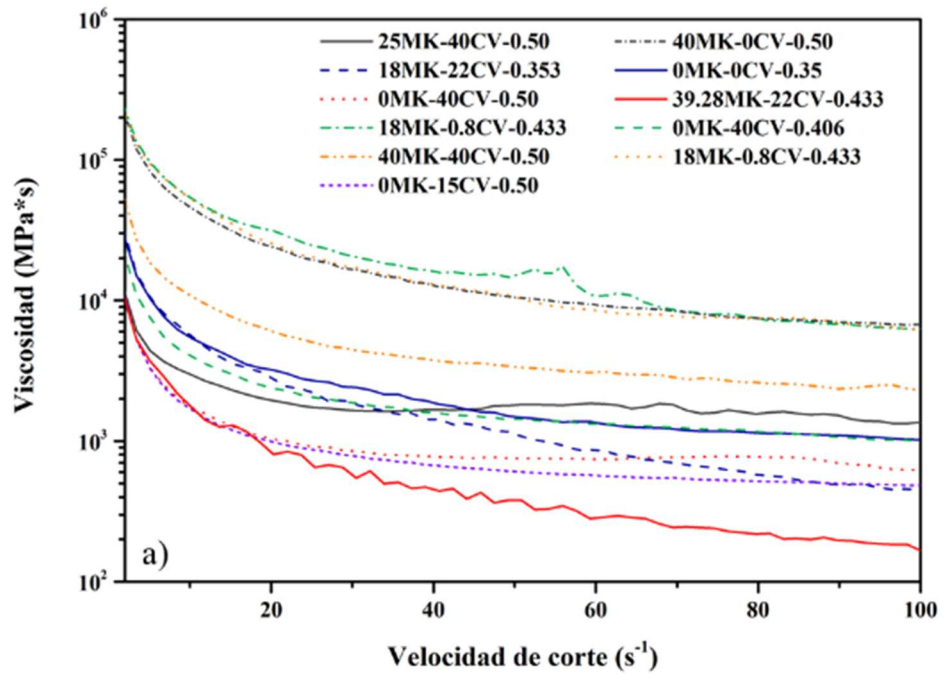


Figura 38. Viscosidad en función de la tasa de corte para las mezclas de a) MK-CV y b) MK-CB.

5.3.3. Influencia microestructural en el comportamiento reológico

El comportamiento reológico de las mezclas cementantes no solo depende de la relación a/cm o del contenido de aditivos, sino que está fuertemente condicionado por las características microestructurales de los aglutinantes que conforman el sistema. En este estudio, se identificó una correlación clara entre las propiedades reológicas y la microestructura de las combinaciones de CP con MK, CV y CB. En particular, las propiedades de acumulación estructural y comportamiento viscoelástico mostraron dependencia directa con el área superficial específica (BET), la distribución granulométrica y la morfología de las partículas. Las mezclas con un mayor contenido de MK presentaron un incremento en el esfuerzo de cedencia y en la acumulación estructural, asociado con su elevada área superficial y a la forma laminar de sus partículas que favorecen la formación de una estructura floculada más densa y resistente a la deformación. Esta estructura es susceptible a la ruptura por el esfuerzo de corte, generando un marcado comportamiento tixotrópico que es ventajoso para mantener la forma del filamento tras la extrusión en procesos de impresión 3D (M. Chen et al., 2020; Prem et al., 2024).

Por otro lado, las mezclas con CV se caracterizaron por una DTP más amplia y las partículas esféricas con menor área superficial, lo cual redujo la fricción interna de las mezclas. Estas condiciones favorecieron una reducción del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad plástica, lo que podría mejorar la extruibilidad, mientras que compromete la edificabilidad si no se compensa con un adecuado ajuste de la relación a/cm o la incorporación de materiales más reactivos o estructurantes (Navarrete et al., 2022; Vance et al., 2013).

Respecto a la CB, su comportamiento estuvo determinado por una combinación de características como su elevada porosidad, la forma irregular y el área superficial intermedia entre el MK y la CV. Esta morfología rugosa y no esférica tiende a incrementar la fricción interna de la mezcla, lo que se reflejó en un aumento moderado del esfuerzo de cedencia y la viscosidad. Además, su capacidad de absorción de agua afectó la lubricación interna, generando una microestructura más compacta con mayor resistencia al flujo.

El análisis conjunto de las curvas reológicas y los datos microestructurales sugirió que la interacción entre las partículas con diferente forma, tamaño y reactividad generó estructuras internas que controlaron la respuesta al esfuerzo. Esta interacción no fue meramente aditiva sino sinérgica, ya que se observó que ciertas combinaciones (p.ej., un contenido medio de MK y un contenido bajo de CB) exhibieron un equilibrio adecuado entre extrudabilidad y estabilidad estructural. Estas combinaciones se beneficiaron de la capacidad de relleno de las partículas finas del MK y del efecto lubricante de la CV, sin comprometer la retención de forma proporcionada por la estructura floculada inducida por el MK y por la CB.

En resumen, la influencia microestructural se observó en la organización de las partículas bajo los esfuerzos de corte, contribuyendo a la formación y destrucción de estructuras internas durante el flujo. La reología de estos sistemas ternarios puede entenderse como una consecuencia de las propiedades físicas de las materias primas y su capacidad de interacción bajo condiciones de corte, lo cual es fundamental para el diseño de tintas optimizadas para impresión 3D.

5.4. Evaluación estadística y ajuste de los modelos de predicción

Con el fin de optimizar las propiedades en estado fresco de las mezclas ternarias empleadas para impresión 3D, se implementó un enfoque estadístico basado en el diseño de mezclas. Se desarrollaron modelos de predicción mediante el MSR para las mezclas de MK-CV y de MK-CB, considerando como variables de respuesta a la fluidez, la edificabilidad y los tiempos de fraguado. A continuación, se presentan los resultados de la comparación entre los valores experimentales y predichos por los modelos, el análisis de residuos y la validación de los modelos generados.

5.4.1. Resultados observados vs valores predichos

Los modelos estadísticos ajustados permitieron obtener un buen grado de correlación entre los valores observados experimentalmente y los valores predichos. En el caso de las mezclas de MK-CV (Figura 39), el R^2 ajustado fue superior al 0.98 para la fluidez y los tiempos de fraguado y mayor a 0.93 para la edificabilidad, mientras que para las mezclas de MK-CB (Figura 40) los R^2 ajustado fueron superiores al 0.97 en todos los casos, lo que indicó una capacidad de predicción aceptable en ambos modelos.

Los valores predichos de fluidez, edificabilidad y tiempos de fraguado presentaron desviaciones mínimas de 4.46%, 1.73%, 10.60 min y 18.23 min para el modelo MK-CV y de 3.48%, 2.39%, 22.78 min y 14.03 min para el modelo MK-CB. En ambos modelos, los puntos experimentales se distribuyeron muy próximos a la línea de pendiente unitaria, evidenciando la alta precisión de los modelos.

Estos resultados confirmaron que las ecuaciones ajustadas representaron adecuadamente la influencia combinada de los factores de composición MK, CV, CB y CP y de la relación a/cm. Este tipo de ajuste es especialmente útil cuando los factores exhiben comportamientos no lineales o efectos de saturación, como ocurre en mezclas con mayores contenidos de MK, donde se observaron máximos locales en fluidez o fraguado antes de que la respuesta disminuyera al incrementar aún más el contenido del componente. Finalmente, la consistencia observada entre los valores predichos y experimentales valida la robustez y capacidad predictiva de los modelos, permitiendo su uso confiable en la optimización y simulación de mezclas para impresión 3D en construcción.

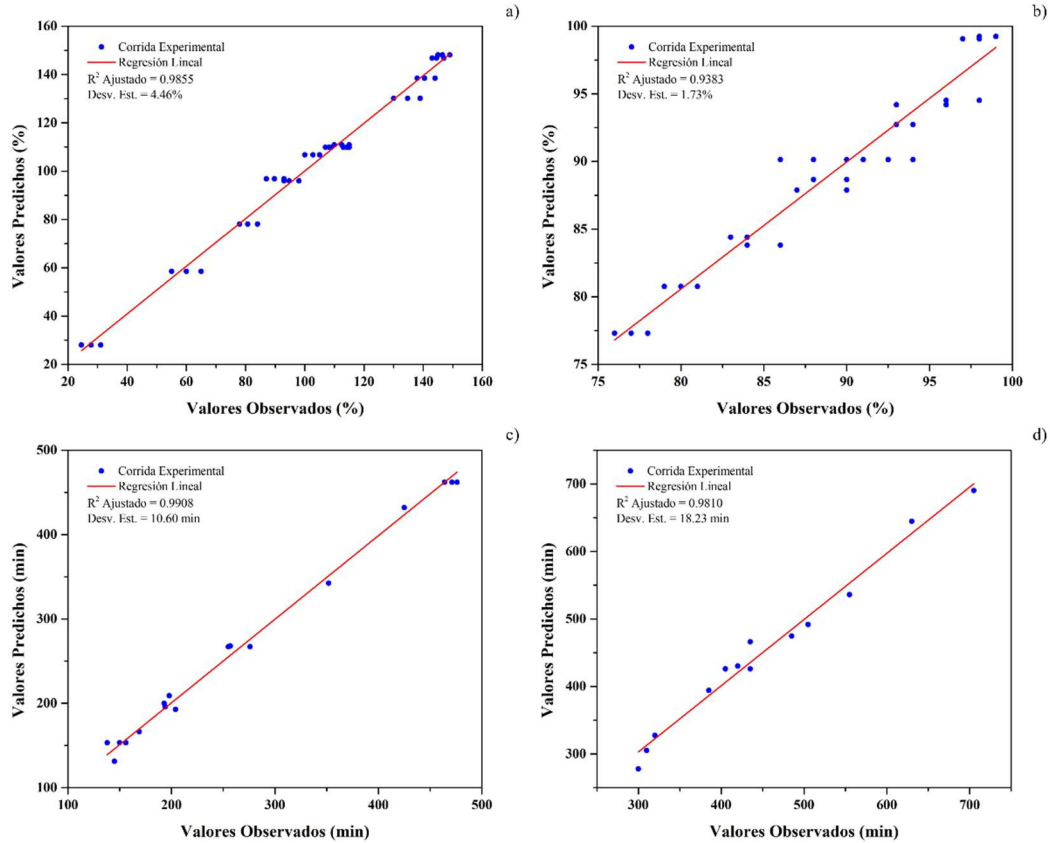


Figura 39. Resultados experimentales vs la predicción del modelo MK-CV para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.

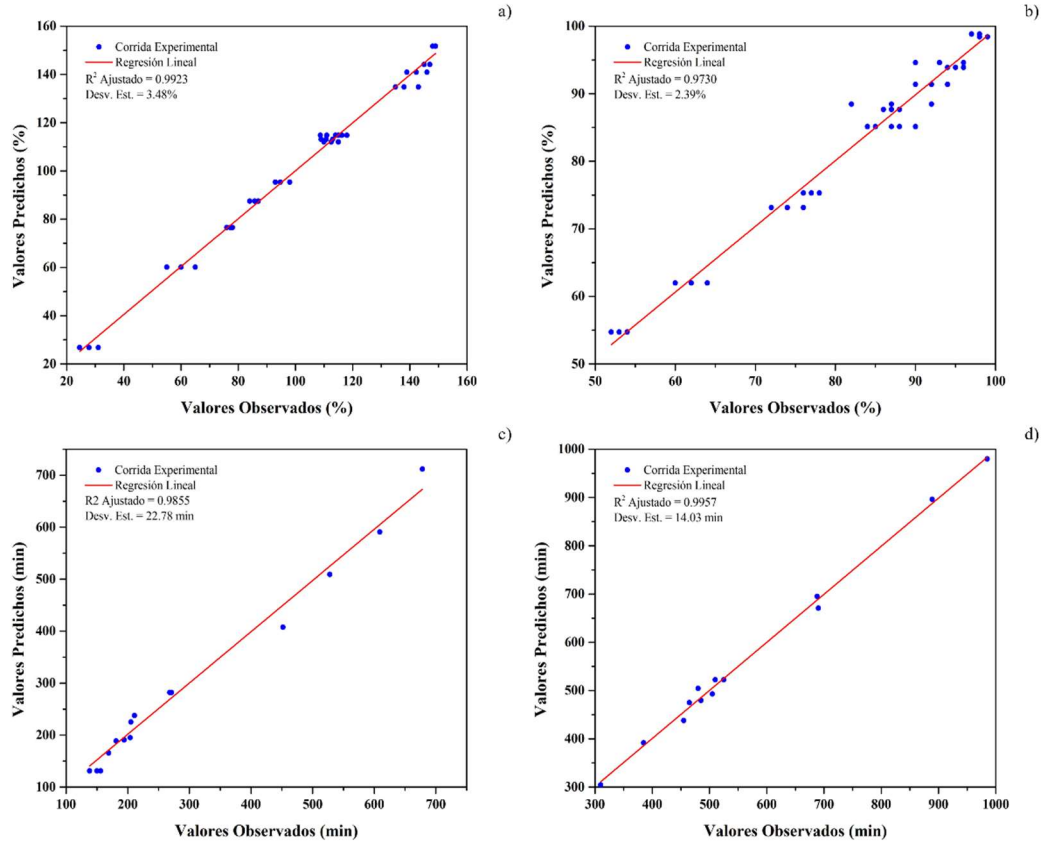


Figura 40. Resultados experimentales vs la predicción del modelo MK-CB para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.

5.4.2. Análisis de los residuos y el ajuste de los modelos de predicción

El análisis de los residuos se realizó graficando la diferencia entre los valores predichos y los valores observados para cada variable de respuesta. Los gráficos de residuos vs valores ajustados correspondientes a los sistemas MK-CV (Figura 41) y MK-CB (Figura 42) permitieron evaluar si los supuestos fundamentales de la regresión como homogeneidad de varianza y correcta especificación del modelo, se cumplen dentro del espacio experimental definido. En términos generales, la distribución de los residuos para las cuatro propiedades evaluadas mostró un comportamiento aleatorio alrededor de la línea horizontal de referencia, indicando que la variabilidad del error no depende del nivel de respuesta y que el modelo no presenta indicios de estructura no capturada por la función matemática empleada.

En el caso del modelo MK-CV, tanto la fluidez (Figura 41a) como la edificabilidad (Figura 41b) mostraron nubes de puntos dispersas uniformemente alrededor del residuo cero, sin patrones ascendentes, descendentes ni agrupamientos que indicaran cambios en la varianza o la necesidad de términos adicionales. Este comportamiento respaldó que la superficie de respuesta ajustada describió adecuadamente la relación entre los factores MK, CV y relación a/cm y las respuestas, manteniendo una varianza del error prácticamente constante en todo el rango de valores predichos. Para los tiempos de fraguado inicial (Figura 41c) y final (Figura 41d), aunque algunos residuos presentaron magnitudes ligeramente mayores, éstos no siguieron trayectorias sistemáticas ni generaron formas típicas de mala especificación, como los patrones en embudo o de curvaturas progresivas. La presencia ocasional de residuos más amplios se interpretó como parte de la variabilidad inherente del proceso de hidratación, especialmente sensible a interacciones químicas y microestructurales entre el MK y la CV, pero no comprometió la validez del modelo propuesto.

Un comportamiento similar se observó en el modelo MK-CB. Los gráficos de fluidez (Figura 42a) y edificabilidad (Figura 42b) exhibieron una dispersión aleatoria sin tendencias asociadas a los valores ajustados, confirmando que la estructura del modelo fue adecuada para capturar las variaciones inducidas por el contenido de CB y su interacción con la relación a/cm. Para los tiempos de fraguado inicial (Figura 42c) y final (Figura 42d), aunque los residuos alcanzaron amplitudes mayores debido a que las respuestas experimentales presentaron rangos más amplios, la proporción relativa de dicha variación siguió siendo aceptable. La distribución de los puntos no sugirió dependencia de la varianza con respecto a la magnitud del fraguado ni evidencia de un patrón sistemático que indicara omisión de términos relevantes. Esto sugirió que la respuesta del modelo MK-CB, aun siendo más variable por la naturaleza orgánica y heterogénea de la CB, fue representada de manera suficientemente estable por el modelo propuesto.

En conjunto, el comportamiento aleatorio de los residuos en ambos sistemas confirmó que los modelos no presentaron contravenciones significativas a los supuestos de homocedasticidad ni indicios de relaciones no lineales no capturadas. La ausencia de patrones estructurados respaldó que la forma funcional empleada es estadísticamente

adecuada para describir las propiedades evaluadas y, por tanto, permitió utilizar los modelos derivados para la predicción y optimización de formulaciones dentro del dominio experimental estudiado.

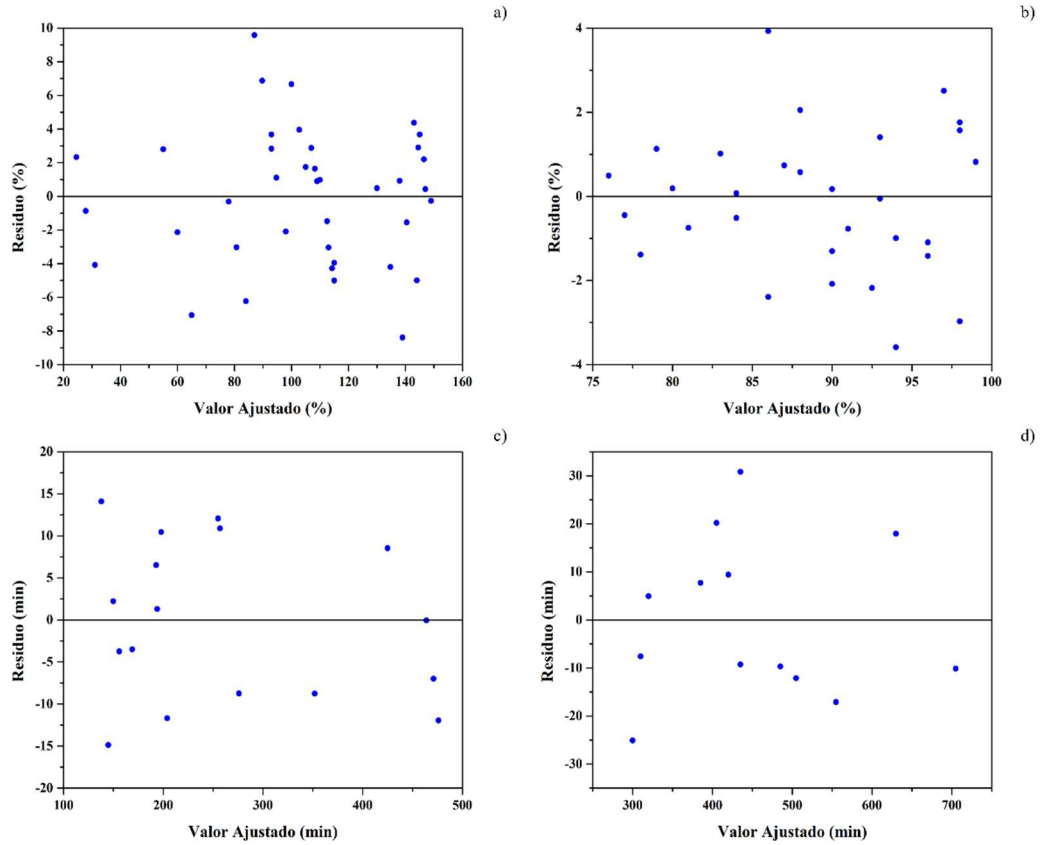


Figura 41. Residuos vs valores ajustados del modelo MK-CV para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.

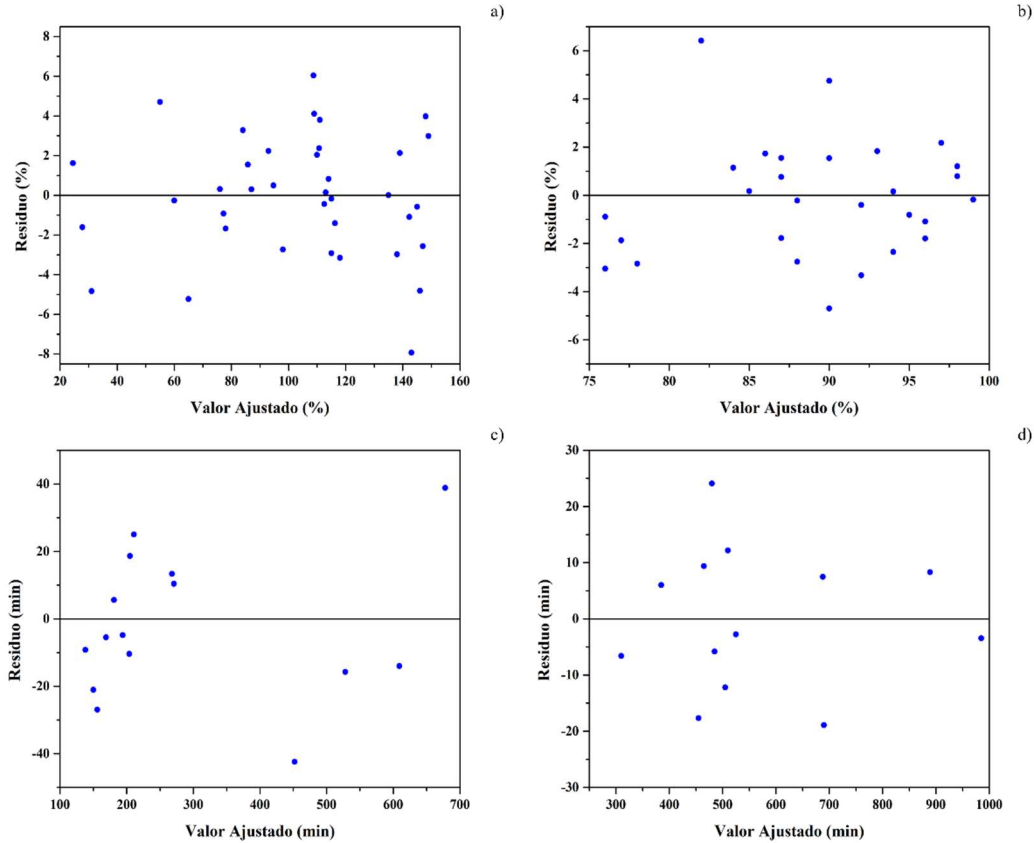


Figura 42. Residuos vs valores ajustados del modelo MK-CB para a) fluidez, b) edificabilidad, c) tiempo de fraguado inicial y d) tiempo de fraguado final.

5.4.3. Modelos de optimización obtenidos

La Tabla 23 y la Tabla 24 presentan los modelos codificados obtenidos para las mezclas MK-CV y MK-CB, respectivamente, revelando patrones claros sobre el desempeño de los factores en el comportamiento de las mezclas en estado fresco.

En ambos sistemas, la fluidez estuvo dominada por efectos lineales de magnitud opuesta. Por un lado, el MK presentó el coeficiente negativo más alto, sugiriendo que es el principal agente reductor de la fluidez debido a su elevada superficie específica y demanda de agua (Arslan et al., 2024); por otro lado, la relación a/cm fue el factor con mayor efecto positivo, actuando como el mecanismo primario de lubricación y separación de partículas (Dai et al., 2020). Tanto la CV como la CB aportaron mejoras moderadas en la fluidez, aunque el modelo MK-CB introdujo curvaturas adicionales asociadas al término cuadrático, sugiriendo que la influencia de la CB es más compleja y depende del rango de dosificación. Esto pudo deberse a la elevada porosidad y a la granulométrica de la CB,

que favorecieron una absorción de agua no lineal y una redistribución heterogénea del líquido en la mezcla, generando zonas localmente más o menos lubricadas y, por ende, una respuesta reológica dependiente del nivel de dosificación (D. H. Le et al., 2018). Las interacciones en ambos modelos confirmaron que los efectos negativos del MK pueden mitigarse parcialmente cuando las mezclas contienen suficiente agua o cantidades adecuadas de ceniza, siendo esta mitigación más evidente en el sistema con CB.

La edificabilidad en ambos modelos respondió de manera inversa a la fluidez, donde el MK se convirtió en el principal agente de mejora de la estabilidad estructural, con un efecto el doble de intenso en el modelo MK-CB, mientras que la relación a/cm actuó como el factor más perjudicial al promover la pérdida de cohesión y el ahuellamiento. Este comportamiento se asocia a que un mayor contenido de agua reduce la tensión de cedencia y la capacidad de las partículas para formar estructuras portantes, debilitando el soporte inmediato después de la extrusión y facilitando deformaciones bajo su propio peso (Diniz et al., 2023), mientras que el MK produce el efecto contrario al tener una alta capacidad de absorción de agua y formación de flóculos estables que incrementan la estabilidad interna de las mezclas (Güllü & Ali Agha, 2021; Tebbal & Abidine Rahmouni, 2019). En este caso, la influencia de la CV y la CB fue menor, aunque la CB presentó interacciones más marcadas, sugiriendo que su presencia modificó la estabilidad interna de la mezcla de un modo más sensible, debido a que la CB contiene fracciones más irregulares y con texturas reactivas que incrementan la fricción interna y la formación de puentes cortos entre partículas, lo cual hace que pequeñas variaciones en su contenido alteren de manera más notable la rigidez inicial y la resistencia a la deformación de la mezcla (Moretti et al., 2018).

La dinámica de los tiempos de fraguado mostró contrastes aún más pronunciados entre los modelos. En el sistema MK-CV, los tiempos inicial y final estuvieron controlados por un equilibrio entre la aceleración inducida por el MK y el retardo proporcionado por el agua, con influencias moderadas de la CV; mientras que en el sistema MK-CB se observó un comportamiento mucho más extremo, en el que el MK adquirió un rol acelerante de mayor magnitud y la CB se convirtió en un retardador potente, casi un orden de magnitud más efectivo que la CV. Esta dualidad MK-CB sugirió una competencia entre aceleración y

retardo que explica la fuerte sensibilidad de los tiempos de fraguado encontrados en el modelo. Lo anterior puede atribuirse a que el MK acelera la hidratación temprana mediante la nucleación de geles C–S–H, mientras que la CB libera compuestos solubles que complejan iones calcio y retrasan la formación de productos hidratados, generando una competencia fuerte entre mecanismos acelerantes y retardantes dentro del sistema (Kim et al., 2021). Adicionalmente, los términos cuadráticos, especialmente en el sistema MK-CB, mostraron que tanto el MK como la CB y la relación a/cm presentaron comportamientos no lineales, indicando que las propiedades no evolucionaron de manera proporcional a la dosificación y que existen rangos donde los efectos se intensifican o se atenúan abruptamente, lo que podría deberse a que, a partir de ciertas concentraciones, tanto el MK como la CB modifican la relación superficie/agua disponible y la densidad de empaquetamiento, provocando transiciones entre estados dominados por floculación, dispersión o gelificación parcial (Bheel et al., 2022; Nikhade & Nag, 2022).

En conjunto, los modelos permitieron entender cómo cada componente contribuyó a la respuesta reológica y cinética de hidratación, con el MK como agente de estructuración y aceleración, la CV como un modificador suave tanto de fluidez como de fraguado y la CB como un retardador de hidratación con influencia curvada, y la relación a/cm como el factor que amplifica o reduce todos estos efectos dependiendo del nivel en que se encuentre.

Tabla 23. Modelos de regresión codificados para mezclas MK-CV.

	Constante	A	B	C	AB	AC	BC	A ²	B ²	C ²
Fluidez (%)	111.77	-31.06	8.13	20.85	2.17	8.21	-4.94	-8.4	-	-
Edificabilidad (%)	89.61	5.68	-1.43	-3.86	-	-1.33	-	-	-	-
TFI (min)	235.99	-73.18	6.56	74.72	-	-53.37	-	-41.05	23.32	35.95
TFF (min)	335.42	-80.48	-24.37	91.98	-	-31.52	20.09	15.11	54.26	85.67

A – Contenido de MK (%)

B – Contenido de CV (%)

C – Relación a/cm

Tabla 24. Modelos de regresión codificados para mezclas MK-CB.

	Constante	A	B	C	AB	AC	BC	A ²	B ²	C ²
--	-----------	---	---	---	----	----	----	----------------	----------------	----------------

Fluidez (%)	109.08	-30.95	8.30	23.19	4.46	7.20	-3.89	-7.72	8.10	-4.69
Edificabilidad (%)	84.15	10.73	-2.81	-8.32	1.18	4.57	-1.83	-	-	-
TFI (min)	315.87	-137.6	59.95	95.67	-39.79	-65.88	-	-	-	-
TFF (min)	558	-144.2	25.25	124.6	-40.84	-52.67	28.06	12.96	-36.12	29.37

A – Contenido de MK (%)

B – Contenido de CB (%)

C – Relación a/cm

La interpretación de los modelos de regresión en unidades no codificadas permitió comprender la magnitud real de la influencia que ejercen el MK, la CV, la CB y la relación a/cm sobre las propiedades frescas de los sistemas MK-CV y MK-CB. En el modelo MK-CV (Tabla 25), la fluidez (Ec. (17)) mostró una clara dominancia del efecto lineal de la relación a/cm, cuyo coeficiente positivo fue el más elevado del modelo, evidenciando que pequeñas variaciones en el contenido de agua ocasionaron incrementos sustanciales en la trabajabilidad (Z. Zhang et al., 2025). Este comportamiento contrasta con el efecto negativo del MK, que redujo la fluidez en proporción directa a su dosificación y de manera más pronunciada en niveles elevados, como lo indica el término cuadrático asociado (Y. Chen, Romero Rodriguez, et al., 2020). Por su parte, la CV generó un incremento moderado en la fluidez, aunque con una eficiencia cercana a la mitad de la observada para el efecto reductor del MK, mientras que los términos de interacción, particularmente el correspondiente a MK*a/cm, mostraron que incrementos de agua pueden compensar de manera significativa la reducción de fluidez inducida por el MK (Saboo et al., 2019; T. Yang et al., 2018). Estos comportamientos son atribuibles a las ideas antes mencionadas anteriormente.

En cuanto a la edificabilidad del sistema MK-CV (Ec. (18)), el análisis confirmó que la relación a/cm fue el factor más determinante y ejerció un efecto negativo, coherente con la pérdida de cohesión y estabilidad que el exceso de agua provoca en mezclas cementicias extruidas (Joh et al., 2020). Los efectos del MK y la CV fueron positivos pero marginales, indicando que su contribución a la resistencia estructural temprana es limitada cuando la mezcla posee suficiente agua como para diluir la capacidad de floculación y formación de estructuras portantes (Navarrete et al., 2020, 2022). Esta relación inversa entre fluidez y

edificabilidad se reflejó de forma directa en los coeficientes negativos asociados al agua en ambos modelos, es decir, el modelo de edificabilidad del sistema MK-CB (Ec. (22)) evidenció un comportamiento similar al reportado por MK-CV.

El comportamiento de los tiempos de fraguado en el sistema MK-CV (Ec. (19) y Ec. (20)) reveló una sensibilidad aún mayor a la variación de la relación a/cm . Mientras que el MK redujo los tiempos inicial y final con un efecto acelerante consistente, la influencia del agua se reflejó en coeficientes lineales y cuadráticos extraordinariamente elevados, lo cual demostró que el retardo inducido por la relación a/cm crece de forma no lineal y se intensifica en los niveles superiores, debido a lo discutido anteriormente (Dai et al., 2020; Kasaniya et al., 2024). Asimismo, la CV tuvo una participación moderada, actuando como un modificador suave del fraguado, y únicamente en interacción con el agua mostró una prolongación perceptible del tiempo final.

El sistema MK-CB (Tabla 26) exhibió patrones similares, aunque con intensidades mucho más marcadas. En particular, la fluidez (Ec. (21)) mostró una sensibilidad extrema al parámetro a/cm , cuyo coeficiente lineal fue aproximadamente cuatro veces mayor que en el sistema MK-CV. Este resultado evidenció que la trabajabilidad en presencia de CB depende fuertemente de la dosificación de agua, debido a la mayor irregularidad morfológica y rugosidad superficial de este material, que incrementan la fricción interna y demandan mayor contenido líquido para superar los puentes físicos entre partículas (Gupta et al., 2022; Moretti et al., 2018). La contribución del CB a la fluidez fue positiva, aunque con una magnitud baja, muy inferior a la de la CV; sin embargo, su influencia cuadrática evidenció que su efecto no fue constante en todo el rango y que, a partir de ciertos niveles de dosificación, la CB modificó el empaquetamiento y la redistribución de agua de maneras complejas (D. H. Le et al., 2018). El término cuadrático asociado a la relación a/cm también fue notablemente alto y negativo, lo cual indicó que, aunque el agua mejora la fluidez de forma predominante, su efecto se atenúa rápidamente cuando la mezcla alcanza relaciones elevadas, generando una curva descendente en el comportamiento (Kasaniya et al., 2024; Khatib, 2008).

Los tiempos de fraguado del sistema MK-CB (Ec. (23) y Ec. (24)) presentaron contrastes marcados respecto al sistema MK-CV. La CB actuó como un potente retardador, con

coeficientes positivos de gran magnitud tanto en el tiempo inicial como en el final, lo cual se atribuye a la presencia de compuestos orgánicos solubles y partículas altamente porosas que interfieren con la disponibilidad de iones calcio y con la formación de productos hidratados en las primeras etapas (Akkarapongtrakul et al., 2017). De manera simultánea, el MK mantuvo su papel acelerante, y en combinación con la relación a/cm generó interacciones pronunciadas de signo negativo, lo cual reveló que la actividad puzolánica y la cinética acelerada del MK pueden dominar parcialmente los efectos retardantes cuando la mezcla posee suficiente agua para facilitar la dispersión de partículas (Kim et al., 2021). No obstante, el comportamiento no lineal de la relación a/cm fue, nuevamente, el factor dominante en el retardo del fraguado final, como lo demostró el coeficiente cuadrático, el más elevado del modelo, confirmando que el aumento del agua afecta de manera exponencial la progresión de la hidratación (Shahzad et al., 2020).

En conjunto, la evaluación de los modelos no codificados mostró que la relación a/cm fue el modulador central de las propiedades en estado fresco y del fraguado en ambos sistemas, aunque con una intensidad significativamente mayor en las mezclas con CB. La CV demostró ser más eficiente como agente lubricante, mientras que la CB tuvo un impacto decisivo en la cinética de fraguado. El MK mantuvo su papel dual como agente reductor de fluidez y acelerante del fraguado, modulando la estructuración temprana de las mezclas. Estas tendencias diferenciadas explican la necesidad de ajustar los rangos óptimos de dosificación de cada componente según el comportamiento deseado y evidencian la relevancia de las interacciones no lineales identificadas en los modelos.

Tabla 25. Ecuaciones de regresión en unidades no codificadas para mezclas MK-CV.

$F_{CV} = 28.9 - 3.15A + 1.70B + 234.4C - 0.02A^2 + 0.005AB + 5.47AC - 3.29BC$	Ec. (17)
$E_{CV} = 99.68 + 0.28A + 0.31B - 33.70C - 0.89BC$	Ec. (18)
$TFI_{CV} = 713 + 15.57A - 2B - 3725C - 0.10A^2 + 0.06B^2 + 6391C^2 - 35.58AC$	Ec. (19)
$TFF_{CV} = 2675 + 3.40A - 12.34B - 11567C + 0.03A^2 + 0.13B^2 + 15230C^2 - 21.01AC + 13.39BC$	Ec. (20)

A – Contenido de MK (%)

B – Contenido de CV (%)

C – Relación a/cm

F_{CV} – Fluidez (%) para el modelo MK-CV

E_{CV} – Edificabilidad (%) para el modelo MK-CV
 TFI_{CV} – Tiempo de Fraguado Inicial (min) para el modelo MK-CV
 TFF_{CV} – Tiempo de Fraguado Final (min) para el modelo MK-CV

Tabla 26. Ecuaciones de regresión en unidades no codificadas para mezclas MK-CB.

$F_{CB} = -126.7 - 3.04A + 0.48B + 974C - 0.02A^2 + 0.02B^2 - 834C^2 + 0.01AB + 4.80AC - 2.59BC$	Ec. (21)
$E_{CB} = 140.05 - 0.82A + 0.32B - 147.4C + 0.003AB + 3.05AC - 1.22BC$	Ec. (22)
$TFI_{CB} = -558.7 + 13.77A + 4.84B + 2154C - 0.10AB - 43.92AC$	Ec. (23)
$TFF_{CB} = 711 + 8.46A - 1.03B - 2449C + 0.03A^2 - 0.09B^2 + 5222C^2 - 0.10AB - 35.11AC + 18.70BC$	Ec. (24)

A – Contenido de MK (%)
B – Contenido de CB (%)
C – Relación a/cm
 F_{CB} – Fluidez (%) para el modelo MK-CB
 E_{CB} – Edificabilidad (%) para el modelo MK-CB
 TFI_{CB} – Tiempo de Fraguado Inicial (min) para el modelo MK-CB
 TFF_{CB} – Tiempo de Fraguado Final (min) para el modelo MK-CB

5.5. Selección y análisis de mezclas óptimas

Con el propósito de identificar las mezclas viables como tintas para impresión 3D, se llevó a cabo la selección de mezclas óptimas a partir de los modelos de predicción obtenidos. Este proceso se enfocó en determinar los rangos adecuados para los de las materias primas, logrando mezclas que cumplieran simultáneamente con los criterios de fluidez, edificabilidad y tiempo de fraguado requeridos para una la extrusión estable y la construcción de capas sucesivas. A continuación, se describen los criterios de printabilidad considerados, los resultados obtenidos mediante simulaciones para la optimización, el análisis y depuración de mezclas potenciales, así como una evaluación comparativa entre los sistemas de MK-CV y de MK-CB.

5.5.1. Establecimiento de los rangos óptimos según criterios de printabilidad

Inicialmente, se construyó un diagrama con rangos de printabilidad que integró simultáneamente tres propiedades críticas para los procesos de extrusión, siendo estas la fluidez, la edificabilidad y el tiempo de fraguado inicial (Figura 43). Este diagrama permitió comparar directamente el comportamiento de todas las mezclas formuladas para los sistemas MK-CV y MK-CB, contrastándolas con los umbrales reportados en la literatura para materiales base cemento printables.

La distribución de los puntos mostró que la edificabilidad se comporta como una frontera estructural crítica, ya que los valores por debajo de ~85% se asocian con mezclas incapaces de soportar la deposición de capas subsecuentes (zona de falla por baja edificabilidad) (Joh et al., 2020), aun cuando presentaran una fluidez dentro del intervalo teóricamente favorable. De modo similar, los valores extremos de fluidez delimitaron dos regiones operativas bien diferenciadas. Por un lado, mezclas con fluidez muy baja exhiben una consistencia excesivamente rígida, difícil de extruir y proclive al bloqueo en tuberías o boquillas de impresión (zona de falla por baja extrudabilidad) (Al-Tamimi et al., 2023); por otro lado, los valores de fluidez demasiado altos conducen a fallas por pérdida de forma, especialmente cuando el avance del fraguado no era suficiente para generar rigidez temprana (Roussel, 2018).

A partir de estas tendencias emergió una zona operativa donde la extrudabilidad y la estabilidad estructural se equilibran, definiendo lo que puede considerarse la ventana funcional de impresión. Dentro de este dominio, las mezclas se ubicaron típicamente en un intervalo de fluidez que osciló entre 80% y 110%, acompañado de edificabilidades superiores al 85% (Kruger et al., 2019; Papachristoforou et al., 2018; Robayo-Salazar et al., 2023; Roussel, 2018). Los tiempos de fraguado inicial ubicados en torno a 150–300 minutos resultaron especialmente favorables, ya que proporcionan un margen de trabajo adecuado para la deposición continua de capas, sin retrasar el desarrollo de rigidez necesaria para evitar deformaciones acumuladas en altura (Bentz & Ferraris, 2010; Shahzad et al., 2020).

La comparación entre ambos sistemas manifestó diferencias relevantes. El modelo MK-CV mostró una mayor concentración de formulaciones dentro o cerca de la zona óptima, lo que sugiere un comportamiento más estable y predecible entre la fase fresca y las primeras etapas del fraguado (Kugler et al., 2022; T. Yang et al., 2018). En contraste, las mezclas MK-CB manifestaron una tendencia clara a ubicarse en edificabilidades menores a las de MK-CV y con valores de fluidez mayores, lo que se relaciona con el efecto retardante característico de la CB (Jittin & Bahurudeen, 2022; Kolawole et al., 2021; SANTOS et al., 2019). Si bien este retardo favorece la manipulación prolongada, también retrasa el desarrollo de resistencia temprana, incrementando la probabilidad de

deformación durante la impresión. De este modo, la combinación MK-CB requiere una calibración más estricta del contenido de MK y de la relación a/cm para contrarrestar el retardo e incrementar la edificabilidad en el momento crítico de la deposición capa a capa.

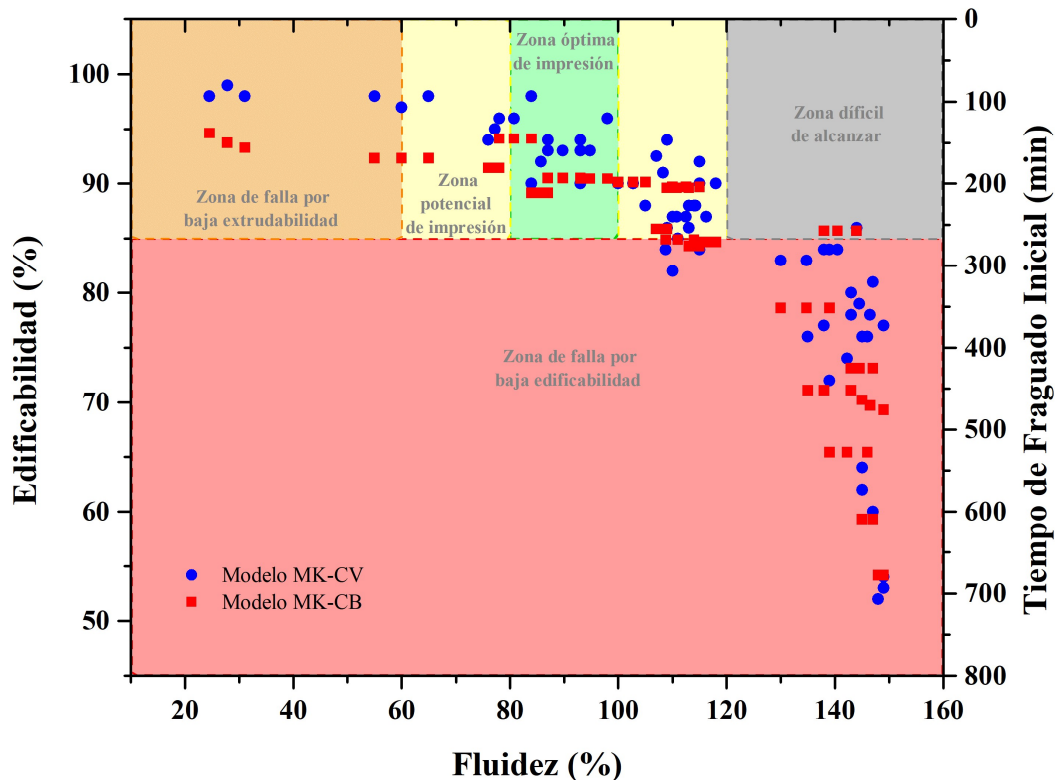


Figura 43. Rangos de printabilidad por triple desempeño para mezclas base cemento. A partir de este análisis integrado del diagrama y considerando el comportamiento observado de ambos sistemas respecto a fluidez, edificabilidad y tiempo de fraguado, se definieron los límites operativos que permiten seleccionar formulaciones con desempeño adecuado para impresión 3D. Con base en esto, la Tabla 27 resume los rangos óptimos para las mezclas formuladas, así como del comportamiento reológico expresado mediante la R_{thix} y la A_{thix} .

Tabla 27. Rangos de valores óptimos en las propiedades aplicables a impresión 3D

Propiedad aplicable a impresión 3D	Rango de valores óptimos	
	MK-CV	MK-CB
Fluidez	95 a 110%	
Edificabilidad	90 ± 5%	
Tiempos de fraguado	TFI > 150 minutos	
R_{thix}	~8.2 MPa/s	~9.3 MPa/s
A_{thix}	> 0.5 MPa/s	> 0.6 MPa/s

En primera instancia, destacó que la fluidez se acercó al rango estandarizado por la norma ASTM-C109 de 110 ± 5 %. Las mezclas con fluidez en dicho rango presentaron una edificabilidad cercana al ~ 85 %, un valor considerado como indicativo de una alta capacidad de apilamiento y estabilidad estructural temprana (Chang et al., 2023; Robayo-Salazar et al., 2023). Sin embargo, con la finalidad de tender a entrar a la zona óptima printable, se ajustó el parámetro disminuyendo la fluidez permisible para las mezclas evaluadas.

En cuanto al tiempo de fraguado inicial, se observó que la mayoría de las mezclas óptimas superaron los 150 minutos, ofreciendo una ventana de trabajabilidad adecuada para procesos continuos de impresión y mitigando el riesgo de fraguado prematuro que podría afectar la adhesión entre las capas.

Con respecto del comportamiento reológico, la tasa de refloculación mostró una tendencia diferente según el tipo de mezcla. En mezclas de MK-CV, los valores se ubicaron alrededor de 8.2 MPa/s, mientras que en MK-CB alcanzaron hasta 9.3 MPa/s, lo que indicó una reconstrucción estructural más acelerada (Navarrete et al., 2022). Por su parte, la tasa de estructuración se mantuvo por encima de 0.5 MPa/s en ambos tipos de mezclas, siendo ligeramente mayores para MK-CB (> 0.6 MPa/s), sugiriendo una mayor capacidad de ganancia de resistencia estructural con el tiempo de reposo (Kruger et al., 2019).

Estos valores son coherentes con otras investigaciones para mezclas para impresión 3D basadas en CP (Kruger et al., 2019; Navarrete et al., 2020). Así, los intervalos resumidos en la Tabla 27 fueron utilizados como criterios de restricción durante el proceso de optimización multivariable para la selección de mezclas con alto potencial de impresión.

5.5.2. Resultados de la simulación para los modelos de MK-CV y de MK-CB

Se llevaron a cabo simulaciones con el objetivo de optimizar las mezclas para impresión 3D, obteniendo 300 mezclas para cada uno de los modelos, donde los factores se distribuyeron en los rangos de MK de 0 a 40%, CV/CB de 0 a 40% y relación a/cm de 0.35 a 0.50. No obstante, las simulaciones iniciales no mostraron distinción en el contenido combinado de MK con las cenizas, superando el límite permitido del 40%, por lo que se realizó una primera depuración, eliminando todas las combinaciones que no

cumplieran este criterio, tal como se muestra en la Figura 44, quedando un total de 141 y 144 mezclas potenciales para MK-CV y MK-CB, respectivamente.

Para las mezclas de MK-CV (Figura 44a), se encontró una distribución de formulaciones, en el cual el contenido de CV varió desde el 0% hasta el 25.58%, el contenido de MK varió desde el 4.25% hasta el 40%, mientras que la relación a/cm varió desde 0.35 hasta 0.50. Para las mezclas de MK-CB (Figura 44b), el contenido de CB varió entre el 0% y el 29.64%, el contenido de MK varió entre el 3.33% y el 40%, mientras que la relación a/cm varió desde 0.35 hasta 0.50.

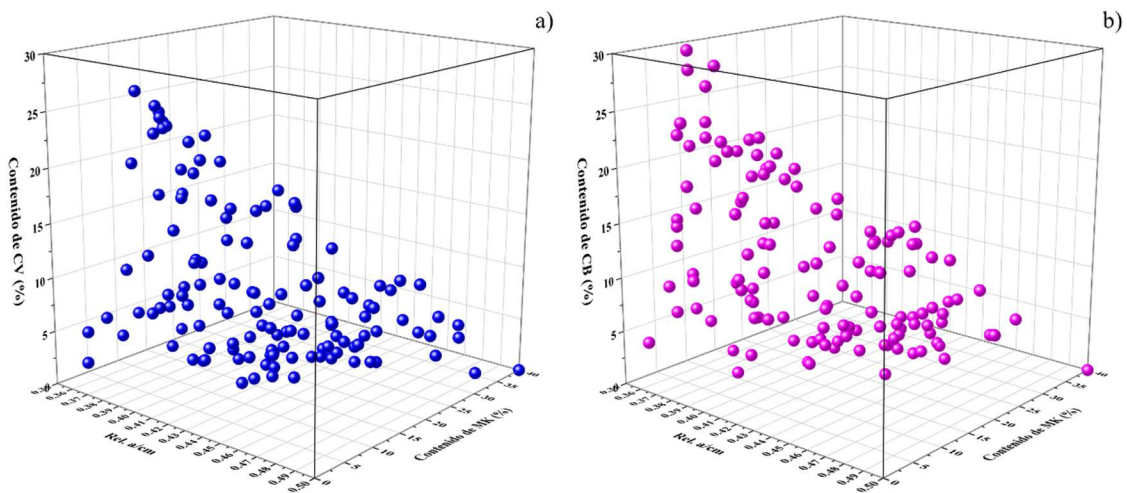


Figura 44. Simulación de mezclas imprimibles para los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.

5.5.3. Análisis estadístico y depuración de las mezclas potenciales para impresión 3D

Debido a la gran cantidad de mezclas obtenidas de la simulación, se implementó un riguroso análisis estadístico para identificar las combinaciones más adecuadas, denominadas "mezclas potenciales". Este proceso de depuración tuvo como objetivo reducir el conjunto de datos sin perder información crítica sobre el comportamiento de las mezclas.

El análisis estadístico incluyó la obtención de los siguientes parámetros para cada factor (contenido de CB/CV, contenido de MK y Rel. a/cm) en ambos tipos de mezclas:

- a) Modas: Valores más frecuentes dentro de la distribución de cada factor.
- b) Medias: Promedios aritméticos de los valores de cada factor.

- c) Medianas: Valores centrales que dividen la distribución en dos mitades.
- d) Desviación Estándar: Medida de la dispersión de los datos alrededor de la media.
- e) Coeficientes de Variación: Medida de la variabilidad relativa, útil para comparar la dispersión entre factores con diferentes escalas.
- f) Mínimos y Máximos: Los valores extremos observados para cada factor.

A partir de este análisis estadístico, se realizó una depuración que permitió reducir significativamente el número de mezclas a considerar. De las 144 mezclas de MK-CV simuladas inicialmente, se seleccionaron 43 mezclas como las más representativas (Figura 45a), concentrándose la mayor parte de estas en contenidos de CV menores a 20%, contenido de MK de alrededor del 20% y relaciones a/cm en el rango medio del modelo. Para el modelo de MK-CB, de las 144 mezclas simuladas, se identificaron 63 mezclas como las más significativas (Figura 45b), con una distribución similar al espectro de las 144 mezclas simuladas. Estos puntos representan las combinaciones óptimas según los criterios del análisis.

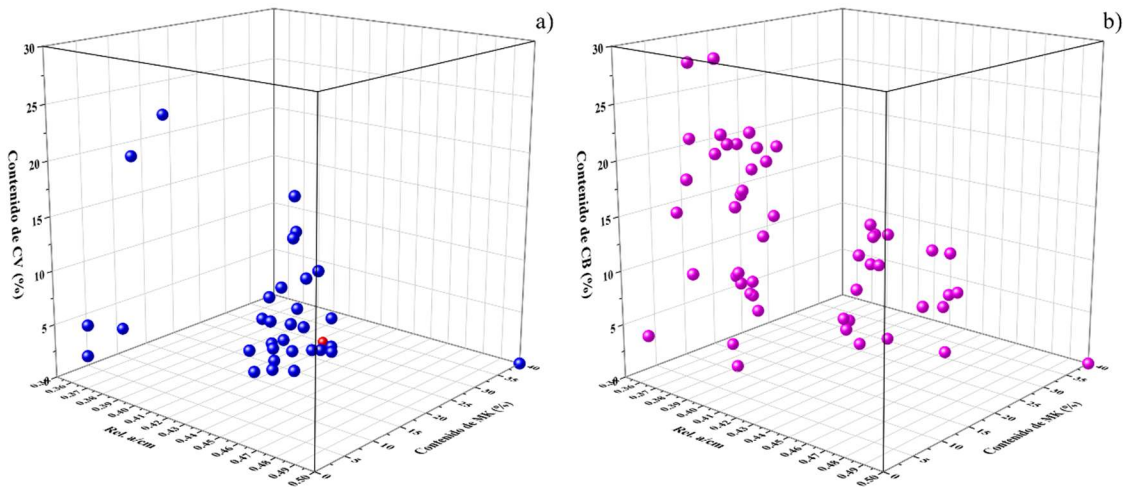


Figura 45. Selección de mezclas en su primera depuración con base en estadística para los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.

Finalmente, se realizó una última depuración que consistió en la eliminación de duplicados y redundancias, en la búsqueda de la cobertura total del espacio experimental, en la eliminación de extremos no imprimibles por deficiencias esperadas en alguna de las propiedades y en la priorización de combinaciones con potencial printabilidad.

Para el modelo MK-CV se seleccionaron 9 mezclas (Tabla 28), donde, los factores se distribuyeron en rangos de contenido de CV entre 0.63 y 8.94%, contenido de MK entre 10.74 y 24.90% y relación a/cm entre 0.35 y 0.43. Estos rangos fueron congruentes, ya que representaron las zonas donde el material mantiene simultáneamente fluidez suficiente para la extrusión y endurecimiento temprano adecuado para la edificabilidad, evitando tanto los efectos de lubricación excesiva asociados a relaciones a/cm más altas o contenido elevados de CV como la pérdida de cohesión observada en valores más bajos (Z. Zhou et al., 2024). Asimismo, los contenidos de MK seleccionados abarcan el intervalo donde su aporte a la refloculación y estructuración es significativo sin generar incrementos excesivos en la demanda de agua (M. Chen et al., 2020; Y. Chen et al., 2023), mientras que los niveles de CV se mantuvieron dentro del rango en el que actúa como un modificador suave de la fluidez sin inducir segregación, poca edificabilidad o retardos de hidratación (Bentz & Ferraris, 2010; Cheng et al., 2017). En conjunto, estos límites permiten capturar la variabilidad relevante del sistema y representan el dominio operativo donde las mezclas resultan imprimibles y estadísticamente útiles para ajustar los modelos predictivos.

Tabla 28. Mezclas seleccionadas para evaluación de printabilidad del modelo MK-CV.

Mezcla	MK (%)	CV (%)	Relación a/cm	Justificación
M1	19.41	0.63	0.42	Representa zona óptima típica (MK medio, CV baja).
M2	22.89	1.48	0.43	Buena edificabilidad y fluidez reportada en MK ~23%.
M3	17.24	2.61	0.42	Punto con MK medio y CV moderada para evaluar sinergias.
M4	24.90	1.66	0.43	Alta fracción de MK con bajo CV, estable en impresión.
M5	20.53	2.50	0.42	Representa composición balanceada y frecuente en zona óptima.
M6	16.36	0.90	0.43	MK medio-bajo para cubrir rango inferior.
M7	17.26	5.11	0.42	CV más alta dentro del rango imprimible.
M8	20.67	8.94	0.43	Punto de CV alto, pero aún técnico para comparar efecto en fluidez y edificabilidad.
M9	10.74	2.42	0.35	Representa extremo inferior de a/cm y MK bajo.

Para el modelo MK-CB, también se seleccionaron 9 mezclas (Tabla 29), donde, los factores se distribuyeron en rangos de contenido de CB entre 0.31 y 15.30%, contenido de MK entre 8.03 y 28.54% y relación a/cm entre 0.35 y 0.45, notándose un ligero incremento en el rango de todos los factores en comparación con el modelo MK-CB. Esto se atribuyó a la mayor variabilidad introducida por la CB, cuyo carácter altamente heterogéneo en cuanto a finura, morfología y contenido de materia orgánica requiere ampliar las combinaciones experimentales para capturar adecuadamente su efecto en la reactividad, la demanda de agua y el comportamiento reológico del sistema (Jittin & Bahurudeen, 2022). En consecuencia, fue necesario explorar intervalos ligeramente más amplios para garantizar que el modelo estadístico pudiera representar de manera robusta la interacción entre el MK y la CB, así como su impacto en las propiedades frescas e imprimibilidad.

Tabla 29. Mezclas seleccionadas para evaluación de printabilidad del modelo MK-CB.

Mezcla	MK (%)	CB (%)	Relación a/cm	Justificación
M1	14.14	0.87	0.37	Punto muy bajo de CB y MK medio; útil para evaluar aceleración temprana.
M2	21.11	2.13	0.42	Representa el centro funcional del diseño, zona estable de impresión.
M3	28.54	5.42	0.45	MK alto con CB medio; buena para analizar la competencia acelerante-retardante.
M4	14.89	4.68	0.38	a/cm medio-bajo; mezcla con parámetros balanceados.
M5	25.46	11.94	0.42	CB alto dentro de rango imprimible; útil para estudiar retardos significativos.
M6	15.20	15.30	0.37	Nivel elevado de CB con MK medio; representa zona retardante extrema imprimible.
M7	10.58	0.31	0.38	Punto bajo de MK con CB mínimo; aporta información en zona con poca estructuración inicial.
M8	17.67	13.34	0.38	CB alto con MK medio; intermedio entre M6 y M7.
M9	8.03	14.25	0.35	Extremo inferior de a/cm y MK bajo con CB alto, importante para curvaturas del modelo.

La depuración de mezclas basada en este análisis estadístico avanzado permitió centrar los esfuerzos de investigación en un subconjunto representativo de las poblaciones

iniciales, lo que es crucial para la eficiencia de la etapa de optimización de mezclas para impresión 3D.

5.5.4. Evaluación de mezclas seleccionadas

A partir de las mezclas seleccionadas para cada modelo, se evaluaron las propiedades en estado fresco y los resultados se discutieron con base en el diagrama de rango de printabilidad (Figura 46), mismo que permitió identificar aquellas mezclas que cumplen con los criterios establecidos por la literatura, diferenciando las mezclas con desempeño óptimo para impresión de aquellas con comportamiento potencialmente imprimible.

Las mezclas del modelo MK-CV demostraron una alta tendencia a ubicarse en la zona potencial de impresión inclinadas hacia valores mayores de fluidez, aunque manteniéndose por encima del límite mínimo de edificabilidad deseable. Esto indicó que, incluso con contenidos bajos de CV, su efecto lubricante destaca y trabaja simultáneamente con la capacidad de edificación del MK (Bheel et al., 2021; Silva et al., 2022). En este sentido, destacaron las mezclas M2, M4 y M9 al ubicarse en la zona óptima de impresión con 22.89, 24.90 y 10.74% de MK, 1.48, 1.66 y 2.42% de CV y 0.43, 0.43 y 0.35 de relación a/cm, respectivamente, sugiriendo que para altos contenidos de MK se puede lograr sinergia con bajos contenidos de CV e incluso, para bajos contenidos de MK, la demanda de agua se puede reducir significativamente con el incremento del contenido de CV.

El modelo MK-CB mostró una mayor dispersión y tendencia a ubicarse en la zona óptima de impresión, con sólo tres mezclas en la zona potencial de impresión, siendo estas M2, M9 y M7, tendiendo a tener una menor edificabilidad y fluidez en comparación con las mezclas MK-CV. Esto se atribuye a que la CB presenta un fuerte efecto retardante que logra anular la estructuración inicial, a pesar del contenido de MK y las bajas relaciones a/cm, lo que empuja las mezclas hacia el límite del colapso estructural (Bheel et al., 2022; Nikhade & Nag, 2022). Lo anterior contrasta con las mezclas en la zona óptima de impresión, mismas que se caracterizaron por presentar mayores contenido de MK y relaciones a/cm en un rango medio-bajo, parámetros que lograron mitigar el efecto de la CB, permitiendo una mejor edificabilidad compaginada con una mejor fluidez para los fines de aplicación.

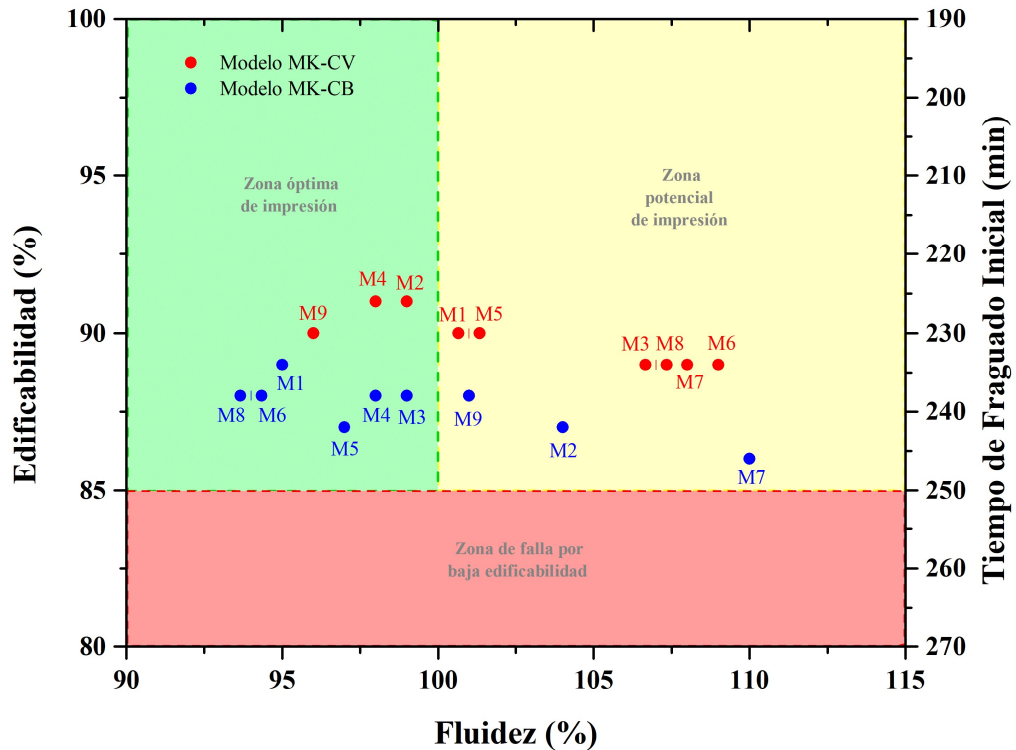


Figura 46. Evaluación de las mezclas seleccionadas de los modelos MK-CV y MK-CB en el diagrama de rango de printabilidad por triple desempeño.

5.6. Evaluación de printabilidad


La evaluación de printabilidad de los elementos extruidos permitió identificar diferencias en el comportamiento de las mezclas de cada modelo, particularmente en su capacidad para mantener la geometría esperada tras la deposición. En general, las mezclas con mayor cohesión y rigidez estructural temprana presentaron filamentos bien definidos, con deformaciones mínimas y alta estabilidad dimensional, mientras que aquellas con menor capacidad de edificación presentaron asentamientos pronunciados, pandeo severo e incluso colapsos.








5.6.1. Evaluación visual: asentamiento, pandeo, colapso y estabilidad dimensional.

La evaluación visual se realizó tanto en las mezclas que se encontraron en la zona con potencial de impresión del diagrama de rangos de printabilidad como en las que se encontraron en la zona óptima de impresión. En el modelo MK-CV, las mezclas M2, M4 y M9 mostraron el desempeño más favorable, caracterizándose por una deposición

estables, capas uniformes y asentamientos prácticamente nulos como se observa en la Tabla 30. Estas mezclas lograron conservar la forma a lo largo del proceso de extrusión y deposición con pocos o nulos defectos superficiales, indicando una adecuada combinación entre la estructuración inicial y la trabajabilidad propiciada por la correcta sinergia entre los factores de las mezclas (Silva et al., 2022). En todos estos casos, el pandeo observado fue mínimo y no se encontraron interrupciones en la continuidad de los filamentos, lo que sugirió la capacidad de obtención de mezclas capaces de sostener su propio peso y el de capas subsecuentes sin deformaciones considerables. Contrariamente, mezclas como M5 y M6 evidenciaron comportamientos adversos a mezclas con desempeño potencial para impresión, presentando deformaciones progresivas, expansiones laterales, pérdida de estabilidad y colapsos, siendo en algunos casos más notorios, lo que pudo darse principalmente por una mayor lubricación en la mezcla propiciada por la relación a/cm y el contenido de CV (Kasaniya et al., 2024; Khatib, 2008; T. Yang et al., 2018). El resto de las mezclas (M1, M3, M7 y M8) mostraron comportamientos moderados de pandeo y asentamiento, conservándose cierta geometría y estabilidad dimensional en comparación con M5 y M6, sin embargo, la mejora de su potencial de impresión requeriría ajustes en cada uno de los factores. Estas diferencias visuales coincidieron con el comportamiento esperado de acuerdo con el diagrama de rangos de printabilidad, destacando que la proporción de adiciones, la relación a/cm y el comportamiento en estado fresco afectan simultáneamente la capacidad de impresión de las mezclas.

Tabla 30. Evaluación visual de las mezclas del modelo MK-CV.

Mezcla	Observaciones	Imagen
M1-CV 19.41MK- 0.63CV-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Ligero asentamiento. • Pandeo lateral en filamentos superiores. • Sin colapso. <p>Estabilidad dimensional media.</p>	
M2-CV 22.89MK- 1.48CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Buena definición de capas. • Mínimo asentamiento. • Pandeo reducido. <p>Alta estabilidad dimensional.</p>	




M3-CV 17.24MK- 2.61CV-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de leve a moderado. • Pandeo mínimo. • Geometría se conserva adecuadamente. 	
M4-CV 24.90MK- 1.66CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Buena cohesión y estabilidad. • Sin pandeo. • Asentamiento mínimo. • Excelente estabilidad dimensional. 	
M5-CV 20.53MK- 2.50CV-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación significativa. • Pandeo evidente con ondulación de capas. • Asentamiento notable. • Baja estabilidad dimensional. 	
M6-CV 16.36MK- 0.90CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento notable. • Pandeo lateral severo. • Estabilidad dimensional baja. 	
M7-CV 17.26MK- 5.11CV-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Alta estabilidad. • Asentamiento reducido. • Geometría consistente. • Leve deformación lateral. 	
M8-CV 20.67MK- 8.94CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Pandeo moderado. • Deformación progresiva entre capas. • Estabilidad dimensional intermedia. 	
M9-CV 10.74MK- 2.42CV-0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Colapso parcial. • Moderada deformabilidad. • Pandeo pronunciado en un extremo. • Moderada estabilidad dimensional. 	

Respecto a las mezclas MK-CB (Tabla 31), se observaron tendencias similares, aunque con mayor variabilidad posiblemente debido al efecto de la CB. La mezclas M3 presentó buena estabilidad, filamentos definidos y bajos niveles de asentamiento, reflejando un equilibrio adecuado entre fluidez y capacidad estructural, sin embargo, se evidenciaron cortes de los filamentos extruidos, limitando su potencial aplicación en impresión. Por el contrario, mezclas como M5, M7 y M9 mostraron comportamientos deficientes, incluyendo pandeo severo, deformación marcada entre capas y, en los casos más críticos, colapsos parciales y defectos superficiales severos como estrías, cortes y rugosidades,

posiblemente atribuible a una consistencia poco fluida (N. Zhang & Sanjayan, 2023). El resto de las mezclas (M1, M4, M6 y M8) presentaron comportamientos adecuados en términos de estructuración y estabilidad dimensional, posiblemente por la presencia del MK (Y. Chen et al., 2023; Yuan et al., 2018), sin embargo, en todas, se evidenció una falta de consistencia marcada que provocó severos defectos superficiales, sugiriendo la necesidad de un ajuste en la composición de las mezclas.

Tabla 31. Evaluación visual de las mezclas del modelo MK-CB.

Mezcla	Observaciones	Imagen
M1-CB 14.14MK- 0.87CB-0.37	<ul style="list-style-type: none"> • Capas uniformes con ligero asentamiento. • Pandeo leve. • Estabilidad dimensional adecuada. • Defectos superficiales como estrías y cortes. 	
M2-CB 21.11MK- 2.13CB-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento estables. • Asentamiento considerable en extremos. • Pandeo reducido. • Moderada estabilidad dimensional. 	
M3-CB 28.54MK- 5.42C-0.45	<ul style="list-style-type: none"> • Capas definidas y estabilidad elevada. • Asentamiento reducido con pandeo mínimo. • Geometría bien conservada. 	
M4-CB 14.89MK- 4.68CB-0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento estable con deformación leve. • Pandeo en capas superiores sin colapso. • Asentamiento moderado. • Defectos superficiales. 	
M5-CB 25.46- 11.94CB-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Colapso parcial. • Filamentos deformados con pérdida notable de estructura. 	
M6-CB 15.20MK- 15.30CB-0.37	<ul style="list-style-type: none"> • Alta deformación. • Filamentos inestables y geometría irregular. • Pandeo generalizado, sin colapso total. 	

	<ul style="list-style-type: none"> • Evidente incapacidad estructural. 	
M7-CB 10.58MK- 0.31CB-0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Baja capacidad estructural. • Asentamiento considerable y pandeo evidente. • Deformación marcada, aunque sin colapso total. • Deficiente estabilidad dimensional. 	
M8-CB 17.67MK- 13.34CB-0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad dimensional adecuada. • Defectos superficiales excesivos. • Colapso leve. 	
M9-CB 8.03MK- 14.25CB-0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Colapso parcial. • Asentamiento alto con pandeo severo en un extremo. • Estabilidad dimensional baja. 	

En conjunto, la evaluación visual evidenció que la printabilidad está directamente relacionada con la capacidad de las mezclas para conservar su geometría al ser depositadas en filamentos extruidos. Las mezclas que presentaron mínimo asentamiento, bajo pandeo y alta estabilidad dimensional fueron candidatas más adecuadas para considerarse en aplicaciones de impresión 3D, mientras que aquellas que mostraron colapso o deformación significativa se descartarían por su incapacidad para sostener estructuras de múltiples capas, salvo el ajuste de sus componentes.

Estos resultados fueron congruentes con las tendencias obtenidas en el diagrama de rangos de printabilidad, donde mayores valores de fluidez más bajos mejoraron la estabilidad dimensional de las mezclas y potenciaron el grado de estructuración temprana favoreciendo la edificabilidad, sin embargo, comprometiendo el acabado superficial. La convergencia entre la evidencia visual y los parámetros en estado fresco, permitieron identificar con claridad los sistemas más aptos para su potencial aplicación en impresión 3D.

5.7. Resultados del comportamiento mecánico

Se seleccionaron las cuatro mezclas de cada modelo con mejores características visuales para fabricar elementos impresos y se evaluó su resistencia de compresión en dos

direcciones con aplicación de carga en sentido perpendicular y paralelo al sentido de la extrusión de los filamentos y su resistencia a la flexión con carga al centro del claro en dirección perpendicular al sentido de la extrusión de los filamentos.

5.7.1. Resistencia de compresión (perpendicular vs paralela)

La Figura 47 muestra las resistencias de compresión en cubos moldeados e impresos de los modelos MK-CV y MK-CB. De forma general, ambos modelos presentaron reducciones en las resistencias de los elementos impresos con respecto de los elementos moldeados, siendo en todos los casos más baja la resistencia para los cubos cargados paralelamente a las capas, seguido de los cubos cargados perpendicularmente. Esta reducción está asociada directamente a la anisotropía inherente a la impresión 3D y es atribuible a dos mecanismos asociados con los factores de las mezclas (J. Ye et al., 2021). Por un lado, la resistencia en sentido paralelo permite evaluar la interfaz de unión entre dos capas adyacentes (C. Liu et al., 2021). En este sentido, el tiempo transcurrido entre la deposición de cada capa y la fluidez de las mezclas pueden permitir que se inicie la floculación y estructuración del material y que exista una mayor o menor fusión de las capas, generando discontinuidades a lo largo de los filamentos extruidos y depositados subsecuentemente (Song et al., 2025). Por otro lado, la resistencia en sentido perpendicular comprime las capas unas contra otras tendiendo a similar el comportamiento de un cubo moldeado, es decir, en este sentido el elemento actúa como una única estructura sólida que distribuye mejor la carga aplicada. De ahí que exista una reducción de resistencia más considerable en los cubos cargados paralelamente (Kolawole et al., 2025).

Para las mezclas MK-CV (Figura 47a), se observó un comportamiento de resistencia gobernado por el contenido de MK y la relación a/cm , donde las mezclas con mayores porcentajes de MK desarrollaron mayores resistencias, como se observa en M1, M2 y M4, confirmando el efecto positivo y dominante del MK como material reactivo y formador de productos de hidratación (Tebbal & Abidine Rahmouni, 2019). La mezcla M9 también presentó una alta resistencia, superando incluso a M1 a pesar del menor contenido de MK, pero baja relación a/cm , sugiriendo que el contenido de agua en las mezclas tiene una alta importancia en la densificación y desarrollo de resistencia (Z. Zhang et al., 2025).

Para estas mezclas, las reducciones de resistencia con carga perpendicular a las capas variaron entre 4.2 y 13.3%, mientras que con carga paralela se redujeron entre 27.4 y 33.9%, respecto de los elementos moldeados. Lo anterior sugirió que con carga perpendicular las mezclas aún mantienen un desempeño de resistencia sin mermas considerables, mientras que la reducción con carga paralela sí resulta significativa y es atribuible a la interfaz de unión entre capas; no obstante, se destacaron puntos relevantes. M9, p. ej., a pesar de su alta resistencia moldeada presentó la mayor reducción con carga paralela, lo que podría indicar que la si bien la baja relación a/cm mejor la resistencia, la poca fluidez resultante dificultó la fusión de las capas (Song et al., 2025). M1, por su parte, presentó la menor reducción, a pesar de alto contenido de MK, sugiriendo que incluso una baja cantidad de CV resultó beneficiosa para la integración intercapas, posiblemente debido a la lubricación generada por las micropartículas esféricas de la CV (Silva et al., 2022).

Por otro lado, las mezclas MK-CB (Figura 47b) exhibieron, en general, menores resistencias, que las evaluadas de MK-CV, lo que puede estar relacionado con el retardo en el desarrollo de resistencias generado por la CB debido a su capacidad puzolánica (Bahurudeen et al., 2016); no obstante, la influencia del MK como impulsor de la resistencia se mantuvo al igual que el patrón anisotrópico. Los cubos comprimidos con carga perpendicular mostraron reducciones de entre 10.7 y 14.7%, mientras que con carga paralela las reducciones variaron entre 28.6 y 35.7%, revelando mayor reducción en comparación con las mezclas MK-CV. Esto sugiere que la CB tiene un impacto negativo no sólo en el desarrollo de resistencia, sino también, en la integración de las capas, lo que puede deberse a su morfología y baja reactividad, características que tienen a generar uniones de capas más débiles en elementos impresos (Gupta et al., 2022).

Pese a lo anterior, en ambos modelos se mantuvieron resistencias por sobre los 20 MPa, con reducciones de CP de hasta 30%, sugiriendo que, las mezclas tienen potencial para ser impresas en 3D y pueden ser aplicables en la fabricación de elementos de construcción.

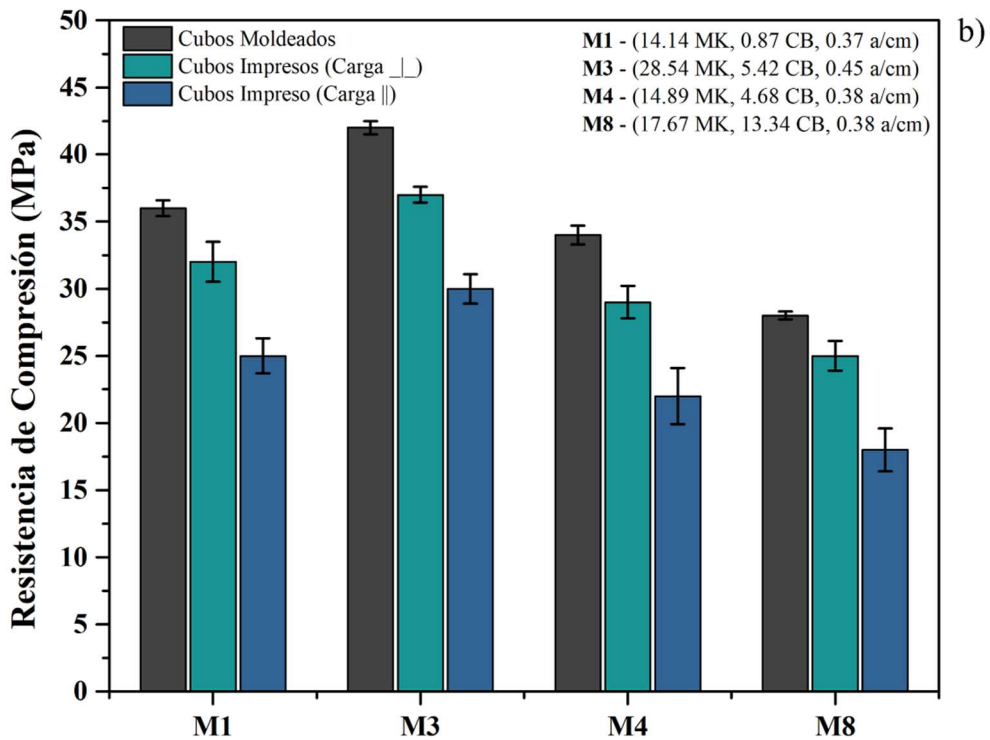
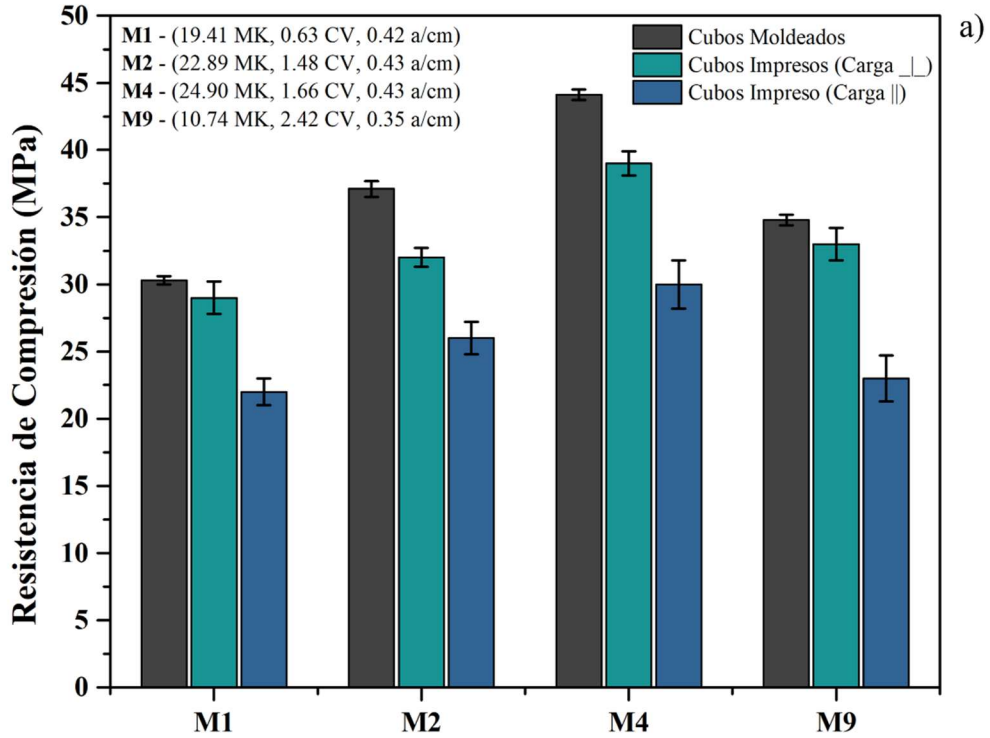


Figura 47. Resistencia de compresión de cubos moldeados e impresos de los modelos a) MK-CV y b) MK-CB. (⊥: Carga aplicada en dirección perpendicular a las capas impresas; ||: Carga aplicada en dirección paralela a las capas impresas).

5.7.2. Resistencia a la flexión en tres puntos

La Figura 48 muestra las resistencias a la flexión (módulos de ruptura) de las barras moldeadas e impresas de los modelos MK-CV y MK-CB. En el modelo MK-CV, las resistencias a la flexión mostraron una tendencia donde la diferencia entre los valores moldeados e impresos fue mínima, con reducciones que en promedio apenas alcanzaron aproximadamente 5 %. En algunos casos, como en la mezcla M1, la resistencia de elementos impresos fue similar a la obtenida en elementos moldeados con ~3.9 MPa en ambos casos, evidenciando una interconexión entre capas altamente eficiente. Incluso en mezclas de mayor desempeño, como M4 con resistencias de 7.0 MPa moldeado y 6.6 MPa impreso, la disminución por impresión se mantuvo baja. Esta reducida anisotropía contrastó con lo observado en la resistencia de compresión, donde se registraron reducciones mayores tanto con carga perpendicular como con carga paralela. Este comportamiento sugiere que, bajo esfuerzos de flexión, la unión de las capas en las mezclas MK-CV fue capaz de transferir tensiones de tracción sin inducir una falla prematura, lo que se puede atribuir al contenido de MK, que favorece la formación de productos de hidratación y geles puzolánicos capaces de densificar la matriz y fortalecer la interfaz (Jaji et al., 2023).

Los resultados también indicaron que la CV contribuyó positivamente al comportamiento en flexión al mejorar la trabajabilidad en el estado fresco y favorecer un empaquetamiento más eficiente, promoviendo una transición suave entre capas (Z. Zhou et al., 2024), dado que la morfología esférica de la CV no solo disminuye la fricción interna, sino que facilita el asentamiento entre capas recién depositadas, promoviendo un mejor contacto y una hidratación cruzada más homogénea (Silva et al., 2022). Esta combinación de mecanismos explica que las mezclas MK-CV presenten, en general, módulos de ruptura elevados y donde la anisotropía no resultó tan perjudicial.

En el modelo MK-CB, similar al comportamiento en compresión, se observó un comportamiento a la flexión inferior en comparación con las mezclas MK-CV, donde la máxima resistencia se observó en M3 con 6.3 MPa y la menor en M8 con 3 MPa, siendo esta la mezcla con el mayor contenido de CB. Este comportamiento se relacionó con la menor reactividad puzolánica del CB, su naturaleza más heterogénea y su tendencia a

retardar la hidratación, factores que se traducen en elemento moldeados e impresos menos densos y con mayor variabilidad en la distribución de poros (Bahurudeen et al., 2016). A pesar de esto, la reducción de la resistencia a la flexión por efecto de la impresión siguió siendo relativamente baja, con un promedio cercano al 5 %, siendo el mayor decremento un 8% mostrado en la mezcla M4, sugiriendo que, en ciertas proporciones, el CB puede generar discontinuidades o zonas deficientes en la interfaz, posiblemente asociadas a su estructura fibrosa, a la presencia de partículas carbonosas y a la menor cohesión inicial entre capas (Moretti et al., 2018), factores que se pueden asociar también a las mezclas MK-CV.

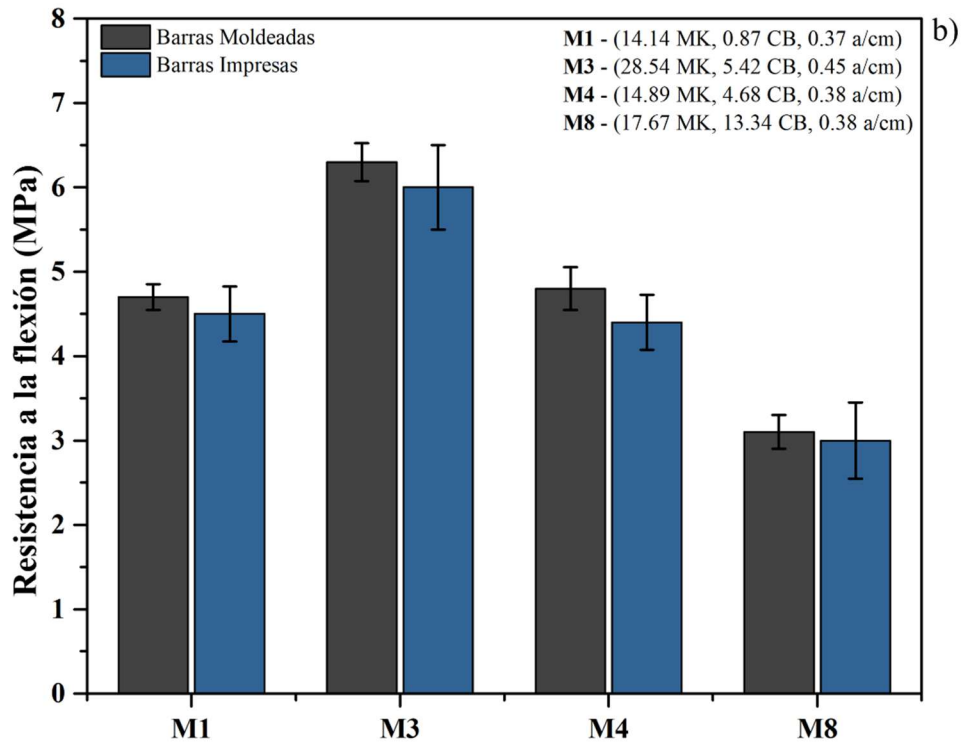
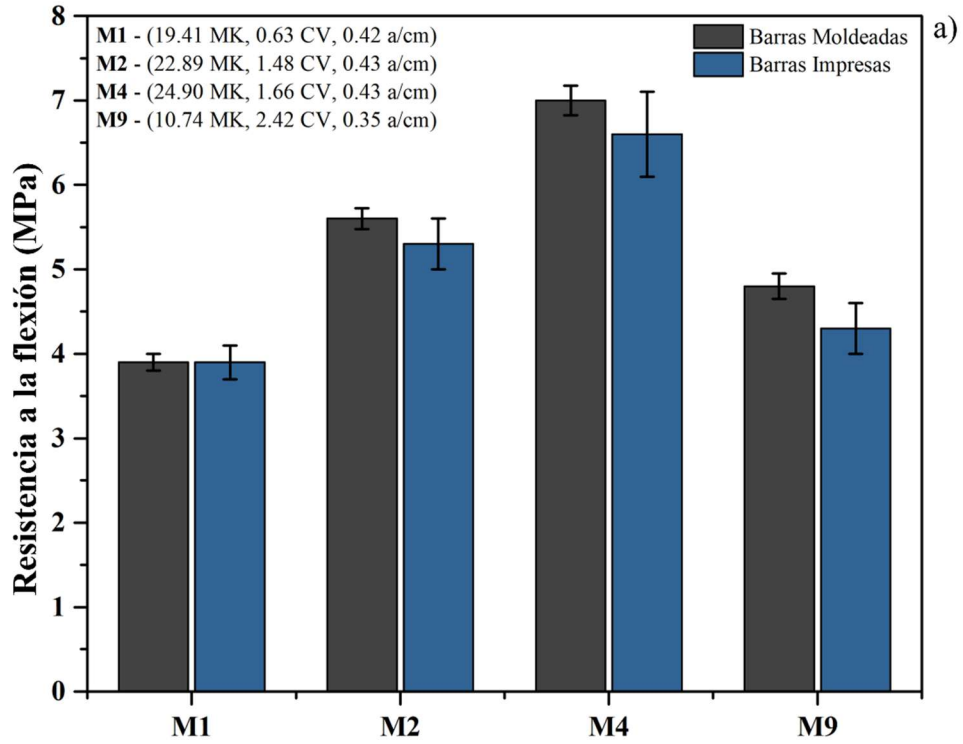


Figura 48. Resistencia a la flexión de barras moldeadas e impresas de los modelos a) MK-CV y b) MK-CB.

5.7.3. Comparativa del desempeño mecánico entre los modelos

Al contrastar ambos sistemas, los resultados revelan un comportamiento mecánico claramente diferenciado. En términos de resistencia de compresión en condición moldeada, el modelo MK–CV alcanzó los valores más altos con un rango de 30 a 44 MPa, mientras que en el modelo MK–CB el rango varió de 28 a 42 MPa. Aunque la diferencia no fue extrema, mostró una mayor eficiencia de las mezclas MK–CV en el desarrollo de matrices más densas y homogéneas, posiblemente por el aporte puzolánico de la CV, un empaquetamiento más eficiente, la reducción de vacíos y la formación de geles secundarios capaces de densificar la pasta (Silva et al., 2022). En cambio, el comportamiento de las mezclas MK–CB mostró mayor variabilidad y un desempeño inferior, evidenciándose en mayor medida con contenidos mayores de CB. Esto se asocia a las características menos reactivas del CB, a su posiblemente alto contenido de materia orgánica y a su efecto retardador, que diluye la concentración efectiva de cementante reactivo y disminuye la tasa de formación de productos hidratados capaces de otorgar rigidez (Nikhade & Nag, 2022).

En lo que respecta a la resistencia paralela a las capas impresas, ambos modelos mostraron reducciones significativas cercanas al 30 %, confirmando que la anisotropía es una consecuencia inevitable del proceso de deposición capa por capa (Kolawole et al., 2025; C. Liu et al., 2021). Sin embargo, la pérdida de resistencia fue distinto en cada sistema. En el modelo MK–CV, la disminución puede estar ligada a limitaciones en la fluidez y a/c , donde una baja relación a/cm redujo la capacidad del material fresco para humedecer adecuadamente la superficie de la capa inferior, generando una interfaz seca y con poca fusión entre capas (T. Yang et al., 2018; S. Zheng et al., 2021). En cambio, en el modelo MK–CB la mayor reducción aparece en mezclas con alto contenido de CB, donde la presencia de compuestos que retrasan la hidratación impide una adecuada reactivación superficial de la capa anterior, lo que mantiene la interfaz en un estado de baja cohesión al momento de depositar la siguiente capa (D.-H. Le et al., 2022; Praveenkumar & Vijayalakshmi, 2019).

En cuanto a la respuesta mecánica bajo flexión, se obtuvo una perspectiva adicional sobre la calidad interna de las mezclas y la efectividad del enlace entre capas. En los elementos

moldeados, el modelo MK–CV volvió a mostrar los valores más altos mediante con 7.0 MPa, frente a los 6.3 MPa máximos observados en el modelo MK–CB. Esta diferencia sugiere que la CV contribuyó a la obtención de una matriz más tenaz y uniforme, con menor presencia de defectos internos. No obstante, lo más relevante fue que la reducción del módulo de ruptura en condición impresa fue mínima en ambos sistemas, promediando apenas 5 %, en ambos caso, lo que demuestra que, a pesar de la presencia de una discontinuidad física entre capas, la transmisión de tensiones de tracción no se vio afectada de manera significativa. Este comportamiento sugirió que el MK desempeñó un papel fundamental en la consolidación temprana de la interfaz, ya que promueve reacciones puzolánicas rápidas que permiten el desarrollo de puentes cementantes capaces de integrar químicamente las capas depositadas (Thajeel et al., 2025).

De lo anterior, mientras que la resistencia de compresión con aplicación de carga paralela evidenció el punto más débil del proceso de impresión por la discontinuidad interlaminar, la resistencia a la flexión demostró que, una vez consolidada la matriz, la microestructura resultante puede presentar un grado notable de continuidad, al punto de que la fisura no necesariamente inicia ni se propaga por la interfaz, sino a través del propio cuerpo del material (Kolawole et al., 2025; C. Liu et al., 2021; J. Ye et al., 2021).

En resumen, el modelo MK–CV se posicionó como el más eficiente para aplicaciones de impresión 3D, ya que combina una matriz densa, un comportamiento flexional superior y una anisotropía contenida, mientras que el modelo MK–CB, aunque viable, presentó retos adicionales derivados de la variabilidad de la ceniza, su reactividad limitada y su tendencia a comprometer tanto la resistencia final como la cohesión interlaminar en mezclas con altos contenidos (Bheel et al., 2022; Nikhade & Nag, 2022). Estos hallazgos subrayan que la optimización del desempeño mecánico en impresión 3D no depende únicamente de alcanzar mayores resistencias, sino de lograr una microestructura que reduzca la anisotropía y mantenga la continuidad interlaminar, objetivos para los cuales la combinación MK–CV ofrece un balance significativamente superior (Nuaklong et al., 2018; Silva et al., 2022).

5.7.4. Evaluación visual de las mezclas impresas en estado endurecido


La Tabla 32 muestra las observaciones visuales hechas a las mezclas de los modelos MK-CV y MK-CB en estado endurecido. Las mezclas correspondientes al modelo MK-CV mostraron comportamientos diferenciados en la definición de capas, cohesión y estabilidad geométrica, atribuibles principalmente a la relación a/cm , al contenido de MK y al aporte de la CV. La mezcla M1-CV presentó paredes estables y capas moderadamente definidas, con una superficie relativamente homogénea y solo pequeños poros aislados. Este comportamiento se relaciona con una viscosidad plástica suficientemente elevada y con la capacidad del MK para formar estructuras floculadas que confieren resistencia al corte temprana, limitando la deformación después de la deposición de los filamentos (M. Chen et al., 2020). En la mezcla M2-CV se observó una mayor integración entre las capas, así como filamentos más redondeados, indicando que la mezcla presentó un estado fresco más susceptible a la relajación estructural entre deposiciones, es decir, una mayor fluidez y un mayor asentamiento. Además, se notó la presencia de microvacíos distribuidos en los filamentos, lo que sugiere una mezcla con menor rigidez instantánea, posiblemente por la combinación de un mayor a/cm y una menor capacidad de la CV para generar puentes floculados estables (Yuan et al., 2018).

En contraste, la mezcla M4-CV mostró la mejor definición de capas dentro del sistema MK-CV, siendo estas uniformes, con bordes limpios y mínima deformación lateral. Esto indicó una posible combinación adecuada entre la refloculación y la estructuración del material, siendo el MK el mayor aportador de una red estructural densa que se reconstruye rápidamente después del esfuerzo de extrusión (Jiao et al., 2021), mientras que la CV contribuyó a la lubricación de la mezcla sin comprometer su estabilidad (T. Yang et al., 2018). La mezcla M9-CV, por el contrario, evidenció irregularidades, bordes colapsados y poros visibles, reflejando una baja edificabilidad asociada al menor contenido de MK y a la a/cm más alta del conjunto de mezclas. Posiblemente, el menor aporte estructurante del MK provocó que el material fluyera en exceso después del depósito, generando geometrías menos controladas y superficies heterogéneas (Jaji et al., 2023; Robayo-Salazar et al., 2024).

Por su parte, las mezclas del modelo MK–CB mostraron una respuesta particularmente influenciada por la morfología irregular, elevada porosidad y mayor absorción de agua de la CB, características que afectan directamente la cohesión del filamento y la homogeneidad de la superficie extruida (Moretti et al., 2018). La mezcla M1-CB presentó capas uniformes y relativamente bien alineadas, con una superficie homogénea pese a la textura más rugosa propia del CB. Esto indicó que el equilibrio entre MK y CB permitió mantener una viscosidad estable y una adecuada retención de agua, evitando la segregación del material durante la extrusión (Moretti et al., 2018). En M3-CB, no obstante, la superficie mostró mayor rugosidad y poros más notorios, atribuibles al incremento simultáneo en MK y CB junto con una relación a/cm más elevada, lo cual favoreció la aparición de discontinuidades en los filamentos debido a la morfología más irregular del CB y a una mayor sensibilidad a la relajación estructural (Ahmed, 2023).

Por su parte, la mezcla M4-CB mantuvo una buena estabilidad y capas relativamente definidas, aunque con porosidad fina distribuida, sugiriendo que el contenido de CB fue suficientemente alto para incrementar la fricción interna del sistema sin llegar a comprometer la cohesión entre estratos (Gupta et al., 2022). En cambio, M8-CB fue la mezcla con mayor heterogeneidad superficial, ondulaciones y evidencia de falta de cohesión, efecto directamente relacionado con el elevado porcentaje de CB (Bhattacharjee et al., 2021). Dado que esta ceniza posee partículas más angulares y una absorción significativamente mayor, la mezcla tiende a perder agua disponible durante la extrusión, reduciendo su trabajabilidad y provocando discontinuidades entre capas (Moretti et al., 2018). La presencia de poros abiertos y distorsiones laterales sugirió un equilibrio no favorable entre cohesión y estructuración resultando en una menor capacidad para mantener la forma después del depósito (Joh et al., 2020; K. W. Lee et al., 2022).

Tabla 32. Evaluación visual de las mezclas MK-CV y MK-CB en estado endurecido.

Mezcla	Observaciones	Imagen
M1-CV 19.41MK- 0.63CV-0.42	<ul style="list-style-type: none"> • Buena estabilidad geométrica. • Capas moderadamente definidas. • Cohesión elevada. • Pequeños poros aislados. 	

M2-CV 22.89MK- 1.48CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Microvacíos distribuidos. • Ligero pandero de capas. • Se mantiene geometría estable. 	
M4-CV 24.90MK- 1.66CV-0.43	<ul style="list-style-type: none"> • Capas bien definidas y uniformes. • Ligera deformación lateral. • Pocos o nulos defectos superficiales. • Buena cohesión. 	
M9-CV 10.74MK- 2.42CV-0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Bordos irregulares. • Ligero deformación y aplastamiento. • Poros visibles. 	
M1-CB 14.14MK- 0.87CB-0.37	<ul style="list-style-type: none"> • Capas uniformes. • Alineación relativamente buena. • Microdefectos superficiales. • Juntas ligeramente visibles. 	
M3-CB 28.54MK- 5.42C-0.45	<ul style="list-style-type: none"> • Rugosidad superficial. • Definición moderada de capas. • Ligera deformación vertical. • Porosidad moderada. 	
M4-CB 14.89MK- 4.68CB-0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Buena estabilidad de capas. • Cohesión adecuada. • Buena retención de forma. • Definición de capas y juntas visibles. 	
M8-CB 17.67MK- 13.34CB-0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad moderada. • Cohesión entre capas reducidas. • Ligero pandeo. • Deformación vertical y ligero aplastamiento. 	

En conjunto, estos resultados permitieron observar que las mezclas MK–CV presentan una mayor uniformidad y definición de capas, atribuible a la interacción entre la reactividad inicial del MK y el efecto lubricante de la CV (Aboulayt et al., 2018; Bheel et al., 2021; Silva et al., 2022), mientras que las mezclas MK–CB exhiben superficies más rugosas y mayor variabilidad, consecuencia de la morfología más irregular y del efecto de absorción del CB (Bheel et al., 2022; Nikhade & Nag, 2022), confirmando que la microestructura e interacción de los factores en cada sistema juegan un papel determinante en el desempeño durante la impresión 3D, afectando directamente la estabilidad

geométrica, la cohesión entre capas y la calidad de la extrusión. No obstante, se debe destacar que, pese a las diferencias encontradas entre los modelos, ambos conjuntos de mezclas presentaron potencial para aplicaciones en construcción por impresión 3D.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación presentó el desarrollo y caracterización de aglutinantes base cemento Portland con incorporaciones de metacaolín, ceniza volate y ceniza de bagazo de caña de azúcar con potencial aplicación en construcción por impresión 3D, con la finalidad de contribuir al establecimiento de metodologías y compresión profunda sobre el desarrollo de material imprimibles bajo los principios de desarrollo sostenible y economía circular que la industria de la construcción busca implementar.

Las contribuciones de este trabajo abarcaron: i) la compresión profunda de la influencia de la materia prima utilizada sobre el potencial de impresión de los aglutinantes desarrollados, ii) el modelado de las propiedades en estado fresco clave para la determinación de aglutinantes printables, iii) el establecimiento de rangos de printabilidad y viabilidad en impresión 3D de los aglutinantes evaluados y iv) la evaluación del comportamiento mecánico de los aglutinantes impresos.

Las principales conclusiones se enlistan por sección a continuación:

- i) Influencia de la materia prima sobre las propiedades clave de aglutinantes printables:
 - a. El estudio mostró que la fluidez disminuye progresivamente conforme aumenta el contenido de MK, mientras que incrementa con incorporaciones de CV y CB en ambos modelos. Estos efectos se asocian a la alta superficie específica y fuerte demanda de agua del primero y a la morfología, textura y capacidad de lubricación y disminución de la fricción interna de las cenizas.
 - b. Las mezclas con mayores contenidos de MK mostraron mayor estabilidad y edificabilidad, resultado de su facilidad para formar redes estructurales y flóculos capaces de soportar cargas en estado fresco. Las mezclas MK–CV presentaron mejor edificabilidad que las MK–CB debido a la sinergia entre MK y CV, que permitió una estructuración más rápida y homogénea del material extruido. En cambio, la CB retrasó la rigidez inicial y generó colapsos o deformaciones en mezclas con alta sustitución.

- c. Las mezclas MK–CV presentaron fraguados notablemente más cortos que las de MK–CB, las cuales mostraron retardos significativos, sugiriendo efectos de dilución y baja reactividad inicial por parte de la CB.
 - d. Los parámetros reológicos apoyaron el comportamiento observado en estado fresco, confirmando la relación entre la composición de los aglutinantes y la estructura interna. El MK elevó el esfuerzo cortante inicial y los parámetros de estructuración, sugiriendo capacidad para formar estructuras estables tras la extrusión. La CV mostró efectos moderados dado su comportamiento lubricante. Y la CB, mostró mayor variabilidad con tasas y esfuerzos cortantes menores, razones por las que su edificabilidad resultaron inferiores.
- ii) Evaluación estadística y modelos predictivos basados en propiedades clave en estado fresco para el desarrollo de aglutinantes printables:
- a. Los modelos de regresión desarrollados mediante MSR presentaron valores de $R^2 > 0.90$ para las propiedades en estado fresco con desviaciones menores al 5% en fluidez y edificabilidad, y variaciones aceptables en tiempos de fraguado, demostrando una buena representación matemática del comportamiento real de las mezclas de MK-CV y MK-CB.
 - b. El análisis de residuos corroboró la ausencia de patrones no explicados, confirmando que los modelos son estadísticamente adecuados para predicción dentro del rango experimental.
 - c. Los coeficientes obtenidos permitieron identificar relaciones clave como que el MK es el factor dominante en la pérdida de fluidez y aumento de edificabilidad, la relación a/cm es el principal agente de lubricación, la CV como modulador positivo del equilibrio reológico y la CB es el principal agente retardante para generar mayores ventanas de impresión.
- iii) Rangos de printabilidad y viabilidad de las mezclas en impresión 3D:
- a. Entre las propiedades evaluadas, la edificabilidad resultó el criterio más restrictivo y determinante para impresión 3D, estableciendo un límite operacional para las mezcla MK-CV y MK-CB mayor a $>85\%$ para evitar fallas por colapso entre capas o consolidación insuficiente.

- b. La fluidez de las mezclas se limitó a un intervalo de entre 90 y 100% de fluidez bajo las condiciones de impresión experimentales, para evitar colapsos por fluidez excesiva, así como dificultades durante la extrusión y defectos superficiales post-extrusión.
 - c. El efecto retardante de la CB generó una mayor dispersión de mezclas con potencial de falla comprometiendo la edificabilidad, sugiriendo que para lograr la printabilidad de mezclas MK-CB se requieren dosificaciones de MK altas y estrictamente controladas y un ajuste fino de las relaciones a/cm para acelerar la cinética necesaria para contrarrestar el efecto de la CB.
 - d. El análisis reológico confirmó que la ventana de printabilidad para las mezclas MK-CV y MK-CB se logró con tiempos de fraguado inicial mayores a 150 minutos, permitiendo un equilibrio funcional en los primeros minutos de hidratación que asegura un tiempo de manipulación suficiente y una tasa de estructuración adecuada, evitando bloqueos y colapsos.
 - e. Las mezclas extruidas demostraron que el modelo MK-CV posee mayor estabilidad geométrica, menores deformaciones por peso propio y mejor continuidad en los filamentos, mientras que las mezclas MK-CB mostraron mayor variabilidad, zonas de debilidad entre capas y mayor dependencia de la presión de extrusión.
- iv) Desempeño mecánico y anisotropía de los aglutinantes impresos:
- a. La resistencia de compresión en dirección paralela a las capas experimento una reducción sistemática promedio del ~30% en ambos modelos, estableciendo la falla de la interfaz de unión como el principal defecto mecánico introducido por la impresión 3D.
 - b. En contraste, la resistencia a la flexión mostró una reducción mínima con un promedio del ~5% en ambos modelos, demostrando que, si bien existe una discontinuidad física, la unión microestructural lograda es adecuada bajo esfuerzos de flexión, lo que sugiere que el fallo bajo flexión se produce en la matriz y no prioritariamente en los planos de la interfaz.
 - c. El modelo MK-CV representó las resistencias más altas y la menor dispersión mecánica tanto a compresión como a flexión, reflejando un empaquetamiento

denso, hidratación más completa y mayor contribución sinérgica entre el MK y la CV. Las mezclas del modelo MK presentaron la anisotropía más crítica, posiblemente ligada a la disminución de la reactivación superficial al colocar capas consecutivas debido al efecto de la CB.

Aportaciones relevantes del trabajo doctoral

El presente trabajo doctoral estableció un avance significativo en el campo de la construcción por impresión 3D mediante el desarrollo, modelado y evaluación de aglutinantes ternarios a base de cemento Portland, metacaolín, ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar. A partir de un enfoque completamente experimental, complementado con modelación estadística y análisis mecánico, se generan las siguientes aportaciones fundamentales:

- i) Desarrollo de modelos predictivos basados en metodología de superficie de respuesta para propiedades críticas de impresión 3D con valores R^2 superiores a 0.90, o cual constituye una herramienta cuantitativa capaz de anticipar el comportamiento de nuevas formulaciones sin necesidad de ensayos extensivos.
- ii) Identificación precisa del rol funcional de cada materia prima: MK mayor aportador a la estabilidad y edificabilidad, relación a/cm agente controlador de la fluidez para mejorar la capacidad de impresión, CV como agente lubricante que facilita la extrusión y estabiliza la edificabilidad y CB como modificador de la cinética de hidratación.
- iii) Establecimiento de criterios de printabilidad basados en parámetros medibles y funcionales a escala de laboratorio soportados mediante evaluaciones del comportamiento reológico: Edificabilidad >85%, Fluidez 90-100%, TFI >150 minutos.
- iv) Propuesta de un marco metodológico replicable, desde la caracterización fisicoquímica inicial hasta el diseño de mezclas, modelación de propiedades en estado fresco, evaluación mecánica anisotrópica y análisis integral de printabilidad. Este marco podría aplicarse a otros residuos, cementantes alternativos o tecnologías de extrusión.

- v) Contribución directa a la economía circular, demostrando que residuos industriales y agroindustriales pueden incorporarse en el desarrollo de materiales para impresión 3D sin comprometer la funcionalidad, siempre que se controlen sus efectos específicos sobre las propiedades en estado fresco críticas para procesos de impresión 3D.

Recomendaciones

- i) Optimización fina de la relación a/cm para sistemas con CB dada la sensibilidad mostrada a las variaciones de agua y a su fuerte efecto retardante.
- ii) Evaluación de adiciones compatibles con los sistemas ternarios para modular la cinética de hidratación y mejorar la extruibilidad sin sacrificar estabilidad capa por capa.
- iii) Se recomienda implementar sistemas aislados de impresión o entornos semicontrolados para minimizar evaporación temprana, heterogeneidad del filamento y variación intermitente en la reología del material.
- iv) Se recomienda el uso de estrategias de impresión alternada (patrones de 0°/90° o inclinados), variación controlada del espesor de capa y técnicas de rehumectación superficial entre capas, a fin de mejorar la cohesión interlaminar y reducir la anisotropía mecánica inherente a la deposición.
- v) Dado el desempeño superior en estado fresco, reológico y mecánico, el modelo MK-CV debe priorizarse para prototipos estructurales, paneles impresos o elementos sometidos a compresión o flexión. Su confiabilidad permite reducir riesgos en aplicaciones reales.
- vi) La variabilidad intrínseca de la ceniza de bagazo requiere una caracterización previa de cada lote (LOI, contenido orgánico soluble, granulometría y área superficial). Esta recomendación es fundamental para reducir incertidumbre en mezclas MK-CB.

Trabajos futuros

- i) Será necesario investigar el uso de adiciones activadoras que permitan acelerar el fraguado en mezclas con CB sin comprometer la trabajabilidad.

- ii) Se deberán desarrollar modelos avanzados que integren simultáneamente parámetros reológicos, cinética y printabilidad para predecir la evolución del material durante la impresión. Esto permitiría realizar simulaciones previas al proceso de extrusión.
- iii) Se requiere investigar resistencia a ciclos húmedo-seco, permeabilidad, ataque sulfático, carbonatación y retracción para validar el uso real de estos materiales en entornos exteriores y aplicaciones estructurales, buscado también la correlación entre la anisotropía con la durabilidad.
- iv) El presente estudio empleó un sistema de extrusión controlado; sin embargo, para validar la aplicabilidad industrial, deben desarrollarse pruebas en impresoras robóticas de gran formato con control automático de presión, velocidad y trayectorias multidimensionales.
- v) Se sugieren investigaciones en curado por nebulización, curado térmico por etapas o control de microclimas localizados durante la impresión, con el fin de reducir gradientes de humedad, mejorar cohesión interlaminar y disminuir anisotropía.
- vi) Se sugiere explorar nuevas combinaciones ternarias y cuaternarias que incorporen nanoarcillas, fibras sintéticas o biológicas, subproductos industriales y/o cenizas ultrafinas, buscando la mejora de las propiedades de impresión y mecánicas.
- vii) Para consolidar la visión de economía circular, se recomienda realizar análisis de ciclo de vida (LCA) y estudios de eficiencia energética que comparen los sistemas MK–CV y MK–CB frente a materiales convencionales de impresión 3D.
- viii) Se sugiere la investigación de alternativas para mejorar la unión interlaminar de las mezclas de ambos modelos.
- ix) Como aporte práctico, se propone consolidar los resultados en un documento de referencia para laboratorios, industria y centros de impresión, permitiendo la estandarización del uso de MK, CV y CB en la construcción.

REFERENCIAS

- Abdalla, T. A., Hussein, A. A. E., Ahmed, Y. H., & Semmana, O. (2024). Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. *Results in Engineering*, 21, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101764>
- Abdel-Gawwad, H. A., Abd El-Aleem, S., Amer, A. A., El-Didamony, H., & Arif, M. A. (2018). Combined impact of silicate-amorphicity and MgO-reactivity on the performance of Mg-silicate cement. *Construction and Building Materials*, 189, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.171>
- Abeykoon, C., Pérez, P., & Kelly, A. L. (2020). The effect of materials' rheology on process energy consumption and melt thermal quality in polymer extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 60(6), 1244–1265. <https://doi.org/10.1002/pen.25377>
- Aboulayt, A., Jaafri, R., Samouh, H., Cherki El Idrissi, A., Roziere, E., Moussa, R., & Loukili, A. (2018). Stability of a new geopolymer grout: Rheological and mechanical performances of metakaolin-fly ash binary mixtures. *Construction and Building Materials*, 181, 420–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.025>
- Abrão, P. C. R. A., Cardoso, F. A., & John, V. M. (2020). Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118546>
- Aghae, K., Sposito, R., & Khayat, K. H. (2022). Synergistic effect of shrinkage mitigating materials on rheological properties of flowable and thixotropic cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104686. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104686>
- Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. (2015). Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 59, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.009>
- Ahmed, G. H. (2023). A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, 66, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863>
- Akkarapongtrakul, A., Julphunthong, P., & Nochaiya, T. (2017). Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash–sugarcane bagasse ash pastes. *Monatshfte Für Chemie - Chemical Monthly*, 148(7), 1355–1362. <https://doi.org/10.1007/s00706-017-1953-5>
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2020). Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.010>
- Albar, A., Chougan, M., Al-Kheetan, M. J., Swash, M. R., & Ghaffar, S. H. (2020). Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. *Results in Engineering*, 6, 100135. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2020.100135>
- Alhijaily, A., Alqarni, A., Kilic, Z. M., & Bartolo, P. (2025). Development of a mobile 3D printer and comparative evaluation against traditional gantry systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 36(6), 3783–3800. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02433-z>
- Al-Noaimat, Y. A., Chougan, M., Al-kheetan, M. J., Al-Mandhari, O., Al-Saidi, W., Al-Maqbali, M., Al-Hosni, H., & Ghaffar, S. H. (2023). 3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry. *Results in Engineering*, 18, 101115. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101115>
- Al-Noaimat, Y. A., Ghaffar, S. H., Chougan, M., & Al-Kheetan, M. J. (2023). A review of 3D printing low-carbon concrete with one-part geopolymer: Engineering, environmental and economic feasibility. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01818. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01818>
- Al-Shmaisani, S., Kalina, R. D., Ferron, R. D., & Juenger, M. C. G. (2022). Critical assessment of rapid methods to qualify supplementary cementitious materials for use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 153, 106709. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106709>
- Al-Tamimi, A. K., Alqamish, H. H., Khaldoune, A., Alhaidary, H., & Shirvanimoghaddam, K. (2023). Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges. *Buildings*, 13(3), 827. <https://doi.org/10.3390/buildings13030827>
- Alvarenga, K. P., & Cordeiro, G. C. (2024). Evaluating sugarcane bagasse fly ash as a sustainable cement replacement for enhanced performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 20, 100751. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100751>

- Ambily, P. S., Kaliyavaradhan, S. K., & Rajendran, N. (2024). Top challenges to widespread 3D concrete printing (3DCP) adoption – A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(2), 300–328. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2213294>
- Amjad, U., Sarir, M., Khan, D., Haq, I. U., Khawaja, M. W. A., & Mahmood, K. (2025). Effect of Sugar Cane Bagasse Ash Incorporated as Viscosity Modifying Agent on Fresh, Microstructure and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00718-4>
- Anjos, M. A. S., Araújo, T. R., Ferreira, R. L. S., Farias, E. C., & Martinelli, A. E. (2020). Properties of self-leveling mortars incorporating a high-volume of sugar cane bagasse ash as partial Portland cement replacement. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101694>
- Ardoğa, M. K., Erdoğan, S. T., & Tokyay, M. (2019). Effect of particle size on early heat evolution of interground natural pozzolan blended cements. *Construction and Building Materials*, 206, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.055>
- Arslan, S., Öz, A., Benli, A., Bayrak, B., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2024). Sustainable use of silica fume and metakaolin in slag/fly ash-based self-compacting geopolymer composites: Fresh, physico-mechanical and durability properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 38, 101512. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101512>
- Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M., & Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- Aziz, A., Mehboob, S. S., Tayyab, A., Khan, D., Hayyat, K., Ali, A., & Latif Qureshi, Q. B. I. (2024). Enhancing sustainability in self-compacting concrete by optimizing blended supplementary cementitious materials. *Scientific Reports*, 14(1), 12326. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62499-w>
- Bahurudeen, A., Wani, K., Basit, M. A., & Santhanam, M. (2016). Assessment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001361](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001361)
- Bai, S., Guan, X., Li, H., & Ou, J. (2021). Effect of the specific surface area of nano-silica particle on the properties of cement paste. *Powder Technology*, 392, 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.045>
- Barkat, A., Kenai, S., Menadi, B., Kadri, E., & Soualhi, H. (2019). Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(9), 963–985. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1571737>
- Bassan de Moraes, M. J., Nagata, E. Y., Felício Peres Duran, A. J., & Rossignolo, J. A. (2024). Alkali activated materials applied in 3D printing construction: A review. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26696>
- Batool, F., Masood, A., & Ali, M. (2020). Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3891–3900. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04301-y>
- Bayat, H., & Kashani, A. (2023). Analysis of rheological properties and printability of a 3D-printing mortar containing silica fume, hydrated lime, and blast furnace slag. *Materials Today Communications*, 37, 107128. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107128>
- Bazli, M., Ashrafi, H., Rajabipour, A., & Kutay, C. (2023). 3D printing for remote housing: Benefits and challenges. In *Automation in Construction* (Vol. 148). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104772>
- Bentz, D. P., Durán-Herrera, A., & Galvez-Moreno, D. (2011). *Comparison of ASTM C311 Strength Activity Index Testing versus Testing Based on Constant Volumetric Proportions*. www.astm.org
- Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.008>
- Beycioğlu, A., & Yılmaz Aruntaş, H. (2014). Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. *Construction and Building Materials*, 73, 626–635. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.071>
- Bhattacharjee, S., Basavaraj, A. S., Rahul, A. V., Santhanam, M., Gettu, R., Panda, B., Schlangen, E., Chen, Y., Copuroglu, O., Ma, G., Wang, L., Basit Beigh, M. A., & Mechtcherine, V. (2021). Sustainable materials for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104156>

- Bheel, N., Ali, M. O. A., Tafsirojjaman, Khahro, S. H., & Keerio, M. A. (2022). Experimental study on fresh, mechanical properties and embodied carbon of concrete blended with sugarcane bagasse ash, metakaolin, and millet husk ash as ternary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 5224–5239. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15954-4>
- Bheel, N., Awoyera, P., Tafsirojjaman, T., Hamah Sor, N., & sohu, S. (2021). Synergic effect of metakaolin and groundnut shell ash on the behavior of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 311, 125327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125327>
- Binici, H., Aksogan, O., Cagatay, I. H., Tokyay, M., & Emsen, E. (2007). The effect of particle size distribution on the properties of blended cements incorporating GGBFS and natural pozzolan (NP). *Powder Technology*, 177(3), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.03.033>
- Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139924146>
- Boddepalli, U., Panda, B., & Ranjani Gandhi, I. S. (2023). Rheology and printability of Portland cement based materials: a review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(7), 789–807. <https://doi.org/10.1080/21650373.2022.2119620>
- Bogner, A., Link, J., Baum, M., Mahlbacher, M., Gil-Diaz, T., Lützenkirchen, J., Sowoidnich, T., Heberling, F., Schäfer, T., Ludwig, H.-M., Dehn, F., Müller, H. S., & Haist, M. (2020). Early hydration and microstructure formation of Portland cement paste studied by oscillation rheology, isothermal calorimetry, 1H NMR relaxometry, conductance and SAXS. *Cement and Concrete Research*, 130, 105977. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105977>
- Bong, S. H., Nematollahi, B., Nazari, A., Xia, M., & Sanjayan, J. G. (2019). *Fresh and Hardened Properties of 3D Printable Geopolymer Cured in Ambient Temperature* (pp. 3–11). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_1
- Bos, F. P., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., da Silva, W. R. L., Rehman, A. U., Weger, D., Wolfs, R. J. M., Zhang, Y., Ferrara, L., & Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Bovo, E., Pieressa, A., Sorgato, M., & Lucchetta, G. (2024). The influence of material properties and process parameters on energy consumption during extrusion of flexible PVC. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00782. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00782>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- Cai, J., Li, X., Tan, J., & Vandevyvere, B. (2020). Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, 30, 101307. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101307>
- Cao, X., Yu, S., Cui, H., & Li, Z. (2022). 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials: A Review. *Buildings*, 12(4), 453. <https://doi.org/10.3390/buildings12040453>
- Carrillo, J., Cárdenas Pulido, J., & Aperador, W. (2017). Propiedades mecánicas a flexión del concreto reforzado con fibras de acero bajo ambientes corrosivos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 59–72. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200005>
- Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 67, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.065>
- Chang, Z., Chen, Y., Schlangen, E., & Šavija, B. (2023). A review of methods on buildability quantification of extrusion-based 3D concrete printing: From analytical modelling to numerical simulation. *Developments in the Built Environment*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100241>
- Chang, Z., Wang, H., Yue, H., Xu, H., & Liu, D. (2025). Synergistic effects of sewage sludge ash and limestone in cement-based composites: hydration kinetics and mechanical performance. *RSC Advances*, 15(27), 21639–21648. <https://doi.org/10.1039/D5RA02341F>

- Charles, C.-A., Louhichi, A., Ramos, L., & Ligoure, C. (2021). Viscoelasticity and elastocapillarity effects in the impact of drops on a repellent surface. *Soft Matter*, 17(23), 5829–5837. <https://doi.org/10.1039/D1SM00438G>
- Chen, K., Liu, Q., Chen, B., Zhang, S., Ferrara, L., & Li, W. (2024). Effect of raw materials on the performance of 3D printing geopolymers: A review. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 84). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108501>
- Chen, M., Li, L., Zheng, Y., Zhao, P., Lu, L., & Cheng, X. (2018). Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 189, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037>
- Chen, M., Yang, L., Zheng, Y., Huang, Y., Li, L., Zhao, P., Wang, S., Lu, L., & Cheng, X. (2020). Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*, 252, 119090. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119090>
- Chen, Y., Chaves Figueiredo, S., Li, Z., Chang, Z., Jansen, K., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020a). Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*, 132, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106040>
- Chen, Y., Chaves Figueiredo, S., Li, Z., Chang, Z., Jansen, K., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020b). Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*, 132, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106040>
- Chen, Y., He, S., Gan, Y., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. (2022). A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 45, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103599>
- Chen, Y., He, S., Zhang, Y., Wan, Z., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2021). 3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 149, 106553. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2021.106553>
- Chen, Y., Jansen, K., Zhang, H., Romero Rodriguez, C., Gan, Y., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020). Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, 262, 120094. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120094>
- Chen, Y., Li, Z., Figueiredo, S. C., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. (2019). Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/app9091809>
- Chen, Y., Liu, C., Cao, R., Chen, C., Mechtcherine, V., & Zhang, Y. (2022). Systematical investigation of rheological performance regarding 3D printing process for alkali-activated materials: Effect of precursor nature. *Cement and Concrete Composites*, 128, 104450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104450>
- Chen, Y., Romero Rodriguez, C., Li, Z., Chen, B., Çopuroğlu, O., & Schlangen, E. (2020). Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103708. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2020.103708>
- Chen, Y., Zhang, Y., He, S., Liang, X., Schlangen, E., & Çopuroğlu, O. (2023). Improving structural build-up of limestone-calcined clay-cement pastes by using inorganic additives. *Construction and Building Materials*, 392, 131959. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131959>
- Cheng, S., Shui, Z., Li, Q., Sun, T., & Yang, R. (2016). Properties, microstructure and hydration products of lightweight aggregate concrete with metakaolin and slag addition. *Construction and Building Materials*, 127, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.135>
- Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., & Ding, S. (2017). Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. *Applied Clay Science*, 141, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.026>
- Chindapasirt, P., Sinsiri, T., Kroehong, W., & Jaturapitakkul, C. (2014). Role of Filler Effect and Pozzolanic Reaction of Biomass Ashes on Hydrated Phase and Pore Size Distribution of Blended

- Cement Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(9).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000921](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000921)
- Chuewangkam, N., Nachaithong, T., Chanlek, N., Thongbai, P., & Pinitsoontorn, S. (2022). Mechanical and Dielectric Properties of Fly Ash Geopolymer/Sugarcane Bagasse Ash Composites. *Polymers*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/polym14061140>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. de M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>
- Cui, W., Liu, W., Guo, R., Wan, D., Yu, X., Ding, L., & Tao, Y. (2025). Geometrical quality inspection in 3D concrete printing using AI-assisted computer vision. *Materials and Structures*, 58(2), 68. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02594-0>
- da Silveira Júnior, J. G., de Moura Cerqueira, K., de Araújo Moura, R. C., de Matos, P. R., Rodriguez, E. D., de Castro Pessôa, J. R., & Tramontin Souza, M. (2024). Influence of Time Gap on the Buildability of Cement Mixtures Designed for 3D Printing. *Buildings*, 14(4), 1070. <https://doi.org/10.3390/buildings14041070>
- Dai, X., Aydin, S., Yardimci, M. Y., Lesage, K., & de Schutter, G. (2020). Influence of water to binder ratio on the rheology and structural Build-up of Alkali-Activated Slag/Fly ash mixtures. *Construction and Building Materials*, 264, 120253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120253>
- De Belie, N. , S. M. , & G. E. (2018). *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials* (RILEM, Ed.; Vol. 25). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>
- De Lima, V. M. E., Barros, L. C., & De Melo Neto, A. A. (2021). Characterization of sugarcane bagasse ash (SBA) and its evaluation for use in alkali-activated slag mixtures. *Ceramica*, 67(381), 123–130. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673813038>
- Dey, D., Srinivas, D., Panda, B., Suraneni, P., & Sitharam, T. G. (2022). Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130749. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749>
- Dhandapani, Y., Santhanam, M., Kaladharan, G., & Ramanathan, S. (2021). Towards ternary binders involving limestone additions — A review. *Cement and Concrete Research*, 143, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396>
- Ding, W., He, Y., Lu, L., Wang, F., & Hu, S. (2020). Influence of metakaolin on the conversion and compressive strength of quaternary phase paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(12), 7213–7225. <https://doi.org/10.1111/jace.17409>
- Ding, Z., Wang, X., Sanjayan, J., Zou, P. X. W., & Ding, Z. K. (2018). A feasibility study on HPMC-improved sulphoaluminate cement for 3D printing. *Materials*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/ma11122415>
- Diniz, H. A. A., Martinelli, A. E., Cabral, K. C., Ferreira, R. L. da S., & da Silva, I. F. D. (2023). Synergistic effects of the use of metakaolin, sand and water on the properties of cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 366, 130277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130277>
- Do, T. A., Hoang, T. T., Bui-Tien, T., Hoang, H. V., Do, T. D., & Nguyen, P. A. (2020). Evaluation of heat of hydration, temperature evolution and thermal cracking risk in high-strength concrete at early ages. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100658>
- Dou, H., Xu, H., & Xie, J. (2023). Long-term mechanical performance of high fluidity fiber reinforced concrete modified by metakaolin. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1162053>
- Duan, Z., Li, L., Yao, Q., Zou, S., Singh, A., & Yang, H. (2022a). Effect of metakaolin on the fresh and hardened properties of 3D printed cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 350, 128808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128808>
- Duan, Z., Li, L., Yao, Q., Zou, S., Singh, A., & Yang, H. (2022b). Fresh and Hardened Properties of 3d Printed Cement Composite Incorporated with Metakaolin. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4044417>
- Dung, N. T., Hay, R., Lesimple, A., Celik, K., & Unluer, C. (2021). Influence of CO2 concentration on the performance of MgO cement mixes. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103826>

- Durán-Herrera, A., Juárez, C. A., Valdez, P., & Bentz, D. P. (2011). Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.020>
- Dvorkin, L., Zhitkovsky, V., Sitarz, M., & Hager, I. (2022a). Cement with Fly Ash and Metakaolin Blend—Drive towards a More Sustainable Construction. *Energies*, 15(10), 3556. <https://doi.org/10.3390/en15103556>
- Dvorkin, L., Zhitkovsky, V., Sitarz, M., & Hager, I. (2022b). Cement with Fly Ash and Metakaolin Blend—Drive towards a More Sustainable Construction. *Energies*, 15(10), 3556. <https://doi.org/10.3390/en15103556>
- Eldin, K., Yassin, E., & Khalil Idris, M. (2015). Determination of the Effects of Bagasse Ash on the Properties of Portland Cement Mashair Khalil Idris1 , Kamal Eldin Eltayeb Yassin2 1 Sudanese Standard and Metrology Organization... Determination of the Effects of Bagasse Ash on the Properties of Portland Cement. In *Journal of Applied and Industrial Sciences* (Vol. 3, Issue 1). ONLINE. <https://www.researchgate.net/publication/277551252>
- Elhadad, A. A., Rosa-Sainz, A., Cañete, R., Peralta, E., Begines, B., Balbuena, M., Alcudia, A., & Torres, Y. (2023). Applications and multidisciplinary perspective on 3D printing techniques: Recent developments and future trends. In *Materials Science and Engineering R: Reports* (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.msre.2023.100760>
- Fan, W., Zhuge, Y., Ma, X., Chow, C. W. K., & Gorjian, N. (2020). Strain hardening behaviour of PE fibre reinforced calcium aluminate cement (CAC) – Ground granulated blast furnace (GGBFS) blended mortar. *Construction and Building Materials*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118100>
- Farid Ojeda-Farías, O. (2019). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Thesis THIXOTROPY OF REACTIVE SUSPENSIONS: APPLICATION TO WHITE PORTLAND CEMENT SUSPENSIONS PRESENT As a requirement for the degree of.*
- Feng, K., Xu, Z., Zhang, W., Ma, K., Shen, J., & Hu, M. (2022). Rheological Properties and Early-Age Microstructure of Cement Pastes with Limestone Powder, Redispersible Polymer Powder and Cellulose Ether. *Materials*, 15(9), 3159. <https://doi.org/10.3390/ma15093159>
- Fonseca, M., & Matos, A. M. (2023). 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities. *Materials*, 16(6), 2458. <https://doi.org/10.3390/ma16062458>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quééré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arner, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Fry, N. R., Richardson, R. C., & Boyle, J. H. (2020). Robotic additive manufacturing system for dynamic build orientations. *Rapid Prototyping Journal*, 26(4), 659–667. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2019-0243>
- Geng, H., Chen, W., Li, Q., Shui, Z., & Yuan, B. (2019). Effect of Pre-dispersing Metakaolin in Water on the Properties, Hydration, and Metakaolin Distribution in Mortar. *Frontiers in Materials*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00099>
- Geng, H. N., & Li, Q. (2017). Water Absorption and Hydration Products of Metakaolin Modified Mortar. *Key Engineering Materials*, 726, 505–509. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.726.505>
- Golewski, G. L. (2022). The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 520–534. <https://doi.org/10.3390/suschem3040032>
- Güllü, H., & Ali Agha, A. (2021). The rheological, fresh and strength effects of cold-bonded geopolymer made with metakaolin and slag for grouting. *Construction and Building Materials*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122091>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Özturan, T., & Mermerdaş, K. (2012). Microstructural properties and pozzolanic activity of calcined kaolins as supplementary cementing materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(12), 1274–1284. <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0586>
- Guo, X., Shi, H., Hu, W., & Wu, K. (2014). Durability and microstructure of CSA cement-based materials from MSWI fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 46, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.015>

- Gupta, C. K., Sachan, A. K., & Kumar, R. (2022). Utilization of sugarcane bagasse ash in mortar and concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, *65*, 798–807. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.304>
- Gutierrez-Lemini, D. (2014). *Engineering Viscoelasticity*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8139-3>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1*(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hache, E., Simoën, M., Seck, G. S., Bonnet, C., Jabberi, A., & Carcanague, S. (2020). The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios. *International Economics*, *163*, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2020.05.002>
- Hassan, A. A. A., & Mayo, J. R. (2014). Influence of mixture composition on the properties of SCC incorporating metakaolin. *Magazine of Concrete Research*, *66*(20), 1036–1050. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00060>
- He, J., Long, G., Ma, K., Xie, Y., & Ma, C. (2020). Hydration heat evolution of Portland cement paste during unsteady steam curing process: Modelling and optimization. *Thermochimica Acta*, *694*, 178784. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178784>
- Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 546–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Hojati, M., Li, Z., Memari, A. M., Park, K., Zahabi, M., Nazarian, S., Duarte, J. P., & Radlińska, A. (2022). 3D-printable quaternary cementitious materials towards sustainable development: Mixture design and mechanical properties. *Results in Engineering*, *13*, 100341. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100341>
- Homayoonmehr, R., Ramezani-pour, A. A., & Mirdarsoltany, M. (2021). Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. *Journal of Building Engineering*, *44*, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103011>
- Huang, Q., Wang, Q., Zhang, Z., Shen, C., Zhou, W., Xu, X., & Zhu, X. (2025). Effect of metakaolin fineness on performance and microstructure of cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, *99*, 111577. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111577>
- Huang, T., Li, B., Yuan, Q., Shi, Z., Xie, Y., & Shi, C. (2019). Rheological behavior of Portland clinker-calcium sulphoaluminate clinker-anhydrite ternary blend. *Cement and Concrete Composites*, *104*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103403>
- Ibrahim, K. A., van Zijl, G. P. A. G., & Babafemi, A. J. (2023a). Comparative studies of LC3- and fly ash-based blended binders in fibre-reinforced printed concrete (FRPC): Rheological and quasi-static mechanical characteristics. *Journal of Building Engineering*, *80*, 108016. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108016>
- Ibrahim, K. A., van Zijl, G. P. A. G., & Babafemi, A. J. (2023b). Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction. *Journal of Building Engineering*, *69*, 106186. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106186>
- Inocente, J. M., Elyseu, F., Jaramillo Nieves, L. J., Jiusti, J., Cargnin, M., & Peterson, M. (2021). Production and characterization of high-reactivity metakaolins calcined in flash reactor. *Applied Clay Science*, *213*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106247>
- Ioannidou, K., Kanduč, M., Li, L., Frenkel, D., Dobnikar, J., & Del Gado, E. (2016). The crucial effect of early-stage gelation on the mechanical properties of cement hydrates. *Nature Communications*, *7*(1), 12106. <https://doi.org/10.1038/ncomms12106>
- Iowa State University, I. (2020). *Feasibility Study of 3D Printing of Concrete for Transportation Infrastructure Final Report*. <https://intrans.iastate.edu/>
- Irgens, F. (2014). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01053-3>
- Jaji, M. B. (2023). *Rheo-mechanics, Durability, and Microstructural Characterisation of Slag-modified Metakaolin-based Geopolymer Concrete for Extrusion-based 3D Printing Applications*. <https://scholar.sun.ac.za>
- Jaji, M. B., van Zijl, G. P. A. G., & Babafemi, A. J. (2023). Slag-modified metakaolin-based geopolymer for 3D concrete printing application: Evaluating fresh and hardened properties. *Cleaner Engineering and Technology*, *15*, 100665. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100665>

- Jalal, M., Fathi, M., & Farzad, M. (2013). RETRACTED: Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, *61*, 11–27. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2013.01.010>
- Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Ul-Haq, M. I. (2022). 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, *3*, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- Jiang, D., Li, X., Lv, Y., Zhou, M., He, C., Jiang, W., Liu, Z., & Li, C. (2020). Utilization of limestone powder and fly ash in blended cement: Rheology, strength and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, *232*, 117228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117228>
- Jiao, D., De Schryver, R., Shi, C., & De Schutter, G. (2021). Thixotropic structural build-up of cement-based materials: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, *122*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104152>
- Jiao, D., Shi, C., & Yuan, Q. (2019). Time-dependent rheological behavior of cementitious paste under continuous shear mixing. *Construction and Building Materials*, *226*, 591–600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.316>
- Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*, *83*, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
- Jiménez-Quero, V. G., León-Martínez, F. M., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C., & Chacón-Nava, J. G. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, *40*, 691–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Jin, S., Zhao, Z., Jiang, S., Sun, J., Pan, H., & Jiang, L. (2021). Comparison and Summary of Relevant Standards for Comprehensive Utilization of Fly Ash at Home and Abroad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *621*(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/621/1/012006>
- Jittin, V., & Bahurudeen, A. (2022). Evaluation of rheological and durability characteristics of sugarcane bagasse ash and rice husk ash based binary and ternary cementitious system. *Construction and Building Materials*, *317*, 125965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125965>
- Joh, C., Lee, J., Bui, T. Q., Park, J., & Yang, I.-H. (2020). Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Materials*, *13*(21), 4919. <https://doi.org/10.3390/ma13214919>
- Karahan, O., Hossain, K. M. A., Ozbay, E., Lachemi, M., & Sancak, E. (2012). Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, *31*, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.112>
- Kasaniya, M., Thomas, M. D. A., Moffatt, T., & Hossack, A. (2024). Microstructure and microanalysis of portland cement pastes with high w/c ratios. *Cement and Concrete Research*, *183*, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107575>
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, *145*, 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Khaleel, O. R., & Abdul Razak, H. (2012). The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar. *Construction and Building Materials*, *36*, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.079>
- Khalil, A., Wang, X., & Celik, K. (2020). 3D printable magnesium oxide concrete: towards sustainable modern architecture. *Additive Manufacturing*, *33*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101145>
- Khan, S. A., İlcan, H., Aminipour, E., Şahin, O., Al Rashid, A., Şahmaran, M., & Koç, M. (2023). Buildability analysis on effect of structural design in 3D concrete printing (3DCP): An experimental and numerical study. *Case Studies in Construction Materials*, *19*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02295>
- Khatib, J. M. (2008). Metakaolin concrete at a low water to binder ratio. *Construction and Building Materials*, *22*(8), 1691–1700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.003>
- Kim, B., Lee, S., Chon, C.-M., & Cho, S. (2021). Setting Behavior and Phase Evolution on Heat Treatment of Metakaolin-Based Geopolymers Containing Calcium Hydroxide. *Materials*, *15*(1), 194. <https://doi.org/10.3390/ma15010194>
- Kirby, S., Pesun, I., Nowakowski, A., & França, R. (2024). Effect of Different Post-Curing Methods on the Degree of Conversion of 3D-Printed Resin for Models in Dentistry. *Polymers*, *16*(4), 549. <https://doi.org/10.3390/polym16040549>

- Klave, E., Denysiuk, O., Zapiechna, Y., Loktionova, Y., Doroshenko, P., & Barandych, B. (2025). THE ROLE OF HUMAN RESOURCES IN THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL CONSTRUCTION MARKET. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(60), 595–606. <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.60.2025.4585>
- Kloft, H., Gehlen, C., Dörfler, K., Hack, N., Henke, K., Lowke, D., Mainka, J., & Raatz, A. (2021). Additive manufacturing in construction. *Civil Engineering Design*, 3(4), 113–122. <https://doi.org/10.1002/cend.202100026>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Fanijo, E., Chandra Paul, S., & Combrinck, R. (2021). State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>
- Kolawole, J. T., Buswell, R., Mahmood, S., Isa, M. N., Cavalaro, S., Austin, S., Engelberg, D., Dobrzanski, J., Xu, J., & Withers, P. J. (2025). On the origins of anisotropy of extrusion-based 3D printed concrete: The roles of filament skin and agglomeration. *Cement and Concrete Research*, 192, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107817>
- Kruger, J., Zeranka, S., & van Zijl, G. (2019). An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*, 224, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078>
- Kugler, F., Karrer, J., Krcmar, W., & Teipel, U. (2022). Setting behavior and mechanical properties of concrete rubble fly ash geopolymers. *Open Ceramics*, 11, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100286>
- Kumar, M., Singh, S. K., & Singh, N. P. (2012). Heat evolution during the hydration of Portland cement in the presence of fly ash, calcium hydroxide and super plasticizer. *Thermochimica Acta*, 548, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.028>
- Kurniati, E. O., & Kim, H.-J. (2023). Utilizing Industrial By-Products for Sustainable Three-Dimensional-Printed Infrastructure Applications: A Comprehensive Review. *Infrastructures*, 8(10), 140. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8100140>
- Kwan, A. K. H., & McKinley, M. (2014). Effects of limestone fines on water film thickness, paste film thickness and performance of mortar. *Powder Technology*, 261, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.027>
- Kwangwoo Wi. (2022). *Development of mix design and evaluation methodology for 3D printing concrete* [Doctor]. Iowa State University.
- Lan, D., Luo, Y., Qu, Y., & Man, Y. (2024). The three-dimensional stability and accuracy of 3D printing surgical templates: An In Vitro study. *Journal of Dentistry*, 144, 104936. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104936>
- Lavagna, L., & Nisticò, R. (2022). An Insight into the Chemistry of Cement—A Review. *Applied Sciences*, 13(1), 203. <https://doi.org/10.3390/app13010203>
- Lavrov, A. (2023). Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: Current status, challenges, and knowledge gaps. *Engineering Geology*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166>
- Le, D. H., Sheen, Y. N., & Lam, M. N. T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029>
- Le, D.-H., Sheen, Y.-N., & Lam, M. N.-T. (2022). Potential utilization of sugarcane bagasse ash for developing alkali-activated materials. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 11(3), 199–209. <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1920513>
- Lee, H., Seo, E.-A., Kim, W.-W., & Moon, J.-H. (2021). Experimental Study on Time-Dependent Changes in Rheological Properties and Flow Rate of 3D Concrete Printing Materials. *Materials*, 14(21), 6278. <https://doi.org/10.3390/ma14216278>
- Lee, K. W., Lee, H. J., & Choi, M. S. (2022). Correlation between thixotropic behavior and buildability for 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*, 347, 128498. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128498>
- Li, G., Zhou, C., Ahmad, W., Usanova, K. I., Karelina, M., Mohamed, A. M., & Khallaf, R. (2022). Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review. *Materials*, 15(7), 2664. <https://doi.org/10.3390/ma15072664>
- Li, J., Tao, Y., Zhuang, E., Cui, X., Yu, K., Yu, B., Boluk, Y., Bindiganavile, V., Chen, Z., & Yi, C. (2022). Optimal amorphous oxide ratios and multifactor models for binary geopolymers from metakaolin

- blended with substantial sugarcane bagasse ash. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134215>
- Li, Q., & Fan, Y. (2022). Rheological evaluation of nano-metakaolin cement pastes based on the water film thickness. *Construction and Building Materials*, 324, 126517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126517>
- Li, W., Hua, L., Shi, Y., Wang, P., Liu, Z., Cui, D., & Sun, X. (2022). Influence of metakaolin on the hydration and microstructure evolution of cement paste during the early stage. *Applied Clay Science*, 229, 106674. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106674>
- Li, Z., Hojati, M., Wu, Z., Piasente, J., Ashrafi, N., Duarte, J. P., Nazarian, S., Bilén, S. G., Memari, A. M., & Radlińska, A. (2020). Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12145628>
- Lin, X., Pang, H., Wei, D., Lu, M., & Liao, B. (2021). Effect of superplasticizers with different anchor groups on the properties of cementitious systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127207. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127207>
- Lin, Y., Alengaram, U. J., & Ibrahim, Z. (2023). Effect of treated and untreated rice husk ash, palm oil fuel ash, and sugarcane bagasse ash on the mechanical, durability, and microstructure characteristics of blended concrete – A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 78, 107500. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107500>
- Link, J., Sowoidnich, T., Pfitzner, C., Gil-Diaz, T., Heberling, F., Lützenkirchen, J., Schäfer, T., Ludwig, H.-M., & Haist, M. (2020). The Influences of Cement Hydration and Temperature on the Thixotropy of Cement Paste. *Materials*, 13(8), 1853. <https://doi.org/10.3390/ma13081853>
- Liu, C., Gao, J., Tang, Y., & Chen, X. (2018). Preparation and characterization of gypsum-based materials used for 3D robocasting. *Journal of Materials Science*, 53(24), 16415–16422. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2800-8>
- Liu, C., Yue, S., Zhou, C., Sun, H., Deng, S., Gao, F., & Tan, Y. (2021). Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete. *Journal of Materials Science*, 56(30), 16851–16864. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>
- Liu, K., Takasu, K., Jiang, J., Zu, K., & Gao, W. (2023). Mechanical properties of 3D printed concrete components: A review. *Developments in the Built Environment*, 16, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100292>
- Liu, R., Zhang, C., Pei, Y., Chen, M., Liu, H., & Li, X. (2021). Influence of flocculation effect on the apparent viscosity of cement slurry and analysis of different influencing factors. *Construction and Building Materials*, 281, 122602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122602>
- Liu, Z., Liu, J., Liu, L., Li, M., Chen, Z., & Shi, C. (2024). Mixture design and environmental impact analysis of cement-metakaolin-sugarcane bagasse ash ternary composite. *Construction and Building Materials*, 435, 136843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136843>
- Long, W. J., Lin, C., Tao, J. L., Ye, T. H., & Fang, Y. (2021). Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites. *Construction and Building Materials*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122647>
- Lukert, D., Kirner, L., Berweiler, R., & Saleh, S. (2024). Exploration of the advancements and potential of 3DCP. *Construction & Robotics, Research Driven Project : Construction Robotics, International M. Sc. Programme*. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-08854>
- Lyu, F., Zhao, D., Hou, X., Sun, L., & Zhang, Q. (2021). Overview of the development of 3D-printing concrete: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app11219822>
- Ma, B., Jiang, Q., Huang, J., Wang, X., & Leng, J. (2019). Effect of different silica particles on flowability of gypsum powder for 3D powder printing. *Construction and Building Materials*, 217, 394–402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.097>
- Ma, J., Wang, D., Zhao, S., Duan, P., & Yang, S. (2021). Influence of particle morphology of ground fly ash on the fluidity and strength of cement paste. *Materials*, 14(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma14020283>
- Madandoust, R., & Mousavi, S. Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 35, 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>

- Mansaneira, E. C., Schwantes-Cezario, N., Barreto Sandoval, G. F., & Toralles, B. M. (2017). Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. *DYNA*, 84(201), 163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61409>
- Marchment, T., Sanjayan, J., & Xia, M. (2019). Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification. *Materials & Design*, 169, 107684. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107684>
- Maskuriy, R., Selamat, A., Ali, K. N., Maresova, P., & Krejcar, O. (2019). Industry 4.0 for the construction industry-How ready is the industry? *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(14). <https://doi.org/10.3390/app9142819>
- Mehdipour, I., & Khayat, K. H. (2017). Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 78, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005>
- Mehdipour, I., & Khayat, K. H. (2018). Understanding the role of particle packing characteristics in rheophysical properties of cementitious suspensions: A literature review. *Construction and Building Materials*, 161, 340–353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147>
- Mendoza Rangel, J. M., & Díaz-Aguilera, J. H. (2023). Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 328–348. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>
- Mo, L., Deng, M., Tang, M., & Al-Tabbaa, A. (2014). MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 57, pp. 1–12). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.007>
- Mobarak, M. H., Islam, M. A., Hossain, N., Al Mahmud, M. Z., Rayhan, M. T., Nishi, N. J., & Chowdhury, M. A. (2023). Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication – A review. In *Applied Surface Science Advances* (Vol. 18). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100462>
- Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00218. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>
- Mohan, M. K., Rahul, A. V., van Dam, B., Zeidan, T., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2022). Performance criteria, environmental impact and cost assessment for 3D printable concrete mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106255>
- Mohan, M. K., Rahul, A. V., Van Tittelboom, K., & De Schutter, G. (2021). Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. *Cement and Concrete Research*, 139, 106258. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106258>
- Monroy-Loperena, R. (2024). Las ecuaciones cúbicas de estado en la dinámica de fluidos. *Materiales Avanzados*, 41, 136–142. <https://doi.org/10.22201/iim.rma.2024.41.63>
- Moretti, J. P., Nunes, S., & Sales, A. (2018). Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 172, 635–649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>
- Mostafa, A. M., & Yahia, A. (2017). Physico-chemical kinetics of structural build-up of neat cement-based suspensions. *Cement and Concrete Research*, 97, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.003>
- Munir, Q., Afshariantorghabeh, S., & Kärki, T. (2022). Industrial Waste Pretreatment Approach for 3D Printing of Sustainable Building Materials. *Urban Science*, 6(3), 50. <https://doi.org/10.3390/urbansci6030050>
- Murthi, P., Poongodi, K., Awoyera, P. O., Gobinath, R., & Saravanan, R. (2020). Enhancing the Strength Properties of High-Performance Concrete Using Ternary Blended Cement: OPC, Nano-Silica, Bagasse Ash. *Silicon*, 12(8), 1949–1956. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00324-0>
- Naqi, A., & Jang, J. G. (2019). Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability*, 11(2), 537. <https://doi.org/10.3390/su11020537>
- Navarrete, I., Kurama, Y., Escalona, N., Brevis, W., & Lopez, M. (2022). Effect of supplementary cementitious materials on viscosity of cement-based pastes. *Cement and Concrete Research*, 151, 106635. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106635>

- Navarrete, I., Kurama, Y., Escalona, N., & Lopez, M. (2020). Impact of physical and physicochemical properties of supplementary cementitious materials on structural build-up of cement-based pastes. *Cement and Concrete Research*, *130*, 105994. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.105994>
- Nawab, M. S., Ali, T., Qureshi, M. Z., Zaid, O., Ben Kahla, N., Sun, Y., Anwar, N., & Ajwad, A. (2023). A study on improving the performance of cement-based mortar with silica fume, metakaolin, and coconut fibers. *Case Studies in Construction Materials*, *19*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02480>
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. In *Cleaner Materials* (Vol. 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
- Ndahirwa, D., Zmamou, H., Lenormand, H., & Leblanc, N. (2022). The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review. *Cleaner Materials*, *5*, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100123>
- Nguyen, V. M., Phung, T. B., Pham, D. T., & Ho, L. S. (2023). Mechanical properties and durability of concrete containing coal mine waste rock, F-class fly ash, and nano-silica for sustainable development. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, *11*(3), 75–86. <https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.100097>
- Nikhade, A., & Nag, A. (2022). Effective utilization of sugarcane bagasse Ash, rice husk Ash& Metakaolin in concrete. *Materials Today: Proceedings*, *62*, 3658–3664. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.422>
- Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T., & Gholampour, A. (2022). Effect of supplementary cementitious materials on properties of 3D printed conventional and alkali-activated concrete: A review. *Automation in Construction*, *138*, 104215. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104215>
- Nodehi, M., & Taghvaei, V. M. (2022). Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. *Circular Economy and Sustainability*, *2*(3), 987–1020. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x>
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasit, P. (2018). Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. *Construction and Building Materials*, *161*, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, *83*, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
- Ojeda-Farias, O., Hebraud, P., Lootens, D., Liard, M., & Mendoza-Rangel, J. M. (2019). Thixotropy of reactive suspensions: The case of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *212*, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.319>
- Ojeda-Farias, O., Lootens, D., & Hébraud, P. (2024). Build-up and consolidation of an attractive network of particles in cement-based pastes. *Cement and Concrete Research*, *183*, 107573. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107573>
- Olsson, N. O. E., Arica, E., Woods, R., & Madrid, J. A. (2021). Industry 4.0 in a project context: Introducing 3D printing in construction projects. *Project Leadership and Society*, *2*. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2021.100033>
- Olumide Olu, O., Aminu, N., & Nazif Sabo, L. (2020). The Effect of Sugarcane Bagasse Ash on the Properties of Portland Limestone Cement. *American Journal of Construction and Building Materials*, *4*(2), 77. <https://doi.org/10.11648/j.ajcbm.20200402.15>
- Onanuga, B. Y., & Biernacki, J. J. (2023). Assessing the robustness of cement-hydrogel-based binders as 3D printing materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.360>
- ONU-Habitat. (2019). *Housing at the Centre of the SDGs in Mexico*. ONU-Habitat.
- Onyelowe, K. C., Naghizadeh, A., Aneke, F. I., Kontoni, D.-P. N., Onyia, M. E., Welman-Purchase, M., Ebid, A. M., Adah, E. I., & Stephen, L. U. (2023). Characterization of net-zero pozzolanic potential of thermally-derived metakaolin samples for sustainable carbon neutrality construction. *Scientific Reports*, *13*(1), 18901. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46362-y>
- Orsu, B., & Shaik, Y. P. (2022). Compression Strength Analysis of Customized Shoe Insole with Different Infill Patterns Using 3D Printing. *OALib*, *09*(05), 1–13. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108712>

- Oseji, S., Imoni, O., & Okonkwo, C. (2025). 3D-printed Housing for Remote and Disaster-prone U.S. Regions: Technological Potential and Deployment Challenges. *Journal of Engineering Research and Reports*, 27(6), 97–109. <https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i61531>
- Ouyang, G., Wang, J., Wang, R., Chen, L., & Bu, B. (2021). Rheokinetics and fluidity modification of alkali activated ultrafine metakaolin based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 269, 121268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121268>
- Ouyang, G., Wu, L., Ye, C., Wang, J., & Dong, T. (2021). Effect of silane coupling agent on the rheological and mechanical properties of alkali-activated ultrafine metakaolin based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 290, 123223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123223>
- Pan, T., Jiang, Y., & Ji, X. (2022). Interlayer bonding investigation of 3D printing cementitious materials with fluidity-retaining polycarboxylate superplasticizer and high-dispersion polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 330, 127151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127151>
- Panda, B., Ruan, S., Unluer, C., & Tan, M. J. (2019a). Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. *Composites Part B: Engineering*, 165, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.109>
- Panda, B., Ruan, S., Unluer, C., & Tan, M. J. (2019b). Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. *Composites Part B: Engineering*, 165, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.109>
- Panda, B., Sonat, C., Yang, E. H., Tan, M. J., & Unluer, C. (2021). Use of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement mixes in 3D printing applications. *Cement and Concrete Composites*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103901>
- Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, 44(9), 10258–10265. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>
- Panda, B., Unluer, C., & Tan, M. J. (2018). Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, 94, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002>
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, 30, 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
- Papachristoforou, M., Mitsopoulos, V., & Stefanidou, M. (2018). Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete. *Procedia Structural Integrity*, 10, 155–162. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.09.023>
- Papp, V., Janovics, R., Péter Kertész, T., Nemes, Z., Fodor, T., Bányai, I., & Kéri, M. (2023). State and role of water confined in cement and composites modified with metakaolin and additives. *Journal of Molecular Liquids*, 388, 122716. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122716>
- Paritala, S., Singaram, K. K., Bathina, I., Khan, M. A., & Jyosyula, S. K. R. (2023). Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – A review. *Construction and Building Materials*, 402, 132962. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132962>
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- Peng, Y., & Unluer, C. (2023a). Advances in rheological measurement and characterization of fresh cement pastes. In *Powder Technology* (Vol. 429). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118903>
- Peng, Y., & Unluer, C. (2023b). Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 252). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110492>
- Peng, Y., & Unluer, C. (2024). Development of 3D-printed magnesium silicate hydrate cement mixes involving metakaolin as a substitute for silica source. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2382173>
- Perrot, A. (2022). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 55(2), 42. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01855-y>

- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(4), 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Petrovic, L. M., Zorica, D. M., Stojanac, I. L., Krstonosic, V. S., Hadnadjev, M. S., Janev, M. B., Premovic, M. T., & Atanackovic, T. M. (2015). Viscoelastic properties of uncured resin composites: Dynamic oscillatory shear test and fractional derivative model. *Dental Materials*, 31(8), 1003–1009. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.05.009>
- Pinheiro, D. G. L., Sousa, M. I. C., Pelisser, F., da Silva Rêgo, J. H., Moragues Terrades, A., & Frías Rojas, M. (2023). Physical and Chemical Effects in Blended Cement Pastes Elaborated with Calcined Clay and Nanosilica. *Materials*, 16(5), 1837. <https://doi.org/10.3390/ma16051837>
- Poudyal, L., & Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>
- Praveenkumar, T. R., & Vijayalakshmi, M. M. (2019). Mechanical Characteristics of Sugarcane Bagasse Ash Along With Nano Particles in Concrete. In *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* (Issue 8).
- Prem, P. R., Ambily, P. S., Kumar, S., Giridhar, G., & Jiao, D. (2024). Structural build-up model for three-dimensional concrete printing based on kinetics theory. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 18(7), 998–1014. <https://doi.org/10.1007/s11709-024-1081-3>
- Puzatova, A., Shakor, P., Laghi, V., & Dmitrieva, M. (2022). Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings*, 12(11), 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings12112023>
- Qi, C., Spagnoli, D., & Fourie, A. (2020). Structural, electronic, and mechanical properties of calcium aluminate cements: Insight from first-principles theory. *Construction and Building Materials*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120259>
- Qian, X., & Li, Z. (2011). *The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin*.
- Rahman, M. K., Baluch, M. H., & Malik, M. A. (2014). Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 50, 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.025>
- Rahman, M., Rawat, S., Yang, R. (Chunhui), Mahil, A., & Zhang, Y. X. (2024). A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, 91, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109719>
- Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019). Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*, 227, 116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
- Rashad, A. M. (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 278–306. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2015.10.002>
- Raveendran, N., & K, V. (2024). Synergistic effect of nano silica and metakaolin on mechanical and microstructural properties of concrete: An approach of response surface methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03196. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03196>
- Ritchie, H., Rodés-Guirao, L., Mathieu, E., Gerber, M., Ortiz-Ospina, E., Hasell, J., & Roser, M. (2023). *Population Growth*. Our World in Data.
- Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Caicedo, M. A., & Delvasto Arjona, S. (2023). 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, 146, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- Robayo-Salazar, R., Muñoz, M. A., Vargas, A., & Mejía de Gutiérrez, R. (2024). Effects of incorporating bentonite, metakaolin, microsilica, and calcium carbonate on the rheological properties of portland cement-based 3D printing inks. *Construction and Building Materials*, 445, 137857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137857>
- Rodier, L., Villar-Cociña, E., Ballesteros, J. M., & Junior, H. S. (2019). Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 231, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.208>
- Rojas, O. , B. M. I. , & A. J. (2012). *FUNDAMENTOS de REOLOGIA*.

- Rojo-López, G., González-Fontebao, B., Luis Pérez-Ordóñez, J., & Martínez-Abella, F. (2023). Parametric analysis in sustainable self-compacting mortars using genetic programming. *Construction and Building Materials*, *404*, 133189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133189>
- Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, *36*(10), 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
- Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 112, pp. 76–85). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- Ruan, S., & Unluer, C. (2016). Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.071>
- Saboo, N., Shivhare, S., Kori, K. K., & Chandrappa, A. K. (2019). Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, *223*, 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>
- Sadrumontazi, A., Noorollahi, Z., Tahmouresi, B., & Saradar, A. (2019). Effects of hauling time on self-consolidating mortars containing metakaolin and natural zeolite. *Construction and Building Materials*, *221*, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.037>
- Saleh Ahari, R., Kemal Erdem, T., & Ramyar, K. (2015). Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, *75*, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014>
- Samson, G., Cyr, M., & Gao, X. X. (2017). Formulation and characterization of blended alkali-activated materials based on flash-calcined metakaolin, fly ash and GGBS. *Construction and Building Materials*, *144*, 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.160>
- San Nicolas, R., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2014). Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. *Construction and Building Materials*, *55*, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.063>
- Santos, T., Gomes, M. I., Silva, A. S., Ferraz, E., & Faria, P. (2020). Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. *Construction and Building Materials*, *254*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222>
- SANTOS, V. C., VANDERLEI, R. D., MORAES, K. K., ROSINA, E. T. D. F., & BALBINO, G. M. (2019). Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, *12*(1), 179–198. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000100012>
- Sapata, A., Šinka, M., Šahmenko, G., Korat Bensa, L., Hanžič, L., Šter, K., Ručevskis, S., Bajāre, D., & Bos, F. P. (2025). Establishing Benchmark Properties for 3D-Printed Concrete: A Study of Printability, Strength, and Durability. *Journal of Composites Science*, *9*(2), 74. <https://doi.org/10.3390/jcs9020074>
- Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (2020). *Construction 4.0* (A. Sawhney, M. Riley, & J. Irizarry, Eds.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780429398100>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). In *Cement and Concrete Research* (Vol. 114, pp. 49–56). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Shahzad, Q., Wang, X., Wang, W., Wan, Y., Li, G., Ren, C., & Mao, Y. (2020). Coordinated adjustment and optimization of setting time, flowability, and mechanical strength for construction 3D printing material derived from solid waste. *Construction and Building Materials*, *259*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119854>
- Sharma, A., Gupta, S., Noman Husain, M., & Chaudhary, S. (2025a). Factors affecting the rheology of cement-based composites: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, *108*(6). <https://doi.org/10.1111/jace.20429>
- Sharma, A., Gupta, S., Noman Husain, M., & Chaudhary, S. (2025b). Factors affecting the rheology of cement-based composites: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, *108*(6). <https://doi.org/10.1111/jace.20429>
- Shi, Z., Yang, Z., Wang, Z., & Liu, L. (2024). Ultrasonic intensification of flocculation filtration for kaolinite: Unraveling mechanisms and performance gains. *Separation and Purification Technology*, *332*, 125773. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125773>

- Shukla, B. K., Bharti, G., Sharma, P. K., Sharma, M., Rawat, S., Maurya, N., Srivastava, R., & Srivastav, Y. (2024). Sustainable construction practices with recycled and waste materials for a circular economy. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(7), 5255–5276. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01111-y>
- Silva, L. F., Filla, G. de P. T., Amorim, E. M. R., & Toralles, B. M. (2022). Usage potential of fly ash an metakaolin in cementitious materials for 3D printing. *Revista Materia*, 27(2). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1396>
- Singh, N., Colangelo, F., & Farina, I. (2023). Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review. *Sustainability*, 15(13), 10121. <https://doi.org/10.3390/su151310121>
- Sinngu, F., Ekolu, S. O., Naghizadeh, A., & Quainoo, H. A. (2023). Evaluation of metakaolin pozzolan for cement in South Africa. *Developments in the Built Environment*, 14, 100154. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100154>
- Šmilauer, V., Hlaváček, P., Škvára, F., Šulc, R., Kopecký, L., & Němeček, J. (2011). Micromechanical multiscale model for alkali activation of fly ash and metakaolin. *Journal of Materials Science*, 46(20), 6545–6555. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5601-x>
- Snelson, D. G., Wild, S., & O'Farrell, M. (2008). Heat of hydration of Portland Cement–Metakaolin–Fly ash (PC–MK–PFA) blends. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 832–840. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.004>
- Solf, B., Guerrero, L., & Sherzad, S. (2024, March 20). *Global Affordable Housing Shortages Can Harm Migrant Reception and Integration*. Migration Policy Institute.
- Sonebi, M., Abdalqader, A., Fayyad, T., Amziane, S., & El-Khatib, J. (2022). Effect of fly ash and metakaolin on the properties of fiber-reinforced cementitious composites: A factorial design approach. *Computers and Concrete*, 29(5), 347–360. <https://doi.org/10.12989/cac.2022.29.5.347>
- Sonebi, M., Lachemi, M., & Hossain, K. M. A. (2013). Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 38, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.102>
- Song, X., Xu, Q., Wang, H., Sun, X., & Xue, F. (2025). Flowability-Dependent Anisotropic Mechanical Properties of 3D Printing Concrete: Experimental and Theoretical Study. *Applied Sciences*, 15(11), 6070. <https://doi.org/10.3390/app15116070>
- Subhani, S., Subhani, S. M., & Bahurudeen, A. (2024). Utilization of sugarcane bagasse ash in binary, ternary, and quaternary blended cement concrete –A waste to Wealth approach. *Materials Today Sustainability*, 28, 100954. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100954>
- Subramanya, K., Kermanshachi, S., & Rouhanizadeh, B. (2020). *MODULAR CONSTRUCTION VS. TRADITIONAL CONSTRUCTION: ADVANTAGES AND LIMITATIONS: A COMPARATIVE STUDY*.
- Sun, M., Bennett, T., & Visintin, P. (2022). Plastic and early-age shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): Experimental study of the effect of water to binder ratios, silica fume dosages under controlled curing conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00948. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00948>
- Suraneni, P. (2021). Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials. *RILEM Technical Letters*, 6, 131–139. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.150>
- Surehali, S., Gustafson, C., Volaity, S. S., Divigalpitiya, R., Kumar, A., & Neithalath, N. (2025). Rheology and early-age structure development in binary and ternary blends modified with novel graphene types. *Cement and Concrete Composites*, 156, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105869>
- Sutar, S. N., Patil, V., Chavan, V., & Maske, M. M. (2021). Study and Review of Ordinary Portland Cement. *ASEAN Journal of Science and Engineering Journal Homepage: ASEAN Journal of Science and Engineering*, 1(3), 153–160. <https://doi.org/10.17509/xxxx.xxxx>
- Szostak, B., & Golewski, G. L. (2020). Modification of early strength parameters of concrete by the addition of fly ash and admixture of nano C-S-H for application in 3D printing. *MATEC Web of Conferences*, 323, 01016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032301016>
- Tamir, T. S., Xiong, G., Shen, Z., Leng, J., Fang, Q., Yang, Y., Jiang, J., Lodhi, E., & Wang, F. Y. (2023). 3D printing in materials manufacturing industry: A realm of Industry 4.0. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19689>

- Tavares, L. R. C., Junior, J. F. T., Costa, L. M., da Silva Bezerra, A. C., Cetlin, P. R., & Aguilar, M. T. P. (2020). Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. *Scientific Reports*, *10*(1), 21461. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w>
- Tebbal, N., & Abidine Rahmouni, Z. El. (2019). Rheological and Mechanical Behavior of Mortars with Metakaolin Formulation. *Procedia Computer Science*, *158*, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.026>
- Teixeira, J., Schaefer, C. O., Rangel, B., Maia, L., & Alves, J. L. (2023). A road map to find in 3D printing a new design plasticity for construction – The state of art. *Frontiers of Architectural Research*, *12*(2), 337–360. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2022.10.001>
- Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L., & Köhler, L. L. (2015). Experimental and modeling study of flash calcination of kaolinite rich clay particles in a gas suspension calciner. *Applied Clay Science*, *103*, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.003>
- Thajeel, M. M., Kopecskó, K., & Balázs, G. L. (2025). Enhancing printability of 3D printed concrete by using metakaolin and silica fume. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.70119>
- Thomas, J. J., Musso, S., & Prestini, I. (2014). Kinetics and activation energy of magnesium oxide hydration. *Journal of the American Ceramic Society*, *97*(1), 275–282. <https://doi.org/10.1111/jace.12661>
- Thompson, R. L., Sica, L. U. R., & de Souza Mendes, P. R. (2018). The yield stress tensor. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, *261*, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2018.09.003>
- Tu, H., Wei, Z., Bahrami, A., Ben Kahla, N., Ahmad, A., & Özkılıç, Y. O. (2023). Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials. In *Developments in the Built Environment* (Vol. 16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100187>
- Tural, H. G., Ozarisoy, B., Derogar, S., & Ince, C. (2024). Investigating the governing factors influencing the pozzolanic activity through a database approach for the development of sustainable cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *411*, 134253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134253>
- van der Heijden, J. (2023). Construction 4.0 in a narrow and broad sense: A systematic and comprehensive literature review. *Building and Environment*, *244*, 110788. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110788>
- Vance, K., Kumar, A., Sant, G., & Neithalath, N. (2013). The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, *52*, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.007>
- Vasilca, I.-S., Nen, M., Chivu, O., Radu, V., Simion, C.-P., & Marinescu, N. (2021). The Management of Environmental Resources in the Construction Sector: An Empirical Model. *Energies*, *14*(9), 2489. <https://doi.org/10.3390/en14092489>
- Vera-Sorroche, J., Kelly, A. L., Brown, E. C., Gough, T., Abeykoon, C., Coates, P. D., Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., & Price, M. (2014). The effect of melt viscosity on thermal efficiency for single screw extrusion of HDPE. *Chemical Engineering Research and Design*, *92*(11), 2404–2412. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.12.025>
- Vico Lujano, R., Pérez Villarejo, L., Novais, R., Torrano, P., Rodrigues Neto, J., & Labrincha, J. (2025). Optimized Mortar Formulations for 3D Printing: A Rheological Study of Cementitious Pastes Incorporating Potassium-Rich Biomass Fly Ash Wastes. *Materials*, *18*(15), 3564. <https://doi.org/10.3390/ma18153564>
- Vijayenthiran, V., Perera, B. A. K. S., & Kavirathna, A. S. (2025). Convergence of 3D printing with circular economy to improve the construction sustainability. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2024-0397>
- Wang, S., Gu, X., Liu, J., Zhu, Z., Wang, H., Ge, X., Xu, X., & Nehdi, M. L. (2023). Modulation of the workability and Ca/Si/Al ratio of cement-metakaolin cementitious material system by using fly ash: Synergistic effect and hydration products. *Construction and Building Materials*, *404*, 133300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133300>
- Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A. M., & Flatt, R. J. (2019). Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research*, *123*, 105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
- Weise, K., Ukrainczyk, N., & Koenders, E. (2024). Pozzolanic Metakaolin Reactions: Stoichiometric and Kinetic Modeling. *Materials & Design*, *239*, 112747. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112747>
- Winnefeld, F., Leemann, A., German, A., & Lothenbach, B. (2022). CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100672>

- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, *119*, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
- Wolfs, R., Verstege, J., Santhanam, M., Bhattacharjee, S., Bos, F., Robens-Radermacher, A., Muthukrishnan, S., Menna, C., Ozturk, O., Ozyurt, N., Roupec, J., Richter, C., Jungwirth, J., Miranda, L., Ammann, R., Caron, J.-F., de Bono, V., Monte, R., Navarrete, I., ... Mechtcherine, V. (2025). Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — flexural and tensile strength. *Materials and Structures*, *58*(5), 182. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02687-w>
- Wu, Y., Liu, C., Liu, H., Zhang, Z., He, C., Liu, S., Zhang, R., Wang, Y., & Bai, G. (2021). Study on the rheology and buildability of 3D printed concrete with recycled coarse aggregates. *Journal of Building Engineering*, *42*, 103030. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103030>
- Xiao, J., Liu, H., & Ding, T. (2021). Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure. *Additive Manufacturing*, *39*, 101712. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101712>
- Xu, J., Li, Y., Su, H., Xu, H., Li, L., & Lu, L. (2025). Evaluating the impact of nano-silica particle size on pozzolanic reaction kinetics, mechanical strength and durability of portland slag cement. *Construction and Building Materials*, *472*, 140784. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140784>
- Xu, Q., Ji, T., Gao, S.-J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. *Materials*, *12*(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ma12010039>
- Xu, W., Huang, S., Han, D., Zhang, Z., Gao, Y., Feng, P., & Zhang, D. (2022). Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house. *Case Studies in Construction Materials*, *17*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442>
- Yang, T., Zhu, H., & Zhang, Z. (2017). Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, *153*, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.067>
- Yang, T., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, X., Zhang, C., & Wu, Q. (2018). Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Research*, *109*, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.008>
- Yang, W., Wang, L., Ma, G., & Feng, P. (2023). An integrated method of topological optimization and path design for 3D concrete printing. *Engineering Structures*, *291*, 116435. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116435>
- Ye, H., Gao, X., & Zhang, L. (2019). Influence of time-dependent rheological properties on distinct-layer casting of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *199*, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.025>
- Ye, J., Cui, C., Yu, J., Yu, K., & Xiao, J. (2021). Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber. *Composites Part B: Engineering*, *211*, 108639. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108639>
- Yeluri, M., Ertugral, E. G., Sharma, Y., Fodor, P. S., Kothapalli, C. R., & Allena, S. (2025). Revolutionizing ultra-high performance concrete: Unleashing metakaolin and diatomaceous earth as sustainable fly ash alternatives. *Construction and Building Materials*, *460*, 139822. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139822>
- Yin, T., Leng, Y., Shu, K., Liu, K., Fan, D., Wang, S., Zhu, J., & Yu, R. (2025). Effects of aggregate morphology and particle size distribution modulus on the rheological properties and microstructure of low water/binder cement-based composites (LW/B-CC). *Powder Technology*, *453*, 120608. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120608>
- Yuan, Q., Zhou, D., Li, B., Huang, H., & Shi, C. (2018). Effect of mineral admixtures on the structural build-up of cement paste. *Construction and Building Materials*, *160*, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.050>
- Zaid, O., & El Ouni, M. H. (2024). Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments. *Construction and Building Materials*, *427*, 136254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136254>
- Zajemska, M., Wojtyto, D., Michalik, J., & Berski, S. (2025). Review of Current Trends in Sustainable Construction. *Energies*, *18*(10), 2559. <https://doi.org/10.3390/en18102559>

- Zhan, P., Xu, J., Wang, J., & Jiang, C. (2021). Multi-scale study on synergistic effect of cement replacement by metakaolin and typical supplementary cementitious materials on properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 307, 125082. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125082>
- Zhang, C., Hou, Z., Chen, C., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Sun, Z. (2019). Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103406. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103406>
- Zhang, C., Zhu, Z., & Liu, R. (2023). The intrinsic relationship between flocculation effect and apparent viscosity of fresh slurry. *Construction and Building Materials*, 371, 130769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130769>
- Zhang, H., Tan, Y., Hao, L., Zhang, S., Xiao, J., & Poon, C. S. (2024). Intelligent real-time quality control for 3D-printed concrete with near-nozzle secondary mixing. *Automation in Construction*, 160, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105325>
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>
- Zhang, N., Li, H., & Liu, X. (2016). Hydration mechanism and leaching behavior of bauxite-calcination-method red mud-coal gangue based cementitious materials. *Journal of Hazardous Materials*, 314, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.040>
- Zhang, N., & Sanjayan, J. (2023). Extrusion nozzle design and print parameter selections for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 137, 104939. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104939>
- Zhang, R. (2018). *Carbonated Reactive MgO-Portland Cement Blends: Chemistry, Microstructure and Properties*.
- Zhang, S., Zhou, Y., Sun, J., Han, F., Fu, C., Zhang, P., & Taylor, P. (2021). *Effect of Ultrafine Metakaolin on the Properties of Mortar and Concrete*. <https://doi.org/10.3390/cryst11060>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M., & Pang, B. (2018). Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*, 174, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>
- Zhang, Z., Ahmad, N., Shrestha, A., Tang, Z., Cai, Z., Ergashev, R., Kalandarbekov, I., Liu, L., & Li, L. (2025). Investigation of fresh, shrinkage, and mechanical properties in iron sand high-strength engineered cementitious composites: Effects of water-to-binder ratio and fiber volume fraction. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04138. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04138>
- Zhao, Z., Chen, M., Zhong, X., Huang, Y., Yang, L., Zhao, P., Wang, S., Lu, L., & Cheng, X. (2021). Effects of bentonite, diatomite and metakaolin on the rheological behavior of 3D printed magnesium potassium phosphate cement composites. *Additive Manufacturing*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102184>
- Zheng, D. peng, Wang, D. min, Li, D. le, Ren, C. fu, & Tang, W. ching. (2017). Study of high volume circulating fluidized bed fly ash on rheological properties of the resulting cement paste. *Construction and Building Materials*, 135, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.127>
- Zheng, S., Liu, T., Jiang, G., Fang, C., Qu, B., Gao, P., Li, L., & Feng, Y. (2021). Effects of Water-to-Cement Ratio on Pore Structure Evolution and Strength Development of Cement Slurry Based on HYMOSTRUC3D and Micro-CT. *Applied Sciences*, 11(7), 3063. <https://doi.org/10.3390/app11073063>
- Zhong, H., & Zhang, M. (2022). 3D printing geopolymers: A review. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 128). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104455>
- Zhou, S., Yang, Z., Zhang, R., & Li, F. (2021). Preparation, characterization and rheological analysis of eco-friendly road geopolymer grouting materials based on volcanic ash and metakaolin. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127822>
- Zhou, Y., Wang, Z., Zhu, Z., Chen, Y., Wu, K., Huang, H., Anvarovna, K. G., & Xu, L. (2022). Influence of metakaolin and calcined montmorillonite on the hydration of calcium sulphoaluminate cement. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01104>
- Zhou, Z., Geng, J., Jin, C., Liu, G., & Xia, Z. (2024). Influence of Residue Soil on the Properties of Fly Ash–Slag-Based Geopolymer Materials for 3D Printing. *Materials*, 17(12), 2992. <https://doi.org/10.3390/ma17122992>

- Zunino, F., & Scrivener, K. (2021). The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106307>
- Zuo, J., Hong, Z., Xiong, Z., Wang, C., & Song, H. (2018). Influence of different W/C on the performances and hydration progress of dual liquid high water backfilling material. *Construction and Building Materials*, 190, 910–917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.146>