

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE
PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE
ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE
EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D**

Por

SAMUEL MARES CHÁVEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en Materiales de Construcción**

F e b r e r o , 2 0 2 6

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE
PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE
ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE
EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D**

Por

ING. SAMUEL MARES CHÁVEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

DIRECTOR

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL

COASESOR

DR. JORGE HUMBERTO DÍAZ AGUILERA

ASESOR EXTERNO

DR. HUMBERTO VARUM

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Febrero de 2026



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: SAMUEL MARES CHÁVEZ

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE
PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE
ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO
DE EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACION EN
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 febrero de 2016

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66456
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fec@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 3; Página 1 de 1



2026/02/17

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 **“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D”**, que presenta el ING. SAMUEL MARES CHÁVEZ, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS 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 **“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D”**, que presenta el **ING. SAMUEL MARES CHÁVEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS 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

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

Porto, 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 “**OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D**”, que presenta el **ING. SAMUEL MARES CHÁVEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS 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.

Evaluator:



Humberto Varum
Professor Catedrático

CONSTRUCT-LESE
Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Civil e Georecursos
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
Mobile: +351-91-9369393 // E-mail: hvarum@fe.up.pt

**OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE
PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE
ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE
EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D**

Aprobación de la Tesis

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Director de Tesis

Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera
Coasesor de Tesis

Dr. Humberto Varum
Asesor externo

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

DEDICATORIA

A Dios Todo poderoso, por haber sido mi guía, mi refugio y mi fuerza en cada paso de este camino. Nada de esto habría sido posible sin su presencia constante en mi vida.

A mi amada familia:

A mis padres, Juana Idalia Chávez Ortiz y Samuel Mares Ledezma, por su gran amor, sacrificio y apoyo incondicional que han sido el cimiento de todo lo que soy.

A mis abuelos y tíos que, desde el cielo o desde la distancia, siempre han creído en mí.

A mi familia extendida, que, con palabras de aliento o silencios comprensivos, acompañaron cada esfuerzo desde lejos.

Gracias por ser mi raíz, mi impulso y mi motivación.

Con infinito amor y gratitud...

...gracias por enseñarme a nunca rendirme.

“One day you’ll leave this world behind, so live a life you will remember”

Tim Bergling AKA Avicii 

Samuel Mares Chávez

San Nicolás de los Garza, N.L., México, febrero 2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. José Manuel Mendoza Rangel, asesor de esta tesis, por su invaluable orientación, confianza y compromiso durante cada etapa del proyecto. Asimismo, agradezco al Dr. Humberto Varum por formar parte del comité de tesis y aportar valiosas observaciones que fortalecieron este trabajo.

Reconozco el respaldo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado mediante la beca con número de CVU: 1346629, que fue fundamental para realizar estos estudios de posgrado.

Mi agradecimiento se extiende a los laboratorios del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, en especial al Centro de Investigación e Innovación de Materiales de la Construcción (CIIMAC), al Laboratorio de Vías Terrestres, y al Grupo de Investigación y Desarrollo de Economía Circular para la Construcción Sostenible (GIDECON). En particular, reconozco el apoyo académico y humano de cada uno de mis compañeros del grupo de investigación: Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera, Dr. José Raúl Zapata Padilla, Dr. José Alberto Mendoza Jiménez, Dr. Francisco David Anguiano Pérez, M.C. Andy Alfonso Olivera, M.C. Erik Eduardo Espino Robles, M.C. Mario Iván Velásquez Hernández, M.C. Emireth Aitana Mellado Lira, M.C. Mayra Marcela Rendón Olvera, Ing. Alexis Gustavo Bustos López, Ing. Paola Gándara del Muro, Arq. César Ricardo Reyes Morales y futura Ing. Ana Gabriela Alejo Hernández por su colaboración, compañerismo y consejos durante el desarrollo de mi proyecto en la maestría.

Agradezco profundamente a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Civil por brindarme la oportunidad de formar parte de este posgrado y crecer tanto profesional como personalmente en su casa de estudios.

En el ámbito personal, dedico este logro a mis padres, Juana Idalia Chávez Ortiz y Samuel Mares Ledezma, por su amor incondicional y por apoyarme firmemente en cada decisión. A mis abuelos Josefina Ortiz Luna, Efrén Rodolfo Chávez Uribe (†), San Juana Ledezma Montes (†) y Antonio Mares Hernández (†), así como a mis tíos Jesús Mares Ledezma (†) y Eufrasia Castañeda Esparza, quienes desde la distancia siempre estuvieron presentes brindándome su apoyo incondicional.

A mis colegas y grandes amigos de VINSA “marcando tu camino” y que considero como mi segunda familia: al Ing. Armando Jacobo Pérez; a sus hermanas, Ing. Carolina Jacobo Pérez, Ing. Elizabeth Jacobo Pérez y Mtra. Berenice Jacobo Pérez, a sus padres, al Sr. J. Santos Jacobo Jacobo y Sra. Eugenia Pérez Hernández, se les agradece de todo corazón por haber estado presentes durante toda mi trayectoria académica y profesional desde la distancia. Por haber sido mi impulso para tomar la decisión de estudiar este posgrado y enseñarme a jamás darme por vencido.

Agradezco también a mis compañeros del posgrado, amigos y colegas, en especial a Diego Alexis Minaya Abregú, Blanca Anakaren Castro Botello, María Fernanda Medrano Villalobos y Xavier Perea Cervantes, con quienes compartí experiencias y momentos que hicieron inolvidable este posgrado.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron en este proyecto, con un consejo oportuno, una palabra de aliento o simplemente con su amistad. Les expreso mi más sincero agradecimiento. Este trabajo no es solo resultado de mi dedicación, sino también el reflejo del acompañamiento y apoyo colectivo que me ha sostenido a lo largo de este camino.

A todos ustedes, muchas gracias.

Samuel Mares Chávez

“Cada paso es uno menos...”

San Nicolás de los Garza, N.L., México, febrero 2026

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción a la impresión 3D con materiales basados en tierra.....	1
1.2. Avances internacionales de impresión 3D en la industria de la construcción.....	3
1.3. Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en impresión 3D.....	11
1.4. Investigaciones sobre impresión 3D de materiales cementantes con tierra.....	17
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1. Residuos de construcción y demolición.	27
2.2. Impresión 3D de materiales cementantes.....	41
2.3. Reología.....	59
2.4. Propiedades mecánicas.....	64
2.5. Análisis estadístico.....	66
2.6. Planteamiento del problema.	72
2.7. Justificación.	76
2.8. Hipótesis y objetivos.	78
CAPITULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL.	81
3.1. Caracterización física y química de las materias primas.	83
3.2. Diseño de experimentos	91
3.3. Ensayos de resistencia de compresión.....	93
3.4. Caracterización de las propiedades de printabilidad.....	95
3.5. Caracterización de las propiedades reológicas.....	104
3.6. Análisis estadístico y optimización.	106
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	108
4.1. Caracterización de las materias primas.	108
4.2. Resistencia de compresión.....	130
4.3. Propiedades de printabilidad.....	134
4.4. Propiedades reológicas.....	151
4.5. Optimización multivariable con base en el desempeño reológico, mecánico y de printabilidad.....	158

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	178
PRODUCTOS GENERADOS.....	187
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS.....	190

Lista de figuras

Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de las Naciones Unidas ^[2]	5
Figura 2. Construcciones impresas en 3D: a) vivienda unifamiliar de un nivel ubicada en Eindhoven, Países Bajos (2021); b) vivienda unifamiliar de dos niveles construida por PERI Group en Alemania (2021) y c) puente peatonal ubicado en Alcobendas, Madrid (2017) ^[53,56,57]	6
Figura 3. Prototipos de viviendas impresas en 3D con TPE construidas en Italia por la empresa WASP: a) modelo GAIA (2018) y b) modelo TECLA (2021) ^[59,60]	8
Figura 4. Prototipos de vivienda construidas por impresión 3D en Latinoamérica: a) “Casa Origami” ubicada en Colombia (2022); b) casa construida por el Grupo danés 3DCP de la empresa COBOD en Guatemala (2023) y c) “Casa Semilla” ubicada en Chile (2024) ^[62–64]	10
Figura 5. Viviendas impresas en 3D construidas por ICON en Nacajuca, México en el año 2019 ^[65]	11
Figura 6. Escombrera metropolitana de SIMEPRODE ubicada en Salinas Victoria, Nuevo León: a) firma del convenio entre SIMEPRODE, la CMIC y HOLCIM en el marco de la inauguración de la escombrera; b) colocación de la primera piedra y c) recepción de RCD con camiones de volteo dentro de la escombrera ^[81]	16
Figura 7. Evaluación para la printabilidad según Daher y col. (2023): a) propiedades clave; b) medición de edificabilidad con prueba del minicono ^[87]	18
Figura 8. Evaluación para la printabilidad según Bhusal y col. (2023): a) medición de la extrudabilidad; b) mediciones de edificabilidad ^[88]	19
Figura 9. Evaluación de propiedades reológicas propuesto por Bhusal y col. (2023): a) reómetro rotacional Brookfield con sistema de copa y geometría de paleta de corte; b) protocolo de ensayo para curva de flujo ^[88]	21
Figura 10. Especímenes para ensayos de resistencia de compresión: a) prismas de 4 x 4 x 16 cm impresos con pistola calafateadora y b) cubos cortados de 4 x 4 x 4 cm de una I3D ^[87]	22
Figura 11. Especímenes impresos en 3D con diferentes combinaciones de patrón zig-zag y dimensiones (largo x ancho x alto en mm): a) por Jo y col. (2020) (580 x 320 x altura variable); b) por Ferretti y col. (2022) (730 x 530 x 504) y c) por Cuevas y col. (2023) (900 x 300 x 450) ^[90–92]	24

Figura 12. Gráficos de superficie de respuesta: a) respuestas de ECE y ECD variando la cantidad de acelerante y retardante y b) respuestas de fluidez y ECD variando las cantidades de PCE y HPMC ^[93,94]	25
Figura 13. Micrografías típicas de TPE: a) x500 y b) x4000 ^[105]	34
Figura 14. Ensayo de extrudabilidad: a) protocolo de prueba y b) evaluación de la extrudabilidad en impresora 3D de laboratorio ^[88]	46
Figura 15. Calidad de extrusión: a) desgarrar de filamento impreso; b) cambios de sección transversal durante I3D y c) deformación y cambio de altura de capa a misma velocidad de impresión ^[10]	49
Figura 16. Edificabilidad: a) número máximo de capas apiladas y b) asentamiento diferencial con peso constante ^[10,87]	53
Figura 17. Tiempo abierto: a) esquema visual y b) cálculo. Ambas figuras adaptadas de ^[122]	55
Figura 18. Fluidez con minicono: a) dimensiones y b) diámetros de flujo ^[130] ..	57
Figura 19. Reologías independientes del tiempo adaptado de ^[135]	60
Figura 20. Anisotropía mecánica en RC en diferentes direcciones de aplicación de carga, adaptado de ^[142]	65
Figura 21. Flujograma de actividades de la metodología experimental.	82
Figura 22. Escombrera Metropolitana de SIMEPRODE: a) acceso principal y b) zona de estudio dentro de la escombrera.....	84
Figura 23. Área de acopio y obtención de los lotes de TPE en la escombrera de SIMEPRODE.	85
Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de extracción, pretratamiento y caracterización del TPE proveniente de la escombrera metropolitana de SIMEPRODE en Salinas Victoria, Nuevo León.....	90
Figura 25. a) Especímenes cúbicos para ensayos de resistencia de compresión; b) ensayo de carga axial en sistema INSTRON 600DX-SATEC.....	94
Figura 26. a) Dimensiones de tabicón impreso en 3D para ensayos de resistencia de compresión; b) aplicación de carga axial en la prensa INSTRON 600DX-SATEC.	95
Figura 27. Impresión 3D de pastas con duya y manga pastelera: a) fotografía realizando las pruebas en el laboratorio y b) ensayos de printabilidad (izquierda a derecha): extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad.	96
Figura 28. a) Diseño de impresora 3D del GIDECON de 1x1x1 m ³ de capacidad; b) Impresora 3D de 1x1x1 m ³	97
Figura 29. Componentes principales de la impresora GIDECON de 1×1×1 m ³ : a) tolva con tornillo sinfín; b) manguera de 25 mm de diámetro y c) salida de manguera con adaptación impresa en 3D con plástico PLA.....	98
Figura 30. Pruebas de extrudabilidad: a) utilizando duya adaptado de Bhusal y col. (2023) [88] y b) utilizando impresora 3D del GIDECON.	99

Figura 31. Prueba de calidad de extrusión: a) filamentos impresos con duya y b) medición de altura objetivo.	100
Figura 32. Prueba de edificabilidad: a) esquema de la prueba adaptado de Bhusal y col. (2023) ^[88] ; b) prueba de edificabilidad en impresora del GIDECON.	101
Figura 33. Medición de fluidez: a) con mesa de fluidez (ASTM C1437) y b) minicono: medición de diámetros de flujo y asentamiento diferencial.....	102
Figura 34. Diagrama de flujo mostrando el proceso de la caracterización de las propiedades de printabilidad.....	103
Figura 35. a) Reómetro AntonPaar MCR102n; b) geometría de cilindros concéntricos.....	104
Figura 36. Protocolo del ensayo para obtener las curvas de flujo y viscosidad adaptado de ^[88]	105
Figura 37. Difractogramas por DRX de las materias primas: a) del CPC 30R de CEMEX® y b) de los 12 lotes de TPE.....	109
Figura 38. Composición química de los lotes del TPE y el CPC obtenido por FRX.	111
Figura 39. Espectros FTIR de los lotes de TPE.	115
Figura 40. Mapeos por EDS de las muestras de TPE del a) lote 1, b) lote 4, c) lote 6 y d) lote 12.	118
Figura 41. Carta de plasticidad mostrando el tipo de arcilla o limo al que corresponde cada lote. CH: arcillas inorgánicas de alta compresibilidad; CL: arcillas inorgánicas de baja compresibilidad; MH: limos inorgánicos de alta compresibilidad; ML: limos inorgánicos de baja compresibilidad; O: limos y arcillas orgánicas.	122
Figura 42. Micrografías por MEB de las muestras de TPE del a) lote 2, b) lote 4, c) lote 9 y d) lote 10.	125
Figura 43. Resistencia de compresión en cubos de las mezclas a las edades de 7 y 28 días.	131
Figura 44. Comparativa de resistencia de compresión de los cubos y tabicones impresos de las mezclas potenciales para impresión 3D con a/cm=0.30 a las edades de 7 y 28 días.....	133
Figura 45. Resultados de fluidez de las mezclas utilizando los métodos de: a) mesa de fluidez por la ASTM C1437 y b) minicono para pastas de Okamura y col. (1993) ^[132]	135
Figura 46. Correlación entre valores de fluidez medidas con minicono y ASTM C1437.	137
Figura 47. Índice de extrudabilidad (%) de las mezclas evaluadas.....	138
Figura 48. Índice de calidad de extrusión (%) de las mezclas evaluadas.	139
Figura 49. Índice de edificabilidad (%) de las mezclas evaluadas.	142
Figura 50. Printabilidad (%) de las mezclas evaluadas.....	143

Figura 51. Zona de printabilidad aceptable: relación entre el asentamiento (mm) y la fluidez (mm) obtenida con el minicono.	145
Figura 52. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 70% de TPE y $a/cm = 0.30$	147
Figura 53. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 80% de TPE y $a/cm = 0.30$	149
Figura 54. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 90% de TPE y $a/cm = 0.30$	150
Figura 55. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 70% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.	152
Figura 56. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 80% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.	153
Figura 57. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 90% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.	154
Figura 58. Resultados comparativos de ECE, ECD y viscosidades aparentes en el tiempo para pastas con: a) 70% TPE y $a/cm = 0.30$; b) 80% TPE y $a/cm = 0.30$ y c) 90% TPE y $a/cm = 0.30$	156
Figura 59. Gráfica de Pareto para resistencia de compresión en cubos a 7 días de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.	161
Figura 60. Gráfica de Pareto para resistencia de compresión en cubos a 28 días de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.	162
Figura 61. Gráfica de Pareto para la printabilidad de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.	162
Figura 62. Gráfica de Pareto para el esfuerzo de cedencia estático de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.	163
Figura 63. Gráfica de Pareto para el esfuerzo de cedencia dinámico de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.	163
Figura 64. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la resistencia de compresión a 7 días para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.	168
Figura 65. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la resistencia de compresión a 28 días para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.	169
Figura 66. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la printabilidad para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.	170

Figura 67. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno del esfuerzo de cedencia estático para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.	171
Figura 68. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno del esfuerzo de cedencia dinámico para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.	172
Figura 69. Tabicón impreso en 3D usando la tinta optimizada de TPE/CP para un modelo con patrón de impresión en zigzag.	177

Lista de tablas

Tabla 1. Composiciones químicas de TPE utilizados en investigaciones de I3D y otras aplicaciones.	33
Tabla 2. Información técnica del CPC 30R CEMEX®.	86
Tabla 3. Diseño experimental de pastas.....	91
Tabla 4. Resumen de resultados de propiedades físicas de los lotes evaluados.	120
Tabla 5. Resultados de propiedades químicas y físicas del TPE.	129
Tabla 6. Modelos de regresión obtenidos mediante MSR para las pastas de TPE/CP para impresión 3D.....	160
Tabla 7. Resumen de resultados de cada una de las propiedades evaluadas.	164
Tabla 8. Resultados de la optimización de la TCI3D a base de TPE/CP.	175

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES.

1.1. Introducción a la impresión 3D con materiales basados en tierra.

La industria de la construcción enfrenta dos desafíos: (1) responder a la creciente demanda de vivienda y, (2) reducir el impacto ambiental de su construcción ^[1,2]. En este contexto, la impresión 3D (I3D) aplicada a la industria de la construcción emerge como una tecnología innovadora capaz de transformar los métodos constructivos tradicionales, al permitir la automatización del proceso, la personalización del diseño geométrico y la optimización en el uso de materiales ^[3–7]. Esta técnica consiste en la deposición capa por capa de una mezcla cementante extruible, sin necesidad de encofrados, lo que reduce tiempos de obra, consumo de materiales y generación de residuos ^[6–8]. Tradicionalmente, los materiales empleados en I3D para construcción se han basado en cementos Portland y agregados finos, diseñados para alcanzar las propiedades específicas de la extrudabilidad, la edificabilidad y la resistencia mecánica ^[9–12]. Sin embargo, el uso intensivo de cemento Portland (CP) asocia una emisión significativa de dióxido de Carbono (CO₂), lo cual impulsó la búsqueda de tintas cementantes más sostenibles para I3D ^[6,8,13–16]. En este sentido, el aprovechamiento de materiales de bajo impacto ambiental, como los suelos arcillosos o el residuo de

la tierra producto de excavación (TPE), ha cobrado interés en la comunidad científica y técnica [14,17–25].

La tierra como material constructivo, posee una larga historia en la edificación de viviendas, especialmente en regiones con disponibilidad de suelos arcillosos y condiciones climáticas favorables [26–29]. Su uso en I3D representó una evolución significativa respecto de las técnicas tradicionales de construcción con tierra, al requerir una formulación específica que permitió su procesamiento mediante extrusión continua, garantizando propiedades reológicas controladas y un adecuado desempeño mecánico [30–33]. Para lograrlo, es común estabilizar la mezcla con un aglutinante hidráulico (p.ej., CP) y ajustar la relación agua/aglutinante (a/cm) para alcanzar las propiedades en estado fresco requeridas (p.ej., las propiedades reológicas y de printabilidad) [9,34,35].

El desarrollo de tintas cementantes printables con base en tierra planteó desafíos técnicos, destacando la variabilidad en la composición de las tierras, la dificultad para estandarizar mezclas con comportamiento reológico controlado y la necesidad de asegurar propiedades estructurales mínimas en los elementos impresos [30,36–39]. Además, la implementación práctica de la I3D depende del equilibrio entre múltiples factores para el diseño de las tintas cementantes, p.ej.: las propiedades físicas y químicas de la tierra, el tipo y el contenido de aglutinante, la relación agua/sólidos, el diseño de la boquilla del extrusor y las condiciones de curado [25,36,40–42]. Otro aspecto clave es la capacidad de adaptación de esta técnica a contextos locales, particularmente en regiones con escasos recursos o con rezago en infraestructura habitacional. En ese sentido, el uso de materiales provenientes de residuos como el TPE generada en procesos de excavación urbana, puede representar una solución viable y replicable en proyectos de vivienda social, lo cual se alinea con la necesidad de lograr modelos de economía circular (EC) y un desarrollo sostenible para la industria de la construcción [27,37,43–45].

Bajo este enfoque, la presente investigación se centró en el diseño, caracterización y optimización de una tinta cementante elaborada a partir de TPE y CP, orientada a validar su potencial aplicación en la construcción por I3D mediante la impresión de elementos modulares. El objetivo fue lograr un equilibrio entre las propiedades de printabilidad, el comportamiento reológico y la resistencia a compresión de la tinta, para validar su viabilidad técnica como una alternativa escalable en sistemas de construcción por I3D, con el fin de solucionar la demanda de vivienda digna, asequible y sostenible (ViDAS) [1,7,46–48]. Asimismo, esta investigación busca aportar a los fundamentos técnicos y científicos para el desarrollo de futuras normativas aplicables a este tipo de materiales en el ámbito de la construcción automatizada por I3D.

1.2. Avances internacionales de impresión 3D en la industria de la construcción.

Actualmente, la impresión 3D (I3D) aplicada en la industria de la construcción ha generado interés en el nivel mundial porque hizo posible automatizar y digitalizar procesos constructivos que tradicionalmente fueron de forma manual, reduciendo la intervención directa del operario en tareas repetitivas y de alto riesgo. Esta tecnología permitió construir elementos constructivos con mayor precisión geométrica, disminuir errores asociados con el factor humano, trabajar de forma continua durante largos periodos y simplificar la logística en obra, al optimizar el proceso en un sistema de impresión controlado.

De esta manera la I3D se ha posicionado en el nivel internacional como una de las tecnologías con el potencial de poder contribuir directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 (Figura 1), específicamente con los siguientes cinco [7,49,50]:

- i) ODS 9 de industria, innovación e infraestructura: ya que permite digitalizar y automatizar los procesos constructivos, impulsando el desarrollo de nuevas cadenas de valor basadas en la fabricación aditiva, facilitando la construcción de infraestructuras más eficientes en el uso de los materiales y la energía.
- ii) ODS 11 de ciudades y comunidades sostenibles: porque posibilita la producción de vivienda asequible con versatilidad de diseño habitacional, reduciendo los tiempos de construcción en entornos urbanos, favoreciendo con soluciones para vivienda de interés social que disminuyen la huella de carbono de las edificaciones, contribuyendo a ciudades más seguras, inclusivas y sostenibles.
- iii) ODS 12 de producción y consumo responsables: ya que reduce los residuos de construcción y el consumo de materiales vírgenes al optimizar el diseño geométrico eliminando encofrados y a su vez aprovechando el uso de materiales reciclados y subproductos industriales en las tintas cementantes.
- iv) ODS 13 de acción por el clima: ya que disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con la construcción de las viviendas, al reducir el volumen de material utilizado in situ, incorporando materiales con baja huella de carbono en las tintas cementantes.

- v) ODS 17 de alianzas para lograr los objetivos: porque promueve las alianzas estratégicas entre los gobiernos, la industria y la academia, para desarrollar los proyectos piloto, los marcos regulatorios y los programas de capacitación especializados en I3D aplicada a la construcción de ViDAS.



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de las Naciones Unidas [2].

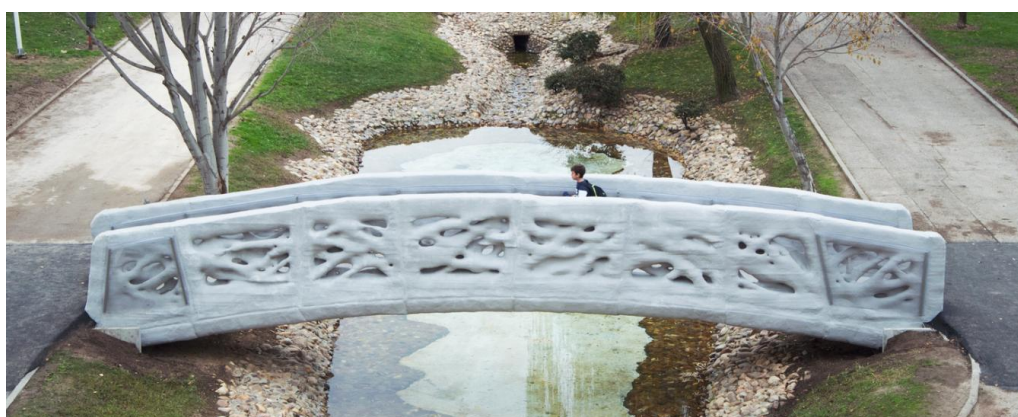
Por lo tanto, esta tecnología se consideró como una de las estrategias para transformar el sector de la construcción, al permitir la fabricación automatizada de los elementos estructurales mediante la deposición capa por capa de los materiales cementantes o similares [51]. P.ej. en países como China, Emiratos Árabes Unidos, Países Bajos y Estados Unidos se han construido viviendas unifamiliares, edificios de varios niveles y puentes in situ mediante I3D, evidenciando su potencial como una alternativa viable, técnica y económica, en comparación con los métodos tradicionales de construcción (Figura 2) [52–55].



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Construcciones impresas en 3D: a) vivienda unifamiliar de un nivel ubicada en Eindhoven, Países Bajos (2021); b) vivienda unifamiliar de dos niveles construida por PERI Group en Alemania (2021) y c) puente peatonal ubicado en Alcobendas, Madrid (2017) [52,55,56].

Estos proyectos mostraron reducciones de hasta un 88% las emisiones de CO₂, un 50% el uso de materiales y generación de residuos, el 70% en mano de obra especializada y hasta en un 90% costos y tiempos de ejecución de obra, debido principalmente a la eliminación del encofrado, a la optimización geométrica y a la automatización del proceso ^[13].

Asimismo, en Europa se desarrollaron proyectos piloto de vivienda social y prototipos habitacionales con I3D integrando materiales locales y residuos agrícolas, p. ej. en Italia, proyectos como los de GAIA y TECLA mostrados en la figura 3, se basaron en el uso de TPE adicionada con cal y cáscara de arroz, para imprimir envolventes arquitectónicas con baja huella de Carbono, alta eficiencia térmica y mínima generación de residuos, consolidando un modelo de vivienda circular, sostenible y construida con recursos in situ ^[57–59].

Por otro lado, en América Latina se documentaron avances recientes en la aplicación de la I3D para atender el déficit de vivienda (Figura 4). P.ej. en Perú, Camarena y Col. evaluaron la viabilidad de la I3D de concreto para la construcción de viviendas sociales, concluyendo que esta tecnología permitió reducir los costos de construcción en alrededor de 39% y los tiempos hasta un 35-87%, comparado con los métodos tradicionales, además de disminuir la generación de residuos, por lo que la consideraron una alternativa eficiente para proyectos masivos de vivienda en Latinoamérica con alta demanda habitacional ^[60].



(a)



(b)

Figura 3. Prototipos de viviendas impresas en 3D con TPE construidas en Italia por la empresa WASP: a) modelo GAIA (2018) y b) modelo TECLA (2021)^[58,59].

En Colombia, iniciativas lideradas por Cementos Argos y Comfama desarrollaron las primeras viviendas de interés social impresas en 3D, en La Unión, Antioquia, con unidades de aproximadamente 63 m², con el objetivo de validar el desempeño estructural de la tecnología a escala real (Figura 4a) ^[61]. Paralelamente, en Guatemala se construyó la primera vivienda impresa en 3D en una región sísmica, con muros de aproximadamente de 3.00m de altura impresos durante 26 horas (Figura 4b) ^[62]. Asimismo, en Chile se inauguró la “Casa

Semilla” un proyecto de 30 m² de construcción, reconocida como la primera vivienda impresa en 3D del país y uno de los hitos regionales en el uso de concreto impreso para vivienda, desarrollada por la Universidad del Bío-Bío e Inmobiliaria Aconcagua con el apoyo de diversas universidades colaboradoras de la región, agencias de financiamiento y sector productivo (Figura 4c) ^[63].

En 2019, en Nacajuca, Tabasco, México, organizaciones como ICON y New Story desarrollaron la primera comunidad de viviendas impresas en 3D en el nivel mundial, conformada por varias decenas de viviendas unifamiliares para familias de escasos recursos. Cada unidad se imprimió aproximadamente en 24 horas, utilizando una mezcla cementante de alta resistencia para condiciones sísmicas y climáticas locales ^[64] (Figura 5). Adicionalmente, empresas como CEMEX anunciaron en 2022 la introducción de la primera tecnología de I3D con concreto de grado constructivo, como una solución que busca imprimir con concreto premezclado mediante la adaptación reológica de la mezcla ^[65].

A pesar de los avances internacionales antes mencionados, la mayoría de los desarrollos en América Latina y en México han existido debido a colaboraciones con empresas extranjeras; esto debido a que tienen la tecnología y el conocimiento de las tintas cementantes, generando una oportunidad para que México pueda generar sus propias mezclas cementantes para I3D. Aunado a esto, la mayoría de los proyectos construidos se enfocaron principalmente en evaluar la viabilidad de la I3D de concreto para vivienda social, reducir los tiempos y costos y comparar este sistema con los métodos tradicionales de construcción, pero ninguno incorporó materiales locales en estas mezclas de I3D.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Prototipos de vivienda construidas por impresión 3D en Latinoamérica: a) “Casa Origami” ubicada en Colombia (2022); b) casa construida por el Grupo danés 3DCP de la empresa COBOD en Guatemala (2023) y c) “Casa Semilla” ubicada en Chile (2024) [61–63].



Figura 5. Viviendas impresas en 3D construidas por ICON en Nacajuca, México en el año 2019 ^[64].

1.3. Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en impresión 3D.

De acuerdo con informes técnicos de la Unión Europea, en 2016 los RCD representaron entre un 35-40% (≈ 374 millones de toneladas) de los residuos generados globalmente siendo una parte de los residuos no peligrosos como concretos, cerámicos y TPE los que concentraron el mayor volumen de RCD entre un 80-90% del volumen gestionado, reportando que aproximadamente 294

millones de toneladas de esta fracción fueron tratadas en instalaciones de reciclaje en 2018 ^[66,67]. No obstante, las tasas de recuperación de RCD variaron significativamente entre los Estados vecinos, con intervalos de entre 54-95%, siendo los Países Bajos el de mayor incidencia. Además, gran parte de los materiales recuperados se destinaron para aplicaciones básicas de ingeniería, como rellenos y subbases viales, en lugar de productos de valor agregado que permitieran generar una circularidad en los procesos de gestión de residuos ^[66-68]. Asimismo, en Flandes, Bélgica, se obtuvieron tasas de recuperación de TPE cercanas al 95%, lo cual mostró el potencial técnico para reutilizar estos materiales cuando existen marcos normativos de gestión de residuos ^[69].

En paralelo, se han desarrollado investigaciones que integraron RCD de concreto reciclado (CR) en mezclas para I3D, como morteros printables donde se variaron niveles de 0 hasta un 100% de sustitución de CR con respecto de la arena natural, demostrando la posibilidad de formular mezclas extruibles y edificables cuando se controla la distribución de tamaño de partícula (DTP) del CR y la reología de estas tintas cementantes ^[70]. Además, en Sudáfrica se cuantificaron inventarios de RCD de CR y mampostería aptos para I3D, en un intervalo de 12.2-24.3 millones de toneladas por año, frente a una demanda anual de agregados de ≈ 77.9 millones de toneladas en el sector de la construcción; estos valores mostraron que, aun bajo supuestos conservadores, los RCD de CR podrían abastecer una fracción relevante del consumo de agregados para mezclas printables si se consolidan cadenas de suministro y sistemas de control de calidad específicos para la I3D de RCD ^[71].

En México, la discusión sobre los RCD se centró inicialmente en la cantidad de residuos generados y en la infraestructura necesaria para su gestión y procesamiento. En 2019, en la Ciudad de México (CDMX) se analizaron los problemas de gestión de RCD, proponiéndose criterios para la selección de sitios de tratamiento y disposición final, resaltando que los residuos de concreto,

cerámicos y TPE se disponían mayoritariamente en tiraderos a cielo abierto o en rellenos no controlados, con riesgos ambientales asociados con la contaminación de suelos y cuerpos de agua ^[72]. También se han aplicado modelos de gestión de residuos en proyectos de vivienda de interés social y se estimaron volúmenes de producción de $\approx 0.083 \text{ t/m}^2$ de RCD, siendo el 83% residuos de CR, cerámicos y TPE, si bien, un gran porcentaje incidió en residuos con potencial para ser aprovechados por la industria de la construcción, solo el 22% de los mismos fueron enviados a plantas de aprovechamiento de RCD ^[73].

El marco regulatorio nacional clasificó a los RCD, incluyendo el TPE, como residuos de manejo especial, sujetos a planes de manejo específicos. La NOM-161-SEMARNAT-2011 estableció criterios para clasificar residuos de manejo especial, definiendo la obligación de formular planes de manejo y proporcionando lineamientos generales para su minimización, aprovechamiento y disposición final; a su vez, la norma ambiental local NADF-007-RNAT-2013 en la CDMX especificó la clasificación y las pautas de manejo para los RCD y el TPE como residuo inerte susceptible para su reutilización bajo ciertas condiciones ^[74]:

- Que los generadores de RCD y los prestadores de servicios deban cumplir con las disposiciones indicadas en las fases de manejo siendo: i) la respectiva separación en la fuente generadora de residuos; ii) realizar su almacenamiento temporal; iii) recolección y transporte; iv) tratamiento; v) aprovechamiento y vi) disposición final.
- Además, de que los residuos generados en obras de construcción deban separarse según su clasificación designada: A) provenientes de concretos hidráulicos y morteros; B) mezclados; C) provenientes de fresado de concreto asfáltico; D) residuos de excavación; E) residuos sólidos urbanos y F) Otros (papel, cartón, madera, metales, plásticos, vidrio, etc.).

Asimismo, otros instrumentos normativos hicieron referencia explícita a el TPE como residuo generado durante cimentaciones y movimientos de tierra, que podía emplearse para nivelaciones o rellenos siempre que cumpliera con lo establecido en la NOM-052-SEMARNAT-2005 sobre características de peligrosidad tales como su corrosividad, su reactividad, su explosividad, su toxicidad ambiental, su inflamabilidad o si se considera biológico-Infeccioso. [75].

En este contexto, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) elaboró el Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición (PM-RCD), donde se estableció que, a partir de 2013, los constructores estuvieron obligados a formular e implementar planes de manejo de RCD conforme a la NOM-161, promoviendo la separación, reutilización y reciclaje de materiales, entre ellos el TPE, aunque en la práctica su valorización se limitó a usos específicos como relleno y nivelación de taludes [74]. Complementando esta idea, se desarrollaron experiencias puntuales de reutilización de RCD en México, como la rehabilitación de parques urbanos utilizando CR en la CDMX, lo que evidenció el potencial de estos residuos para producir nuevos materiales de construcción, pero sin extender aún estas estrategias a tecnologías como la I3D [76].

En Nuevo León (NL), el Programa Estatal de Gestión Integral de Residuos reconoció a los RCD como uno de los flujos prioritarios en materia por atender y asignó al Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE) un papel central en su gestión [77,78]. Posteriormente, la Norma Ambiental Estatal NAE-SMA-008-2022 estableció la clasificación y las especificaciones para el manejo integral de los RCD en el estado, incluyendo porcentajes de incidencia de TPE (39%), concreto (25%), escombros mezclados (24%) y el 12% restante correspondiente a materiales como Yeso, muro falso, madera, cerámica, plásticos, entre otros. También se hizo énfasis en la necesidad de generar planes de manejo, valorización, reciclaje y disposición final controlada

de los RCD ^[79], lo cual conllevó que en 2024 el Gobierno de NL anunciara la puesta en marcha de la primera escombrera metropolitana de RCD con capacidad de hasta 400 t/día, destinada a recibir tanto materiales procedentes de la industria de la construcción, como sedimentos y materiales extraídos del Río Pesquería, con el objetivo de poder transformarlos en productos de valor agregado como bloques, adoquines, grava y arenas recicladas para obras del sector público y privado, lo que representó como un avance para poder transitar a un modelo de EC en la industria de la construcción en el Estado de NL (Figura 6) ^[80].

Sin embargo, a pesar de los avances normativos, las investigaciones y la infraestructura en países desarrollados, en México y en NL, sigue siendo un reto utilizar el TPE como un material para diseñar tintas cementantes en I3D, debido a la falta de un control de calidad que permita conocer la composición química y física con las que se recibe este material para su potencial aprovechamiento como materia prima circular en la I3D, por lo tanto, es necesario establecer rangos específicos de sustitución para conocer el desempeño óptimo de estas tintas, de tal manera que puedan ser printables y a su vez que cumplan con los estándares normativos de calidad, permitiendo así su implementación en la industria de la construcción.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Escombrera metropolitana de SIMEPRODE ubicada en Salinas Victoria, Nuevo León: a) firma del convenio entre SIMEPRODE, la CMIC y HOLCIM en el marco de la inauguración de la escombrera; b) colocación de la primera piedra y c) recepción de RCD con camiones de volteo dentro de la escombrera ^[80].

1.4. Investigaciones sobre impresión 3D de materiales cementantes con tierra.

Las investigaciones sobre I3D de materiales cementantes con TPE se basaron en desarrollar las metodologías de diseño de mezcla que garantizaron simultáneamente la extrudabilidad, la edificabilidad y el comportamiento mecánico de los elementos impresos y moldeados. El enfoque de estos estudios se planteó como una alternativa de baja huella de carbono en comparación con las tintas de CP, utilizando materiales alternativos como el TPE local estabilizado con el CP, la escoria granulada de alto horno (EGAH), la ceniza volante (CV) o los cementos activados alcalinamente (CAA) ^[23,37,81–85].

En el ámbito para la evaluación de la printabilidad de tintas con TPE, Daher y col. (2023) desarrollaron un método de diseño para mezclas con TPE y CP, donde definieron la printabilidad como el cumplimiento simultáneo entre la extrudabilidad y la edificabilidad (Figura 7a). La extrudabilidad se evaluó con una pistola calafateadora equipada con una boquilla circular de 20 mm de diámetro, considerando printable únicamente el material que pudiera ser extruido de forma continua, sin bloqueo, segregación, ni flujo espontáneo por peso propio del material. La edificabilidad se cuantificó mediante un minicono modificado ($h=50$ mm) aplicándole una carga estática total de 600 g al material desmoldado; la mezcla se consideró edificable cuando la altura final (h_f) fue ≥ 4.50 cm (90% de la altura original), intervalo considerado como aceptable en términos de una tinta

cementante comercial printable (Figura 7b). Las mezclas presentaron alturas entre 4.50-4.85 cm (90-97%) y diámetros de mesa de fluidez entre 15.60-17.00 cm (56-70%), y se consideraron ambos intervalos como un criterio inicial para validar la printabilidad de estas tintas ^[86].

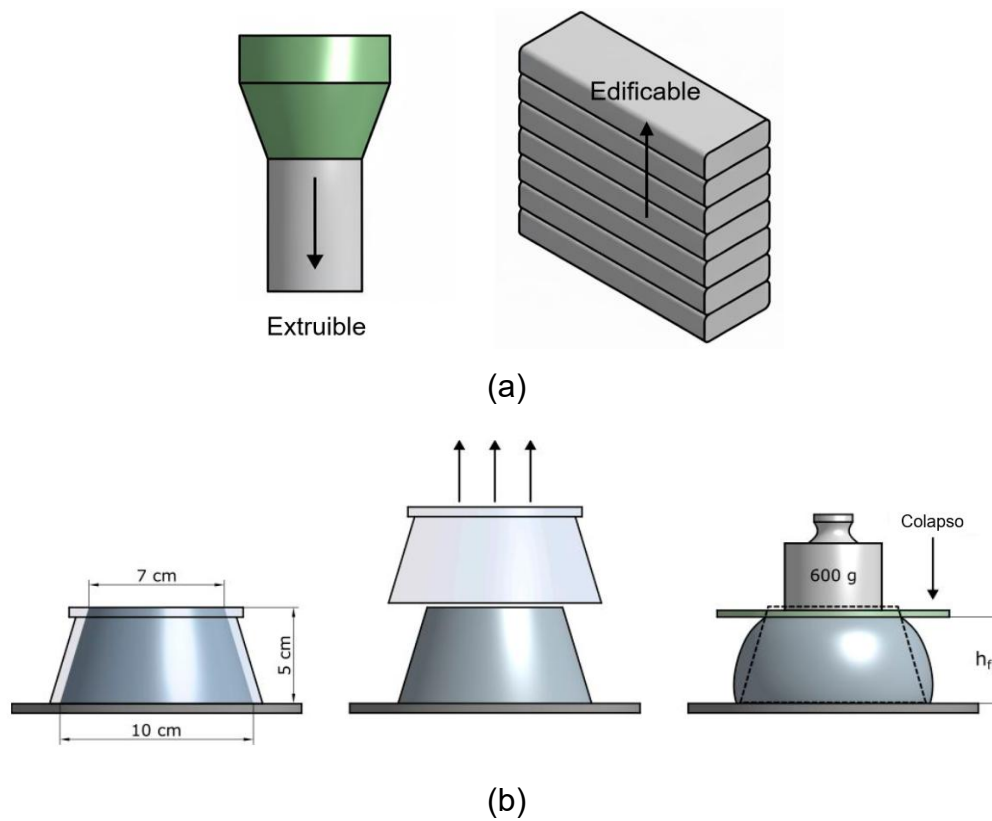


Figura 7. Evaluación para la printabilidad según Daher y col. (2023): a) propiedades clave; b) medición de edificabilidad con prueba del minicono ^[86].

Estudios posteriores, utilizaron TPE con alto contenido de arcilla ($\approx 42\text{-}44\%$) adoptando criterios similares, pero adicionando las propiedades de calidad de extrusión y estabilidad geométrica. En este estudio se sustituyó entre 25-50% la arena natural en morteros por TPE con cemento Portland ordinario (TPE/CPO) y otra de EGAH con CPO, y observaron que la arcilla no expansiva redujo la fluidez entre 12-15%, la viscosidad plástica en 50-60% y mejoró la calidad de extrusión de los filamentos entre 8-26% en comparación con las mezclas sin TPE,

lo que permitió incrementar la edificabilidad de $\approx 0.51\text{--}0.55$ m (mezclas de referencia con arena) hasta 1.20 m en morteros de TPE/CPO [37]. Por otro lado, en tintas de TPE estabilizados con cal y adiciones de fibras naturales se evaluaron la printabilidad por medio de ensayos de extrusión continua y construcción de muros o prismas impresos (Figura 8), registrando el número máximo de capas apiladas sin colapso como indicador directo de edificabilidad (18 capas de 20 = 90%), y relacionándolo con la fluidez medida en la mesa de flujo ($\approx 40\text{--}79\%$ de extensión) y la calidad de extrusión del filamento impreso (15-60%), siendo esta última deficiente debido a una alta fluidez que se le atribuyó a una elevada extrusión en el sistema de I3D, por lo tanto, esto definió que la fluidez calculada mediante este procedimiento no asegura que una tinta cementante pueda cumplir criterios de calidad de extrusión aceptables [87].



Figura 8. Evaluación para la printabilidad según Bhusal y col. (2023): a) medición de la extrudabilidad; b) mediciones de edificabilidad [87].

Paralelamente, se desarrollaron métodos experimentales que combinaron ensayos de consistencia con la estimación indirecta del ECE, la propuesta consideró utilizar un penetrómetro tipo shotcrete (Mecmesin) para determinar la resistencia a la penetración y correlacionarla con el ECE, así como el ensayo de mesa de fluidez conforme a la norma EN 1015-3 y la prueba de revenimiento. En una primera etapa, el revenimiento se situó entre 14.62-16.10 cm, mientras que el ECE varió entre 253-618 Pa; en la segunda etapa, el aumento del contenido

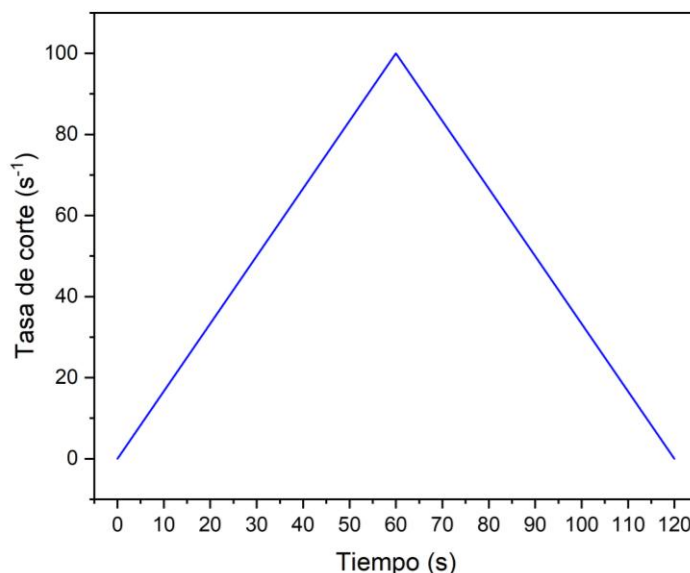
sólido en la pasta redujo el revenimiento de 20.48 a 11.19 cm e incrementó el ECE de 32 Pa hasta 2280 Pa. Estos resultados definieron un tiempo abierto de printabilidad (de 60 minutos), identificando que mezclas con revenimientos superiores a ≈ 11.50 cm fueron extruibles, mientras que un intervalo objetivo cercano a 13.00 ± 0.5 mm mostraron un desempeño equilibrado entre extrudabilidad y edificabilidad logrando imprimir un elemento modular tipo columna de ≈ 27.00 cm de altura ^[88]. Estos estudios reforzaron la idea de que la printabilidad de tintas con TPE se debía interpretar como el resultado combinado entre fluidez, extrudabilidad, edificabilidad y la calidad de extrusión. Sin embargo, los rangos obtenidos entre resultados variaron entre estudios, esto debido en primero lugar por los diferentes criterios de aceptación que cada autor propone para definir la printabilidad y, en segundo lugar, por las adiciones y porcentajes de sustitución de TPE en las tintas, generando condiciones de deseabilidad no óptimas entre printabilidades.

Por otro lado, otros investigadores enfocaron sus estudios en el análisis reológico de las tintas considerando el ECE, el ECD y la viscosidad para poder asociarlas con las propiedades de printabilidad y describir el efecto que tiene la TPE en estas propiedades. P. ej., Daher y col. (2023), evaluaron el ECE en el tiempo considerando el ensayo por caída de cono (EN ISO 17892-6), a los 120 s se obtuvo un valor entre 600-1000 Pa, con una evolución prácticamente lineal en el tiempo ($R^2 \approx 0.94-0.99$), y se observó que el incremento en la relación TPE/CP incrementó simultáneamente el ECE y el ECD sin comprometer la extrudabilidad de la tinta mediante ensayos de I3D en laboratorio ^[86]. Ese mismo año, Bhusal y col. (2023) obtuvieron intervalos de ECE de 1169-2583 Pa, ECD de 84-355 Pa y, además, viscosidades plásticas entre 2.8-8.3 Pa·s utilizando un equipo de reometría rotacional con geometría de paleta de corte, proponiendo un protocolo de curvas de flujo ascendente-descendente (Figura 9) ^[87]. Esto nos sugiere que, aunque se utilicen métodos prácticos con base en normativas o se utilicen

equipos precisos, los intervalos de las propiedades reológicas definen ventanas de printabilidad muy variadas entre investigaciones.



(a)



(b)

Figura 9. Evaluación de propiedades reológicas propuesto por Bhusal y col. (2023): a) reómetro rotacional Brookfield con sistema de copa y geometría de paleta de corte; b) protocolo de ensayo para curva de flujo ^[87].

Además, los estudios de estabilización de TPE con CPO, EGAH o CAA reportaron que la arcilla presente en la TPE desempeñó un papel análogo al de las nanoarcillas en morteros cementantes: la floculación a reposo aumentó el ECE, mientras que el ajuste de la relación a/cm y la dosificación de EGAH o CV permitió controlar la viscosidad plástica y la fluidez, equilibrando así la extrudabilidad con la edificabilidad ^[37]. Sin embargo, a pesar de reportar curvas de flujo y parámetros reológicos, estos trabajos se limitaron a tiempos abiertos de printabilidad y tampoco definieron índices de printabilidad cuantitativos que integraran de manera explícita la edificabilidad, la extrudabilidad y la calidad de extrusión en un solo parámetro.

Por otro lado, el comportamiento mecánico de los elementos moldeados e impresos se han evaluado principalmente mediante ensayos de resistencia de compresión (RC) en cubos y prismas. P. ej., se compararon especímenes moldeados, no moldeados (con pistola calafateadora) y elementos impresos (con I3D de tipo pórtico), fabricados a partir de morteros con diferentes relaciones de TPE/CP (Figura 10). Los cubos y prismas (de 4×4×4 cm y de 4×4×16 cm respectivamente) se ensayaron a 1, 7 y 28 días conforme la norma EN 196-1 aplicando la velocidad de carga tanto paralela como perpendicularmente a las capas impresas. Los resultados mostraron que las RC a 28 días de los especímenes impresos comparado con los moldeados disminuyeron a su vez que el contenido de TPE se incrementa (de 70% a 90%), con una diferencia de RC de entre 6.74% a 22.45% respectivamente, indicando que el proceso de I3D puede influir directamente en el desempeño mecánico al igual que las adiciones de TPE en la tinta [86].



(a)



(b)

Figura 10. Especímenes para ensayos de resistencia de compresión: a) prismas de 4 x 4 x 16 cm impresos con pistola calafateadora y b) cubos cortados de 4 x 4 x 4 cm de una I3D [86].

También se han evaluado en especímenes impresos bajo diferentes condiciones de curado en húmedo a 28 días, obteniendo RC entre 14-25 MPa, dependiendo de la cantidad de TPE y la dirección de aplicación de la carga [37].

En otros trabajos, los especímenes se imprimieron mediante trayectorias rectilíneas de filamentos paralelos o con rellenos alternados que buscaban emular patrones de tipo zig-zag huecos (Figura 11), con el objetivo de homogenizar la distribución de esfuerzos, reducir el consumo de material y limitar la anisotropía, pero sin considerar un análisis de la RC utilizando el diseño de un tabicón con medidas estandarizadas con materiales de TPE [89–91]. Es decir, no se compararon de forma directa la RC de cubos moldeados con bloques o tabicones impresos considerando una geometría tipo zig-zag para validar su desempeño mecánico con materiales locales de TPE.

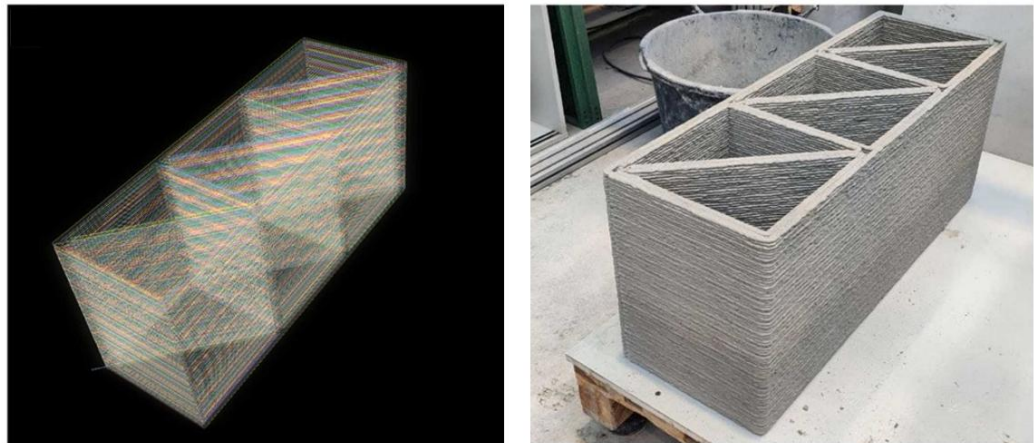
Sin embargo, para validar dichos desempeños o propiedades específicas atribuidas a las tintas cementantes para minimizar el error experimental y evitar la dispersión entre los datos, se han utilizado herramientas estadísticas como la MSR que permite optimizar parámetros de las tintas cementantes para poder maximizar las propiedades de interés bajo ciertas condiciones específicas. En la bibliografía se ha utilizado esta técnica estadística en materiales como el CP, sugiriendo el potencial de esta herramienta para el diseño de mezclas en I3D (Figura 12). P. ej., Li y col. (2022), emplearon un diseño central compuesto para ajustar las dosificaciones de superplastificante, retardante y acelerante en un mortero extruible, modelando simultáneamente el ECE y el ECD, la viscosidad plástica y la tixotropía; los modelos presentaron valores de $R^2 > 0.80$, lo que permitió identificar combinaciones óptimas de aditivos dentro de una ventana reológica de printabilidad aceptable (Figura 12a) [92].



(a)



(b)



(c)

Figura 11. Especímenes impresos en 3D con diferentes combinaciones de patrón zig-zag y dimensiones (largo x ancho x alto en mm): a) por Jo y col. (2020) ($580 \times 320 \times$ altura variable); b) por Ferretti y col. (2022) ($730 \times 530 \times 504$) y c) por Cuevas y col. (2023) ($900 \times 300 \times 450$) [89–91].

Asimismo, Wang y col. (2025), utilizaron un diseño Box-Behnken para optimizar un sistema con acelerante, hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y superplastificante policarboxílico (PCE), la interacción de los dos últimos logró optimizar la fluidez en 14.75 cm (47.5%) y el ECD en 711 Pa. El modelo alcanzó un $R^2 > 0.95$, permitiendo imprimir un elemento de 20 capas (Figura 12b) [93].

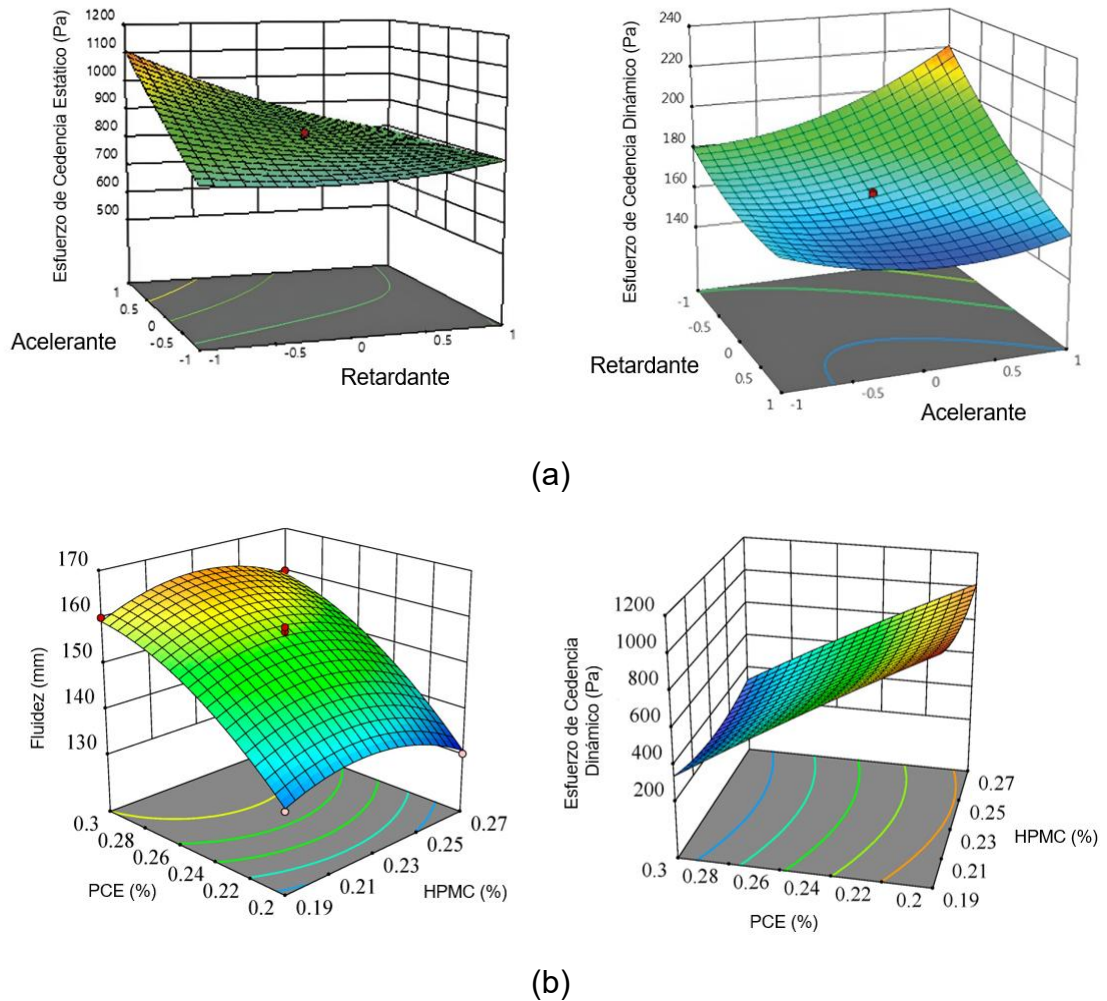


Figura 12. Gráficos de superficie de respuesta: a) respuestas de ECE y ECD variando la cantidad de acelerante y retardante y b) respuestas de fluidez y ECD variando las cantidades de PCE y HPMC [92,93].

De forma complementaria, Kaushik y col. (2023), optimizaron un mortero para I3D variando el contenido de CP ($550\text{-}650\text{ kg/m}^3$), de CV (5-20%), superplastificante ($2\text{-}4\text{ kg/m}^3$) y fibra de basalto ($1\text{-}3\text{ kg/m}^3$); mediante funciones de deseabilidad integraron respuestas de fluidez con minicono, de penetración con cono de caída, de ECE y de RC a 7 y 28 días, obteniendo modelos estadísticamente significativos para delimitar una zona de mezcla printable [94]. También, estudios sobre concretos eco-printables modificados con biopolímeros y la optimización de resistencia de adherencia entre capas recurrieron a la MSR para seleccionar combinaciones óptimas de aditivos y proporciones de mezcla, sugiriendo este método como un enfoque robusto para el diseño multirrespuesta de tintas cementantes para I3D [95].

En lo que respecta a la optimización de tintas con TPE/CP, la bibliografía revisada mostró que los diseños de mezclas se basaron principalmente en enfoques iterativos o paramétricos (variando relaciones TPE/CP, relación a/cm, adiciones de EGAH o CV, y contenido de aditivos) hasta lograr una ventana de printabilidad aceptable definida experimentalmente [86]. Aunque algunos estudios de mezclas para I3D sin TPE desarrollaron modelos de regresión o diseños experimentales para optimizar propiedades en función de la composición de la tinta, las investigaciones específicas con TPE printables no utilizaron el MSR ni esquemas multirrespuesta que integraran simultáneamente parámetros reológicos, indicadores de printabilidad (edificabilidad, extrudabilidad y calidad de extrusión) y propiedades mecánicas de elementos moldeados e impresos [37]. Este vacío metodológico declaró la necesidad de proponer esquemas de evaluación cuantitativa de la printabilidad y herramientas de optimización estadística aplicadas a tintas cementantes con TPE, capaces de relacionar los parámetros de mezcla con el desempeño reológico, de printabilidad y mecánico de elementos impresos en 3D tipo tabicones.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Residuos de construcción y demolición.

En México, los RCD se clasificaron como residuos de manejo especial, de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, establecieron los criterios para identificar qué tipo de residuos eran sujetos al plan de manejo ^[96] ^[97]. En estas normas se definieron que los RCD generados por las actividades de construcción, de remodelación, de demolición, los materiales pétreos y de TPE, podían ser aprovechables siempre que no presentaran características de peligrosidad tales como ^[75,97]:

- Corrosividad: cuando es un líquido acuoso con $\text{pH} \leq 2.0$ o ≥ 12.5 ; es un sólido que al mezclarse con agua destilada produce una solución con $\text{pH} \leq 2.0$ o ≥ 12.5 . Es un líquido no acuoso capaz de corroer acero al carbón SAE 1020 a una velocidad ≥ 6.35 mm/año a 55°C (328 K).

- Reactividad: cuando se inflama al contacto con el aire en menos de 5 minutos sin fuente externa de ignición; reacciona con agua generando >1 L de gas inflamable por kg de residuo por hora. Genera calor en contacto con el aire sin fuente de energía suplementaria. Contiene cianuros o sulfuros liberables que, en medio ácido, generan >250 mg de HCN/kg o >500 mg de H₂S/kg de residuo.
- Explosividad: cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva por sí solo o en presencia de una fuente de energía, o si se calienta bajo confinamiento. La norma lo define de forma cualitativa, no con un intervalo numérico específico.
- Toxicidad ambiental: cuando el extracto PECT (lixiviado obtenido conforme la NOM-053) contiene alguno de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de la NOM-052 en concentraciones mayores que los límites máximos permisibles. Estos límites dependen del constituyente y se encuentran típicamente en un intervalo de décimas de mg/L hasta centenas de mg/L (≈0.1–400 mg/L, según el metal o compuesto específico).
- Inflamabilidad: cuando es un líquido con punto de inflamación <60.5 °C (en copa cerrada), excepto soluciones acuosas con <24% v/v de alcohol; es un sólido capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25 °C; es un gas que, a 20 °C y 101.3 kPa, arde en mezclas con aire al 13% v/v o menos, o tiene un intervalo de inflamabilidad con aire de al menos 12% v/v; Es un gas oxidante que favorece la combustión de otros materiales más que el aire.

Además, documentos elaborados a partir de la NOM-161-SEMARNAT-2011 indicaron que los RCD se integraron por escombros de concreto, de

mortero, de tabique, de mezclas cerámicas y de TPE generados durante las etapas de desmonte, despalme, excavación de cimentaciones, cortes y rellenos en obra civil ^[74]. También, establece que los generadores que produzcan volúmenes >80 m³ de RCD en una obra de construcción, están obligados a formular e implementar un Plan de Manejo específico para estos residuos, con el fin de asegurar su separación, su aprovechamiento y su disposición en sitios autorizados.

En NL, la Norma Ambiental Estatal NAE-SDS-002-2019 describió a los RCD como el conjunto de fragmentos o restos de materiales provenientes de actividades de la construcción, la urbanización, la pavimentación, de demolición, de desmantelamiento y/o excavación incluyendo: los tabiques, los materiales pétreos, el concreto, los morteros, la madera, los metales, los plásticos, el yeso, la cerámica, las mezclas asfálticas y el TPE ^[98]. Adicionalmente, considera lineamientos para el aprovechamiento de los RCD, privilegiando su reciclaje, su reúso en obra y su envío a centros de manejo integral autorizados, antes de considerar su disposición final.

Sobre todas estas bases, la NAE-SMA-008-2022, tuvo por objeto establecer la clasificación y las especificaciones para el manejo integral de los RCD, con el propósito de optimizar su control, fomentar su aprovechamiento y evitar su disposición en tiraderos clandestinos ^[79]. La norma definió obligaciones administrativas para los generadores, tales como la elaboración de planes de manejo, la comprobación documental de la correcta disposición y el uso de centros autorizados para su acopio, reciclaje y aprovechamiento.

2.1.1. Residuo de tierra producto de excavación.

El TPE se define como un residuo con base en tierra generado durante los procesos de construcción de cimentaciones, sótanos, pasos a desnivel, túneles y obras lineales de infraestructura. Este material está compuesto por tierras naturales, sin pasar por procesos de trituración y está constituido por arenas, limos y arcillas, con contenidos variables de gravas y materia orgánica. Diversos estudios sobre I3D con TPE lo han definido como un material para el diseño de tintas cementantes, debido a su disponibilidad (>36% de los RCD) y su potencial para sustituir agregados naturales o parte del contenido de CP en mezclas (hasta un 90%) [14,18,19,99–101].

2.1.1.1. Muestreo y representatividad

El muestreo del TPE corresponde a una de las etapas para garantizar la representatividad de los resultados de caracterización física, química y mecánica en la investigación científica. Generalmente, la representatividad se entiende como el grado en que una o varias muestras reprodujeron la media y la variabilidad real del conjunto de residuos en el sitio, de tal manera que las conclusiones del estudio fueran extrapolables al volumen total del TPE aprovechable. Por lo tanto, esta condición resulta importante, debido a su heterogeneidad en el lugar, asociada con cambios litológicos, estratificación del perfil y variaciones en el proceso constructivo (profundidades de excavación, etapas de obra y rellenos previos).

En este sentido, la NMX-AA-132-SCFI-2006/2016 definió los elementos de un plan de muestreo y los criterios para obtener muestras representativas. Esta

norma específica el tipo y el plan de muestreo, el diseño espacial, el número y la profundidad de las muestras, así como la justificación técnica de la distribución de puntos de muestreo y la delimitación del área a estudiar. Además, explica la diferencia entre muestreos exploratorios y de detalle, siendo estos últimos los que permiten delimitar un volumen de TPE de interés, ya sea por sus niveles de contaminación o su evaluación para un uso determinado [102].

En este mismo marco normativo también se define el concepto de muestra compuesta. Para muestreos de detalle, cada muestra compuesta corresponde a cinco muestras simples tomadas en patrón de tresbolillo y distribuidas uniformemente dentro de la unidad de muestreo, con el fin de promediar variaciones locales y reducir el error asociado con una única muestra puntual. Este enfoque de muestras compuestas se adoptó de manera recurrente en guías técnicas emitidas por autoridades ambientales latinoamericanas, que consideraron el criterio de cinco incrementos en tresbolillo como criterio estándar para mejorar la representatividad espacial de cada unidad muestral.

Por otro lado, se han establecido tablas con el número mínimo de puntos de muestreo (n) en función del área estudiada (por ejemplo, de 12 puntos para 1 ha y hasta 200 puntos para 100 ha), así como la posibilidad de calcular n mediante expresiones basadas en un nivel de confianza Z , la desviación estándar preliminar S y un error máximo relativo admisible E (Ec. 1). El tamaño de la muestra se puede estimar mediante relaciones del tipo:

$$n = \frac{Z^2 S^2}{E^2} \quad \text{Ec. 1}$$

donde Z corresponde a un nivel de confianza del 95% ($Z \approx 1.96$), S se obtiene de un muestreo exploratorio y E se fijó en intervalos de 10-20% de error relativo para

las variables como contenido de finos, humedad o concentración de un constituyente. Estos criterios permitieron dimensionar el número de unidades muestrales necesarias para describir adecuadamente la variabilidad del material.

Al trasladar estos principios en el uso del TPE como residuo de manejo especial, la representatividad se abordó a través de la definición de lotes. Esta normativa sugiere segmentar la generación de residuos en lotes según el tamaño de la obra, las etapas de excavación y los volúmenes acumulados, con base en los criterios de separación y trazabilidad [79,98,102]. Cada lote se consideró una unidad relativamente homogénea en términos de origen, tipo de material y condición de generación, sobre la cual se aplicaron esquemas de muestreo como: (i) la definición de puntos distribuidos sistemáticamente, (ii) la formación de muestras compuestas a partir de incrementos tomados de distintos puntos y (iii) la identificación, ubicación y características de cada punto.

2.1.1.2. Composición química y mineralógica

Generalmente, los TPE han presentado contenidos de aluminosilicatos asociados a minerales arcillosos de los grupos caolinita, illita, esmectita (p. ej., montmorillonita o nontronita), además de micas como moscovitas. Los análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) reportados en la bibliografía han mostrado contenidos mayoritarios de dióxido de Silicio (SiO_2) y óxido de Aluminio (Al_2O_3), con bajas concentraciones de óxidos de Hierro (Fe_2O_3), de Calcio (CaO) y algunos alcalinos (MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2). Se han reportado contenidos de SiO_2 (44.54-67.59%), de Al_2O_3 (3.63-38.98%), de CaO (0.02-13.04%) y de Fe_2O_3 (1.12-11.81%), mientras que MgO , TiO_2 y K_2O variaron o tuvieron una presencia nula en estas tierras (Tabla 1) [37,86,87,100,103,104].

Tabla 1. Composiciones químicas de TPE utilizados en investigaciones de I3D y otras aplicaciones.

Referencia	Composición química en óxidos (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Otros
[87]	63.00	15.50	8.10	5.70	1.70	0.96	-	5.04
[86]	57.16	3.63	13.04	1.12	7.98	0.20	1.37	15.50
[37]	53.10	33.90	-	9.39	-	-	-	3.61
[100]	67.59	9.63	2.89	11.81	-	1.85	5.15	1.08
[103]	44.54	36.15	0.50	4.89	0.17	0.46	1.09	12.20
	66.14	21.12	0.16	3.45	0.55	0.43	2.18	5.97
	45.27	32.90	0.15	8.58	0.47	1.14	3.03	8.46
	44.62	38.98	0.02	3.77	0.06	0.29	0.82	11.44
[104]	58.90	31.50	0.64	3.69	0.60	-	2.50	2.17

Estos resultados mostraron variaciones muy dispersas entre los contenidos de alúmina, calcio y hierro asociados con el origen geológico, el grado de meteorización y los procesos de excavación entre investigaciones. Aunado a esto las composiciones mineralógicas de estas tierras han mostrado fases cristalinas atribuidas al cuarzo, seguido de filosilicatos del tipo caolinita, illita y esmectita, además de feldespatos, carbonatos (principalmente calcita y dolomita), óxidos e hidróxidos de Hierro en menor cantidad ^[105]. P.ej., Bhusal y col. (2023) identificaron que la arcilla presente estaba constituida aproximadamente por 49% de caolinita, 36% de illita y un 15% de nontronita, evidenciando la presencia simultánea de arcillas de baja y alta expansividad. Asimismo, Carcassi y col. (2024) caracterizaron un suelo limoso-arcilloso reforzado con fibras naturales, identificando la presencia de cuarzo, caolinita e illita ^[87,100]. Esta variación entre composiciones y fases cristalinas ha sugerido que el TPE no constituye un material homogéneo, sino un conjunto de matrices sílice-alúmina cuya respuesta depende de la proporción relativa de cuarzo, arcillas y carbonatos; en consecuencia, la combinación entre composición química y mineralógica define su reactividad, su plasticidad y su estabilidad volumétrica,

por lo que resulta imprescindible caracterizar cada TPE antes de emplearlo en el diseño de mezclas y tintas para I3D.

2.1.1.3. Morfología y microestructura

La morfología y la microestructura del TPE se ha descrito como el tamaño, la forma, la esfericidad y la rugosidad superficial de sus partículas, así como su modo de agrupamiento y contacto. Estas características se han analizado principalmente mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), complementada con espectroscopía EDS e incluso con análisis de imagen para cuantificar parámetros como diámetro de las partículas y su relación de aspecto (Figura 13).

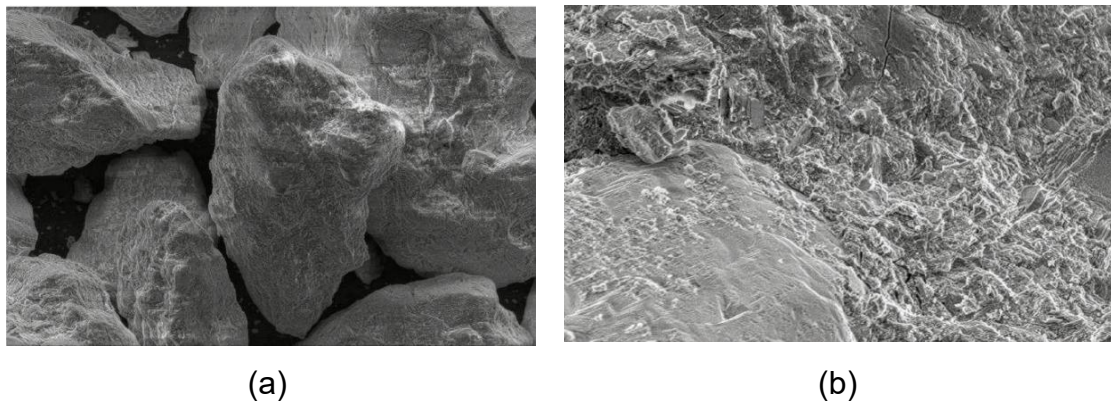


Figura 13. Micrografías típicas de TPE: a) x500 y b) x4000 [104].

En TPE utilizados como finos reciclados en morteros, las micrografías MEB mostraron conjuntos heterogéneos formados por granos de cuarzo y feldespato de tamaño arena fina a arena media, con geometrías irregulares, aristas angulosas y superficies rugosas, recubiertos parcial o totalmente por agregados de partículas arcillosas laminares. Xu y col. (2024) observaron que el agregado fino reciclado a partir de TPE presentó una distribución de tamaño no

uniforme y una esfericidad inferior a la de una arena natural de río, lo que evidenció una fracción importante de granos fracturados e incompletamente redondeados^[104]. Este cambio en la distribución de tamaño de los granos sugirió cambios en los tamaños de las partículas durante los procesos de excavación de TPE, por lo tanto, existen cambios en la distribución de tamaños entre las partículas, generando granulometrías muy variables entre los lotes muestreados^[103,104].

2.1.1.4. Distribución de tamaño de partícula

La distribución de tamaño de partícula (DTP) del TPE se entendió como la proporción en masa de las fracciones de grava, de arena, de limo y de arcilla, obtenida a partir de ensayos granulométricos por tamizado y, para las fracciones finas, mediante técnicas de difracción láser. En sistemas de clasificación geotécnica, las fronteras típicas de tamaño se situaron en diámetros de partícula <0.002 mm (2 μ m) para las arcillas, entre 0.002-0.075 mm (2-75 μ m) para los limos, 0.075-4.75 mm (75-4750 μ m) para las arenas y 4.75-80 mm (4750-80000 μ m) para las gravas, con partículas mayores clasificadas como cantos o bloques. La caracterización granulométrica se representa habitualmente mediante curvas de porcentajes del material que pasa contra el tamaño de la partícula, a partir de las cuales se calculan parámetros como los diámetros característicos d_{10} , d_{50} , d_{60} y los coeficientes de uniformidad ($C_u = d_{60}/d_{10}$) y de curvatura ($C_c = d_{30}^2/(d_{10} d_{60})$), empleados para describir la graduación del material en términos de tamaños de partículas.

En estudios sobre aprovechamiento de TPE en materiales de construcción, se observaron contenidos de partículas y arenas finas, con gravas eliminadas por cribado previo. P. ej., Guan y col. (2023) trabajaron con un TPE de un foso de cimentación donde aproximadamente el 95% de la masa presentó

tamaños <1 mm y cerca del 64% fue menor a $75\ \mu\text{m}$, lo que reflejó un predominio de la fracción limo-arcilla. Asimismo, Priyadharshini y col. (2018) analizaron dos TPE para su uso como agregado fino en mezclas de concreto; reportaron mezclas con 71% de arena, 15% de arcilla y 14% de finos en un caso; y 52% de arena, 25% de arcilla y 23% de finos en el otro, identificando variaciones en los contenidos de finos entre lotes dentro de una misma área de muestreo ^[106,107].

Otros trabajos mostraron que la mayor parte de los TPE se concentró en el intervalo de partículas finas ($<2\text{-}4$ mm), con porcentajes de finos ($<63\text{-}75\ \mu\text{m}$) que oscilaron típicamente entre 5% y 65% según el origen y el nivel de tratamiento aplicado (secado, trituración, cribado o lavado). En estudios de arenas procedentes de TPE para uso como árido fino (clases 0/4 mm), Saad y col. (2025) registraron módulos de fineza entre 2.27-3.32 y contenidos de finos $\leq 63\ \mu\text{m}$ entre 1.31%-6.84%, similares con arenas de granulometría media a gruesa con presencia limitada de partículas finas ^[108]. Estos rangos sugirieron que, aunque el TPE se originó como un residuo heterogéneo, su fracción útil para materiales cementantes después de aplicar procesos de selección y acondicionamiento se concentró en dominios granulométricos similares a los de arenas finas y limos arenosos.

La DTP del TPE condicionó su clasificación bajo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y normas equivalentes (ASTM D2487). Este sistema distinguió suelos gruesos (más del 50% retenido en el tamiz No. 200= 0.075 mm) de suelos finos (50% o más pasando dicho tamiz), separándolo entre ellos como gravas (G), arenas (S), limos (M) y arcillas (C), con subíndices que describen su graduación (bien graduado, W; mal graduado, P) y la plasticidad (L o H, según límite líquido $<50\%$ o $\geq 50\%$).

En excavaciones de suelos finos, como el estudio de Wang y col. (2025) sobre un TPE de una zona de suelos blandos en China, la curva granulométrica se caracterizó por $d_{60} = 0.064$ mm, $d_{50} = 0.031$ mm y $d_{10} = 0.014$ mm, generando un $C_u \approx 4.6$ y un $C_c \approx 1.1$, describiendo el material como un suelo de grano fino con graduación deficiente y comportamiento típico de arcilla de baja plasticidad ^[109]. Además, para arenas derivadas de TPE y acondicionadas como agregados 0/4 mm, varios autores describieron materiales con curvas granulométricas similares con las de arenas naturales, finos <7% y comportamiento equivalente a arenas pobremente graduadas con trazas de limos (SP-SM) conforme al SUCS.

Por otro lado, estudios de recuperación de TPE en Europa (p. ej., la reutilización de lodos de túneles) mostraron que los TPE empleados como materia prima para la formación de subsuelo y subbase para la construcción de carreteras se distribuyeron mayoritariamente en el rango entre arenas y limos, con porcentajes de fracción arcilla para asegurar cohesión, sin generar problemas de contracción y baja plasticidad ^[110]. Sugiriendo curvas granulométricas ajustadas con contenidos de arena entre 40-80%, finos (incluyendo limos y arcillas) entre 20-60% y gravas entre 10-15% para elementos constructivos.

2.1.1.5. Límites de consistencia

Los límites de consistencia han descrito el comportamiento del TPE en términos de plasticidad y resistencia al corte con base en técnicas empíricas, al delimitar los intervalos de humedad en los que el material se puede comportar como un sólido, un semisólido, un plástico o un líquido. Las normas ASTM D4318, NF P 94-051 y la NMX-C-493-ONNCCE-2018, establecieron procedimientos estandarizados para determinar estos límites en laboratorio mediante ensayos de

copa de Casagrande o cono de penetración para el límite líquido y el ensayo de rollado de hilos para el límite plástico.

El límite líquido (LL) se ha definido como el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto a la masa seca del suelo, a partir del cual el TPE pasó del estado plástico al semilíquido, por otro lado, el límite plástico (LP) se define como el contenido de agua al cual el suelo dejó de comportarse como un material plástico y empezó a fisurarse al conformar cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro mediante rollado manual y el límite de contracción (LC) se entendió como el contenido de agua por debajo del cual una disminución adicional en el contenido de humedad ya no produce reducción apreciable de volumen en el material. A partir del LL y el LP es posible calcular el índice de plasticidad (IP) utilizando la ecuación 2:

$$IP = LL - LP$$

Ec. 2

donde LL y LP se expresaron en % de contenido de agua respecto a la masa seca del TPE. Este índice cuantificó el intervalo de humedad en el que el TPE mostró comportamiento plástico y se utilizó como parámetro de clasificación en el sistema SUCS para distinguir los limos, las arcillas y las tierras orgánicas. De acuerdo con estas clasificaciones, el TPE con un $IP = 0$ indica que no tiene plasticidad; un $IP < 7\%$ corresponde a una baja plasticidad; $7\% \leq IP \leq 17\%$ sugieren plasticidad media; e $IP > 17\%$ a un TPE de alta plasticidad.

Estos intervalos han permitido identificar qué TPE fueron potencialmente útiles para su aprovechamiento. P. ej., en TPE utilizados en BTC y muros de tierra estabilizada indicaron que suelos arenosos y franco-arenosos presentaron valores típicos de LL entre 20-30% y de IP entre 10-20%, mientras que TPE más

arcillosos aptos para aplicaciones estructurales mostraron LL entre 25-50% e IP en el intervalo de 15-35%, asociados con suelos clasificados como arcillosos o arcillo-limosos ^[111]. Estos rangos se consideraron compatibles con la necesidad de disponer de una cierta plasticidad para garantizar cohesión y moldeo del material, evitando al mismo tiempo expansiones y retracciones volumétricas.

Asimismo, otros estudios con lateritas y tierras residuales utilizados para la fabricación de BTC estabilizados reportaron índices de plasticidad en intervalos amplios, típicamente entre 5 y 38%, con contenidos de arena de 52.8-90.3% y contenidos de finos (limos con arcillas) de 8.4-42.1% ^[112,113]. En dichos trabajos, los suelos con IP inferior a ~15% se clasificaron como arenas o limos arcillosos de baja y media plasticidad (CL–ML), mientras que IP superiores a 20-25% se asociaron con arcillas con mayor susceptibilidad a cambios volumétricos, requiriendo ajustes granulométricos o estabilización química para su uso seguro en elementos constructivos. Además, se han sugerido combinaciones de LL entre 25-45% e IP de ≈5-20% para tener TPE entre baja y media plasticidad, compatibles con requisitos normativos para terracerías y subrasantes, mientras que valores de IP superiores a los límites establecidos restringieron su uso sin procesos de acondicionamiento como mezcla con materiales granulares ^[109,110,114].

2.1.1.6. Contenido de materia orgánica y criterios de aceptación

El contenido de materia orgánica (MO) en la TPE se determinó comúnmente mediante ensayos de ignición (pérdida por calcinación) o métodos relacionados, en los cuales una muestra previamente secada a 105 °C se calcinó a temperaturas de 440-550 °C y se calculó la fracción de masa perdida según la ecuación 3:

$$MO(\%) = \frac{m_{seca} - m_{calcinada}}{m_{seca}} \times 100 \quad Ec. 3$$

Este procedimiento es análogo al descrito en normas como ASTM D2974 y otras guías nacionales para RCD.

Adicionalmente, la norma neozelandesa NZS 4298:2024 indicó que para muros de tierra compactada y bloques de tierra estabilizada debían presentar contenidos de MO $\leq 2-3\%$ en masa, recomendándose la eliminación total del despálme superficial rico en humus y la utilización de suelos minerales con pérdidas por ignición reducidas ^[114]. Describiendo también que utilizar porcentajes superiores podrían generar riesgo por degradación biológica y pérdida de resistencia mecánica a largo plazo del TPE. Asimismo, el New Mexico Earthen Building Code (14.7.4 NMAC) menciona que la MO no debe emplearse como material estructural y que los suelos para adobes, tapiales o BTC deben proceder de estratos minerales subyacentes, con contenidos orgánicos limitados a unos cuantos por ciento en peso, haciendo énfasis en que fracciones orgánicas elevadas pueden generar en el TPE: (i) descomposición en el tiempo, (ii) generación de vacíos internos y pérdida de cohesión y (iii) mayor variabilidad volumétrica frente a cambios de humedad ^[111].

Por lo tanto, los límites de aceptación de MO se han adaptado en un intervalo 1-3% de la masa total, determinados mediante ensayos de pérdidas por ignición. Valores por debajo de 1% se asociaron a suelos esencialmente minerales, mientras que contenidos superiores se consideraron motivo para descartar el material o también mezclarlo con suelos minerales hasta reducir la proporción de MO.

2.2. Impresión 3D de materiales cementantes.

La I3D de materiales cementantes se ha definido como una tecnología de fabricación aditiva en la que un sistema automatizado deposita, capa por capa, una mezcla cementante sin la utilización de encofrado y con una mínima intervención manual ^[115–117].

En este contexto, el término tinta cementante de impresión 3D (TCI3D) se utilizó para describir mezclas de tipo mortero o pasta diseñadas para ser bombeadas, extruidas y mantener su forma tras ser depositadas en forma de filamentos por la boquilla de la impresora 3D. Estas tintas están formuladas con un ligante hidráulico (CP u otros cementantes alternativos), agregados finos, agua y aditivos, permitiendo ajustar la relación sólidos/finos y la relación a/cm para cumplir simultáneamente con propiedades como la extrudabilidad, la edificabilidad y la calidad de extrusión. La bibliografía ha abordado varias familias de TCI3D: con base en concreto o mortero de CP, con geopolímeros, con CAA, con RCD y con TPE o estabilizadas en combinación con estos ligantes, entre otros materiales ^[6,8,13,17,30,49,70].

Generalmente, la evaluación de una TCI3D se ha definido habitualmente bajo el concepto de printabilidad, entendido como la capacidad del material para ser bombeado, extruido, depositado y mantener su forma durante la construcción

capa por capa. Diferentes revisiones indicaron que la printabilidad integra, al menos, las siguientes cinco propiedades: (i) la extrudabilidad, (ii) la edificabilidad, (iii) la calidad de extrusión, iv) el tiempo abierto) y (v) la fluidez de la tinta cementante [9,86,87,118–120].

2.2.1. Printabilidad

La printabilidad se ha definido como la capacidad de una TCI3D para ser bombeada, extruida de forma continua y apilada capa por capa sin pérdida de forma y estabilidad, bajo un conjunto dado de parámetros de impresión (altura y ancho de capa y velocidad de impresión). En la mayoría de los estudios se consideró que esta propiedad dependió, al menos, de la extrudabilidad y la edificabilidad, a las que se le fueron añadiendo otras variables como la calidad geométrica del filamento, el tiempo abierto, la fluidez y la adherencia entre capas [9,86,87,118,121].

En tintas de CP, autores como Ma y col. (2018) propusieron coeficientes adimensionales de extrudabilidad y edificabilidad para optimizar morteros con relaves de cobre [121]. La extrudabilidad se evaluó mediante dispositivos de extrusión con boquilla circular calificando la mezcla como printable cuando el material fluyó de forma continua, sin bloqueo, sin segregación visible y sin asentamiento espontáneo. La edificabilidad se cuantificó por el número de capas apilables y la deformación vertical en ensayos de apilamiento, definiendo valores de estos coeficientes para proponer intervalos cualitativos para tintas no printables, aceptables y printables.

De forma similar, Lafhaj y col. (2019) introdujeron un coeficiente de printabilidad que relacionó una medida de fluidez (derivada de un ensayo de

asentamiento) con una medida de resistencia verde (obtenida por penetrómetro), normalizando ambas pruebas en coeficientes adimensionales y combinándolos mediante una relación funcional en la que la fluidez y la edificabilidad contribuyeron en la misma magnitud a la printabilidad ^[122]. Aunque la expresión adoptada fue una diferencia (y no una suma ponderada), el supuesto explícito fue que ambos criterios tenían peso equivalente en la definición de la ventana de printabilidad.

Para tintas de TPE en 3D, Rückrich et al. (2023) definieron la printabilidad por la combinación de bombeabilidad, extrudabilidad y edificabilidad, y propusieron dos índices de clasificación: un índice de fluidez (derivado de ensayos con minicono) y un índice de resistencia verde (derivado de pruebas mecánicas tempranas), que permitieron categorizar mezclas como no printables, aceptables o printables en función de que ambos índices se encontraran dentro de una ventana objetivo ^[35]. Además, la calidad de extrusión también se consideró cuantificable a partir de la conservación de la sección transversal extruida, la presencia de defectos superficiales, la variación del ancho del cordón y la regularidad entre capas ^[86,122]. Estos trabajos permitieron agrupar las propiedades frescas en tres bloques principales: (i) fluidez, (ii) extrudabilidad y (iii) edificabilidad.

Aunque no existe un estándar único para un “índice de printabilidad”, varias contribuciones coincidieron en que:

- Hay que considerar la printabilidad como una propiedad compuesta, derivada de varias métricas elementales normalizadas (revenimiento, altura bajo carga, número de capas, velocidad/continuidad de extrusión, parámetros geométricos del cordón), y

- Asignar pesos implícitamente equivalentes a los criterios principales cuando se definieron coeficientes globales (p. ej., fluidez vs edificabilidad en ^[122], o extrudabilidad vs edificabilidad en ^[121], donde ambos criterios se consideraron igualmente aceptables para declarar una mezcla como printable).

En mezclas con TPE, la práctica habitual ha sido definir ventanas de printabilidad a partir de rangos específicos para cada propiedad, y clasificar la mezcla como printable sólo si todas las propiedades cumplen dentro de esos intervalos. Sin embargo, incluso en estos trabajos no se estableció un índice porcentual único entre 0 y 100%, ni se propusieron ponderaciones diferenciadas entre propiedades; la decisión fue binaria (printable/no printable) o en algunos casos ordinaria (no/posiblemente/totalmente printable).

Por lo tanto, se planteó definir la printabilidad (P) como una combinación lineal de tres propiedades normalizadas:

- I_{EX} : índice de extrudabilidad,
- I_{CE} : índice de calidad de extrusión e
- I_{ED} : índice de edificabilidad.

Cada índice I_i se definió en la escala de [0,1], a partir de criterios cuantitativos derivados de la bibliografía ^[9,37,86,87,100,118,121,122]. A partir de estos índices se propuso la siguiente ecuación para calcular la printabilidad global en porcentaje (Ecuación 4):

$$P (\%) = 100(w_{EX}I_{EX} + w_{CE}I_{CE} + w_{ED}I_{ED}) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde $w_E + w_Q + w_B = 1$. Se consideró una ponderación equivalente para las tres propiedades, es decir, de $1/3 \approx 0.33$ (Ecuación 5), por lo tanto:

$$P(\%) = \frac{100}{3}(I_{EX} + I_{CE} + I_{ED}) \approx 0.33I_{EX} + 0.33I_{CE} + 0.33I_{ED} \quad \text{Ec. 5}$$

Y una mezcla alcanza $P = 100\%$ únicamente cuando las tres propiedades toman su valor máximo ($I_{EX} = I_{CE} = I_{ED} = 1$). De esta manera se consideraron tres intervalos de clasificación para la TCI3D en función de la printabilidad obtenida, siendo no printable cuando $P < 60\%$, aceptable cuando $60\% < P < 80\%$ y printable cuando $P > 80\%$.

2.2.2. Extrudabilidad

En la I3D de materiales cementantes, la extrudabilidad se definió como la capacidad de la mezcla fresca para ser bombeada y extruida a través del sistema boquilla-manguera en forma de filamento continuo, sin bloqueos, segregación ni rotura del filamento extruido [23,51,123].

En mezclas con TPE, Bhusal y Col. (2023) realizaron un ensayo imprimiendo trayectorias cuadradas huecas de 500×500 mm en una sola capa y registrando la variación del ancho de filamento en 20 posiciones a lo largo del perímetro (Figura 14) [87]. La mezcla se consideró extruible cuando el filamento se depositó de forma continua, sin interrupciones, fisuras ni zonas con adelgazamiento y cuando la dispersión de los anchos medidos alrededor del valor objetivo fijado por la boquilla de impresión se mantuvo similar.



Figura 14. Ensayo de extrudabilidad: a) protocolo de prueba y b) evaluación de la extrudabilidad en impresora 3D de laboratorio ^[87].

Sobre esta base la extrudabilidad puede adaptarse a partir de la desviación relativa del ancho del filamento sea:

- b_0 : el ancho objetivo del filamento en mm.
- b_i : el ancho medido del filamento en el punto i a lo largo de la trayectoria en mm.
- n : el número total de mediciones de ancho (en el protocolo de ^[87], $n = 20$).

Primero se calcula el error relativo medio absoluto del ancho mostrado en la ecuación 6:

$$\delta_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|b_i - b_0|}{b_0} \quad \text{Ec. 6}$$

Con este error se define un índice de extrudabilidad I_E adimensional entre 0 y 1 (Ecuación 7):

$$I_{EX} = \max [0, 1 - \delta_b] = \max \left[0, 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|b_i - b_0|}{b_0} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

- Si el filamento coincide exactamente con el ancho objetivo en todos los puntos ($b_i = b_0$ para todo i), entonces $\delta_b = 0$ y el $I_{EX} = 1$.
- A medida que el ancho medido se adelgaza o se sobredimensiona respecto a b_0 , el error relativo medio δ_b aumenta e I_{EX} disminuye linealmente.
- Si, en promedio, la desviación relativa es igual o superior al 100% ($\delta_b \geq 1$), el índice se considera a $I_{EX} = 0$.

Expresando en porcentaje la ecuación 7 quedaría de la siguiente manera:

$$I_{EX}(\%) = 100 \cdot I_{EX} = 100 \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|b_i - b_0|}{b_0} \right] \quad (\text{acotado entre 0 y 100}) \quad \text{Ec. 8}$$

Convirtiendo la evaluación de la extrudabilidad desde criterios cualitativos hacia indicadores cuantitativos basados en el control del ancho de filamento, considerando una mezcla extruible cuando $I_{EX} > 80\%$, aceptablemente extruible cuando $60\% \leq I_{EX} < 80\%$ y no extruible cuando $I_{EX} < 60\%$, compatibles con estrategias de aseguramiento geométrico en TCI3D.

2.2.3. Calidad de extrusión

La calidad de extrusión se ha entendido como el grado en que el filamento extruido mantiene una geometría constante y cercana a la deseada (ancho, altura y sección transversal), sin defectos visibles como vacíos, desgarre o cambios

abruptos de sección transversal. Diversas revisiones sobre el control de proceso y monitoreo geométrico en I3D destacaron que la calidad de extrusión se evaluó principalmente a partir de la medición del ancho y la altura del filamento, complementadas con inspección visual o con sistemas de visión por computadora para detectar deformaciones y discontinuidades (Figura 15) [10,117,124].

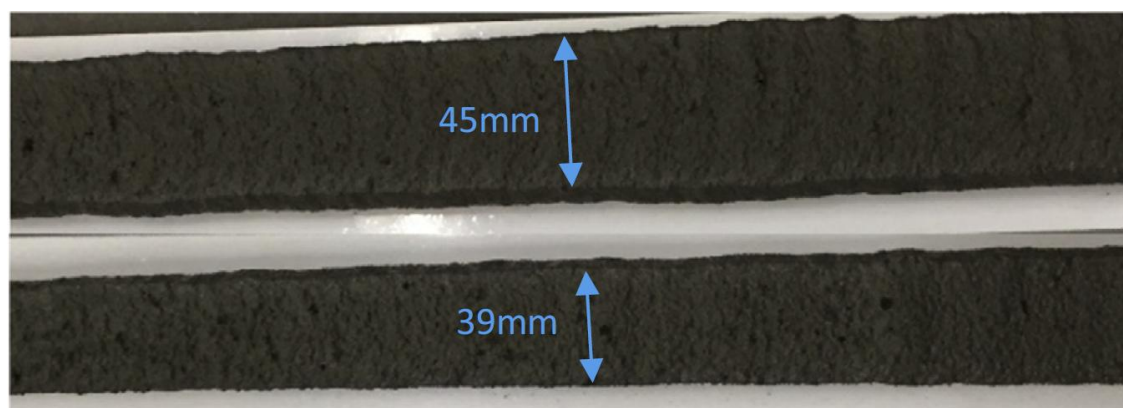
Para no contraponerse con la propiedad de extrudabilidad, uno de los índices adimensionales explícitos propuestos en la literatura para cuantificar la calidad geométrica del filamento fue el factor de retención de forma (FRF), definido como la razón entre el diámetro de la boquilla ($D_{boquilla}$) y el ancho del filamento impreso ($w_{filamento}$) (Ecuación 9):

$$FRF = \frac{D_{boquilla}}{w_{filamento}} \quad Ec. 9$$

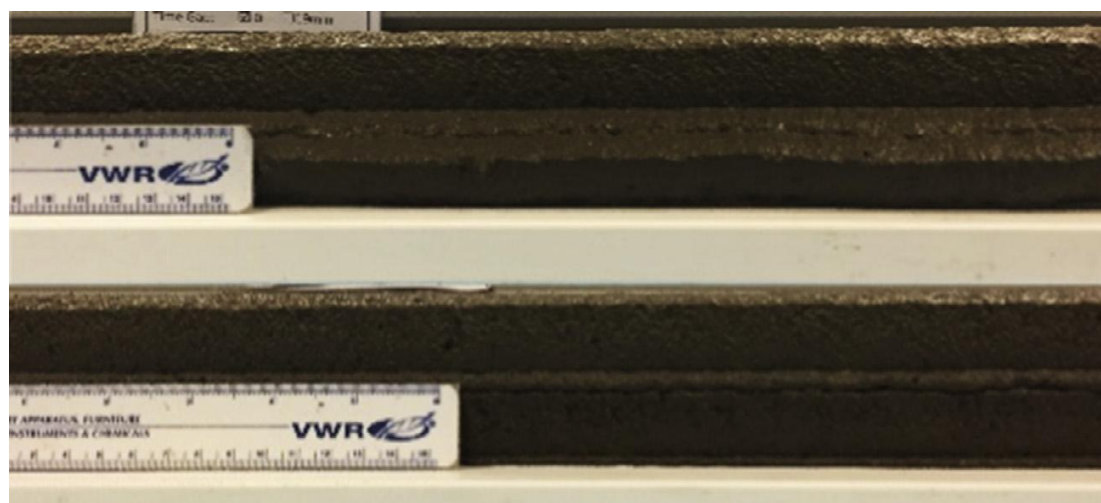
Panda y col. (2023) establecieron valores de FRF entre 0.76-0.90 atribuibles a filamentos con una superficie lisa y estable, lo que implicó razones ancho/boquilla de 1.1 a 1.3 (ensanchamientos de ~10-30% respecto al diámetro de la boquilla) [117,125]. Estudios posteriores utilizaron este mismo factor reportando filamentos aún printables con FRF entre ~0.73 y 1.2, es decir, con desviaciones geométricas de $\pm 20-40\%$ respecto al ancho objetivo, sugiriendo un intervalo óptimo entre investigaciones del ~10-40% [117,124].



(a)



(b)



(c)

Figura 15. Calidad de extrusión: a) desgarre de filamento impreso; b) cambios de sección transversal durante I3D y c) deformación y cambio de altura de capa a misma velocidad de impresión ^[10].

También se han evaluado características como el ancho, la altura y el área de la sección transversal como variables de respuesta para clasificar la calidad del filamento. Alhussain y col. (2024) midieron estas variables y clasificaron los filamentos en tres clases de calidad: filamentos inestables con formas irregulares y huecos entre capas (clase 1), filamentos estables y apilables con buena continuidad (clase 2, considerada ideal) y filamentos excesivamente redondeados o deformados que dificultaron el apilamiento (clase 3) ^[126].

Sobre esta base, se definió la calidad de extrusión a partir de la geometría promedio de varios filamentos rectos impresos en condiciones controladas. Cuatro filamentos de una misma longitud (p.ej., 200 mm) se imprimieron con una misma combinación de parámetros de proceso; en cada filamento se midieron el ancho w y la altura h en posiciones equidistantes y se calcularon los promedios globales $\bar{w}$ y $\bar{h}$. Estos valores se compararon con los valores objetivos de diseño, definidos como el ancho objetivo w_{obj} (diámetro de boquilla) y la altura de capa programada h_{obj} .

De manera análoga al uso del FRF y de las tolerancias de error geométrico reportadas en la bibliografía, se propuso un índice de calidad de extrusión I_{CE} en escala 0-100% (Ecuación 10) basado en las desviaciones relativas del ancho y la altura:

$$I_{CE} = 100 \times \frac{f_w + f_h}{2} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$$f_w = \max \left[0, 1 - \frac{|\bar{w} - w_{obj}|}{\Delta w_{max}} \right], \quad f_h = \max \left[0, 1 - \frac{|\bar{h} - h_{obj}|}{\Delta h_{max}} \right] \quad Ec. 11$$

y Δw_{max} y Δh_{max} corresponden a las desviaciones máximas admisibles antes de considerar que la calidad de extrusión es nula (0%). Similar con los intervalos de FRF utilizados para filamentos “aceptables” con desviaciones de ancho entre 20-30% respecto al valor objetivo (Ecuación 12), sugiriendo adoptar valores de referencia de:

$$\Delta w_{max} \approx 0.25 - 0.30 w_{obj}, \quad \Delta h_{max} \approx 0.25 - 0.30 h_{obj} \quad Ec. 12$$

Con esta formulación, un filamento cuya geometría promedio se mantuvo cercana a los valores de diseño ($|\bar{w} - w_{obj}|/w_{obj}$ y $|\bar{h} - h_{obj}|/h_{obj}$ menores al 5-10%) obtuvo valores de I_{CE} cercanos al 100%, mientras que desviaciones del entre 20-30% redujeron el índice hacia valores cercanos a 0-40%, correspondientes con filamentos visualmente deformados o inestables de acuerdo con los criterios establecidos en la bibliografía.

2.2.4. Edificabilidad

La edificabilidad se definió como la capacidad del material recién extruido para soportar el peso de las capas subsecuentes antes del colapso, pandeo excesivo o deformaciones del elemento impreso, durante un intervalo de tiempo dado. Esta propiedad describió la resistencia portante temprana de la mezcla en estado fresco y se ha relacionado directamente con la capacidad de la TCI3D para edificar elementos con cierta altura mediante apilamiento capa por capa.

Esta propiedad se ha evaluado principalmente mediante dos tipos de ensayos (Figura 16) [10,86]:

1. Ensayos de apilamiento de capas, en los que se imprimieron filamentos sucesivos uno sobre otro hasta que se observó inestabilidad o colapso (Figura 16a). Kazemian y col. (2017) imprimieron paredes rectas con una combinación fija de velocidad de impresión (60 mm/s), altura de capa (25.4 mm), ancho de capa (38.1 mm) y tiempo entre capas (19 min), y definieron la edificabilidad como el número máximo de capas que podían apilarse sin que se produjera inestabilidad visible (pandeo lateral o aplastamiento significativo de las capas inferiores). En su trabajo, mezclas consideradas printables apilaron entre 10-15 capas estables en elementos tipo pared, mientras que formulaciones con menor resistencia temprana colapsaron después de las 5 capas.
2. Ensayos de deformación bajo carga estática, normalmente con el ensayo de minicono, en los cuales se medía la altura remanente de una muestra tras la aplicación de una carga normal definida (Figura 16b). Daher y col. (2023) utilizaron un minicono modificado para evaluar la capacidad portante de morteros con TPE: tras aplicar una carga de 600 g sobre el “cono” recién moldeado, se fijó como límite de edificabilidad una altura final $h_f \geq 4.50 \text{ cm}$ (equivalente a un 90% en relación con la altura del molde de 5.00 cm); solo las mezclas que superaron este valor se consideraron adecuadas en términos de edificabilidad para ser printables.

Ambos enfoques coincidieron en interpretar la edificabilidad como un criterio de aptitud estructural temprana, distinto pero complementario a la extrudabilidad. Una mezcla podía ser fácilmente extruible pero no edificable (colapso rápido al apilar), o presentar buena edificabilidad, pero mala extrudabilidad (flujo inestable en la boquilla).

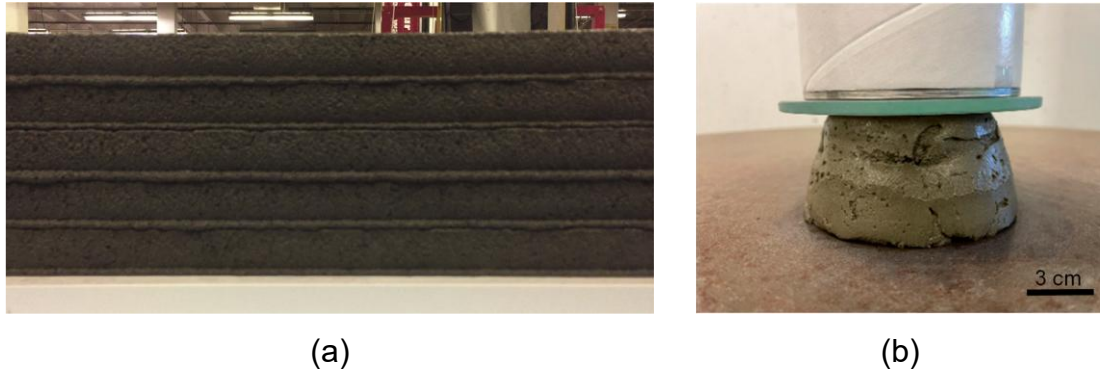


Figura 16. Edificabilidad: a) número máximo de capas apiladas y b) asentamiento diferencial con peso constante ^[10,86].

En esta investigación se adoptó un método de conteo de capas apilables inspirado en los ensayos de Kazemian y col. (2017), definiendo un índice de edificabilidad basado en el número máximo de capas estables alcanzado por una mezcla considerada printable. Se plantea un máximo de referencia de 10 capas (Ecuación 13); cada capa estable aporta un 10% al índice, de modo que una mezcla que logra apilar n capas sin colapso obtiene:

$$I_{ED}(\%) = 10 \times n \quad \text{con} \quad n = 0,1,2, \dots, 10 \quad \text{Ec. 13}$$

y se promedia $I_{ED} = 100\%$ para $n \geq 10$. Bajo este esquema: una mezcla con un $I_{ED} < 60\%$ se consideró como no edificable; $60\% \leq I_{ED} < 80\%$ como una edificabilidad aceptable y $I_{ED} > 80\%$ con una buena edificabilidad.

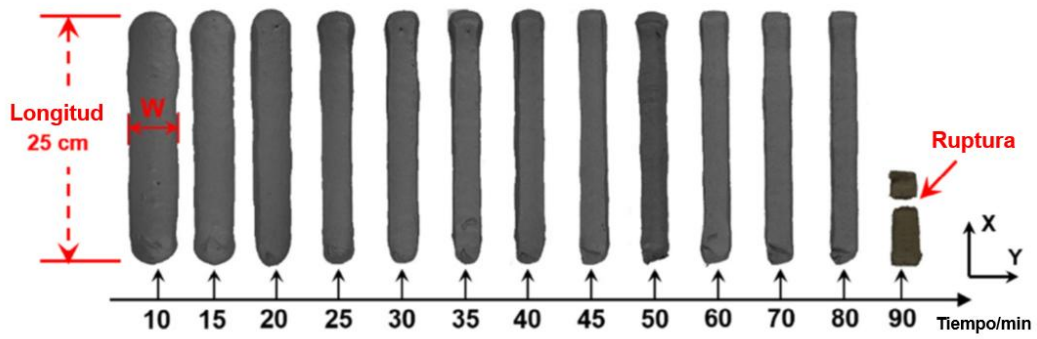
2.2.5. Tiempo abierto

El tiempo abierto se definió como el intervalo durante el cual la mezcla fresca mantuvo una trabajabilidad compatible con el proceso de extrusión, con la formación estable de filamentos, sin bloqueo de la boquilla ni interrupciones

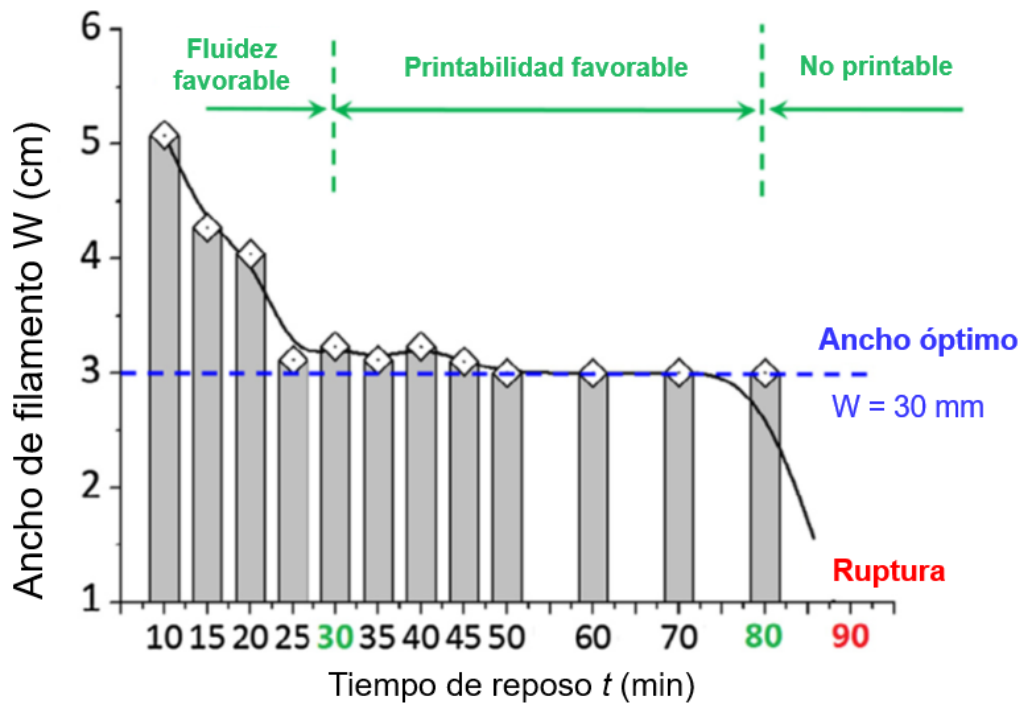
visibles del mismo. Diversos autores lo vincularon con la llamada ventana de printabilidad, es decir, el periodo en que las propiedades reológicas y de resistencia temprana permanecieron dentro de un rango que permitió simultáneamente la extrudabilidad y la edificabilidad del material.

El tiempo abierto se ha evaluado mediante distintos enfoques. Por un lado, Le y col. (2012) evaluaron la evolución de la resistencia al corte de un concreto de alta resistencia para I3D y fijaron el final del tiempo abierto cuando la resistencia al corte aumentó 0.3 kPa respecto al valor inicial; con ello definieron mezclas óptimas con resistencias al corte cercanas a 0.55 kPa, capaces de construir entre 15 y 34 capas antes de perder su capacidad de impresión ^[127].

Por otro lado, Ma y col (2018). desarrollaron un procedimiento directo basado en la observación de filamentos extruidos para caracterizar el tiempo abierto de una tinta cementante con relaves de cobre (Figura 17) ^[121]. En su metodología se imprimieron pares de filamentos rectos de 250 mm de longitud y ≈ 30 mm de ancho a distintos tiempos de reposo (10-90 min) y se definió el tiempo abierto como el último instante en el que el filamento permaneció continuo, sin roturas ni disrupción. Para sus mezclas con sustituciones de 0-50% de relaves, los tiempos abiertos oscilaron entre 70 y 90 min; a partir de estos resultados recomendaron un tiempo efectivo de impresión de 70 min como valor de diseño para garantizar una extrudabilidad aceptable en todas las tintas.



(a)



(b)

Figura 17. Tiempo abierto: a) esquema visual y b) cálculo. Ambas figuras adaptadas de ^[121].

Como se mostró en la figura 17, el seguimiento del ancho del filamento W permitió identificar tres zonas funcionales: (i) una etapa inicial ($t \leq 30$ min) con una deformación del filamento atribuida a una alta fluidez; (ii) una etapa intermedia (≈ 30 -80 min) donde el ancho del filamento se aproximó al ancho de la boquilla y se consideró óptimo para imprimir; y (iii) una etapa final en la que el

material se volvió demasiado rígido, generando discontinuidades y pérdida de extrudabilidad. A partir de estas observaciones, identificaron rangos de asentamiento entre 32-88 mm, diámetros de extensión de mesa de flujo entre 174-210 mm y resistencias a la penetración de 13-40 kPa donde consideraron imprimibles las tintas dentro de este mismo tiempo abierto.

2.2.6. Fluidez

La fluidez se ha definido como la capacidad de una pasta o mortero para deformarse y extenderse bajo su propio peso sin segregación ni exudación significativa. Esta propiedad dependió principalmente del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad plástica del sistema y se ha utilizado como indicador indirecto para calcular la extrudabilidad y la edificabilidad de las TCIM3D [4,9,10,30,32,51,88,115,121].

2.2.6.1. Fluidez medida en mesa de flujo

El ensayo de mesa de flujo conforme a ASTM C1437 y normas equivalentes (EN 1015-3 y EN 13395-1) consistió en moldear el mortero en un cono truncado sobre una mesa normalizada, retirar el molde y accionar la mesa 25 veces en 15 s. Posteriormente se midieron al menos cuatro diámetros ortogonales del material y se calculó el diámetro medio final D_f (Ecuación 14). La fluidez F_{ASTM} se expresó como el incremento porcentual del diámetro respecto al diámetro inicial del molde D_0 (100 mm en la geometría estándar):

$$F_{ASTM}(\%) = \frac{D_f - D_0}{D_0} \times 100 \quad \text{Ec. 14}$$

Los diámetros de flujo entre 150-190 mm, propuestos como intervalo óptimo para morteros printables, correspondieron aproximadamente a incrementos de fluidez entre 50-90% ^[128]. Valores inferiores a 150 mm se asociaron a mezclas demasiado cohesivas para ser extruidas, mientras que valores superiores a 190-210 mm se relacionaron con morteros muy fluidos, con pérdida de estabilidad de forma y colapso de las capas impresas.

2.2.6.2. Fluidez medida con minicono de revenimiento

Por otro lado, la fluidez en pastas cementantes se ha evaluado utilizando un minicono de revenimiento, utilizando un molde troncocónico geométricamente similar al cono de Abrams, pero de dimensiones reducidas (Figura 18) ^[129].

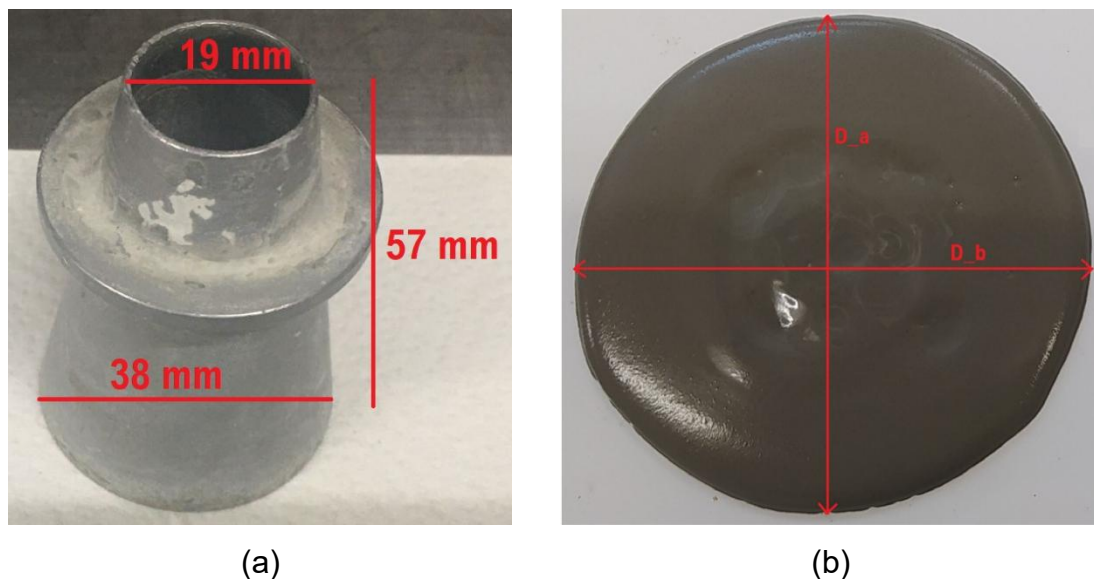


Figura 18. Fluidez con minicono: a) dimensiones y b) diámetros de flujo ^[129].

El procedimiento consiste en llenar el minicono colocado sobre una placa lisa de acrílico, levantarlo verticalmente y medir, tras un tiempo de 60 s, dos diámetros de extensión de la pasta (d_a, d_b) a lo largo de dos ejes perpendiculares. El diámetro medio de extensión D_m se calcula con la ecuación 15:

$$D_m = \frac{d_a + d_b}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

Sobre esta base, Okamura y Ouchi (2003), propusieron para morteros de concreto autocompactable el índice de extensión relativa del mortero G_m (Ecuación 16), definido como el incremento relativo del área de flujo respecto al área inicial de la base del cono ^[130,131]:

$$G_m = \frac{D_m^2 - D_0^2}{D_0^2} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde D_0 es el diámetro de la base del minicono. Valores de G_m comprendidos entre 3 y 7 (equivalentes a diámetros de flujo de 200-280 mm cuando se utilizaron conos de mayor escala) se consideraron aceptables para obtener morteros con comportamientos autocompactable y sin segregación. Estudios posteriores de pastas cementantes superplastificadas emplearon procedimientos análogos, utilizando el diámetro de flujo o parámetros adimensionales derivados de D_m/D_0 para correlacionar la fluidez con el esfuerzo de cedencia inicial y la viscosidad plástica, y reportando diámetros de minicono típicos entre 150-220 mm para considerar pastas con una reología controlada.

2.3. Reología.

La reología es la rama de la mecánica de medios continuos que estudia la relación entre esfuerzos y deformaciones en materiales que fluyen y se deforman en el tiempo ^[132–134]. Su objetivo es describir, mediante modelos constitutivos, cómo responde un material cuando se somete a diferentes esfuerzos cortantes (τ) y a las tasas de corte ($\dot{\gamma}$). En un fluido newtoniano ideal esta relación es lineal ($\tau = \eta \dot{\gamma}$), donde la viscosidad η se considera constante; sin embargo, la mayoría de los materiales cementantes presentan un comportamiento no newtoniano, es decir, con una viscosidad dependiente de la tasa de corte y del tiempo ^[133]. Por lo tanto, la reología utiliza modelos de fluidos tipo pseudoplásticos para describir su comportamiento (Figura 19). Entre ellos están:

i) El Modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde τ_0 es un esfuerzo de cedencia a partir del cual el material comienza a fluir y μ_p es una viscosidad plástica efectiva.

ii) El Modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad \text{Ec. 18}$$

En el que K es el índice de consistencia y n el exponente reológico; valores $n < 1$ representan comportamientos pseudoplásticos, típicos de pastas y morteros cementantes.

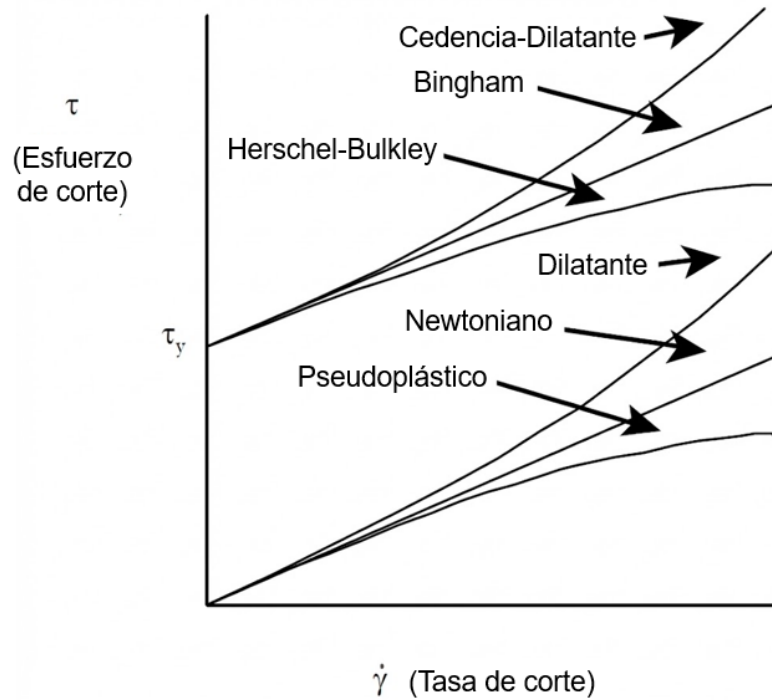


Figura 19. Reologías independientes del tiempo adaptado de [133]

En función de estos modelos, las TCI3D se clasifican dentro de la familia de los fluidos pseudoplásticos que describen el esfuerzo máximo necesario antes de fluir y una viscosidad aparente que disminuye con el incremento de la tasa de corte [132,133]. Esta combinación permite que la mezcla ofrezca resistencia a la deformación cuando está en reposo y, al mismo tiempo, fluya de manera constante bajo las condiciones de bombeo y extrusión en la impresora [30,33,135].

2.3.1. Esfuerzo de cedencia.

Se le denomina al esfuerzo de cedencia estático ($ECE = \tau_{0,est}$) al esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo de cualquier fluido no newtoniano a partir del reposo, es decir, para romper la estructura floculada generada por la hidratación inicial del aglutinante y las interacciones entre la arcilla y el agua. Este parámetro ha estado asociado con la extrudabilidad de las TCI3D debido a que permite comparar el esfuerzo requerido para iniciar el flujo de la tinta con el sistema de bombeo de la impresora 3D, sin embargo, si el $\tau_{0,est}$ es demasiado alto, la tinta generaría obstrucciones en la boquilla de impresión durante el proceso de extrusión, generando problemas de calidad dimensional en los filamentos impresos [32,34,118].

En TCI3D con TPE, Bhusal y col. (2023) evaluaron cuatro mezclas con un TPE arcilloso utilizando un reómetro rotacional con barrido ascendente-descendente de $\dot{\gamma} = 0$ a 100 s^{-1} y viceversa. Ajustaron el tramo ascendente a un modelo de Bingham y definieron $\tau_{0,est}$ como el punto máximo de ECE al inicio del flujo [87]. Obteniendo valores entre 1,169-2,583 Pa (≈ 1.2 -2.6 kPa), rango que permitió imprimir edificar hasta 12 capas sin colapso, pero en las mezclas ECE más altos se observaron retracciones y fisuras por secado.

Por otro lado, El esfuerzo de cedencia dinámico ($ECD = \tau_{0,din}$) se define como el esfuerzo mínimo necesario para mantener el flujo una vez que el material ya se encuentra en movimiento [36,132–134]. En reometría rotacional se obtiene comúnmente ajustando el tramo descendente de la curva $\tau - \dot{\gamma}$ (después de un pre-cizallamiento) con los modelos de Bingham o Herschel-Bulkley y extrapolando $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ es posible calcular el ECD con la ecuación 19:

$$\tau_{0,din} = (\tau - k\dot{\gamma}^n)|_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \quad \text{Ec. 19}$$

Bhusal y col. (2023) calcularon $\tau_{0,din}$ en el límite de la tasa de corte nula en el ciclo descendente, obteniendo valores entre 84-355 Pa ^[87]. Estos valores menores que los ECE en su investigación, demostraron que las tintas tuvieran la capacidad de apilar las capas subsecuentemente durante las pruebas de edificabilidad, debido a que si el ECD < ECE, entonces los filamentos impresos mantienen su forma durante su deposición permitiendo mantenerse estáticos debido a su resistencia al flujo durante el apilamiento de las capas.

2.3.2. Viscosidad.

En reología, la viscosidad (η) se define como la razón entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) (Ecuación 20) ^[132,133], es decir:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ec. 20}$$

En fluidos no newtonianos, esta magnitud depende de la tasa de corte y se denomina viscosidad aparente (η_{app}). Estos materiales se describen mediante el modelo de Herschel-Bulkley, a partir de la ecuación 18, la viscosidad aparente puede obtenerse como:

$$\eta_{app}(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{Ec. 21}$$

En mezclas pseudoplásticas ($n < 1$), la viscosidad aparente disminuye al aumentar la tasa de corte, lo que favorece el bombeo y la extrusión bajo altos gradientes de esfuerzo, mientras que se recuperan valores de viscosidad más elevados a bajas tasas de corte, necesarios para garantizar la estabilidad dimensional después del depósito de las capas.

En investigaciones utilizando TPE se han reportado intervalos de viscosidad aparente de la misma magnitud que los observados en morteros de I3D convencionales, pero ajustados a la naturaleza cohesiva de los contenidos de arcilla. P. ej., Bhusal y col. (2023) obtuvieron viscosidades aparentes de 8 Pa·s a tasas de corte entre 20-80 s⁻¹ en mezclas consideradas como extruibles y con una edificabilidad superior a las 10 capas ^[87]. Otros trabajos describieron mezclas imprimibles con viscosidades aparentes entre 4-5 Pa·s en morteros de suelo para aplicaciones de construcción in situ, así como formulaciones más cohesivas con viscosidades de 60-65 Pa·s cuando se incrementó la fracción de aglutinante ^[136].

2.4. Propiedades mecánicas.

2.4.1. Resistencia de compresión de tabicones y elementos impresos en 3D.

En elementos de mampostería y modulares por I3D, la RC se definió como la capacidad del elemento para soportar una carga axial por unidad de área. Conforme al criterio de la NMX-C-404-ONNCCE y su método asociado de la NMX-C-036-ONNCCE, la RC simple de una pieza f_p (kg/cm² o MPa) se calcula de acuerdo con la ecuación 22:

$$f_p = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_b} \quad \text{Ec. 22}$$

donde $P_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima de falla (kg) y A_b es el área bruta de la pieza producto del largo por el ancho sin descontar los huecos del elemento (cm²). La norma establece valores mínimos de resistencia media e individual para bloques, tabiques y tabicones estructurales de 7 y 9 MPa, respectivamente [137,138]. En el caso de elementos modulares por I3D (p. ej. tabicones huecos), estos pueden evaluarse de forma análoga, siempre que se cumplan las condiciones de velocidad de carga (0.137-0.343 MPa/s), de relación de esbeltez (0.7) y de la desviación de la arista de los lados del espécimen ($\leq 3\%$) [138,139].

2.4.2. Anisotropía por dirección de impresión.

En materiales I3D, la deposición capa por capa genera el efecto por anisotropía mecánica, debido a la presencia de interfaces entre filamentos y capas que generan planos de debilidad [123,140–142]. Estudios en concretos I3D mostraron que la RC dependió de la dirección de la carga respecto de la dirección de deposición de los filamentos impresos (Figura 20). El comité RILEM TC 304 reportó reducciones promedio de resistencia en especímenes impresos respecto a especímenes moldeados de 8.7% cuando la carga se aplicó en el eje X, y de 18.2-20.3% cuando la carga se orientó de en el eje Y [116]. Otras investigaciones observaron efectos más severos, p. ej., Maroszek y col. (2024) indicaron que, en ciertos materiales, los elementos impresos presentaron resistencias a compresión de 3 a 4 veces menores que sus equivalentes moldeados, atribuidas a una desfavorable adherencia entre las capas [143].

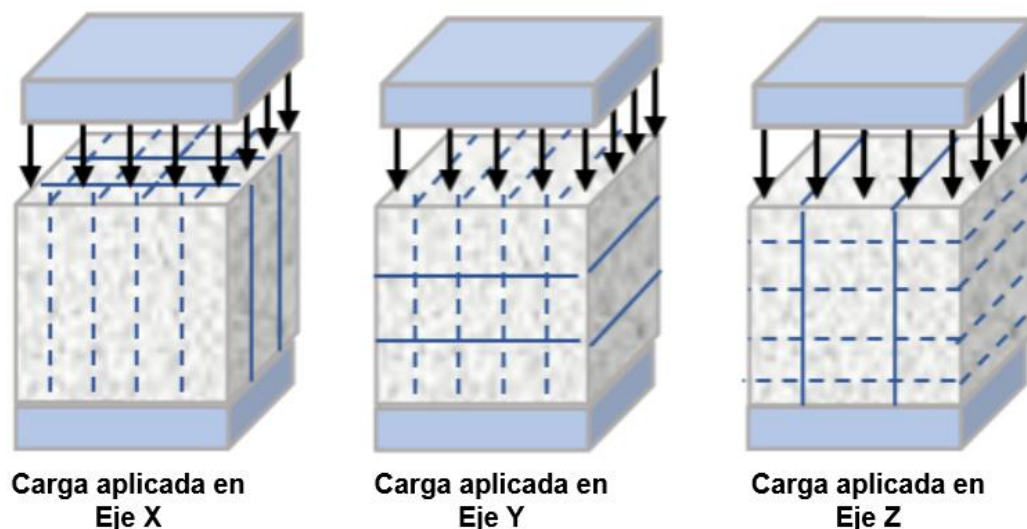


Figura 20. Anisotropía mecánica en RC en diferentes direcciones de aplicación de carga, adaptado de [140]

Por otro lado, otros trabajos reportan reducciones promedio de $\approx 12\text{-}22\%$ en RC de morteros impresos en comparación con cubos moldeados, mientras que Wagner y col. (2024) reportaron una disminución media cercana al 41%, existiendo variaciones entre los intervalos posiblemente por los materiales utilizados y además por las geometrías adoptadas en estas investigaciones [140,144]. Sugiriendo proponer un rango de caída de RC del elemento moldeado a elemento impreso tipo tabicón para considerarlo como un factor de seguridad durante su aplicación como elemento estructural.

2.5. Análisis estadístico.

El análisis estadístico es una herramienta en la investigación científica y tecnológica, ya que permite interpretar los datos experimentales, identificar relaciones entre variables y optimizar procesos, incluso cuando intervienen múltiples factores de manera simultánea. En el diseño de TCI3D donde intervienen múltiples propiedades en un solo conjunto (de printabilidad, reológicas y mecánicas), el análisis estadístico cumple por lo menos tres funciones principales [81,135,143,145,146]:

1. Diseño de experimentos (DOE): permite planificar de manera eficiente la experimentación, definiendo factores, niveles y combinaciones que representen adecuadamente el comportamiento del sistema bajo estudio. Con ello se evitan ensayos redundantes, se reducen costos y tiempos, y

se obtiene una base sólida para evaluar la variabilidad, la aleatoriedad y el error experimental, incrementando la confiabilidad de las conclusiones.

2. Modelamiento estadístico: Se basa en métodos de regresión y análisis multivariable para expresar las respuestas experimentales en función de los factores de estudio. Estos modelos permiten cuantificar la contribución de cada factor, identificar efectos principales e interacciones estadísticamente significativas y estimar la respuesta del sistema dentro del dominio experimental considerado.
3. Optimización multivariable: a partir de los modelos de predicción, se emplean métodos como la de superficie de respuesta (MSR) y los diseños factoriales para determinar las combinaciones de factores que maximizan o minimizan las propiedades de interés.

2.5.2. El Método de Superficie de Respuesta como herramienta estadística para optimizar tintas de impresión 3D.

El MSR ha permitido modelar, analizar y optimizar las variables de respuesta en función de los factores experimentales, pero considerando un modelo de regresión cuadrática ^[147]. Este modelo implica (i) la selección de los factores y sus respectivos niveles, (ii) el diseño experimental basado en modelos como el Diseño Central Compuesto (DCC) o el Diseño de Box-Behnken, que permiten estructurar un número eficiente de ensayos experimentales, (iii) la obtención de datos experimentales para cada combinación de factores del diseño y (iv) el ajuste de un modelo matemático polinomial de segundo orden, que describe la respuesta en función de las variables (Ecuación 23):

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \text{Ec. 23}$$

donde Y es la variable de respuesta, X_i y X_j son los factores independientes, β representa el coeficiente del modelo y ε es el término del error.

A partir de este modelo, el MSR incorpora tres bloques de análisis [93,95,147–149]:

1. Análisis de varianza (ANOVA), para verificar la significancia global del modelo y de sus términos (lineales, cuadráticos e interacciones), evaluar el ajuste (R^2) y cuantificar el error residual.
2. Construcción de superficies de respuesta y gráficos de contorno, que permiten visualizar el efecto combinado de dos factores a la vez sobre la respuesta, manteniendo los demás factores fijados.
3. Determinación de condiciones óptimas, mediante búsqueda del máximo, mínimo o punto óptimo de deseabilidad dentro del dominio experimental.

Una ventaja específica del MSR es que las gráficas de contorno y las superficies de respuesta en 3D facilitan la interpretación física del sistema: permiten identificar regiones donde la respuesta es alta o baja, visualizar curvas entre propiedades competitivas (p. ej., fluidez vs esfuerzo de cedencia) y delimitar zonas operativas robustas donde pequeñas variaciones en los factores no producen cambios significativos en el desempeño. P. ej., en el diseño de una TCI3D, Wang y col. (2025) aplicaron un diseño Box-Behnken con tres factores (acelerante, HPMC y superplastificante PCE) y dos respuestas (fluidez y ECD), estableciendo como criterios de aceptabilidad una fluidez de 150-180 mm y un esfuerzo de cedencia dinámico de 200-800 Pa. El modelo cuadrático ajustado

presentó coeficientes de determinación $R^2 > 0.95$ y R^2 ajustados > 0.90 para ambas respuestas, con $p\text{-value} < 0.0001$ y falta de ajuste no significativa ($p > 0.05$), lo que confirmó una capacidad del modelo de predicción robusta. La solución de máxima deseabilidad ($D \approx 1$) correspondió a dosificaciones óptimas de acelerante=0.32%, HPMC=0.24% y PCE=0.23% (respecto de la masa de aglutinante), que predijeron una fluidez=153.8 mm y un ECD=768 Pa; los ensayos de validación obtuvieron 147.5 mm y 711 Pa, con desviaciones relativas de 4.1% y 7.6% respecto a los valores predichos, además de RC de 21.4 MPa, 30.5 MPa y 40.6 MPa a 3, 7 y 28 días respectivamente, confirmando la pertinencia del marco de optimización propuesto ^[93]. Asimismo, Chen y col. (2018) estudiaron pastas de cemento sulfoaluminoso modificadas con HPMC, un agente reductor de agua y Li_2CO_3 mediante MSR, identificando una ventana óptima de dosificaciones en la que la viscosidad plástica se mantuvo entre 1.65-2.54 Pa·s, incrementando la RC temprana, demostrando que los modelos de respuesta ajustados describieron adecuadamente la correlación entre dosificación de aditivos, reología y desempeño mecánico en sistemas cementantes printables ^[150].

2.5.2.1. Análisis de Varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística utilizada para evaluar si las variaciones observadas en una respuesta Y pueden atribuirse de forma significativa a los factores de estudio o si se deben únicamente al error experimental ^[147]. En los modelos del MSR el ANOVA descompone la suma de cuadrados total en contribuciones asociadas al modelo (factores e interacciones) y al error residual (Ecuación 24), calculando para cada fuente de variación: suma de cuadrados (SS), grados de libertad (gl), cuadrado medio (MS) y el estadístico F:

$$F_{factor} = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}}$$

Ec. 24

a partir de este cociente se obtiene un valor p comparando el F calculado con la distribución F teórica; un término se considera estadísticamente significativo cuando $p < \alpha$ ($\alpha = 0.05$). Además, el ANOVA del modelo global permite verificar si la regresión ajustada explica una parte significativa de la variabilidad de la respuesta, mientras que la prueba de falta de ajuste contrasta el error del modelo con el error puro, es decir, valores de falta de ajuste con $p > 0.05$ suelen interpretarse como ausencia de desviaciones [93].

En TCI3D, el ANOVA se utilizó de forma rutinaria para validar modelos obtenidos mediante MSR y otros enfoques de diseño de mezclas. En el estudio de Wang y col. (2025), mostró que los modelos cuadráticos ajustados para la fluidez y el ECD fueron estadísticamente significativos (valor del modelo $p < 0.0001$) indicando un ajuste adecuado y ausencia de falta de ajuste significativa. Además, los valores F permitieron establecer la jerarquía de influencia de los factores (contenido de superplastificante > acelerante > HPMC) sobre la variable de respuesta reológica.

2.5.2.2. Coeficiente de determinación.

El coeficiente de determinación (R^2) se empleó como uno de los indicadores para evaluar el ajuste de los modelos de regresión obtenidos mediante el MSR. En términos generales, el R^2 cuantificó la proporción de la variabilidad total de una respuesta Y que fue explicada por el modelo en función de los factores X_i [147]. Matemáticamente se define en la ecuación 25 como:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Ec. 25}$$

donde SS_{res} es la suma de cuadrados de los residuos, SS_{tot} es la suma de cuadrados total, Y_i es el valor experimental, $\hat{Y}_i$ el valor predicho por el modelo, $\bar{Y}$ la media de la respuesta y n el número de observaciones. Valores de R^2 próximos a 1 indicaron que el modelo explicó la mayor parte de la variabilidad observada, mientras que valores bajos reflejaron una capacidad predictiva limitada del modelo [93].

Dado que en los modelos de MSR el número de parámetros puede ser elevado (términos lineales, cuadráticos e interacciones), se utilizó también el coeficiente de determinación ajustado (R_{aj}^2), que omite la inclusión de términos poco significativos. La ecuación 26 la describe como:

$$R_{aj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad \text{Ec. 26}$$

donde p es el número de parámetros del modelo (sin incluir el término independiente). De esta forma, el R_{aj}^2 disminuyó cuando se añadieron términos que no aportaron capacidad explicativa real y permitió comparar modelos con diferente número de términos. En aplicaciones de MSR en TCI3D, varios autores consideraron los modelos predictivos cuando presentaron R^2 y R_{aj}^2 mayores que 0.85-0.90, sin embargo, se sugiere validar la predicción de los modelos mediante una prueba de hipótesis [93,95,148,149].

2.6. Planteamiento del problema.

El acceso a una vivienda digna es uno de los principales retos sociales en México, especialmente en regiones con una alta densidad urbana y una limitada disponibilidad de terrenos para construcción ^[1,2,151]. De acuerdo con organismos como la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), en 2022 el 9.1% de la población presentó carencia por calidad y espacios de la vivienda (≈ 11.7 millones de personas), 5.8% vivía en hacinamiento y 2.9% en viviendas con piso de tierra; en 2024 la carencia por calidad y espacios descendió a 7.9%, mientras que 14.1% de la población presentó carencia por acceso a servicios básicos en la vivienda (agua, luz y drenaje). Además, 24.3% de las viviendas no contaba con escrituras (2022) y 14.0% del parque habitacional en el nivel nacional estaba deshabitado (2020), evidenciando problemas de acceso, calidad y gestión del stock existente. Además, el déficit habitacional no sólo se expresa en la falta de unidades construidas, sino también en ^[1,2,151–155]:

- (a) La baja calidad de los espacios, p.ej., hacinamiento (>2.5 personas por cuarto: 5.8% en 2022), pisos de tierra (2.9%), uso de materiales endebles en muros/techos y exposición a peligros estructurales; estos factores incrementan la vulnerabilidad ante climas extremos y riesgos a la salud.

(b) La precariedad estructural como viviendas con materiales endeble o deteriorados que, de acuerdo con el propio diagnóstico de CONEVAL, implican peligros estructurales y mayor riesgo para sus habitantes.

(c) La falta de servicios adecuados, p.ej., 14.1% de la población con carencia por servicios básicos (2024) y 33.5% de viviendas sin suministro cotidiano de agua (2022).

(d) La sostenibilidad de las viviendas, p.ej., la alta huella de Carbono asociada con materiales convencionales (el cemento aporta ~5-8% de las emisiones globales de CO₂ y representa ~74-81% del CO₂ embebido del concreto).

Frente a este panorama, se vuelve urgente explorar soluciones constructivas más eficientes y sostenibles que puedan responder a la creciente demanda de vivienda asequible, especialmente para el sector de la población más vulnerable [156].

No obstante, los métodos constructivos convencionales han mostrado límites para cerrar el déficit con criterios simultáneos de costo, tiempo, calidad y sostenibilidad: los ciclos de obra son largos y dependen de mano de obra intensiva; la variabilidad en el sitio dificulta la repetibilidad y el control geométrico; el uso de encofrados y procesos húmedos incrementa pérdidas y generación de RCD; la logística de cementantes y agregados eleva costos y huella de Carbono; y el TPE rara vez se valoriza a gran escala. En consecuencia, se requieren sistemas automatizables, reproducibles y de bajo consumo material-energético que produzcan elementos modulares con rapidez, trazabilidad y menor impacto ambiental, idealmente incorporando insumos locales y circulares [44,46,157].

La I3D en la construcción es una tecnología con el potencial para revolucionar esta industria debido a la reducción de los tiempos de ejecución, el

consumo de materiales, la necesidad de mano de obra intensiva, las emisiones de CO₂ y el consumo energético en magnitudes reportadas en la bibliografía como: ahorro de 50-80% en mano de obra, 30-60% menos residuos, ≈50% de reducción en tiempo de obra, y hasta ~70% de disminución de CO₂ dependiendo del diseño y materiales empleados [7,20,158]. Sin embargo, su implementación en México está limitada por diversos factores como el acceso a impresoras de gran formato y la falta de materiales cementantes alternativos que puedan ser diseñados localmente, lo cual es importante para evitar la huella de carbono por el transporte de materias primas, la reducción de costos y la facilidad para que la población local pueda manipular o procesar los materiales si esto fuera necesario; todo lo anterior debido a la necesidad de promover la EC y una industria de la construcción más sostenible [157,159].

En este contexto, el Gobierno del Estado de NL estableció la normativa ambiental estatal NAE-SMA-008-2022 mediante la Secretaría de Medio Ambiente (SMA) y creó la primera Escombrera Metropolitana del norte del país mediante el SIMEPRODE, buscando promover el manejo integral y el aprovechamiento de los residuos de los RCD. No obstante, hace falta establecer alianzas estratégicas entre el Gobierno, las Industrias y la Academia para lograr este objetivo, ya que el primero no cuenta con todos los medios, equipos y expertos para establecer (i) el control de calidad y los manuales de uso seguro de las materias primas circulares y los productos elaborados con materiales reciclados, (ii) los requerimientos técnicos, los tipos de ensayos y análisis requeridos para lograr una confiabilidad estadística, (iii) entre otros aspectos. Por tanto, la SMA y el SIMEPRODE han establecido convenios con la FIC-UANL con el fin de alcanzar estas soluciones.

Por lo tanto, un recurso con el potencial de aprovechamiento y circularidad es el TPE, ya que es el RCD más abundante derivado de obras de urbanización, de cimentaciones y de excavaciones subterráneas. De hecho, en 2024 la TPE

representó aproximadamente el 39% del volumen total de RCD en México, el cual se dispone sin control técnico ni valorización alguna ^[46,74]. Su aprovechamiento como materia prima circular en la fabricación de TCI3D brinda una alternativa para reducir la extracción de recursos vírgenes, el uso de CP, los costos de construcción y fomentar una EC dentro del sector construcción ^[37]. No obstante, el uso de TPE enfrenta múltiples limitaciones técnicas, tales como la heterogeneidad de sus propiedades físicas y químicas, así como la falta de procedimientos estandarizados para lograr su control de calidad como materia prima de las tintas ^[39,160]. Esto es importante porque determinan el comportamiento reológico de las tintas (fluidez, viscosidad, esfuerzos de cedencia), su capacidad de extrusión y edificabilidad durante la impresión, así como las propiedades en estado endurecido de los elementos impresos como la resistencia mecánica ^[14,17,20,87].

Adicionalmente, no existen guías normativas, métodos ni criterios bien definidos para diseñar las tintas cementantes con base en TPE, evaluar sus propiedades o escalar su utilización, lo que ha ralentizado su integración en proyectos de construcción por I3D. Esta falta de estandarización limita el escalamiento de la tecnología porque no existe una estrategia sistemática para pasar de prototipos a un nivel de laboratorio hacia un nivel industrial, lo cual dificulta su adopción como una solución práctica en el sector habitacional ^[6,8,39,86,161]. Con este fin, es necesario establecer métodos experimentales estadísticamente robustos que aporten a optimizar el diseño de la tinta, pero considerando la complejidad de definir ensayos adecuados para evaluar las propiedades de interés y relacionar las propiedades en estado fresco y endurecido para establecer la viabilidad técnica de las TCI3D y los elementos impresos.

Por lo tanto, se requiere desarrollar y validar el uso de TCI3D a partir de TPE y CP para imprimir elementos tipo tabicón, brindando las bases para escalar

a muretes o muros de vivienda en posteriores investigaciones. Asimismo, es necesario establecer los ensayos de caracterización físicas y químicas de la TPE, así como para evaluar las propiedades reológicas, de printabilidad, la estabilidad dimensional y la resistencia estructural de las mezclas además de validar la aplicación de herramientas como el MSR para modelar y optimizar las propiedades de las tintas y los elementos impresos con base en criterios estadísticos [145,146,160]. Así, esta investigación sienta las bases para integrar el uso de TPE locales en I3D, proponiendo una alternativa metodológica que pueda servir en otras regiones con un enfoque sostenible y técnicamente fundamentado.

2.7. Justificación.

Las carencias habitacionales en México se manifestaron tanto en la disponibilidad de vivienda como en la calidad de los espacios, el acceso a servicios básicos y la seguridad estructural en la población vulnerable. Este escenario demandó soluciones constructivas capaces de mejorar tiempos de ejecución, control geométrico y repetibilidad, sin incrementar el impacto ambiental ni depender de procesos intensivos en mano de obra. En ese sentido, la I3D ofreció una ruta tecnológica para producir elementos constructivos con mayor trazabilidad y menor desperdicio; sin embargo, su adopción local se vio limitada por la disponibilidad de equipos y por la falta de materiales alternativos que permitan diseñar las TCI3D con insumos regionales y criterios técnicos verificables.

En paralelo, el TPE constituyó uno de los posibles insumos más abundantes de RCD y se dispuso frecuentemente sin control técnico ni valorización. Su incorporación como insumo TCI3D planteó un doble propósito: reducir el uso de materiales vírgenes y el consumo de CP, y habilitar una estrategia de economía circular alineada con el marco institucional de Nuevo León para el manejo integral de RCD. No obstante, la variabilidad física y química inherente del TPE y la ausencia de protocolos estandarizados de aceptación y control de calidad han restringido su uso directo, especialmente cuando se requirió garantizar su desempeño del material fresco y del elemento endurecido de forma reproducible.

Bajo este contexto, el estudio se enfocó en desarrollar una base técnico-experimental para transformar un residuo heterogéneo en una materia prima utilizable, mediante un esquema verificable de: (i) caracterización física y química del TPE orientada a control de calidad; (ii) evaluación sistemática del comportamiento del material en estado fresco mediante fluidez, tiempo abierto, reología y criterios de printabilidad (extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad); y (iii) verificación del desempeño en estado endurecido a través de la RC en especímenes moldeados y elementos impresos tipo tabicón, como unidad modular escalable hacia muretes y muros en trabajos posteriores. Con ello, la investigación respondió al vacío técnico asociado a la falta de metodologías que conecten la variabilidad del TPE con parámetros medibles de desempeño y con criterios de aceptación aplicables a procesos de I3D.

Adicionalmente, la incorporación del MSR permitió abordar la optimización del diseño de mezcla con un enfoque multivariable, reduciendo ensayos redundantes, identificando efectos e interacciones, y generando modelos predictivos validados estadísticamente. Esta estrategia proporcionó trazabilidad

al proceso de formulación y facilitó delimitar regiones operables de desempeño para materiales con alta variabilidad, condición indispensable para plantear escalamiento desde laboratorio hacia aplicaciones de mayor escala.

Por lo tanto, el estudio permitió alcanzar: (a) un esquema reproducible de selección y control de calidad del TPE como materia prima; (b) criterios y métricas cuantificables para comparar desempeño en estado fresco y endurecido de tintas con TPE; (c) evidencia experimental sobre el comportamiento mecánico de elementos impresos tipo tabicón frente a especímenes moldeados y (d) una ruta de optimización estadística transferible a otros depósitos de TPE y a otras regiones. Su alcance inmediato se centró en validar el uso de TPE local para producir elementos modulares printables con desempeño verificable mientras que su alcance aplicado residió en aportar bases técnicas para programas de valorización de RCD y para el desarrollo de soluciones constructivas de menor impacto ambiental orientadas a la ViDAS.

2.8. Hipótesis y objetivos.

2.8.1. Hipótesis.

Será posible optimizar simultáneamente las propiedades reológicas (esfuerzo de cedencia estático y dinámico), de printabilidad (extrudabilidad, edificabilidad, calidad de extrusión y tiempo abierto) y la resistencia de

compresión de una tinta cementante elaborada con tierra producto de excavación (TPE) y cemento Portland Compuesto (CPC), variando el contenido del primero entre 60-90% y de la relación agua/aglutinante (a/cm) entre 0.30-0.35, con el fin de imprimir tabicones con resistencia de compresión mínima de 7 MPa, conforme a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

2.8.2. Objetivo general.

Optimizar las propiedades mecánicas, reológicas y de printabilidad de una tinta cementante para impresión 3D elaborada con cemento Portland compuesto y tierra producto de excavación, variando el contenido del último entre 60% y 90%, así como la relación agua/aglutinante (a/cm) entre 0.30 y 0.35, con el fin de cumplir los criterios mínimos de extrudabilidad, edificabilidad, calidad de extrusión y un tiempo abierto mayor que 90 minutos, alcanzando un esfuerzo de cedencia estático y dinámico adecuados para la impresión 3D para imprimir tabicones con resistencia de compresión mínima de 7 MPa, conforme a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012.

2.8.2.1. Objetivos específicos

- a) Caracterizar el TPE mediante sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, determinando su idoneidad como materia prima circular e identificar los rangos de composición en el diseño de TCI3D.
- b) Diseñar las pastas variando los porcentajes de TPE y CP, así como la relación agua/aglutinante (a/cm), desarrollando las formulaciones con potencial de printabilidad con duya y resistencia mecánica en cubos.

- c) Evaluar el comportamiento reológico de las mezclas mediante ensayos de fluidez, viscosidad, y esfuerzos de cedencia estático y dinámico, correlacionándolas con las propiedades de printabilidad para identificar los parámetros de operatividad en la impresora 3D.
- d) Evaluar la printabilidad de las pastas con potencial de ser TCI3D, mediante ensayos de extrudabilidad, edificabilidad, calidad de extrusión y tiempo abierto utilizando la impresora 3D.
- e) Evaluar la resistencia de compresión de los tabicones impresos utilizando las TCI3D.
- f) Optimizar las propiedades reológicas, de printabilidad y la resistencia de compresión mediante el modelamiento por MSR, analizando la influencia del contenido de TPE y la relación a/cm en las TCI3D para identificar el punto óptimo para poder imprimir tabicones con una resistencia de compresión mínima de 7 MPa conforme la NMX-C-404-ONNCCE-2012.

CAPITULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL.

Con el objetivo de estudiar las TCI3D optimizadas con 60%, 70%, 80% y 90% de TPE y estabilizadas con CP, preliminarmente se determinó el efecto de la relación a/cm sobre la RC en cubos y la printabilidad utilizando una duya (manga pastelera), posteriormente a estas pastas se les evaluó el comportamiento reológico para identificar las RPM utilizadas en el reómetro y compararlas con las velocidades del motor de la impresora 3D, esto con el propósito de identificar los parámetros de operatividad (velocidad de extrusión y de impresión) considerando una altura de capa fija de 10 mm y ancho de capa de 25 mm. El mejor comportamiento de RC y printabilidad fue el criterio para seleccionar las TCI3D a optimizar con el fin de evaluar el desempeño de RC en elemento impreso tipo tabicón, todo lo anterior se determinó con respecto de una matriz experimental considerando una relación de $a/cm = 0.30$ y 0.35 .

Por lo tanto, el método experimental se acotó en 6 etapas considerando:

- i) Caracterización física y química de las materias primas, ii) Diseño de experimentos (DOE), iii) Ensayos de resistencia de compresión, iv) Caracterización de las propiedades de printabilidad, v) Caracterización de las propiedades reológicas y vi) Análisis estadístico y optimización multivariable.

En la Figura 21 se resume el método experimental utilizado en esta investigación, el cual fue dividido en tres fases: Primera fase) acondicionamiento y caracterización de las materias primas; Segunda fase) diseño de mezclas y caracterización de las propiedades en estado fresco y endurecido de las pastas; tercera etapa) optimización y modelamiento estadístico de las TCI3D.

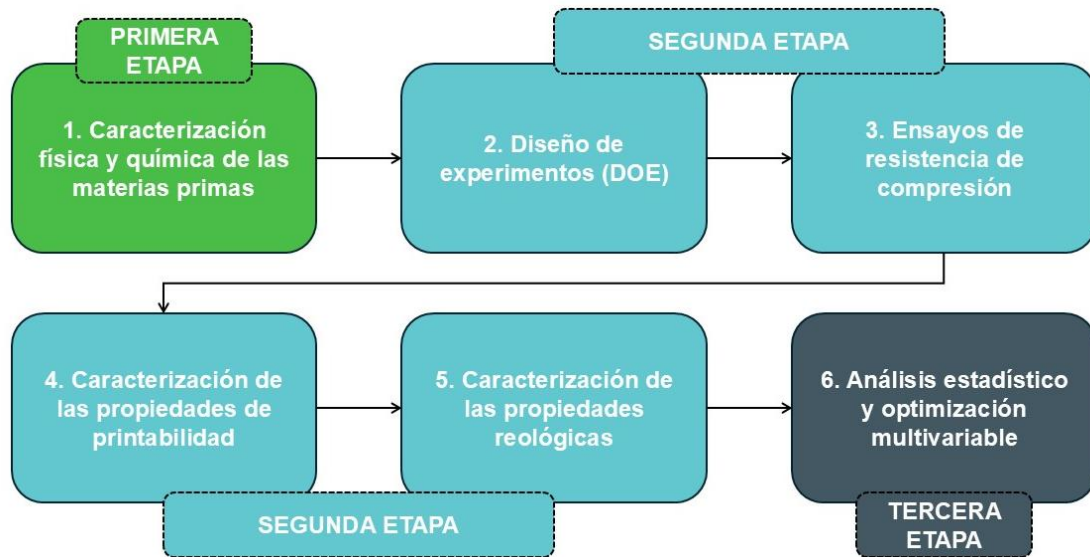


Figura 21. Flujograma de actividades del método experimental.

3.1. Caracterización física y química de las materias primas.

3.1.1. Materias primas.

El TPE se obtuvo de la escombrera metropolitana (EM) de SIMEPRODE, ubicada en Salinas Victoria, Nuevo León, México (Figura 1).

El muestreo del montículo de TPE se realizó conforme a la norma NMX-AA-132-SCFI-2016, obteniendo muestras representativas en lotes (Figura 23). De acuerdo con la información proporcionada por el personal técnico de la EM, el montículo de TPE está compuesto por una mezcla de tierras de obras de construcción provenientes de la zona metropolitana de Monterrey, Santa Catarina, Escobedo y Salinas Victoria. Debido a problemas de logística e infraestructura en la EM, no se tiene recopilado la ubicación exacta de la extracción del TPE y de las cantidades, ya que se sigue recibiendo este residuo diariamente hasta la fecha.



(a)



(b)

Figura 22. Escombrera Metropolitana de SIMEPRODE: a) acceso principal y b) zona de estudio dentro de la escombrera.

La cantidad de lotes muestreados en esta investigación fueron mínimo de 12 (L1-L12), considerando esta cantidad para zonas con áreas menores que 1 ha. Posteriormente, fueron disgregados, secados al aire libre por 24 h a temperatura ambiente (23 ± 2 °C) y cribados mediante la malla No. 100 (149 μm) para obtener la fracción fina del TPE.



Figura 23. Área de acopio y obtención de los lotes de TPE en la escombrera de SIMEPRODE.

Después, a las muestras de TPE de cada lote se les determinaron sus contenidos de MO conforme a la norma ASTM-D2974-14, estableciendo un control de calidad considerando que los lotes no pasen de un porcentaje mayor que el 2% de MO para su potencial uso en TCI3D. Para estabilizar las pastas con TPE se utilizó un cemento Portland compuesto (CPC) de la clase 30R de CEMEX®. En la tabla 2 se muestra información técnica del CPC proporcionadas por el fabricante.

Tabla 2. Información técnica del CPC 30R CEMEX®.

Propiedad	Valor (unidades)
Resistencia a compresión a 3 días	20 N/mm ²
Resistencia a compresión a 28 días	30 N/mm ²
Tiempo de fraguado inicial	45 minutos
Tiempo de fraguado final	600 minutos
Expansión en autoclave	0.80%
Contracción en autoclave	0.20%
Densidad	2989.90 kg/cm ²
Tamaño de partícula (d ₅₀)	15.98 µm

3.1.2. Caracterización química de las materias primas.

La identificación de fases cristalinas del TPE y del CPC se realizó mediante DRX en un difractómetro Malvern Panalytical Empyrean utilizando una geometría de Bragg-Brentano, empleando radiación de Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), con condiciones de operación de 45 kV. Los patrones de difracción se adquirieron en el intervalo de $2\theta = 5-80^\circ$, con un tamaño de paso de 0.013° (2θ) y un tiempo de conteo de 97.92 s/paso, con el objetivo de identificar el patrón mineralógico asociado a las arcillas del TPE. Previo al análisis, las muestras se secaron a $105 \pm 5^\circ \text{C}$ durante 16 h, se disgregaron y se molieron utilizando un mortero de porcelana hasta obtener un polvo homogéneo pasante por la malla No. 200 ($\leq 75 \text{ }\mu\text{m}$); posteriormente se colocaron en un porta muestras (empaquetamiento superficial para reducir la orientación preferencial). La indexación de fases se llevó a cabo mediante el software X'Pert HighScore Plus, utilizando la base de datos de Crystallography Open Database (COD) versión COD24_HS4x; La selección final de fases se apoyó en el indicador de calidad de coincidencia reportado por el software (similitud y puntaje), además de la verificación visual de picos.

La composición química se determinó mediante FRX en un equipo Malvern Panalytical Epsilon3-XL (EDXRF). Las muestras se prepararon por secado, molienda y homogeneización hasta $\leq 75 \mu\text{m}$; posteriormente se analizaron como pellets prensados con una masa de 10 g y utilizando una presión de 10 ton durante 60 s. La medición y cuantificación se ejecutó con el software Omnian, aplicando un factor de normalización de 1.420 y un flujo de Helio mínimo de 0.63 lts/min. Los resultados se reportaron como óxidos mayoritarios (% en peso) y, cuando aplicó, elementos traza (ppm), con normalización a 100%.

La identificación de grupos funcionales y bandas asociadas a enlaces característicos en el TPE y el CPC se realizó mediante FTIR utilizando un espectrómetro Shimadzu IRTracer-100. Los espectros se adquirieron en el rango de $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$, con resolución de 4 cm^{-1} y 32 escaneos por muestra, empleando un accesorio de ATR. El procesamiento incluyó corrección de línea base, sustracción de fondo y normalización en el software OriginLab v2025, y la interpretación de bandas se realizó con apoyo de bibliografía especializada para compuestos de aluminosilicatos, carbonatos y silicatos.

3.1.3. Caracterización física de las materias primas

La Distribución de Tamaño de Partículas (DTP) del TPE $\leq 149 \mu\text{m}$ se realizó en un rango de medición de $0.028\text{-}1408 \mu\text{m}$ utilizando un equipo de difracción láser MICROTRAC S3500 integrado con un módulo de dispersión en húmedo (MDH). Previo al análisis, la muestra se secó, se disgregó y se homogeneizó; posteriormente la muestra se dispersó en alcohol isopropílico (IPA) como medio de suspensión y se mantuvo bajo agitación y recirculación dentro del MDH. Adicionalmente, se aplicaron pulsos de ultrasonido integrados en el módulo para desaglomerar las partículas previo a la adquisición de los datos, reportándose el parámetro estadístico d_{50} . Por otro lado, las arenas y gravas del

TPE se caracterizaron mediante el análisis granulométrico por tamizado con base en la ASTM C136, en donde una muestra seca de masa conocida se separó a través de un conjunto de tamices de aberturas decrecientes mediante agitación manual. Con los resultados se calcularon los porcentajes retenidos y pasantes, y se construyeron las curvas granulométricas correspondientes de cada lote.

Los límites de consistencia se determinaron con base en ASTM D4318, empleando la fracción de suelo pasante el tamiz No. 40 (0.425 mm). Se obtuvo el límite líquido (LL) a partir de la relación contenido de agua-número de golpes utilizando la copa de Casagrande, y el límite plástico (LP) mediante el rolado de hilos hasta la condición de desintegración (diámetro < 3 mm); con ello se calculó en porcentaje el Índice de Plasticidad (IP) mostrado en la ecuación 2. La gravedad específica de los sólidos (G_s) del TPE se determinó conforme a la ASTM D854, mediante el método del picnómetro. Previo al ensayo, el material se secó y se desairó para minimizar la presencia de burbujas; posteriormente se midieron las masas del picnómetro vacío, con muestra, y con muestra + agua a una temperatura de 21 ± 2 °C. Con estas mediciones se calculó la G_s y la densidad considerando las correcciones asociadas a la temperatura y la densidad del agua establecidas en el método. La clasificación del suelo se estableció mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) conforme a ASTM D2487, integrando los resultados de granulometría y de límites de consistencia (LL e IP) para asignar el grupo y símbolo SUCS correspondiente a cada lote.

La morfología de las partículas de la TPE se analizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) utilizando un equipo JEOL JSM-6510LV, empleando magnificaciones de x300, x500, x1,000 y x2,000. Las muestras se prepararon como polvo seco, montado sobre porta muestras con cinta de carbono, y se aplicó un recubrimiento conductor de oro/paladio (Au/Pd) para minimizar efectos de carga y mejorar la calidad de imagen. Las observaciones se realizaron con un voltaje de aceleración de 20 kV. Adicionalmente, se efectuó microanálisis por

espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDS), mediante un análisis tipo barrido por área, con el fin de obtener la distribución cualitativa/semi-cuantitativa de elementos presentes en las partículas y correlacionarla con las características morfológicas observadas. La selección de los lotes para discutir ambas técnicas en los resultados se hizo al azar considerando una tercera parte de las muestras (4 lotes) de las micrografías obtenidas.

Estas pruebas se realizaron para comparar las propiedades de tamaño de partícula (d_{50}), IP (%), tipo de suelo, densidad y morfología con la bibliografía, y proponer los rangos de diseño para las TCI3D con base en los lotes muestreados. El proceso de extracción, pretratamiento y caracterización de propiedades químicas y físicas se resume en la Figura 24.

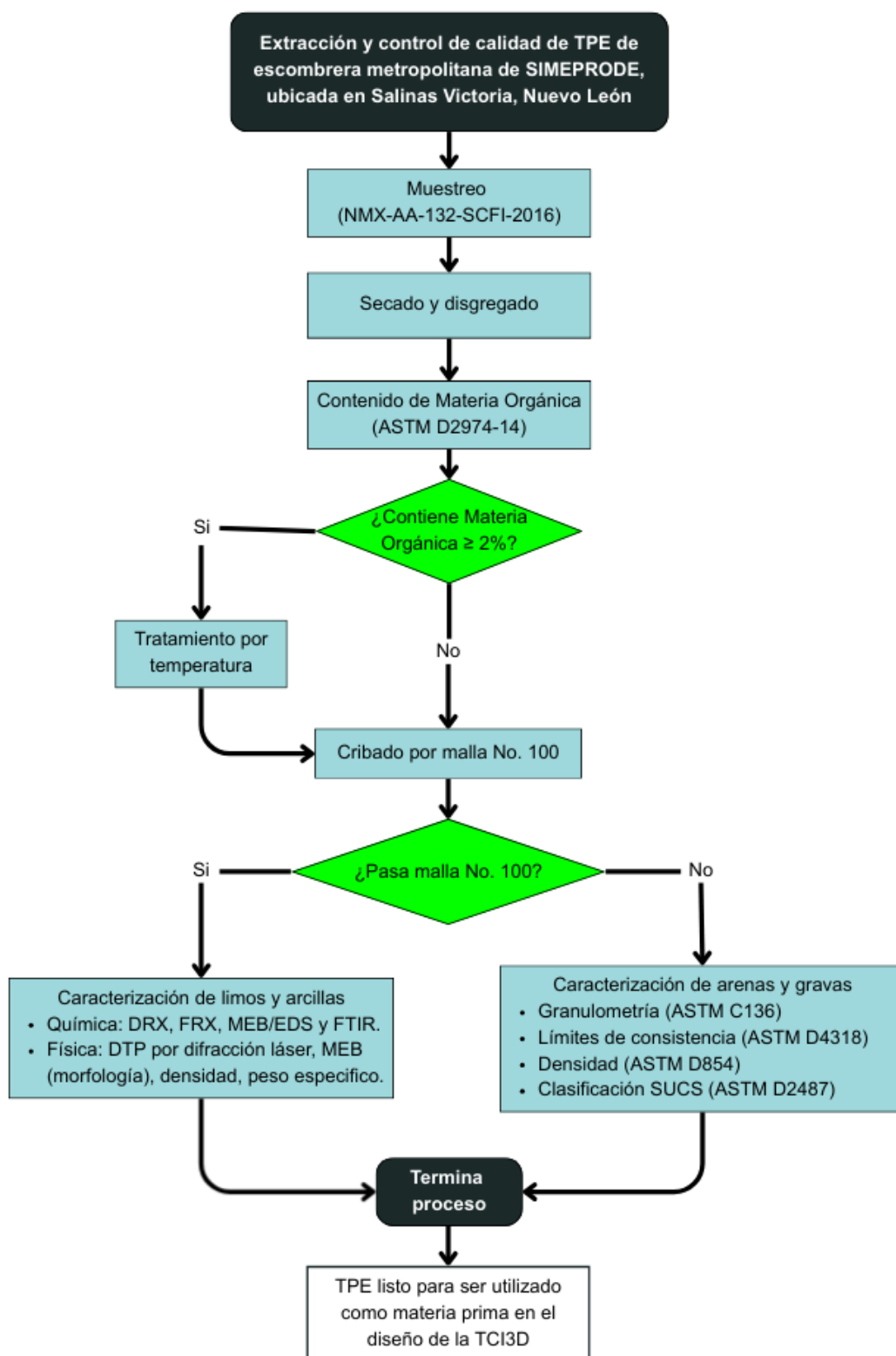


Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de extracción, pretratamiento y caracterización del TPE proveniente de la escombrera metropolitana de SIMEPRODE en Salinas Victoria, Nuevo León.

3.2. Diseño de experimentos

En esta etapa se realizó un diseño experimental para evaluar el efecto de la cantidad de TPE y CPC sobre la relación a/cm. Por lo tanto, se definieron ocho combinaciones de pastas de TPE/CPC mostrados en la tabla 3, el protocolo de mezclado se hizo conforme a la norma ASTM C305, primero se pesaron los materiales conforme a la dosificación establecida, luego se premezclaron en seco hasta homogeneizarse. Posteriormente, se colocó el agua de mezclado en el recipiente y se añadió gradualmente la mezcla en seco, permitiendo un tiempo de absorción de 30 s sin agitación. En seguida, se mezcló por 30 s a velocidad baja; se detuvo el equipo durante 15 s para raspar las paredes y el aditamento de mezclado para reincorporar el material adherido; finalmente, se continuó el mezclado por 60 s a velocidad media, obteniendo una pasta uniforme y libre de grumos visibles en un tiempo total de 2:15 min.

Tabla 3. *Diseño experimental de pastas.*

Variables independientes	Pastas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
TPE (%)	60	70	80	90	60	70	80	90
CPC (%)	40	30	20	10	40	30	20	10
a/cm	0.30				0.35			

Se varió el contenido de TPE en cuatro niveles (60%, 70%, 80% y 90%) con respecto del CPC, y la a/cm en dos niveles (0.30 y 0.35). El objetivo de este diseño fue identificar las combinaciones que permitieran maximizar la printabilidad sin comprometer la RC mínima de 7 MPa, conforme a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012. Para llevar a cabo este objetivo se consideraron los siguientes criterios:

- i) Preliminarmente, se realizó una evaluación de potencial de printabilidad para las ocho pastas, utilizando una duya con geometría troncocónica de 1 cm de diámetro de abertura y una manga pastelera para llevar a cabo las pruebas de extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad. Posteriormente, aquellas pastas que cumplieran con los criterios de printabilidad >60%, fueron las seleccionadas para evaluar su tiempo abierto con el objetivo de confirmar su tiempo operativo y demostrar su escalamiento a la impresora 3D.
- ii) Asimismo, se hizo una evaluación de potencial de RC en cubos de 5×5×5 cm considerando un desempeño mecánico ≥ 7 MPa. Esto sirvió más adelante para seleccionar las pastas que cumplieron ambas propiedades de manera simultánea (printabilidad y mecánicas).
- iii) Las pastas que cumplieron ambas propiedades se escalaron a la impresora 3D y se imprimieron especímenes tipo tabicón hueco de dimensiones de 21×10×14 cm, después se les realizó las pruebas de RC y se obtuvieron los resultados correspondientes previo al modelamiento estadístico.

Cabe destacar que las pruebas de fluidez (ASTM C1437 y con minicono) no fueron considerados como criterios de selección dentro del diseño, sino más bien, como parámetros de correlación entre la printabilidad y como medio de

comparación entre ambas pruebas. Esto con el propósito de definir los rangos de fluidez que más se ajustaron a la printabilidad de las pastas. Por otro lado, las propiedades reológicas, fueron consideradas como parámetros de medición en el tiempo en términos de crecimientos de esfuerzos y viscosidad para compararlas con las propiedades de printabilidad y operatividad de la impresora 3D.

Toda la información generada se utilizó para procesarla en un modelo estadístico de segundo orden mediante el Método de Superficie de Respuesta (MSR), con el propósito de optimizar simultáneamente la printabilidad, RC y reología (ECE y ECD), maximizando las condiciones óptimas de estas propiedades para generar la TCI3D.

3.3. Ensayos de resistencia de compresión

Se elaboraron especímenes cúbicos de 5×5×5 cm conforme a las normas ASTM C305 y ASTM C109 (Figura 25a). Estos especímenes fueron curados durante 24 horas a temperatura ambiente (23 ± 2 °C) y protegidos con una película plástica para evitar la pérdida de humedad. Posteriormente, fueron curados por inmersión a 7 y 28 días. Las pruebas de RC se realizaron en un sistema para ensayos universales modelo INSTRON 600DX-SATEC (Figura 25b).



(a)



(b)

Figura 25. a) Especímenes cúbicos para ensayos de resistencia de compresión; b) ensayo de carga axial en sistema INSTRON 600DX-SATEC.

Por otro lado, los tabicones de 21×10×14 cm fueron impresos en 3D considerando el patrón de impresión tipo zig-zag hueco de Cuevas y col. (2023) con un ancho y altura de capa de 25 mm y 10 mm, respectivamente (Figura 26a). Estos especímenes fueron curados en sistema por aspersión y a la misma temperatura y edad que los cubos. Sin embargo, las condiciones de ensayo se realizaron conforme a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013, considerando: i) una RC objetivo mínima de 7 MPa; ii) que ambas caras de los especímenes estén cabeceadas con azufre; iii) una velocidad de carga de 0.24 MPa/s y iv) que las desviaciones de las aristas de los ejes X/Y/Z no excedan el 3% de las dimensiones nominales del tabicón (Figura 26b).

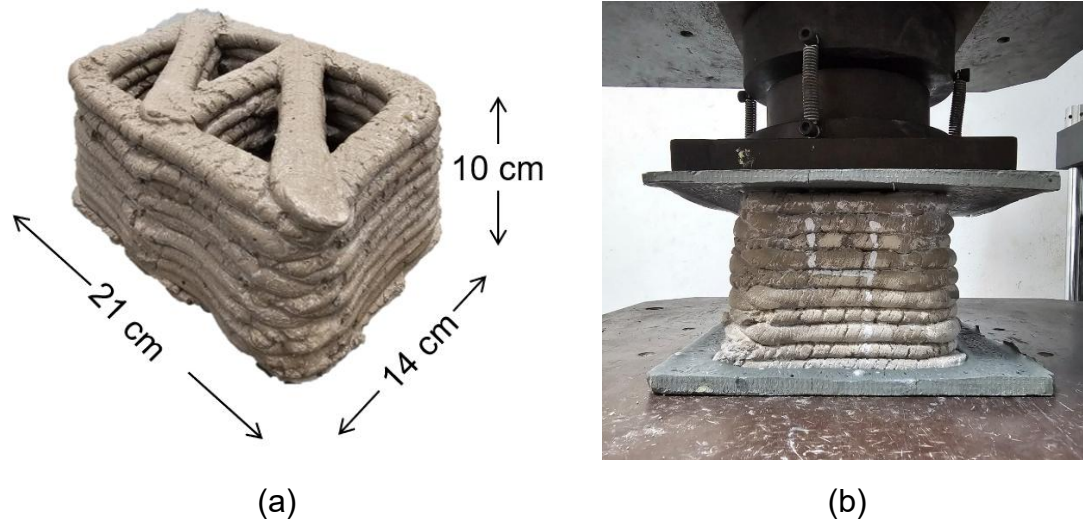


Figura 26. a) Dimensiones de tabicón impreso en 3D para ensayos de resistencia de compresión; b) aplicación de carga axial en la prensa INSTRON 600DX-SATEC.

Se comparó la RC de un elemento moldeado con uno impreso en 3D y se obtuvo el porcentaje de disminución de RC. De esta manera se identificaron las TCI3D que tuvieron potencial para ser impresas considerando criterios de printabilidad y RC simultáneamente.

3.4. Caracterización de las propiedades de printabilidad

Esta caracterización se realizó mediante dos métodos:

1. Utilizando una duya con manga pastelera (Figura 27a): se utilizó una boquilla de 1 cm de diámetro y se realizaron preliminarmente las pruebas de extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad considerando los criterios previamente establecidos en el marco teórico pero adaptados a una escala reducida utilizando una alfombrilla de corte de 450×300 mm (Figura 27b). El procedimiento y criterios de ensayo de las propiedades de printabilidad se discutieron más adelante en esta misma sección.



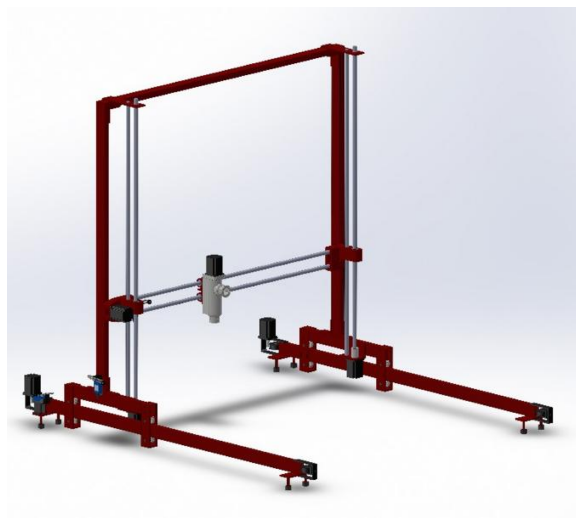
(a)



(b)

Figura 27. Impresión 3D de pastas con duya y manga pastelera: a) fotografía realizando las pruebas en el laboratorio y b) ensayos de printabilidad (izquierda a derecha): extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad.

2. Utilizando una impresora 3D: de dimensiones de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$, fabricada y diseñada por el Grupo de Investigación y Desarrollo de Economía Circular para la Construcción Sustentable (GIDECON) de la UANL-FIC (Figura 28).



(a)



(b)

Figura 28. a) Diseño de impresora 3D del GIDECON de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ de capacidad; b) Impresora 3D de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$.

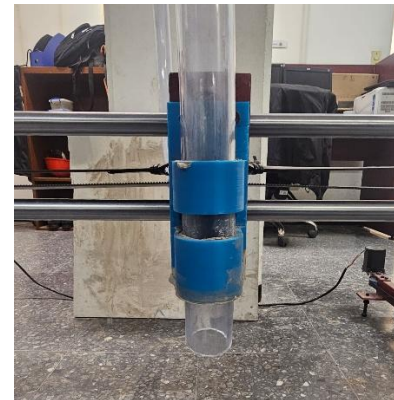
La impresora cuenta con (Figura 29): (a) un sistema de alimentación por tolva y tornillo sinfín integrado con un motor NEMA23, en el cual la TCI3D es depositada y posteriormente transportada a través de (b) una manguera de 25 mm de diámetro y 1 m de largo; c) finalmente la TCI3D es extruida a por la salida de la manguera que está sujeta por una adaptación de plástico impresa en 3D con PLA. Los parámetros de impresión considerados para realizar los ensayos de propiedades de printabilidad fueron: i) una velocidad de impresión de 18 mm/s; ii) una velocidad de tornillo sinfín de 60 RPM; iii) una altura de capa de 10 mm y iv) un ancho de capa de 25 mm.



(a)



(b)



(c)

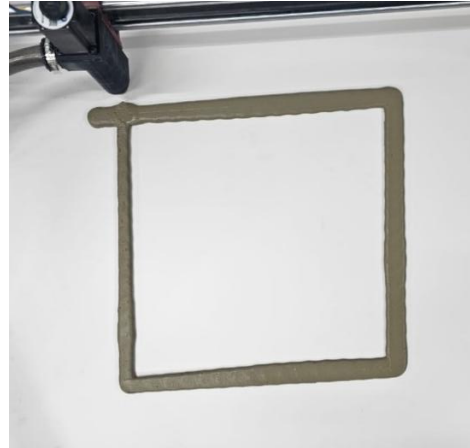
Figura 29. Componentes principales de la impresora GIDECON de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$:
a) tolva con tornillo sinfín; b) manguera de 25 mm de diámetro y c) salida de manguera con adaptación impresa en 3D con plástico PLA.

Para obtener la extrudabilidad, la calidad de extrusión, la edificabilidad y el tiempo de abierto se adaptaron métodos reportados en la bibliografía científica para determinar cuantitativamente cada una de estas propiedades:

i) La extrudabilidad se determinó imprimiendo un filamento de una sola capa en una trayectoria cuadrada de 10×10 cm con duya (de 50×50 cm en impresora 3D) adaptado de Bhusal y col. (2023) (Figura 30). Se midieron los anchos impresos (n) en 20 ubicaciones (5 de cada lado), y se calculó el índice de extrudabilidad (I_E) utilizando la ecuación 8 propuesta en el marco teórico [87].



(a)



(b)

Figura 30. Pruebas de extrudabilidad: a) utilizando duya adaptado de Bhusal y col. (2023) [88] y b) utilizando impresora 3D del GIDECON.

ii) La calidad de extrusión se evaluó imprimiendo cuatro filamentos rectos de 10 cm de largo, en cada filamento se midieron el ancho w y la altura h en posiciones equidistantes y se calcularon los promedios globales $\bar{w}$ y $\bar{h}$. Estos valores se compararon con los valores objetivos de diseño, considerando el ancho objetivo (w_{obj}) de 25 mm y la altura objetivo (h_{obj}) de 10 mm (Figura 31). De esta manera se propuso un índice de calidad de extrusión I_{CE} en escala 0-100% tal como se mostró en la ecuación 10, basado en las desviaciones relativas del ancho y la altura.



(a)



(b)

Figura 31. Prueba de calidad de extrusión: a) filamentos impresos con duya y b) medición de altura objetivo.

iii) La edificabilidad se evaluó como un método de conteo de capas apilables inspirado en los ensayos de Kazemian y col. (2017), definiendo un índice de edificabilidad basado en el número máximo de capas estables (Figura 32) ^[10,87]. Se plantea un máximo de referencia de 10 capas mostrado en la ecuación 13; cada capa aportó un 10% al índice de edificabilidad (I_{ED}), de modo que una mezcla que logró apilar 10 capas sin colapso obtiene un 100%.

iv) La printabilidad se calculó con base en la ecuación 5, planteada en el marco teórico. Considerando los tres intervalos de clasificación para la TCI3D en función de la printabilidad obtenida, siendo no printable cuando $P < 60\%$, aceptable cuando $60\% < P < 80\%$ y printable cuando $P > 80\%$.



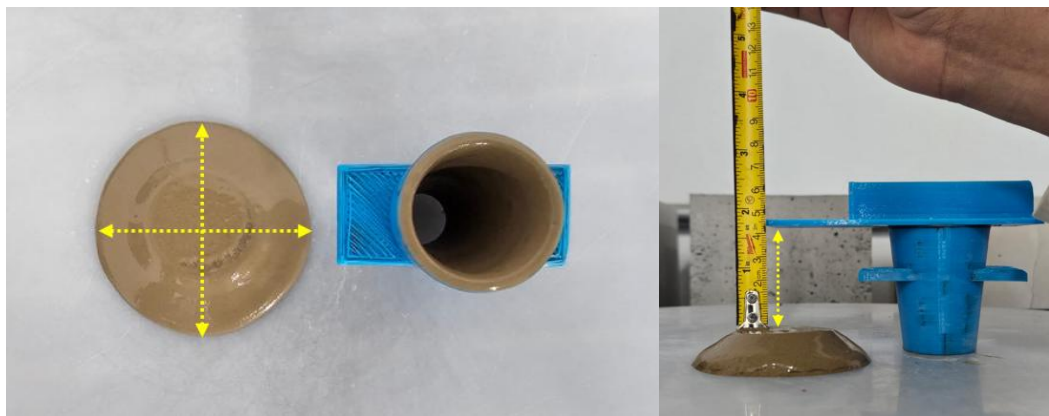
Figura 32. Prueba de edificabilidad: a) esquema de la prueba adaptado de Bhusal y col. (2023) ^[87]; b) prueba de edificabilidad en impresora del GIDECON.

v) El tiempo abierto se determinó imprimiendo filamentos de 25 cm de largo a diferentes intervalos de tiempo, la primera media hora se midieron a cada 5 min, y luego a cada 15 min, hasta que la mezcla deja de ser printable, después se midieron los anchos de los filamentos impresos (4 mediciones) y se obtuvo su valor promedio, el tiempo abierto se determinó cuando los filamentos tuvieron un ancho similar al de la salida de la manguera (25 mm) siendo un procedimiento adaptado de Ma y col. (2018) ^[121].

vi) La fluidez de las pastas se obtuvo considerando los métodos de la mesa de fluidez (ASTM C1437) y del minicono para pastas propuesto por Okamura y col. (1993) ^[131]. El primero se reportó en porcentaje y diámetro de extensión de la mesa de flujo en milímetros (Figura 33a), mientras que el segundo se midió el diámetro de extensión y el asentamiento diferencial desde el punto alto máximo del molde hasta la altura del material asentado (Figura 33b). Esto se realizó para identificar el área óptima de impresión asociando los valores de fluidez de las mezclas con los de printabilidad tal como lo reportaron Tay y col. (2019) ^[9]. Adicionalmente, se obtuvieron intervalos de fluidez asociados con una buena printabilidad (>60%) obtenidos mediante estos dos métodos.



(a)



(b)

Figura 33. Medición de fluidez: a) con mesa de fluidez (ASTM C1437) y b) minicono: medición de diámetros de flujo y asentamiento diferencial.

El procedimiento de caracterización de las propiedades de printabilidad está resumido en la figura 34.

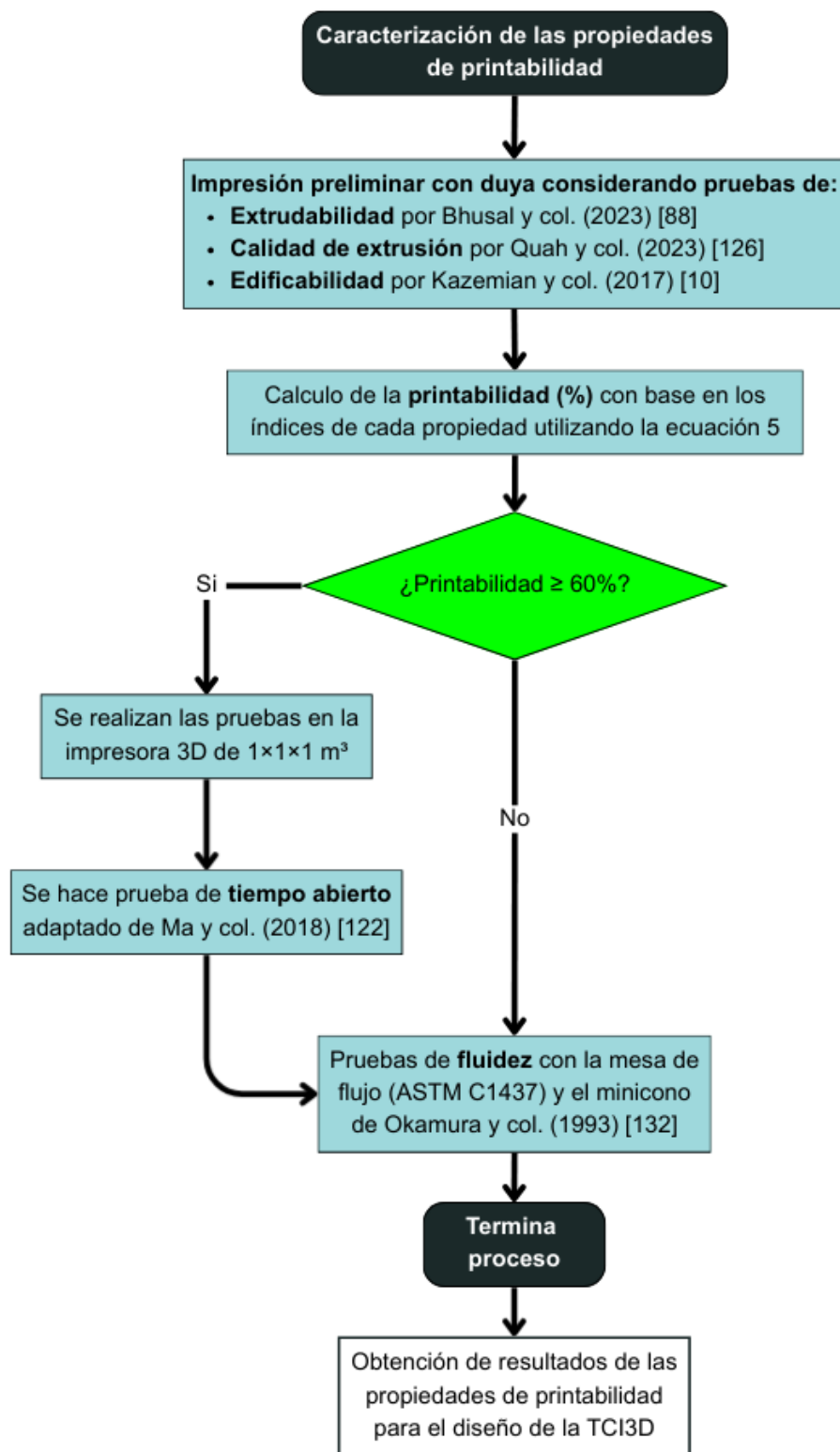


Figura 34. Diagrama de flujo mostrando el proceso de la caracterización de las propiedades de printabilidad.

3.5. Caracterización de las propiedades reológicas

Para evaluar las propiedades reológicas se utilizó un reómetro AntonPaar MCR102 con una geometría de cilindros concéntricos con una altura de 39.993 mm y un diámetro de copa de 28.92 mm (figura 35).



(a)



(b)

Figura 35. a) Reómetro AntonPaar MCR102n; b) geometría de cilindros concéntricos.

Se realizaron ensayos para obtener las curvas de flujo con base en un protocolo adaptado de Bhusal y col. (2023) para determinar el ECE y el ECD, así

como la viscosidad aparente (Figura 36) ^[87]. Cada ensayo se hizo en intervalos de tiempo de 15 min, obteniendo resultados de la viscosidad y el esfuerzo de cedencia en función del tiempo, con el objetivo de asociar estos resultados con las propiedades de printabilidad de las pastas, es decir, se identificó el tiempo abierto en el cual las pastas pudieron ser printables en términos de crecimientos de esfuerzos y deposición de las capas hasta que la tinta ya no pudiera ser extruida.

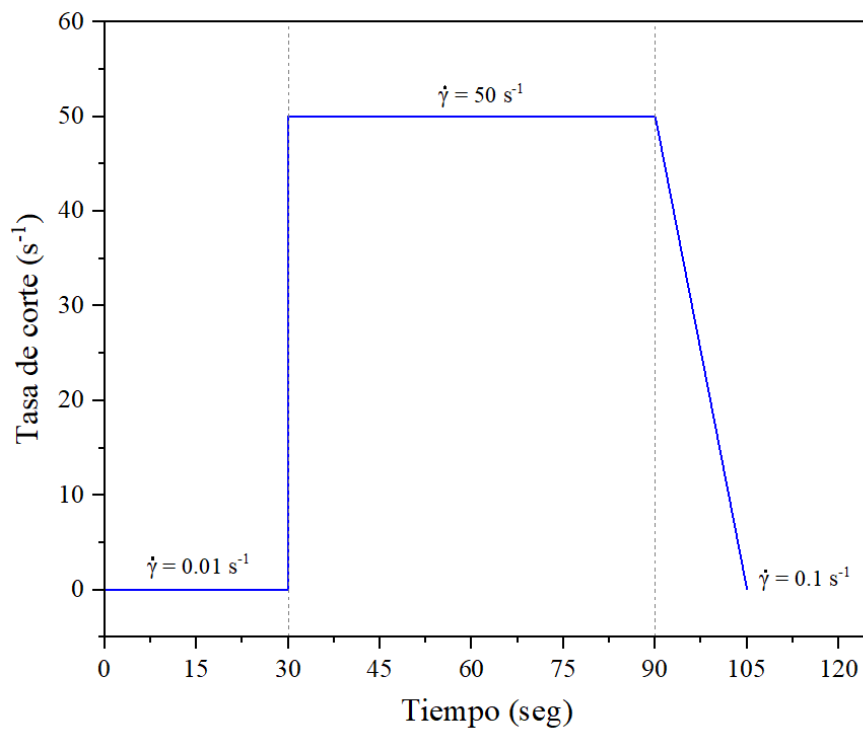


Figura 36. Protocolo del ensayo para obtener las curvas de flujo y viscosidad adaptado de Bhusal y col. (2023) ^[87].

3.6. Análisis estadístico y optimización.

El análisis estadístico se enfocó en las propiedades de printabilidad, reológicas y mecánicas evaluadas experimentalmente, con el propósito de cuantificar el efecto de los factores de diseño y obtener una formulación óptima para la TCI3D. El procesamiento de todos los datos se realizó en el software Minitab 18.

El modelamiento se realizó mediante el Método de Superficie de Respuesta (MSR), considerando como factores: (i) el contenido de TPE (%) como sustitución del CPC y (ii) la relación a/cm y como variables de respuesta: (i) la printabilidad (%), (ii) el ECE y el ECD (Pa) por separado y (iii) la RC en cubos a 7 y 28 días (MPa). Para cada variable de respuesta se ajustó un modelo polinomial y se evaluó su desempeño mediante el coeficiente de determinación (R^2). La significancia de los términos del modelo se estableció con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) mediante ANOVA.

Para identificar la magnitud e importancia del efecto de los factores sobre las variables de respuesta, se determinaron los efectos estandarizados y se representaron mediante diagramas de Pareto. Asimismo, se generaron gráficos de efectos principales e interacciones para interpretar las tendencias y las dependencias entre los factores. Adicionalmente, se elaboraron los gráficos de

contorno y de superficie para visualizar la región operable y la sensibilidad de las respuestas dentro del dominio experimental.

La optimización multivariable se ejecutó integrando como respuestas: (i) la printabilidad, estableciendo como criterio una printabilidad $\geq 80\%$; (ii) propiedades reológicas de ECE y de ECD, aplicando un criterio de maximización y verificando que los valores se mantuvieran dentro de los rangos reportados en la literatura como compatibles con la printabilidad; y (iii) la RC en cubos a 7 y 28 días, con la restricción de $f'c \geq 7$ MPa. La formulación óptima predicha por el MSR se corroboró experimentalmente mediante la preparación de la mezcla bajo el mismo protocolo y la I3D de un tabicón, verificando su estabilidad durante la deposición y el cumplimiento del desempeño mecánico establecido.

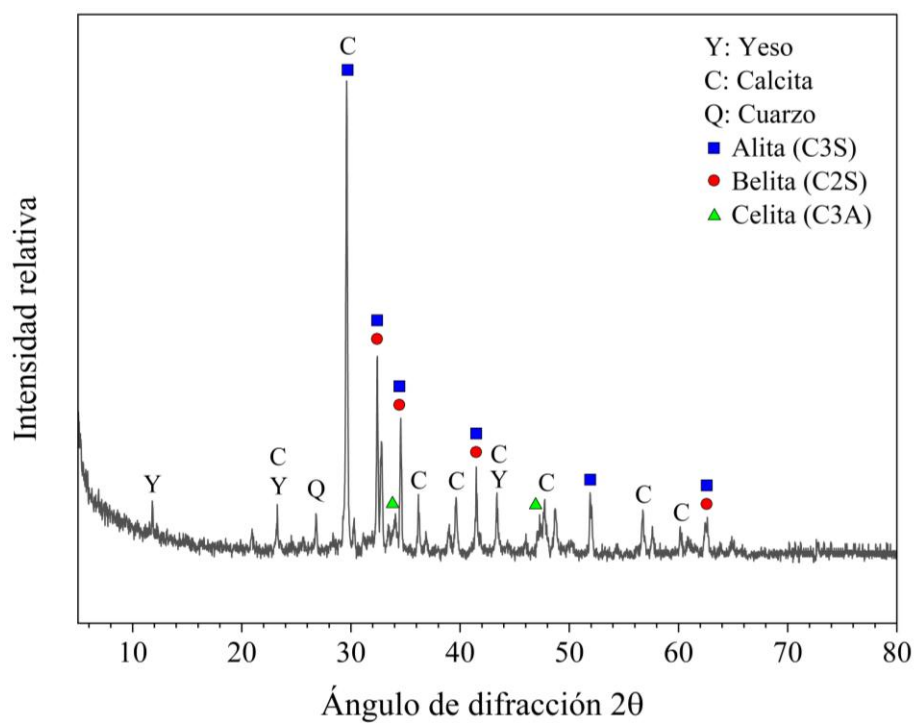
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Caracterización de las materias primas.

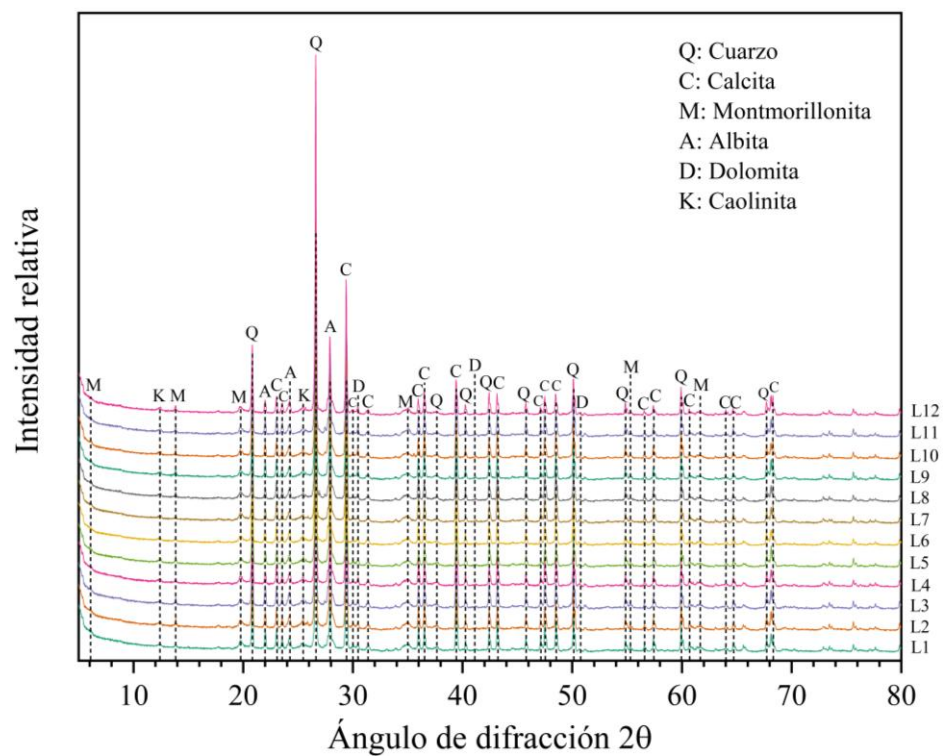
4.1.1. Caracterización química de las materias primas.

4.1.1.1. Difracción de Rayos X de las materias primas.

La Figura 37 presenta los difractogramas de DRX del CPC 30R y de los 12 lotes de TPE, empleados para identificar las fases cristalinas presentes y, en el caso del TPE, reconocer su variabilidad mineralógica como base para criterios de idoneidad y control de calidad de la materia prima.



(a)



(b)

Figura 37. Difractogramas por DRX de las materias primas: a) del CPC 30R de CEMEX® y b) de los 12 lotes de TPE.

En el CPC 30R (Figura 37a) se identificaron fases características del CP, principalmente de alita (C3S) y belita (C2S), junto con aluminato tricálcico (C3A) y la presencia de yeso; adicionalmente se observaron señales asociadas a la calcita y el cuarzo. Estas fases fueron similares con la mineralogía reportada para CP, respaldando su uso como estabilizante hidráulico del TPE al aportar las fases responsables de la hidratación y el desarrollo de la matriz cementante [37,41,106]. Por otro lado, los difractogramas del TPE (Figura 37b) mostraron patrones mineralógicos repetitivos dominados por cuarzo (Q), con presencia de calcita (C) y fases secundarias asociadas con arcillas del tipo montmorillonita (M) y caolinita (K); además de albita (A) y dolomita (D). Estas identificaciones mineralógicas coincidieron con TPE utilizados en TCI3D, donde se presentaron cuarzo como fase mayoritaria y arcillas (p. ej., caolinita e illita). Sin embargo, la identificación de Montmorillonita en los lotes sugirió la presencia de arcillas expansivas [87,100]. Además, la identificación de carbonatos como la calcita y la dolomita en los lotes sugirió un carácter más calizo del depósito o del estrato excavado, lo cual fue coherente con la variabilidad geológica esperable en materiales excavados y con diferencias reportadas entre suelos de distinta procedencia [105].

Aunque las fases principales se mantuvieron similares entre los lotes, se apreciaron pequeñas variaciones en la intensidad relativa de los picos especialmente de cuarzo y carbonatos, y en menor medida de las arcillas, lo que indicó cambios en la proporción relativa de los componentes minerales entre L1-L12. Dado que la DRX sin refinamiento no permite identificar los porcentajes en masa con precisión y las intensidades pueden sesgarse por preparación de muestra y orientación preferencial, estas diferencias se interpretaron como un indicador operativo de variabilidad por lote, útil para el control de calidad en dos niveles: (i) criterios de idoneidad mineralógica (confirmar que el TPE conservó el mismo tipo de fases principales) y (ii) seguimiento comparativo de lotes (detectar incrementos o disminuciones de carbonatos o arcillas que justificaran la homogenización o separación por lotes antes de formular las mezclas).

4.1.1.2. Fluorescencia de Rayos X de las materias primas.

La figura 38 muestra las composiciones químicas de las materias primas obtenidas mediante FRX. En ella se visualizan los rangos de composiciones químicas en óxidos en peso porcentual.

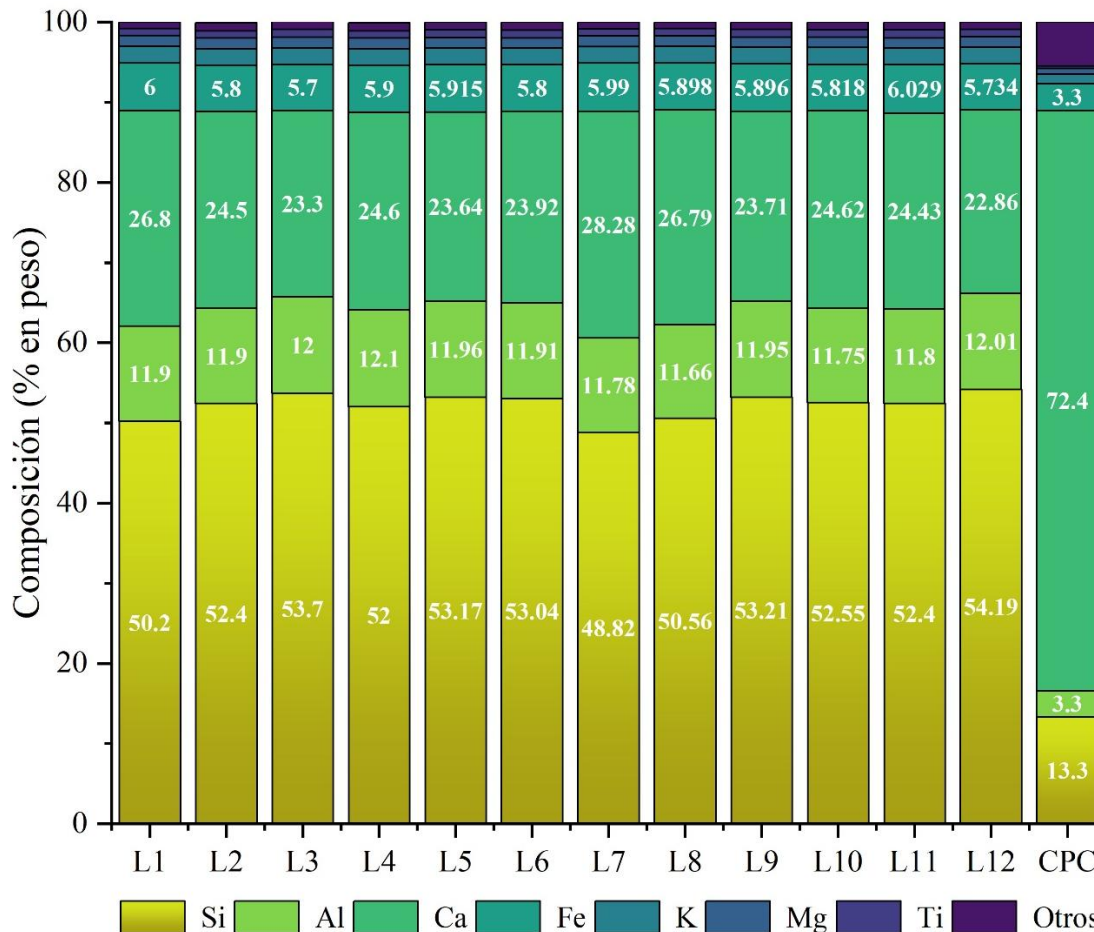


Figura 38. Composición química de los lotes del TPE y el CPC obtenido por FRX.

En el CPC, la composición química estuvo dominada por óxidos de calcio (72.4%), seguida de silicio (13.3%) y de aluminio (3.3%), mientras que el resto correspondió a porcentajes menores de hierro, magnesio, potasio, titanio, entre otros. Esta jerarquía composicional coincidió con lo identificado por DRX, donde

se identificaron fases mayoritarias del Clinker (C3S y C2S) y adiciones (yeso y calcita), todas ellas asociadas a sistemas ricos en calcio.

Por otro lado, los lotes de TPE mostraron una composición mayoritaria de Silicio, Calcio, Aluminio y Hierro, con variación limitada entre lotes. En particular, el silicio osciló entre 48.82-54.19% ($\Delta = 5.37\%$), el calcio entre 22.86-28.28% ($\Delta = 5.42\%$), el aluminio entre 11.66-12.10% ($\Delta = 0.44\%$) y el hierro entre 5.70-6.03% ($\Delta \approx 0.33\%$). Los óxidos menores (K, Mg, Ti y otros) se mantuvieron constantes y, en conjunto, representaron 5.09-5.41% ($\Delta \approx 0.32$) en los 12 lotes. Este patrón indicó que la variabilidad química del depósito se concentró principalmente en el equilibrio entre Si-Ca, mientras que la fracción aluminica y férrica permaneció estable ^[41]. Además, esta tendencia coincidió con observado en la DRX del TPE: el alto contenido de silicio resultó coherente la presencia de cuarzo como fase principal, y el contenido de calcio con la presencia de calcita y dolomita en todos los lotes. En consecuencia, el TPE se comportó como un material síliceo-calcáreo, donde los cambios de intensidad relativa de picos carbonatados en DRX fueron consistentes con el rango de calcio medido por FRX, especialmente en lotes con mayor contenido de calcio (p. ej., L7 = 28.28%) y menor contenido de silicio, lo que sugirió una mayor fracción carbonatada respecto a los lotes con mayor silicio (p. ej., L12 = 22.86%) ^[23,162,163].

Los contenidos de SiO₂ reportados en la literatura han sido en rangos entre ~53-63%, mientras que Al₂O₃ y Fe₂O₃ mostraron variaciones amplias dependientes del origen y la tipología del TPE ^[37,86,87]. Interesantemente, el rango de contenido de silicio obtenido (48.82-54.19%) se ubicó en el límite inferior-medio con respecto a otras investigaciones y mientras que el contenido de aluminio (11.66-12.10%) fue similar para TPE con contenidos de arcillas moderadamente bajos. Sin embargo, el rasgo distintivo fue el contenido de calcio (22.86-28.28%) superior a lo reportado en algunos TPE usados en TCI3D con CaO en el rango de ~8-13%, ^[86,87].

4.1.1.3. Espectroscopía Infrarroja del residuo de tierra producto de excavación.

La figura 39 muestra los espectros de FTIR de los lotes de TPE, mostrando las bandas características de los grupos funcionales a los que corresponden cada uno de estos lotes.

Generalmente, los espectros presentaron un patrón similar en todos los casos, dominado por bandas asociadas a silicatos y arcillas y por señales atribuibles a carbonatos, lo que corroboró la mineralogía observada por DRX. En la región de altas frecuencias se observó una banda ancha de estiramiento O-H cercana a 3615 cm^{-1} junto con una banda de flexión del agua adsorbida cercana a $1630\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$, típicas de la presencia de agua en minerales arcillosos atribuidas a la montmorillonita ^[162]. En la zona de los silicatos se identificó una banda intensa de estiramiento Si-O-Si y Si-O-Al en $1000\text{-}1040\text{ cm}^{-1}$, junto con bandas menores de flexión Si-O y Al-O-Si entre $460\text{-}520\text{ cm}^{-1}$, lo cual se asocia con una matriz dominada por cuarzo y filosilicatos del tipo caolinita/montmorillonita descritos en la DRX ^[37,42].

En la región de los carbonatos, los espectros mostraron una banda fuerte de estiramiento asimétrico del grupo CO_3^{2-} alrededor de $1410\text{-}1460\text{ cm}^{-1}$ y bandas de flexión fuera del plano en torno a $870\text{-}880\text{ cm}^{-1}$ y $710\text{-}720\text{ cm}^{-1}$, características de calcita y, en algunos lotes, compatibles con la presencia de dolomita ^[162]. La intensidad relativa de estas bandas se incrementó en los lotes con mayor contenido de Calcio determinado por FRX, lo que sugirió una relación entre la parte carbonatada identificada químicamente y la respuesta vibracional de los carbonatos en FTIR.

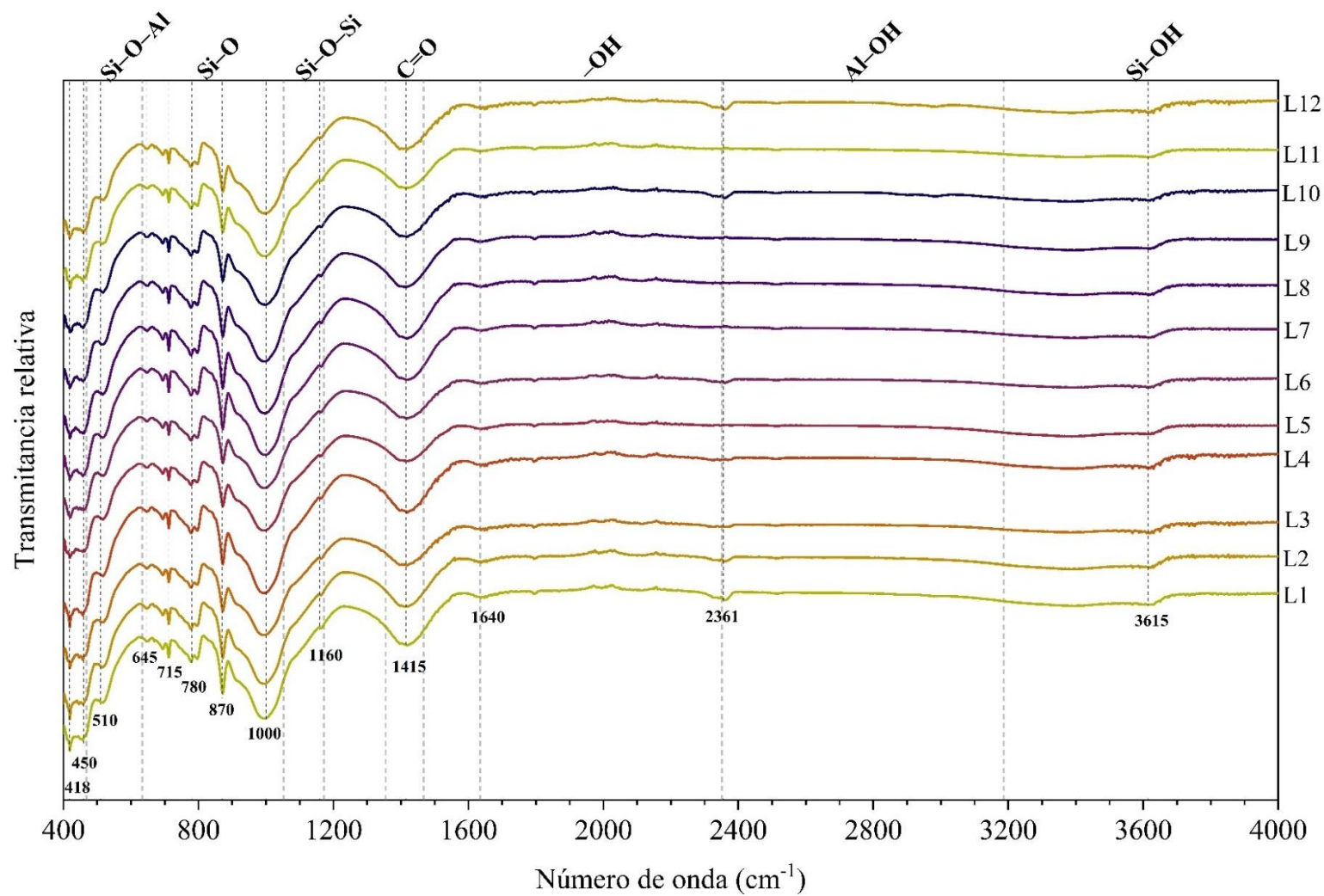


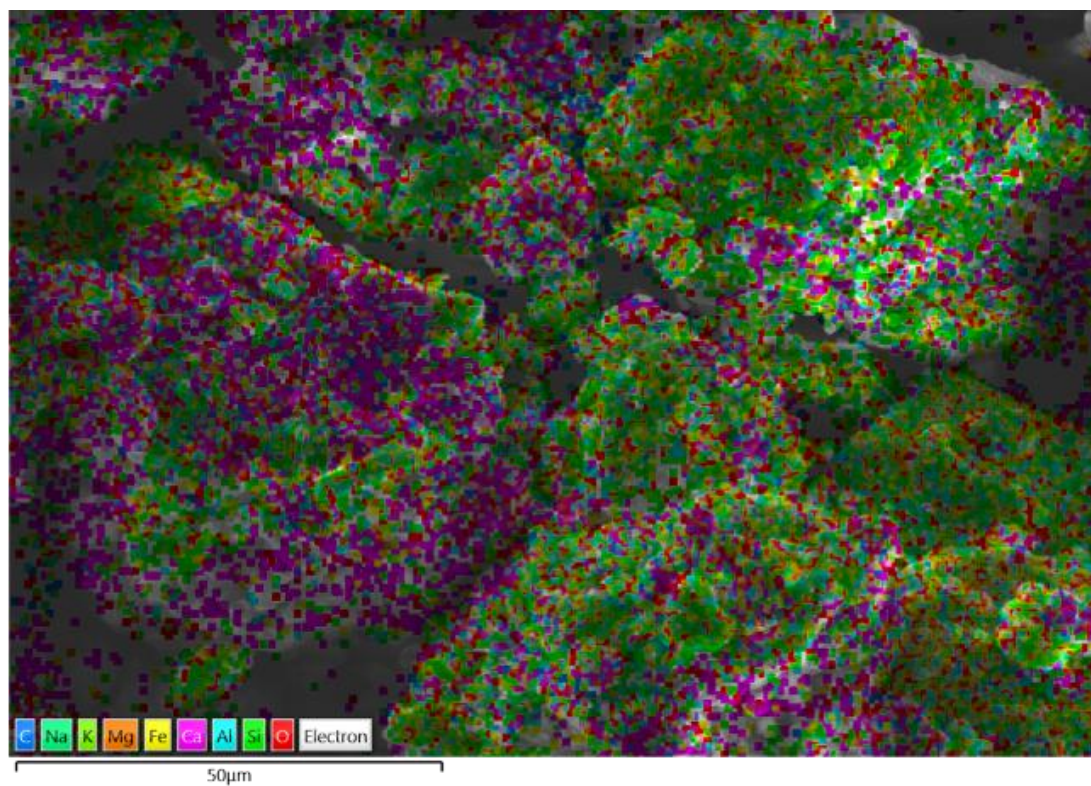
Figura 39. Espectros FTIR de los lotes de TPE.

Por otro lado, en la región de estiramiento C-H ($\approx 2850\text{-}2960\text{ cm}^{-1}$) no se identificaron bandas intensas asociadas a compuestos orgánicos, lo que sugirió de forma preliminar y cualitativa que el TPE no presentó contenido de MO [41,106]. No obstante, debido a que el FTIR no se utilizó como método cuantitativo para identificar la presencia de MO entre los lotes, esta evidencia se consideró únicamente como un indicio y su confirmación se estableció posteriormente complementándolo con los ensayos físicos.

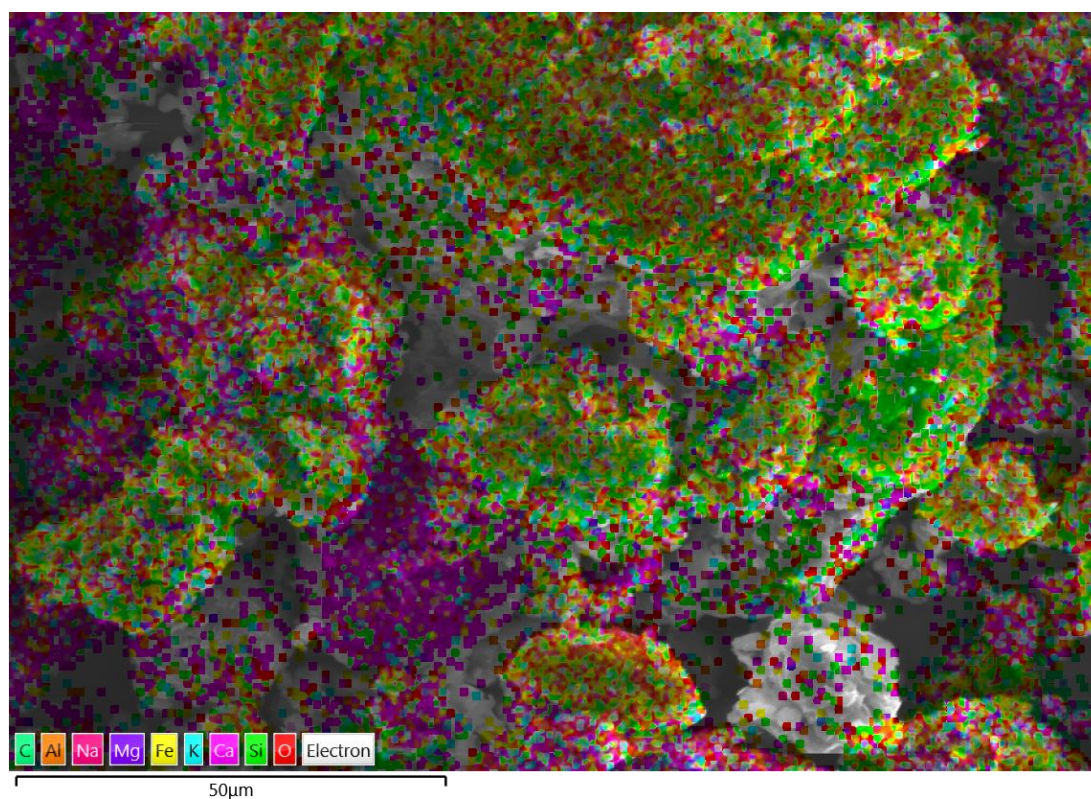
4.1.1.4. Microscopía electrónica de barrido por espectroscopía de energía dispersiva del residuo de tierra producto de excavación.

Para corroborar a escala microestructural la composición elemental obtenida por FRX y vincularla con las fases cristalinas identificadas por DRX, se realizaron mapeos EDS en cuatro lotes del TPE (L1, L4, L6 y L12). Esta técnica permitió observar la distribución espacial de los elementos mayoritarios y minoritarios del residuo, diferenciando dominios ricos en Si-Al (aluminosilicatos) y dominios ricos en Ca-Mg asociados a fases carbonatadas (Figura 40).

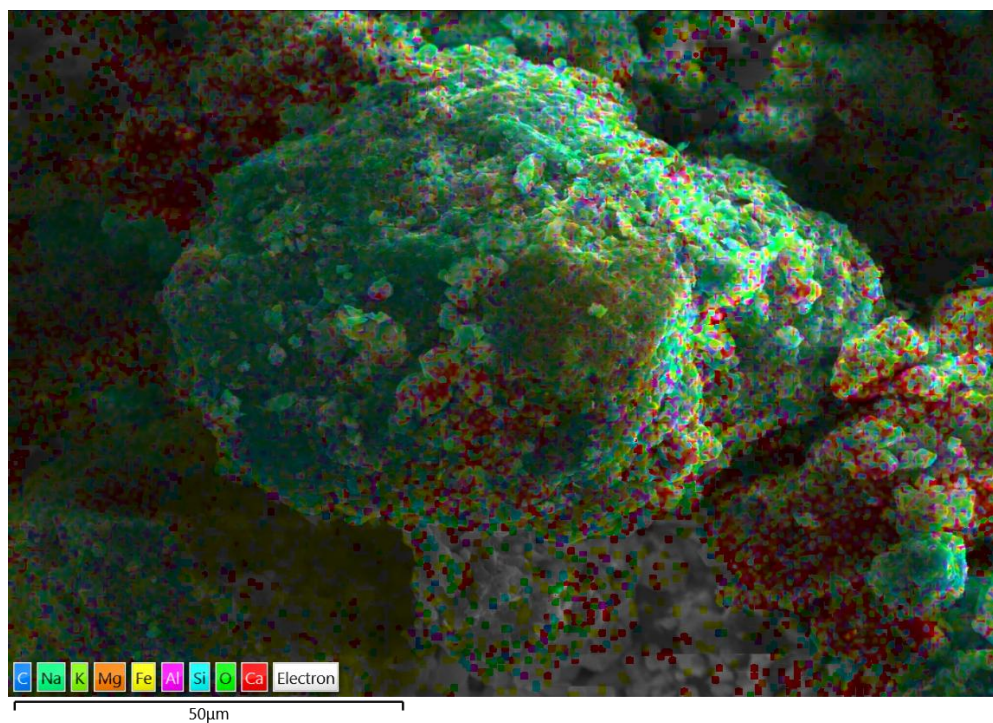
En los cuatro lotes se identificaron la presencia de silicio, aluminio, calcio y hierro, además de señales menores de potasio, sodio y magnesio, similarmente a los elementos encontrados en la FRX. En los mapeos, el Oxígeno se distribuyó de manera generalizada, lo cual fue coherente con que los resultados de FRX se reportaron como óxidos. Por su parte, la señal de Carbono se interpretó con cautela por ser sensible al recubrimiento utilizado en la técnica; por ello, la corroboración de carbonatos se sustentó principalmente con la presencia y distribución de Calcio y Magnesio y en las fases carbonatadas observadas por DRX.



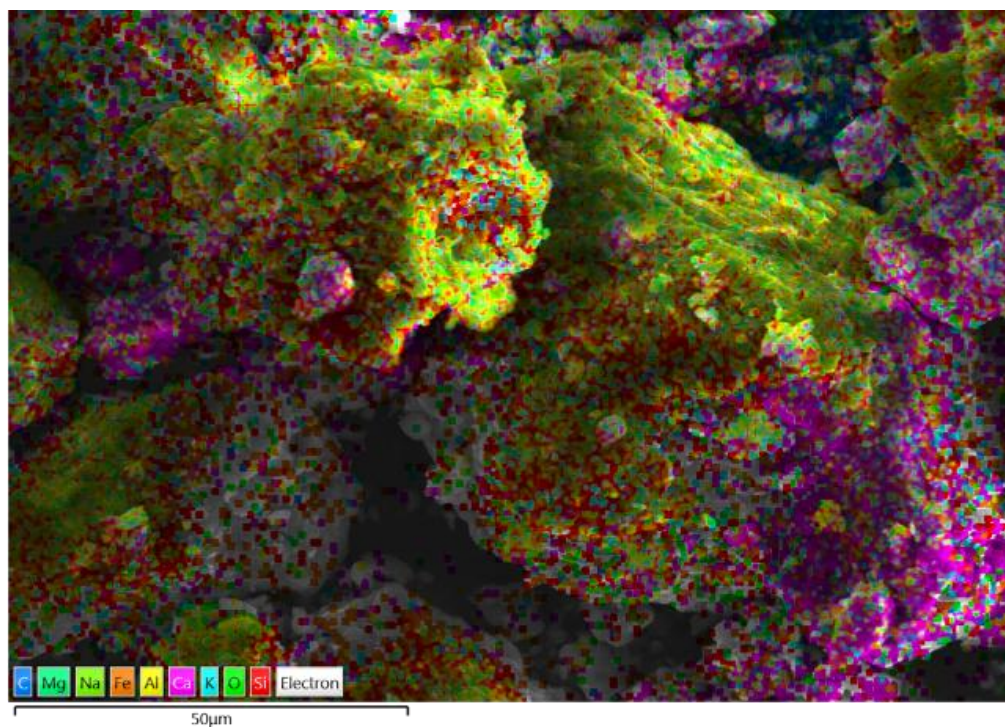
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40. Mapeos por EDS de las muestras de TPE del a) lote 1, b) lote 4, c) lote 6 y d) lote 12.

Al comparar por lote, los mapeos respaldaron las diferencias composicionales medidas por FRX:

- En el mapeo del L1 se observaron dominios extensos con señal de silicio y oxígeno (compatibles con granos silíceos y aluminosilicatos) y zonas con señales de calcio; la presencia simultánea de calcio y trazas de magnesio se atribuyó con la presencia de calcita y dolomita identificadas por DRX, mientras que la distribución de Aluminio junto con el silicio y elementos alcalinos menores (Potasio y Sodio) fue congruente con filosilicatos y feldespatos (p. ej., albita) ^[162].
- Asimismo, L4 mantuvo el mismo patrón elemental que L1, pero con una proporción visualmente menor de dominios de calcio, lo cual concordó con su menor porcentaje de composición química respecto de L1. La distribución de silicio-aluminio continuó siendo dominante, relacionado con la presencia de cuarzo y arcillas observadas en la DRX.
- Por otro lado, en L6 se apreció un predominio de regiones ricas en silicio y una menor proporción relativa de zonas con calcio respecto de L1, lo cual fue coherente con el incremento de Silicio y la reducción de Calcio en la FRX.
- El L12 que fue el lote con mayor contenido de silicio y el menor de calcio del conjunto comparado. Su mapeo mostró un amplio dominio de la señal de silicio sobre la de Calcio, lo que coincidió con la tendencia de la FRX y con la DRX, donde el cuarzo se mantuvo como fase principal mientras los carbonatos persistieron como fases recurrentes.

4.1.2. Caracterización de las propiedades físicas de las materias primas.

En la tabla 4 se muestran el resumen de resultados de las propiedades físicas evaluadas para los 12 lotes de TPE, con se respectivo promedio y desviación estándar para cada caso.

Tabla 4. Resumen de resultados de propiedades físicas de los lotes evaluados.

No. Lote	IP (%)	MO (%)	d ₅₀ (μm)	Densidad (kg/m ³)	SUCS
L1	9.47	0.14	46.63	2540.24	SP-SC
L2	1.10	0.03	51.35	2298.77	SM
L3	3.22	0.05	53.49	2457.26	SM
L4	5.42	0.11	49.02	2471.79	SP-CL/ML
L5	2.35	0.03	50.78	2323.53	SM
L6	1.56	0.04	52.45	2136.79	SM
L7	10.25	0.03	43.18	2271.27	SW-CH
L8	4.52	0.05	48.32	2265.93	SP-CL/ML
L9	8.57	0.05	43.87	2189.62	SW-CL
L10	2.11	0.02	51.10	2217.57	SM
L11	8.86	0.08	48.40	2320.12	SP-SC
L12	2.33	0.02	52.97	2205.07	SP-ML
$\bar{x}$	4.98	0.05	49.29	2308.16	-
σ	3.27	0.03	3.24	118.57	-

En las siguientes secciones se discutirán detalladamente cada uno de estos resultados por separado.

4.1.2.1. Índices de plasticidad.

Los lotes de TPE presentaron IP entre 1.10% (L2) y 10.25% (L7), con un promedio de 4.98% y una desviación estándar de 3.27%. Con base en los rangos de interpretación discutidos (IP = 0: no plástico; IP < 7%: baja plasticidad; 7-17%: plasticidad media y >17%: alta plasticidad), 8 de 12 lotes se identificaron como tierras de baja plasticidad (L2, L3, L4, L5, L6, L8, L10, L12) y los otros 4 como de plasticidad media (L1 = 9.47%, L9 = 8.57%, L11 = 8.86% y L7 = 10.25% siendo este último el límite superior del conjunto). En comparación con los rangos típicos reportados para suelos empleados en aplicaciones de tierra estabilizada (frecuentemente el IP ~10-20% para suelos arenosos/franco-arenosos y ~15-35% para suelos arcillosos), los IP medidos se concentraron mayoritariamente por debajo de esos rangos, lo que indicó un TPE con plasticidad global baja y, por tanto, una fracción fina con comportamiento más cercano a limo o arcillas de baja actividad [14,17,23].

4.1.2.2. Clasificación del residuo de tierra producto de excavación con base en la carta de plasticidad de Atterberg.

La Figura 41 presenta la ubicación de los 12 lotes de TPE en la carta de plasticidad de Casagrande, a partir de sus valores del LL e IP. En general, los lotes se concentraron en la zona de baja plasticidad, ubicándose mayoritariamente en los campos ML y CL-ML, lo que indicó que la fracción fina del TPE fue predominantemente limosa o limo-arcillosa. En particular, los lotes con IP bajos ($\approx 1-3\%$) se localizaron cercanos a la región ML, siendo finos de comportamiento limoso; mientras que los lotes con IP intermedios ($\approx 4-6\%$) se desplazaron hacia la banda CL-ML, sugiriendo un incremento relativo de los finos con arcillas, aunque aun siendo de baja plasticidad. Los lotes con los IP más altos ($\approx 8.6-10.3\%$) se mantuvieron por debajo de la zona de alta plasticidad, pero se ubicaron en la franja superior de baja plasticidad, lo que evidenció finos más activos dentro del depósito, en concordancia con las variaciones de arcillas identificadas previamente por DRX.

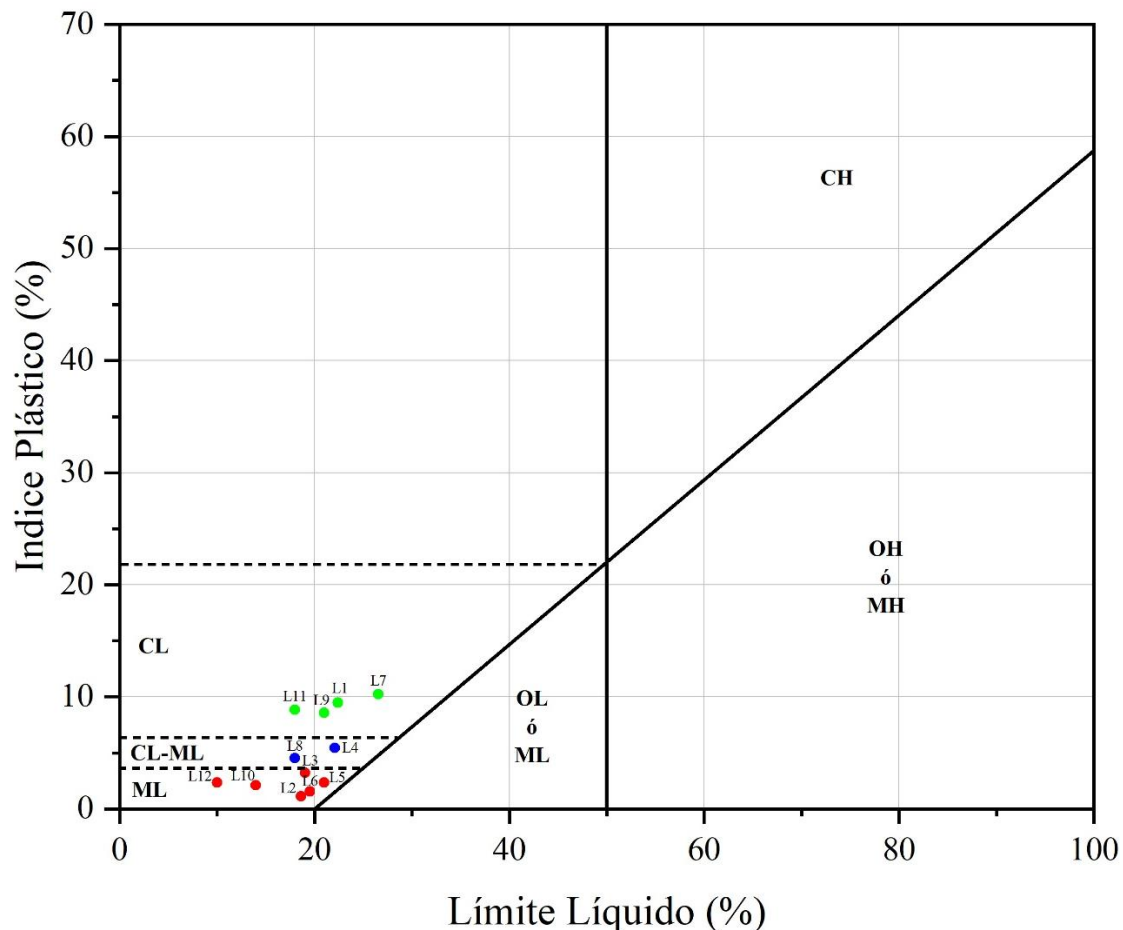


Figura 41. Carta de plasticidad mostrando el tipo de arcilla o limo al que corresponde cada lote. CH: arcillas inorgánicas de alta compresibilidad; CL: arcillas inorgánicas de baja compresibilidad; MH: limos inorgánicos de alta compresibilidad; ML: limos inorgánicos de baja compresibilidad; O: limos y arcillas orgánicas.

Adicionalmente, ningún punto se posicionó en las regiones OL/OH asociadas a finos orgánicos. Esta clasificación fue consistente con una identificación previa, es decir, cuando el FTIR no mostró bandas intensas en la región C-H ($\approx 2850-2960 \text{ cm}^{-1}$), lo que sugirió de forma cualitativa ausencia de materia orgánica, corroborando que el comportamiento plástico observado correspondió a finos inorgánicos (limo/arcilla) libre de MO.

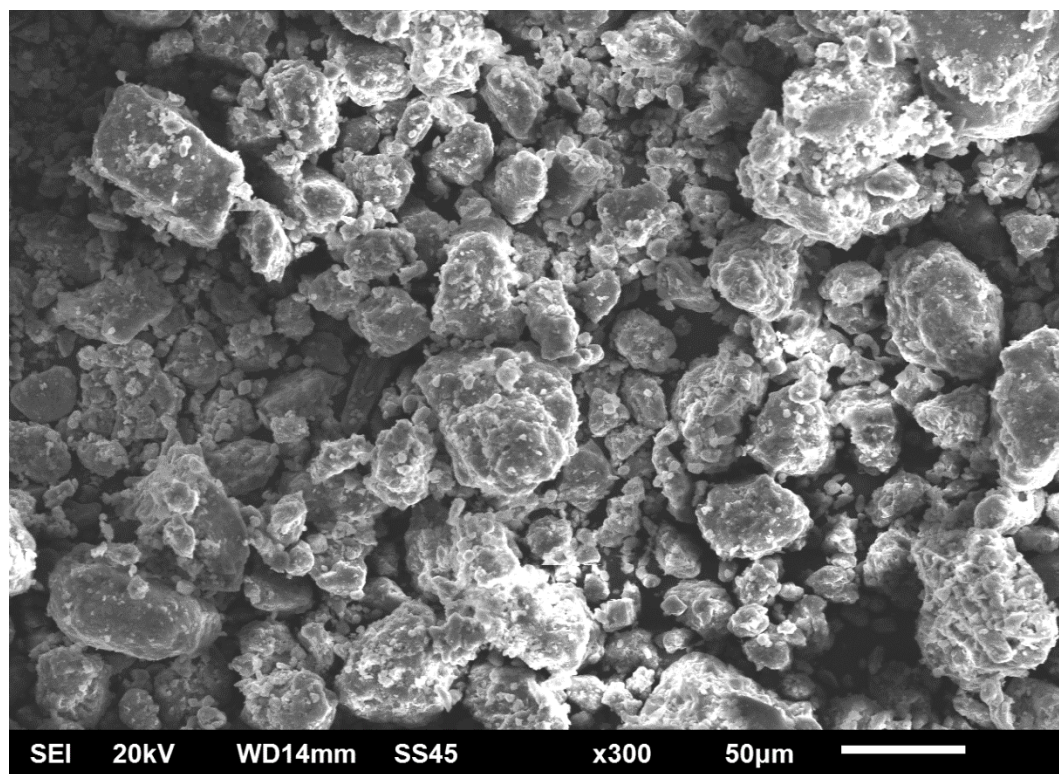
4.1.2.3. Contenido de Materia Orgánica del residuo de tierra producto de excavación.

Con base en la Tabla 4, el contenido de MO del TPE osciló entre 0.02% (L10 y L12) y 0.14% (L1), con un promedio de 0.05% y una desviación estándar de 0.03%. Estos valores se ubicaron en un intervalo muy bajo, por lo que el material cumplió el criterio de aceptación de contenido orgánico establecido en la normativa con límite máximo de MO $\leq 2\%$ [103,106]. En consecuencia, el TPE evaluado no presentó una fracción orgánica relevante que pudiera comprometer su estabilidad o su uso como materia prima.

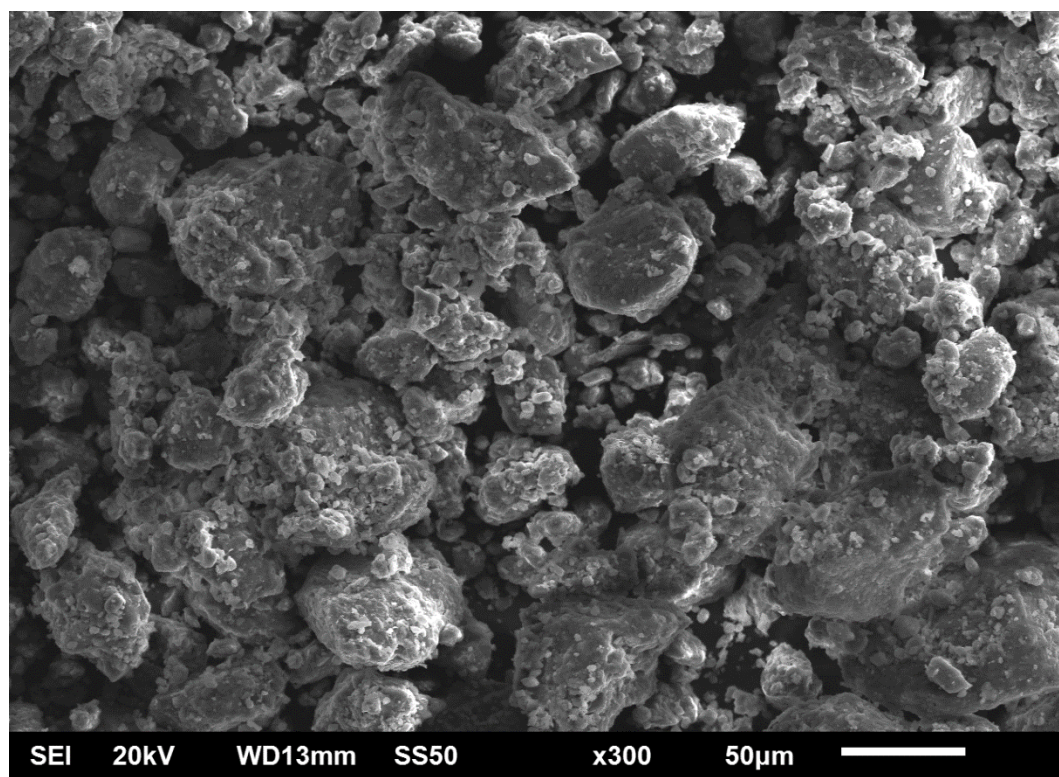
Este resultado cuantitativo fue la evidencia previa del FTIR, donde no se observaron bandas intensas de estiramiento C-H, lo que había sugerido de manera preliminar y cualitativa una baja presencia de compuestos orgánicos. Asimismo, la carta de plasticidad no mostró lotes en las regiones OL/OH asociadas a finos orgánicos, lo que reforzó que el comportamiento plástico correspondió a finos inorgánicos (ML/CL-ML) y no a MO. Por lo tanto, la MO medida, el FTIR y la clasificación por Atterberg confirmaron que los lotes de TPE presentaron un carácter predominantemente inorgánico.

4.1.2.4. Morfología del residuo de tierra producto de excavación mediante microscopía electrónica de barrido.

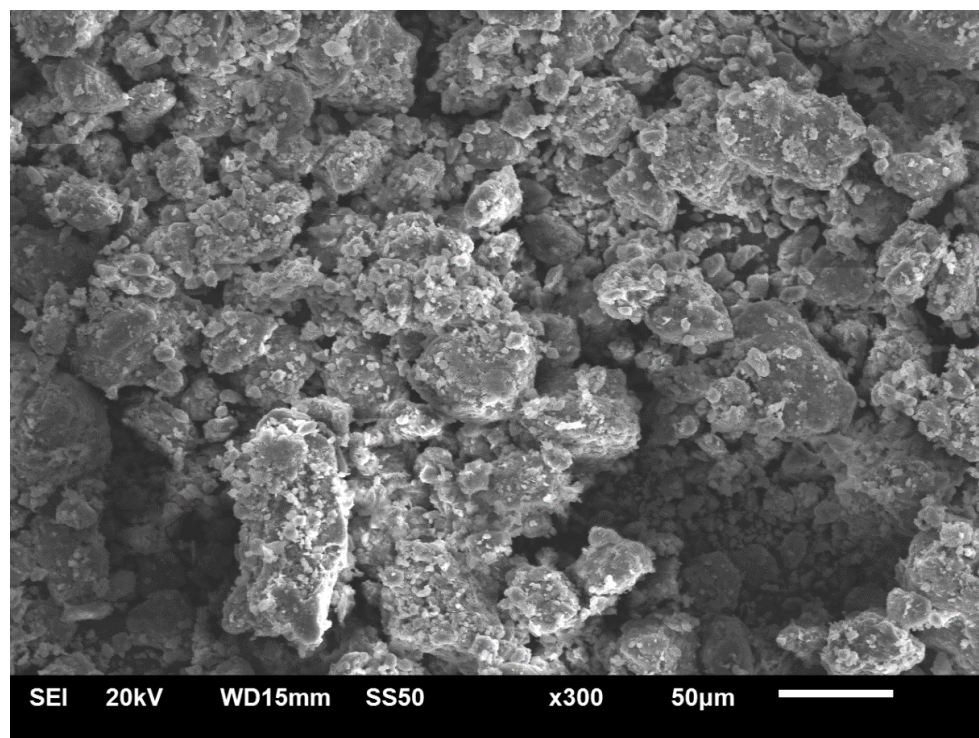
Las micrografías MEB de los lotes L2, L4, L9 y L10 (Figura 42) mostraron un residuo heterogéneo, constituido por (i) partículas relativamente grandes de morfología irregular-angulosa y superficie rugosa, y (ii) una fracción fina que apareció como aglomerados y recubrimientos adheridos sobre las partículas mayores.



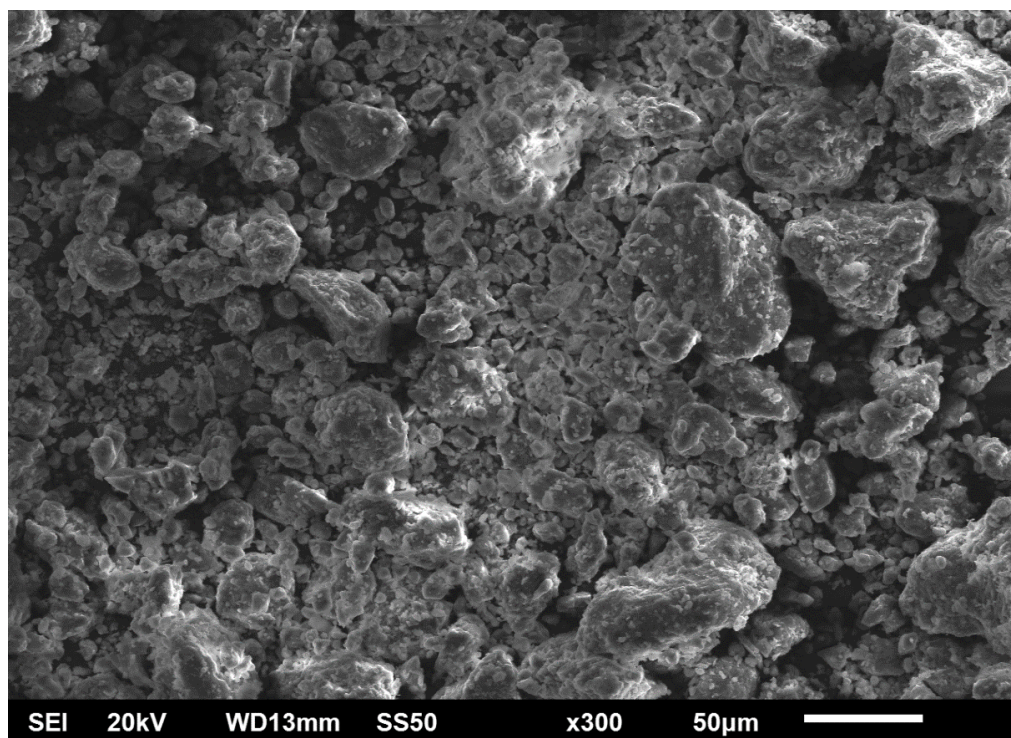
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 42. Micrografías por MEB de las muestras de TPE del a) lote 2, b) lote 4, c) lote 9 y d) lote 10.

Cualitativamente, el L9 presentó una morfología más dominada por finos y aglomeración, relacionado con tamaños menores a las 50 μm , mientras que el L2 y el L10 mostraron una mayor proporción visual de partículas de arenas y fragmentos con aristas mayores a las 50 μm . En todos los casos se observó una textura superficial rugosa y baja esfericidad, rasgos que han sido reportados también para agregados finos provenientes de TPE, los cuales presentaron partículas menos esféricas y con granulometría más heterogénea que las arenas naturales [103,104].

4.1.2.5. Distribución de tamaño de partícula por difracción láser del residuo de tierra producto de excavación.

Con base en la Tabla 4, el tamaño medio d_{50} de los lotes de TPE se ubicó en un rango de 43.18-53.49 μm , con un promedio de 49.29 μm y una desviación estándar de 3.24 μm (variabilidad relativa $\approx 6.6\%$). Los valores mínimos correspondieron al L7 (43.18 μm) y L9 (43.87 μm), mientras que el máximo se observó en el L3 (53.49 μm), lo cual indicó una dispersión moderada entre los lotes, pero sin cambios drásticos en la granulometría central del material.

Este intervalo obtenido se asoció con la morfología observada por MEB donde se distinguieron partículas irregulares y angulosas de decenas de micrómetros, junto con una fracción fina que apareció como aglomerados y recubrimientos adheridos sobre partículas mayores [43,104]. En particular, los lotes con un d_{50} menor (p. ej., L9) mostraron cualitativamente una mayor presencia de finos, mientras que lotes con d_{50} cercano a 51 μm (p. ej., L2 y L10) mostraron una mayor proporción visual de partículas relativamente más gruesas dentro del mismo orden de magnitud. El intervalo obtenido se mantuvo dentro de la tendencia reportada para TPE acondicionados como polvos para aplicaciones cementantes, donde se ha descrito un predominio de fracciones finas (frecuentemente con una porción importante $<75 \mu\text{m}$) y valores centrales de

tamaño en decenas de micrómetros, dependientes del origen del depósito y del nivel de acondicionamiento (secado, trituración, molienda y cribado) [106–108].

4.1.2.6. Densidad.

Las densidades de los TPE presentaron un rango de 2136.79-2540.24 kg/m³, con un promedio de 2308.16 kg/m³ y una desviación estándar de 118.57 kg/m³ mostrando una variabilidad moderada entre los lotes.

El intervalo de densidad obtenido fue similar con el de algunos TPE utilizados en aplicaciones de construcción, además se asoció principalmente con (i) la proporción relativa de partículas gruesas y finos, (ii) la presencia de minerales de mayor densidad y (iii) el grado de acomodo de las partículas. En este sentido, la dispersión observada se interpretó como coherente con la caracterización previa, p. ej., lotes con mayor contribución de fases densas (p. ej., carbonatos identificados por DRX/FTIR y contenidos de calcio por FRX) y con mayor cantidad de partículas relativamente gruesas tendieron a mostrar densidades más altas, mientras que lotes con mayor cantidad de finos y menor contribución carbonatada presentaron densidades más bajas.

4.1.2.7. Clasificación SUCS.

La clasificación SUCS del TPE indicó un material predominantemente arenoso con finos, con categorías en SM (L2, L3, L5, L6 y L10) y en combinaciones SP-SC (L1, L11), SP-CL/ML (L4, L8) y SP-ML (L12). En menor proporción, se identificaron lotes clasificados como SW-CL (L9) y SW-CH (L7), mostrando variabilidad puntual en el tipo y el comportamiento de los finos.

Estas clasificaciones fueron coherentes con el conjunto de propiedades físicas medidas. Los d_{50} se mantuvieron en un intervalo de 43.18-53.49 μm , lo que respaldó que todos los lotes compartieron una parte dominada por partículas finas de arena muy fina con limos. Sin embargo, las diferencias en los IP (1.10-10.25%) y en la posición relativa en la carta de plasticidad (predominio ML/CL-ML) indicaron cambios en la naturaleza de los finos: lotes con IP muy bajo se asociaron a finos de comportamiento más limoso (tendencia a M, como en SM), mientras que incrementos de IP desplazaron la clasificación hacia finos con mayor componente arcilloso (tendencia a C, como en SP-SC o SP-CL/ML). En paralelo, el MO se mantuvo en niveles bajos (0.02-0.14%), descartando influencia orgánica en la clasificación y confirmando el carácter inorgánico de los finos. Aunque los lotes mostraron diferencias en SUCS (principalmente por la variación en tipo, contenido de finos y en su plasticidad), compartieron similitudes como corresponder a una matriz arenosa con fracción fina de baja plasticidad global y con bajo contenido de MO. Por ello, las variaciones de clasificación entre lotes se interpretaron como cambios moderados dentro de un mismo tipo general de TPE, más que como materiales de naturaleza completamente distinta [43,103,104,107,164].

4.1.3. Resumen de la caracterización química y física del residuo de tierra producto de excavación.

En la Tabla 5 se sintetizaron los valores promedio y la desviación estándar de la caracterización del TPE, evidenciando una materia prima de naturaleza predominantemente silíceo-calcárea. La composición química presentó como óxidos mayoritarios $\text{SiO}_2 = 52.18 \pm 1.50\%$, $\text{CaO} = 24.78 \pm 1.57\%$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.89 \pm 0.12\%$, con contribuciones menores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5.87 \pm 0.10\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.10 \pm 0.01\%$, $\text{MgO} = 1.28 \pm 0.02\%$ y $\text{TiO}_2 = 0.93 \pm 0.04\%$. La baja dispersión observada en SiO_2 y CaO indicó la variabilidad química acotada entre los lotes como control de calidad del insumo, lo cual fue congruente con la identificación previa por DRX de fases dominadas por cuarzo y carbonatos. En comparación, estudios de

referencia de TPE para materiales printables reportaron matrices también silíceas, con variaciones de CaO dependientes del origen; por ejemplo, Daher y col. (2023) reportaron $\text{SiO}_2 \approx 57.16\%$ y $\text{CaO} \approx 13.04\%$ para un TPE utilizado como compuesto para una TCI3D, mostrando que el contenido de CaO pudo aumentar de manera importante cuando el depósito fue más calizo, como ocurrió en esta investigación [86].

Tabla 5. Resultados de propiedades químicas y físicas del TPE.

Propiedad	Valor promedio	Desviación estándar
SiO_2 (%)	52.18	1.50
Al_2O_3 (%)	11.89	0.12
CaO (%)	24.78	1.57
Fe_2O_3 (%)	5.87	0.10
K_2O (%)	2.10	0.01
MgO (%)	1.28	0.02
TiO_2 (%)	0.93	0.04
IP (%)	4.98	3.27
MO (%)	0.05	0.03
d_{50} (μm)	49.29	3.24
Densidad (kg/m^3)	2308.16	118.57

En términos físicos, el TPE mostró baja plasticidad global ($\text{IP} = 4.98 \pm 3.27\%$) y contenido orgánico prácticamente nulo ($\text{MO} = 0.05 \pm 0.03\%$), lo que respaldó su carácter inorgánico. El tamaño medio característico fue $d_{50} = 49.29 \pm 3.24 \mu\text{m}$, atribuible con un material dominado por fracciones finas de limos con arcillas y arenas muy finas, también coherente con la morfología observada por MEB donde se observaron coexistencia de granos angulosos y agregados finos. La densidad $= 2308.16 \pm 118.57 \text{ kg/m}^3$ se ubicó en un intervalo esperable para un residuo mineral con mezcla de fases silíceas y carbonatadas; al contrastar con reportes donde se informaron densidades de suelo excavado del orden de ~ 2.7

g/cm³, la diferencia se atribuyó principalmente al contenido mineralógico específico del depósito [106,164].

4.2. Resistencia de compresión

4.2.1. En especímenes cúbicos (5×5×5 cm).

En la Figura 43 se muestran los resultados de RC de los especímenes cúbicos variando los contenidos de TPE y la relación a/cm a dos edades de curado diferentes (7 y 28 días).

En general, la RC disminuyó sistemáticamente al incrementar el porcentaje de TPE, lo cual se atribuye con la reducción del contenido relativo de la fase cementante disponible para formar una matriz continua [165]. Con una a/cm = 0.30, la mezcla con 60% TPE alcanzó 12.62 MPa y 21.01 MPa a 7 y 28 días respectivamente, mientras que con 70% TPE se registró 8.14 MPa y 8.01 MPa. Asimismo, al aumentar el TPE de 80% a 90%, las resistencias cayeron a intervalos de 2.87-3.55 MPa y 0.76-0.84 MPa, respectivamente, confirmando una pérdida de capacidad portante cuando el material fue dominado por altos contenidos de TPE. Este comportamiento coincidió con reportes en mezclas con TPE, donde el incremento de la relación TPE/CPC redujo la resistencia, aun cuando se mantuvieron condiciones de curado controladas [22,87].

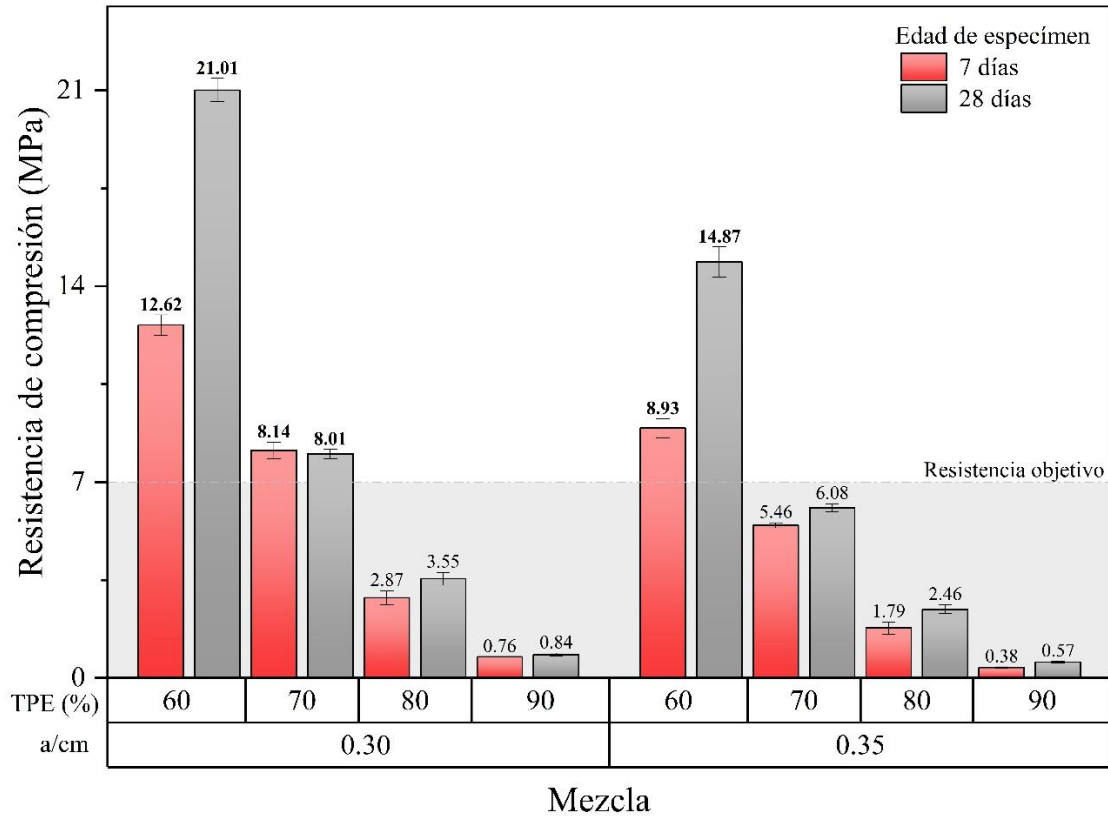


Figura 43. Resistencia de compresión en cubos de las mezclas a las edades de 7 y 28 días.

Asimismo, en la relación a/cm se observó el mismo efecto, es decir, a relaciones a/cm altas con mismos contenidos de TPE, la RC disminuyó entre un 25-31% a los 28 días. Por ejemplo, con 60% TPE, la resistencia pasó de 21.01 MPa (a/cm 0.30) a 14.87 MPa (a/cm 0.35); con 70% TPE, disminuyó de 8.01 MPa a 6.08 MPa. Esta tendencia se atribuyó al aumento esperado de porosidad capilar al incrementar el contenido de agua [34]. Por otro lado, el efecto de la edad de curado fue predominantemente positivo (p. ej., 60% TPE incrementó ~66% de 7 a 28 días en ambos a/cm), mientras que la ligera disminución observada en 70% TPE con a/cm de 0.30 fue limitada y pudo interpretarse dentro de la dispersión experimental.

Las mezclas que cumplieron con la resistencia objetivo (≥ 7 MPa), fueron: $a/cm = 0.30$: 60% TPE y 70% TPE (a 7 y 28 días); $a/cm = 0.35$: 60% TPE (a 7 y 28 días). Por otro lado, las formulaciones con $\geq 80\%$ TPE no alcanzaron el valor objetivo en ninguna edad. En mezclas impresas con TPE se reportaron RC en húmedo a 28 días entre 14-25 MPa, dependiendo de la dosificación del TPE y la dirección de carga ^[100,166]. Por lo tanto, los valores obtenidos para 60% TPE (14.87-21.01 MPa a 28 días) se ubicaron dentro de rangos comparables, mientras que 70% TPE se situó en el extremo bajo, lo que señaló que, para este TPE y bajo estas condiciones, el aumento de sustitución penalizó de forma relevante la resistencia aun antes de considerar otros criterios de desempeño.

4.2.2. En especímenes impresos (21×14×10 cm).

En la Figura 44 se comparó la RC de las mezclas ensayadas en cubos moldeados y en tabicones impresos. En cubos, la mezcla con 60% de TPE alcanzó 12.62 y 21.01 MPa a 7 y 28 días, respectivamente, mientras que la mezcla con 70% de TPE desarrolló 8.14 y 8.01 MPa a las mismas edades. Al evaluar los tabicones impresos, las resistencias disminuyeron a 5.18 y 8.16 MPa (60% TPE) y a 4.03 y 6.14 MPa (70% TPE) a 7 y 28 días, respectivamente. Por lo tanto, solo los tabicones con 60% de TPE superaron el valor objetivo de 7 MPa a los 28 días, mientras que la mezcla con 70% de TPE quedó por debajo del valor objetivo.

También, el cambio de geometría de cubo moldeado a tabicón impreso hueco mostró unas reducciones de la RC. Para la mezcla con 60% de TPE, la pérdida fue del 59% y 61% a los 7 y 28 días; para la mezcla con 70% de TPE, las reducciones fueron de aproximadamente 50% y 23% en las mismas edades. En promedio, la mezcla con un 60% de TPE mostró una disminución cercana al 60%, mientras que la del 70% se redujo alrededor del 37%.

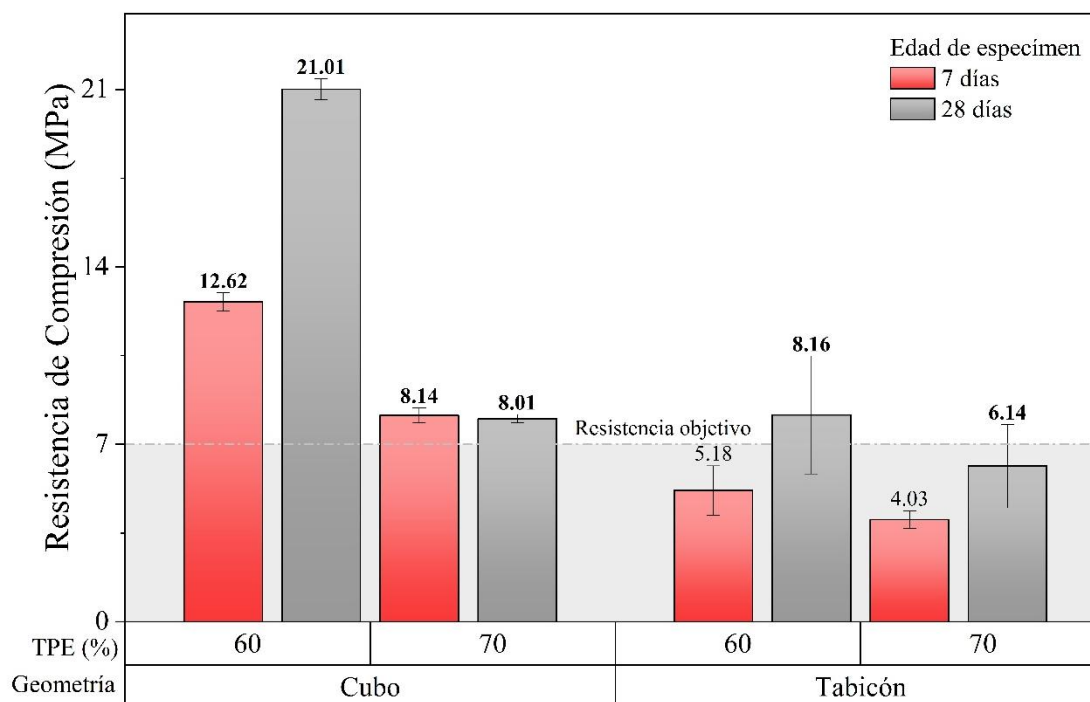


Figura 44. Comparativa de resistencia de compresión de los cubos y tabicones impresos de las mezclas potenciales para impresión 3D con $a/cm=0.30$ a las edades de 7 y 28 días.

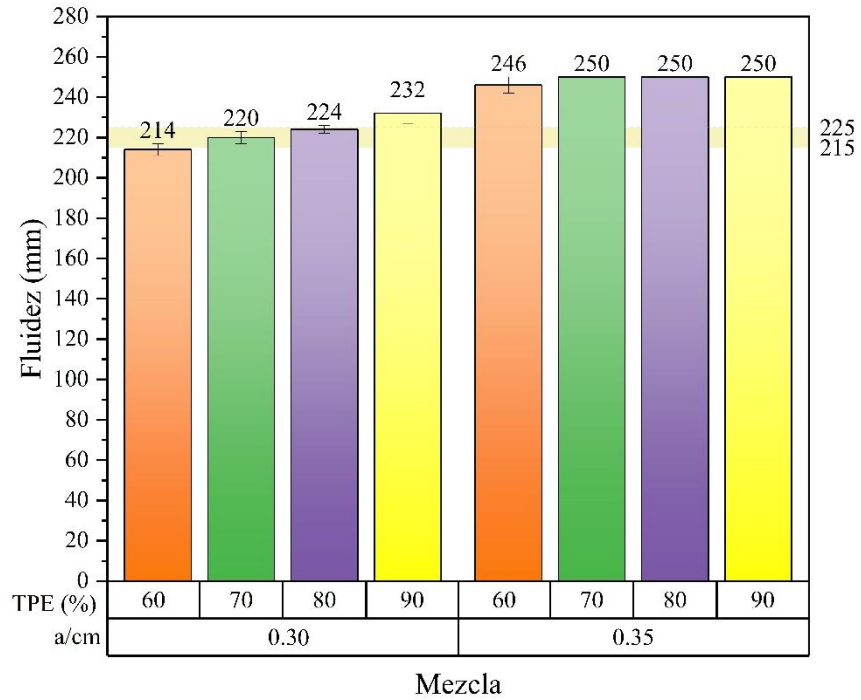
La pérdida de resistencia observada se atribuyó a la anisotropía inducida por la deposición capa por capa y a la presencia de interfaces filamento-filamento y filamento-capas, que actuaron como planos de debilidad y zonas preferenciales de iniciación de grietas, a diferencia de la microestructura más homogénea y confinada de los cubos moldeados [31,90,123,141]. Adicionalmente, la geometría hueca y el patrón de relleno de los tabicones favorecieron una mayor concentración de esfuerzos y una sensibilidad mayor a defectos locales ocasionando la reducción de la RC.

4.3. Propiedades de printabilidad.

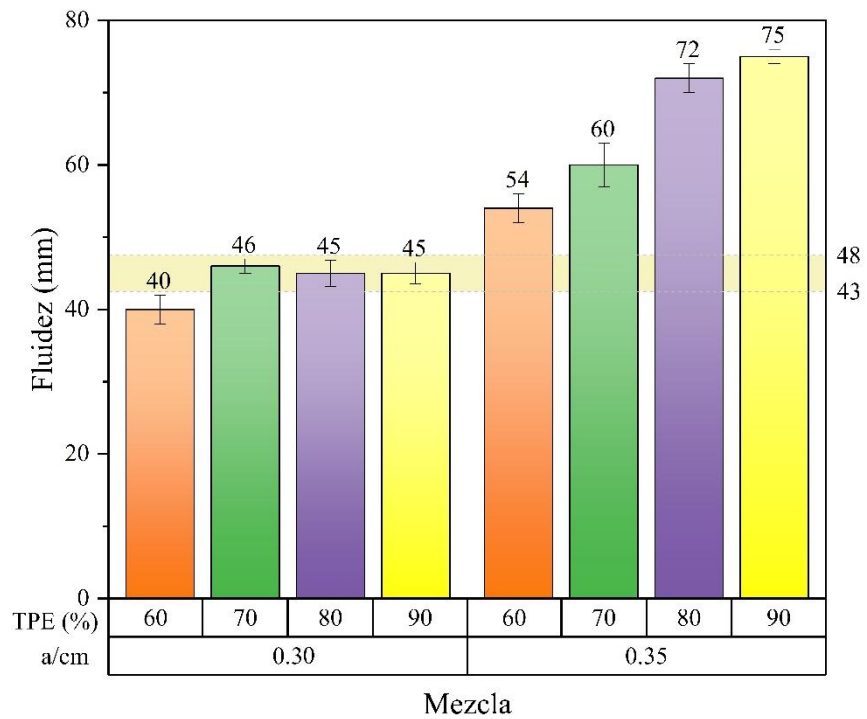
4.3.1. Pruebas de fluidez.

La Figura 45 muestra la fluidez de las mezclas evaluadas mediante: (a) mesa de fluidez conforme a la norma ASTM C1437 y (b) minicono para pastas siguiendo el enfoque de Okamura-Ouchi ^[131]. En ambos casos, la fluidez se interpretó como el grado de extensibilidad del material en estado fresco; es decir, un parámetro de ventana de trabajabilidad previo a los ensayos específicos de printabilidad.

Los diámetros de fluidez mediante ASTM oscilaron entre 214 y 250 mm (114-150%), mientras que con el minicono entre 40-75mm. En general, para ambos métodos el diámetro de flujo se incrementó exponencialmente al incrementar el contenido de TPE y la relación a/cm. Esto sugiere que el incremento de agua en las mezclas tuvo un mayor impacto en el comportamiento de extensibilidad, reduciendo la capacidad del sistema para mantener su forma bajo un esfuerzo dinámico aplicado ^[9,129].



(a)



(b)

Figura 45. Resultados de fluidez de las mezclas utilizando los métodos de: a) mesa de fluidez por la ASTM C1437 y b) minicono para pastas de Okamura y col. (1993) ^[131].

Además, se observó que a relaciones a/cm altas, el método del minicono mostró ser más preciso para medir la fluidez con respecto al de la norma ASTM, esto porque la prueba del minicono solo considera levantar el molde sin aplicar ningún esfuerzo secundario para iniciar el flujo del material, obteniendo valores de fluidez entre las mezclas a diferentes cantidades de TPE, sugiriendo también un amplio rango de medición para $a/cm > 0.35$. Mientras que, en el método de la ASTM, solo a relaciones $a/cm \leq 0.30$ fue posible tomar mediciones de fluidez antes de llegar al valor límite de 250 mm equivalente al 150%, a excepción de la mezcla con 60% de TPE.

Para fines prácticos se correlacionó la tendencia exponencial de los valores de fluidez obtenidos con ambas técnicas y se obtuvo un $R^2=0.8682$, sugiriendo un buen ajuste del modelo para convertir los valores de fluidez de la norma ASTM a los del minicono en milímetros (Figura 46). El modelo mostrado en la ecuación 27 se ajusta considerando el dominio experimental de las cantidades de TPE utilizadas y las a/cm .

$$y = 42.58 + 1.47 \times 10^{-13} * e^{0.13 * \text{Fluidez ASTM (mm)}} \quad \text{Ec. 27}$$

De esta manera fue posible convertir los valores de fluidez ajustando ambas técnicas dependiendo las condiciones experimentales y los protocolos de ensayos para el diseño preliminar de la TCI3D.

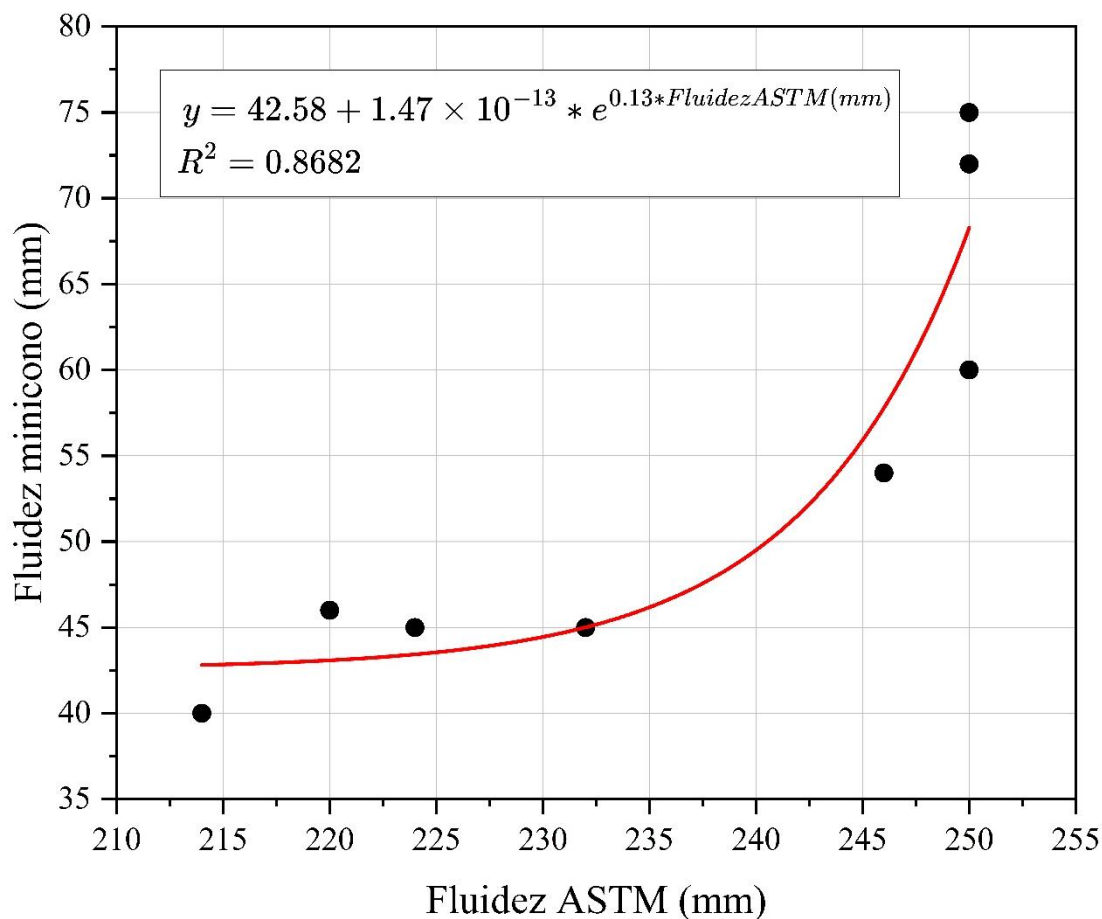


Figura 46. Correlación entre valores de fluidez medidas con minicono y ASTM C1437.

4.3.2. Índice de extrudabilidad.

En la Figura 47 se observó que el índice de extrudabilidad se mantuvo en valores aceptables únicamente para las mezclas con $a/cm=0.30$ y TPE=70-90% (64-74%), mientras que las formulaciones con TPE=60% resultaron deficientes (45% a $a/cm=0.30$ y 44% a $a/cm=0.35$). En las mezclas con $a/cm=0.35$ y TPE $\geq$ 70%, el índice quedó fuera de rango, asociados con un incremento del ancho del filamento extruido mayor al 200% del valor relativo.

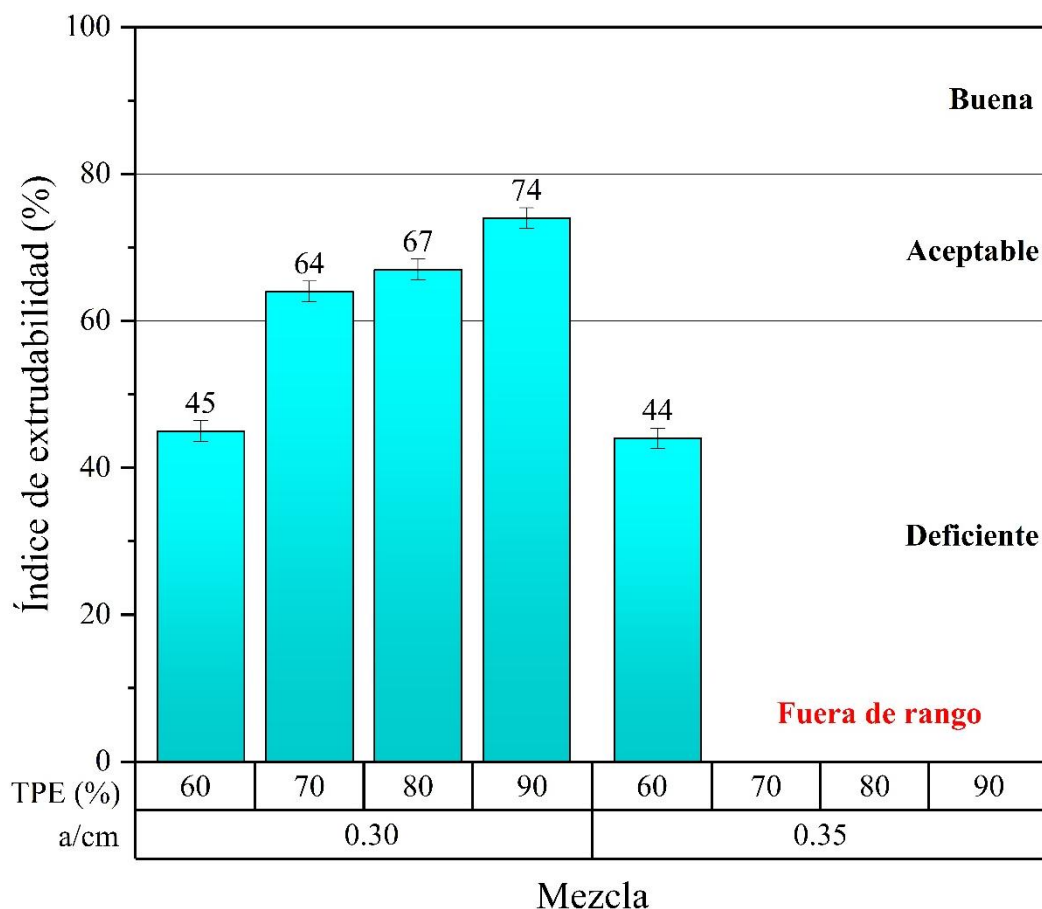


Figura 47. Índice de extrudabilidad (%) de las mezclas evaluadas.

Este comportamiento coincidió indirectamente con la fluidez, al pasar de una a/cm de 0.30 a 0.35, la fluidez incrementa ocasionando que los filamentos generen un fenómeno de escurrimiento [9,10,117]. Al escurrir, la mezcla impide generar los filamentos con las dimensiones óptimas establecidas, generando un decremento en el porcentaje del índice de extrudabilidad. Asimismo, se observó una tendencia cuadrática en el índice de extrudabilidad con un punto máximo del 74% cuando la TPE alcanzó el 90% con una relación a/cm=0.30, sugiriendo que la cantidad de TPE influyó directamente en la capacidad de los filamentos para ser extruidos y mantener su forma debido a la cohesión que ésta le aporta.

4.3.3. Índice de calidad de extrusión.

En la Figura 48 se observó que el índice de calidad de extrusión fue bueno para las mezclas con $a/cm=0.30$ (89-95%), mientras que al incrementar a $a/cm = 0.35$ la calidad disminuyó y/o quedó fuera de rango: únicamente la mezcla con 60% de TPE mantuvo un valor aceptable (68%), y las formulaciones con $TPE \geq 70\%$ no cumplieron los criterios de evaluación definidos para este índice.

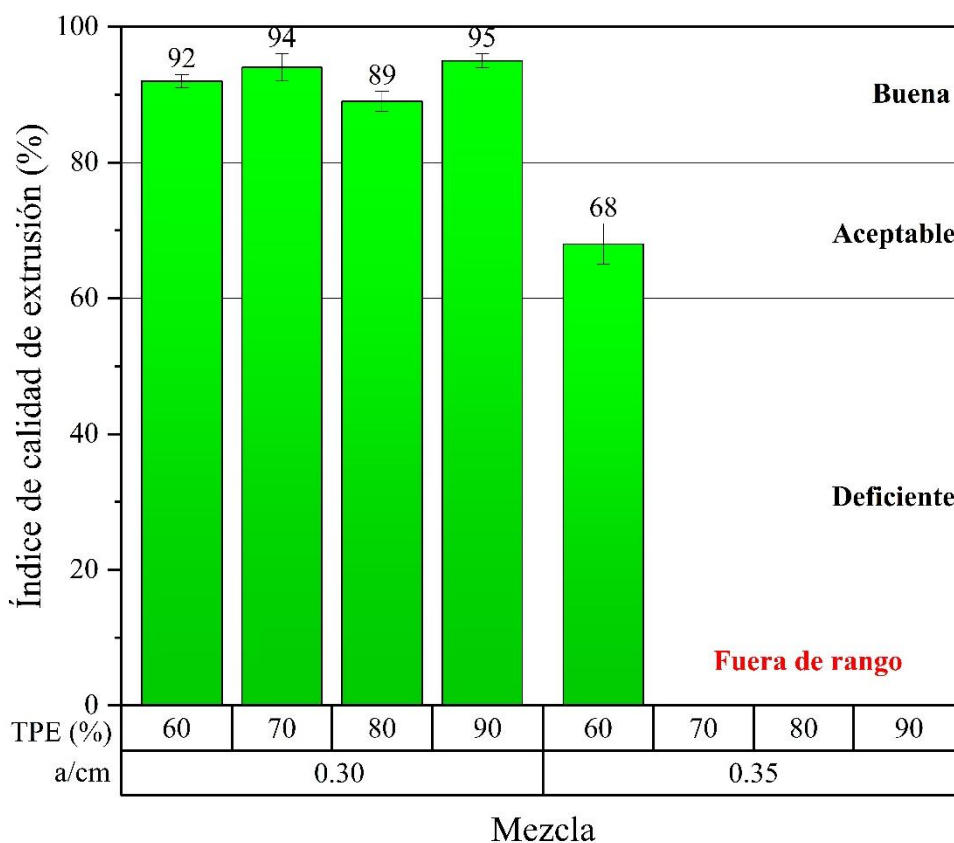


Figura 48. Índice de calidad de extrusión (%) de las mezclas evaluadas.

Relacionando estos resultados con la fluidez y el índice de extrudabilidad. Para $a/cm=0.30$, la fluidez se mantuvo en una ventana más controlada (ASTM: 214-232 mm; minicono: 40-46 mm), lo que favoreció que los filamentos

conservaran dimensiones cercanas a los parámetros de operación (ancho de capa de 25 mm y altura de capa de 10 mm), reflejándose en calidades de extrusión elevadas (89-95%). Además, con $a/cm=0.35$ la fluidez se incrementó a valores entre 246-250 mm y con minicono de 54-75 mm, condición que promovió deformación del cordón inmediatamente después de la deposición, de modo que el filamento dejó de conservar simultáneamente altura y ancho dentro del intervalo objetivo y, por ello, varias mezclas quedaron fuera del rango.

Al relacionar el índice de extrudabilidad con el de calidad de extrusión, se observaron dos comportamientos. Primero, a $a/cm=0.30$, aunque con 60% de TPE se presentó una extrudabilidad deficiente (45%), su calidad de extrusión fue buena (92%); sugiriendo que el filamento se formó con una sección transversal cercana al objetivo (25×10 mm), sin embargo, el ancho promedio a lo largo de la trayectoria fue variando durante la I3D. Segundo, al aumentar el TPE de 70 a 90% con $a/cm=0.30$, la extrudabilidad mejoró (64-74%) y la calidad se mantuvo alta (94-95%), indicando un régimen donde el material no sólo extruyó con geometría estable, sino que también controló mejor la variación del ancho durante el trazado [10,117,122].

Además, se observó que un incremento en la a/cm disminuye simultáneamente la fluidez, la extrudabilidad y la calidad de extrusión, mientras que la cantidad de TPE tuvo un efecto casi nulo en el índice de la calidad de extrusión cuando la $a/cm=0.30$.

4.3.4. Índice de edificabilidad.

En la Figura 49 se observó que el índice de edificabilidad presentó la mayor dispersión entre las propiedades de printabilidad evaluadas y, a diferencia de la extrudabilidad y la calidad de extrusión, fue el criterio más restrictivo. En $a/cm=0.30$, únicamente la mezcla con 70% TPE alcanzó un desempeño bueno

(90%), mientras que con 60% y 80% de TPE se mantuvieron en 30%, y con 90% de TPE disminuyó a 20%. Para $a/cm=0.35$, todas las formulaciones quedaron en el mínimo evaluado (10%) lo cual mostró una incapacidad para apilar las capas.

En las mezclas con $a/cm=0.35$, la fluidez elevada (ASTM: 246-250 mm; minicono: 54-75 mm), extrudabilidad <44% y calidad de extrusión <68% (fuera de rango para $TPE \geq 70\%$) indicaron un estado fresco deformable; por ello, aun cuando el material pudo extruirse parcialmente, no pudo retener su forma y por lo tanto el apilamiento se limitó a una sola capa (10%). En este sentido, la edificabilidad confirmó que el régimen de alta fluidez observado en $a/cm=0.35$ no solo afectó la geometría del filamento, sino también la estabilidad vertical del elemento impreso ^[10].

Por otro lado, cuando la $a/cm = 0.30$, la fluidez se ubicó en una ventana óptima (ASTM: 214-232 mm; minicono: 40-46 mm) y la calidad de extrusión se mantuvo alta (89-95%); sin embargo, esto no garantizó la edificabilidad en todos los casos. P. ej., cuando la cantidad de TPE=90%, se obtuvo una extrudabilidad máxima (74%) y calidad de extrusión alta (95%), pero edificabilidad baja (20%): el filamento se depositó de forma continua y con geometría cercana al objetivo, pero el material no desarrolló rigidez estructural suficiente para soportar el apilamiento ^[87,121]. De forma inversa, con TPE=60% se presentó una calidad de extrusión alta (92%) pero extrudabilidad deficiente (45%) y edificabilidad del 30%, sugiriendo un material relativamente rígido que conservó sección transversal óptima, aunque con variaciones de ancho durante la I3D y con capacidad limitada de apilamiento. Así, la edificabilidad no respondió de manera monótona al aumento del TPE; más bien, reflejó un óptimo intermedio donde coexistieron: (i) una fluidez suficiente para extruir sin interrupciones y (ii) una estabilidad de forma adecuada para apilar capas.

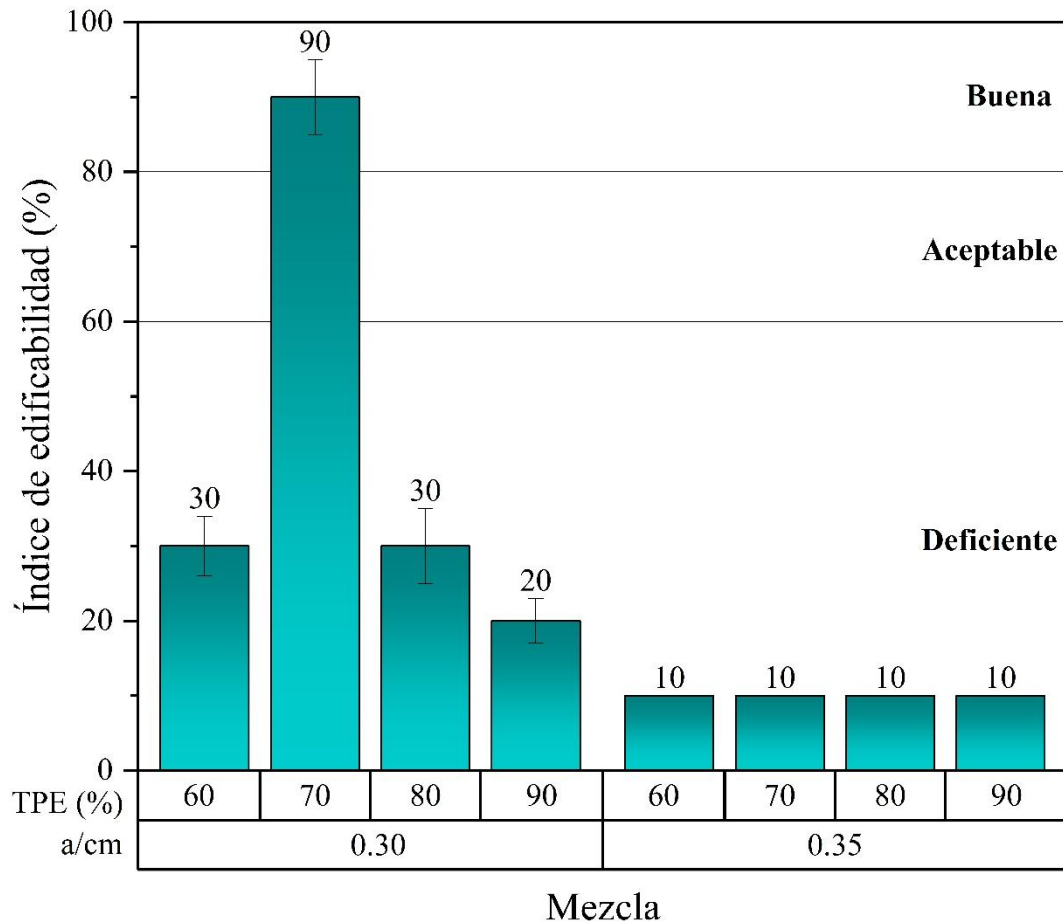


Figura 49. Índice de edificabilidad (%) de las mezclas evaluadas.

Bajo esta lectura, la mezcla con 70% de TPE y $a/cm=0.30$ concentró el mejor equilibrio, es decir, mantuvo una fluidez dentro del rango objetivo (≈ 220 mm conforme ASTM y 46 mm en minicono), extrudabilidad aceptable (64%) y calidad alta (94%), lo que se tradujo en la mayor edificabilidad (90%).

4.3.5. Printabilidad.

En la Figura 50 se muestran los resultados de printabilidad de las mezclas. Con $a/cm=0.30$, las mezclas alcanzaron valores entre 56-83%, clasificándose como aceptables y la formulación con 70% de TPE presentó el valor máximo (83%). Por otro lado, con $a/cm=0.35$ la printabilidad disminuyó, p. ej., con 60%

de TPE se registró un 40% (deficiente) y las formulaciones con $TPE \geq 70\%$ alcanzaron $\approx 3\%$, sugiriendo una condición no printable bajo los criterios adoptados.

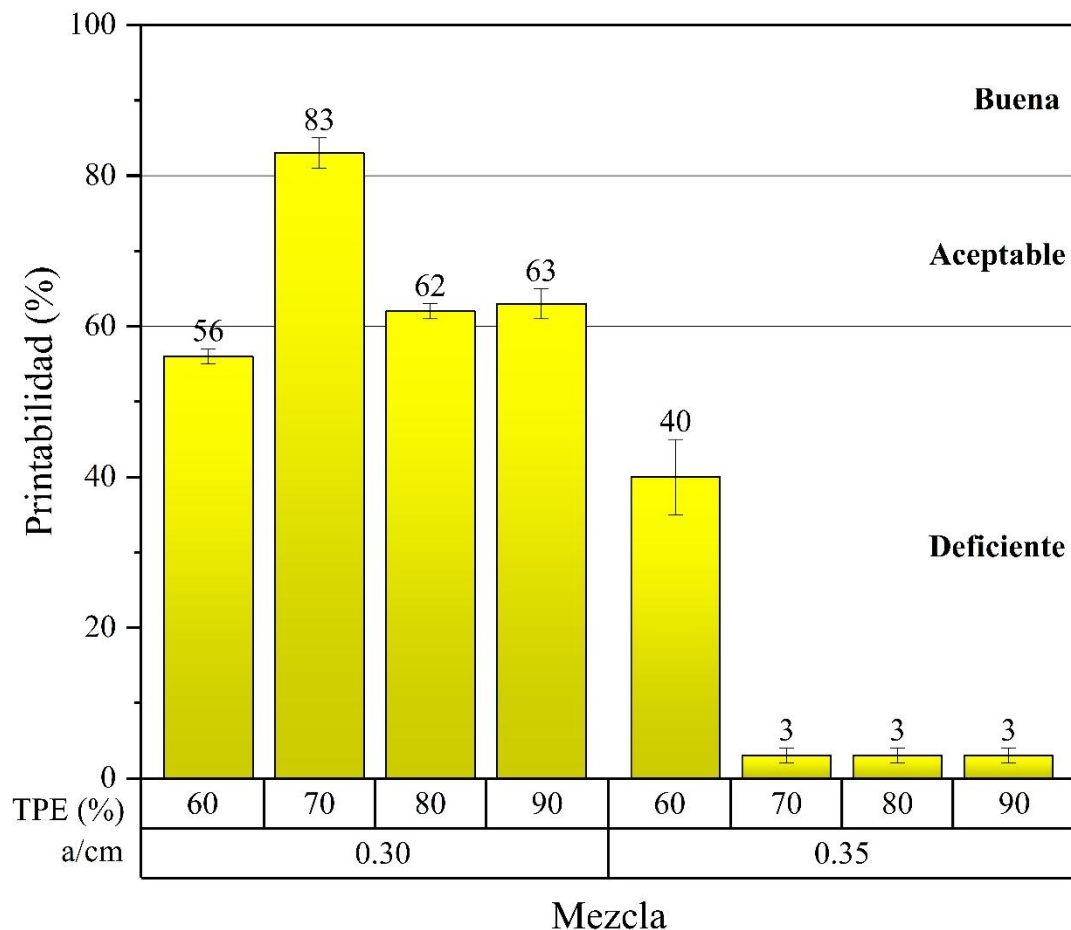


Figura 50. Printabilidad (%) de las mezclas evaluadas.

Esta respuesta tuvo un comportamiento similar respecto de los índices de extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad, considerando la fluidez como variable de soporte. P. ej., en $a/cm=0.30$, cuando la fluidez se mantuvo en una ventana de $ASTM=214-232$ mm y con $minicono=40-46$ mm, la calidad de extrusión fue alta (89-95%) pero la printabilidad no alcanzó niveles buenos porque el índice global fue penalizado por la edificabilidad, que se comportó como

el criterio más restrictivo (20-90%). Este efecto se reflejó, por ejemplo, en 90% de TPE con una $a/cm=0.30$, donde a pesar de combinar extrudabilidad alta (74%) y calidad de extrusión alta (95%), la edificabilidad baja (20%) limitó la printabilidad a un 63%. De forma similar, con 60% de TPE y $a/cm=0.30$ mostró una calidad de extrusión alta (92%), pero una extrudabilidad deficiente (45%) y edificabilidad moderada (30%), resultando en una printabilidad del 56%. Así, el valor máximo de printabilidad fue con un 70% de TPE y $a/cm=0.30$ (83%) se explicó por el mejor equilibrio simultáneo entre: extrudabilidad aceptable (64%), calidad alta (94%) y, sobre todo, edificabilidad alta (90%).

Por otro lado, en $a/cm=0.35$, la disminución de la printabilidad se atribuyó al incremento de la fluidez, condición que degradó la estabilidad geométrica del filamento y la capacidad de apilamiento [9,35,87]. Esto se evidenció en que solo el 60% TPE mantuvo medición parcial de calidad (68%) y extrudabilidad (44%), pero la edificabilidad mínima (10%) arrastró la printabilidad a 40%. En las formulaciones con $TPE \geq 70\%$, la combinación de fluidez alta, calidad fuera de rango, extrudabilidad fuera de rango y edificabilidad mínima condujo a los valores de $\approx 3\%$, mostrando que el incremento de la a/cm llevó a una mezcla demasiado deformable para sostener filamentos y capas.

4.3.6. Relación entre fluidez y asentamiento diferencial: área printable.

En la Figura 51 se muestra la relación entre la fluidez (diámetro de extensión en mm) y el asentamiento diferencial (mm), como dos respuestas complementarias del método del minicono. En términos físicos, el diámetro de extensión reflejó la capacidad de la pasta para deformarse y fluir bajo su propio peso, mientras que el asentamiento diferencial aportó un indicador de estabilidad asociados con la pérdida de altura y colapso una vez retirada la geometría del cono. Por ello, el análisis conjunto permitió delimitar un área de comportamiento donde mezclas demasiado rígidas tendieron a mostrar diámetros bajos (flujo

limitado) y mezclas excesivamente fluidas tendieron a incrementar simultáneamente el flujo y el asentamiento, anticipando pérdida de estabilidad [9].

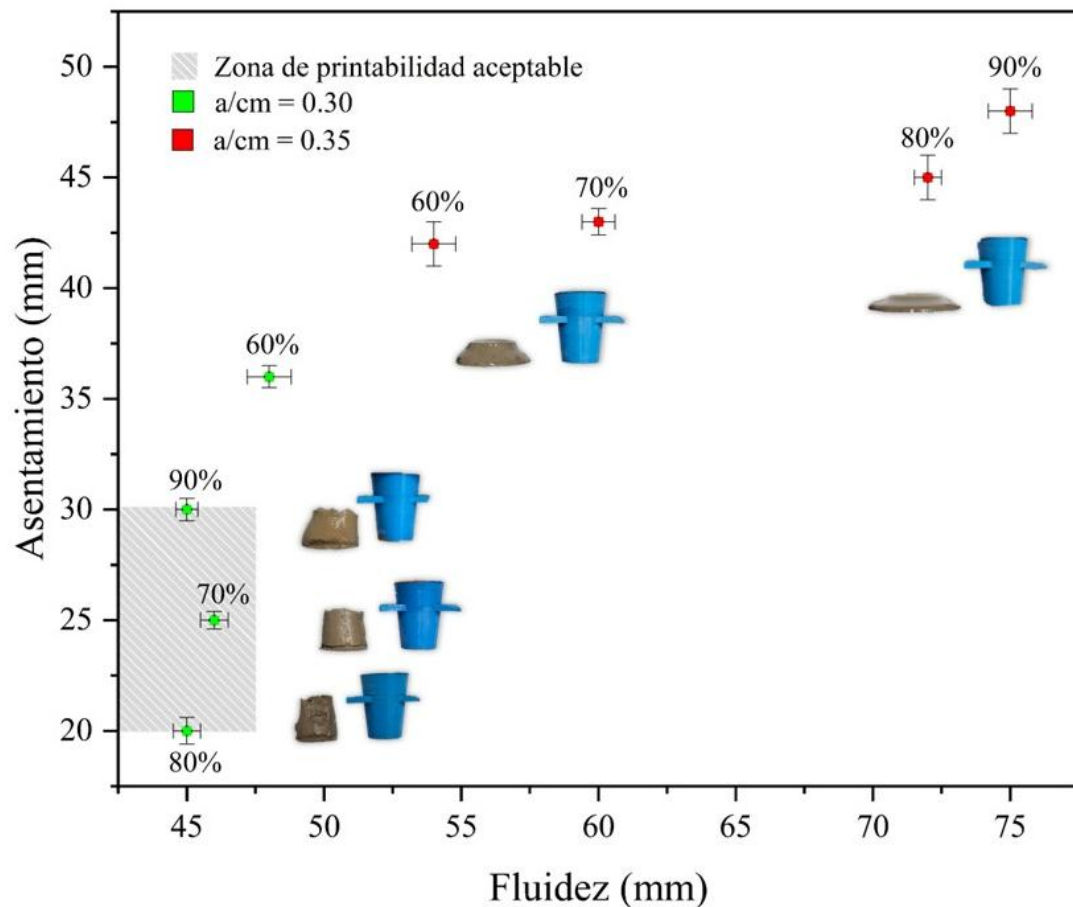


Figura 51. Zona de printabilidad aceptable: relación entre el asentamiento (mm) y la fluidez (mm) obtenida con el minicono.

Al comparar estos resultados con la printabilidad obtenida, se observó una respuesta directa entre la zona de fluidez-asentamiento y la printabilidad: las mezclas con $a/cm=0.30$ y 70-90% de TPE (printabilidad aceptable-buena, 62-83%) se agruparon en un rango de fluidez entre $\approx 45-46$ mm y asentamientos diferenciales $\approx 20-30$ mm (Figura 51). Por otro lado, la mezcla con 60% de TPE y $a/cm=0.30$ presentó un diámetro mayor (≈ 48 mm) y una printabilidad inferior (56%), sugiriendo una baja capacidad de apilamiento y retención de forma. Para

$a/cm=0.35$, la fluidez aumentó de ≈ 54 a 75 mm al mismo tiempo que la printabilidad disminuyó de 40% a $\approx 3\%$, lo que fue coherente con un comportamiento dominado por pérdida de estabilidad (mayor asentamiento diferencial) y reducción de la edificabilidad, aun cuando existiera facilidad de flujo y extrusión ^[10].

Con base en esta tendencia, se definió un área de printabilidad aceptable en el plano de asentamiento-fluidez definida por los puntos que cumplieron $printabilidad \geq 60\%$ ($TPE=70\%$, 80% y 90% con $a/cm=0.30$). En esta investigación, dicha zona quedó acotada por una fluidez por minicono cercana a $45-46$ mm y con un rango de asentamiento diferencial comprendido entre $20-30$ mm para esas tres mezclas.

4.3.7. Tiempo abierto de las pastas printables.

En las Figuras 52-54 se presentan los resultados de tiempo abierto obtenidos mediante el procedimiento propuesto por Ma y col. (2018), el cual consideró la evolución de la extrusión en el tiempo mediante (i) la evidencia fotográfica del filamento y (ii) la evolución del ancho del filamento respecto al ancho objetivo (2.5 cm) y su tolerancia ^[121].

Para la pasta con 70% de TPE y $a/cm=0.30$ (Figura 52), el filamento inició con un ancho de ≈ 5 cm (un 200% con respecto del ancho objetivo) durante los primeros 20 minutos, asociados con una alta fluidez.

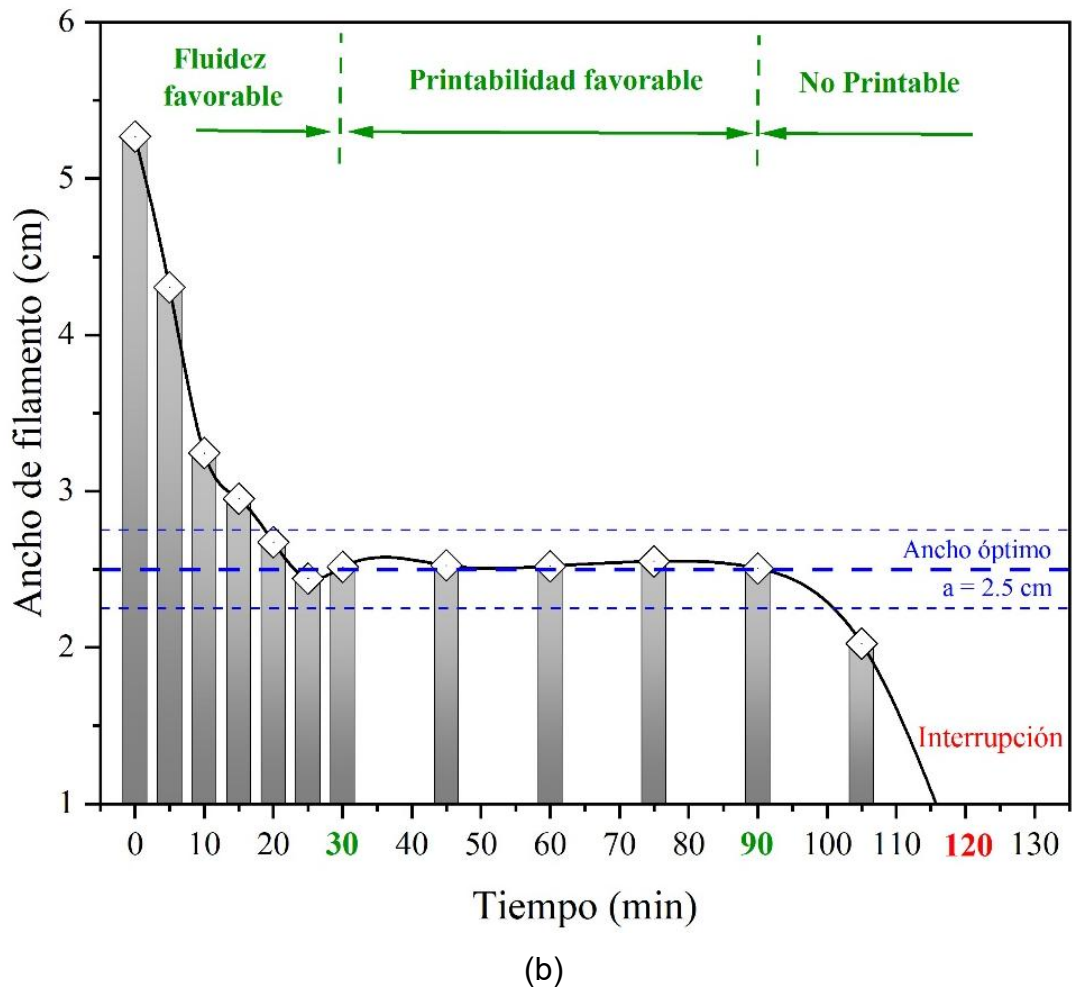
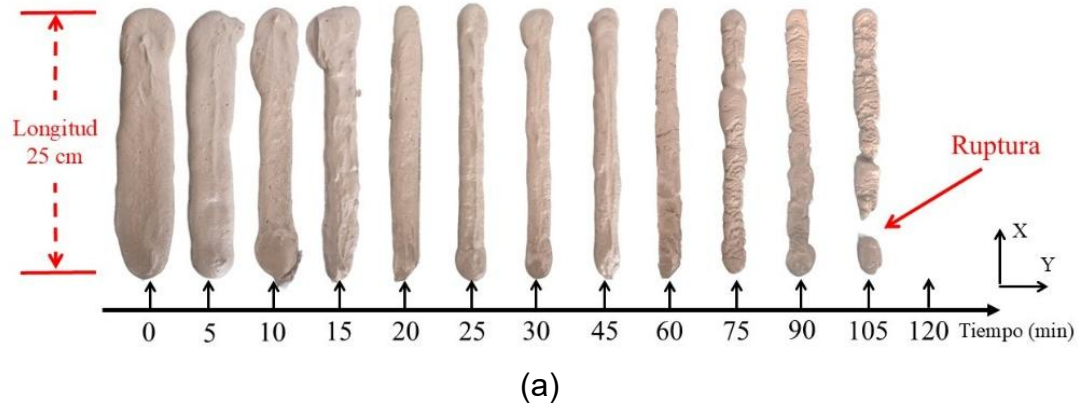


Figura 52. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 70% de TPE y $a/cm = 0.30$.

Posteriormente, a los 30 minutos el ancho se estabilizó alcanzando el valor objetivo de 2.5 cm, observándose una zona de printabilidad favorable aproximadamente entre los 30 y 90 min y con ello un tiempo abierto de 60 min; después de este punto, el filamento tendió a reducir su ancho y hacia el final del ensayo se observó una ruptura e interrupción (≈ 120 min), indicando pérdida de continuidad por rigidización del material ^[34].

Por otro lado, en la pasta con 80% de TPE y $a/cm=0.30$ (Figura 53), el filamento se mantuvo cercano al ancho objetivo al inicio de la impresión, con un tiempo abierto de printabilidad más corto (≈ 25 min). Después, el ancho disminuyó por debajo del rango objetivo y la extrusión perdió estabilidad, culminando en la ruptura alrededor de los 90 min. Asimismo, para la pasta con 90% de TPE (Figura 54) la ventana favorable fue aún más reducida (≈ 20 min); posteriormente predominó el adelgazamiento y la pérdida de estabilidad, observándose ruptura a partir de ~ 105 min e interrupción total a los 120 min.

Estos resultados mostraron que al incrementar el contenido de TPE del 70 al 90% se acortó el tiempo abierto de printabilidad hasta en un 67%, aun cuando la extrusión pudo mantenerse durante más tiempo antes de la interrupción total. Este comportamiento se debe al contenido de finos del TPE que favoreció una estructuración más rápida y un incremento progresivo de la resistencia al flujo, lo que se reflejó en el adelgazamiento del filamento, la pérdida de reproducibilidad geométrica y, finalmente, a la ruptura de este ^[23,121,167]. Esto indicó que dentro de las pastas printables evaluadas, la formulación con 70% TPE proporcionó la ventana operativa más amplia (≈ 1 h de printabilidad), mientras que las pastas con 80-90% de TPE exigieron tiempos de impresión más cortos, sugiriendo ajustes de formulación y proceso para mantener una extrusión estable.

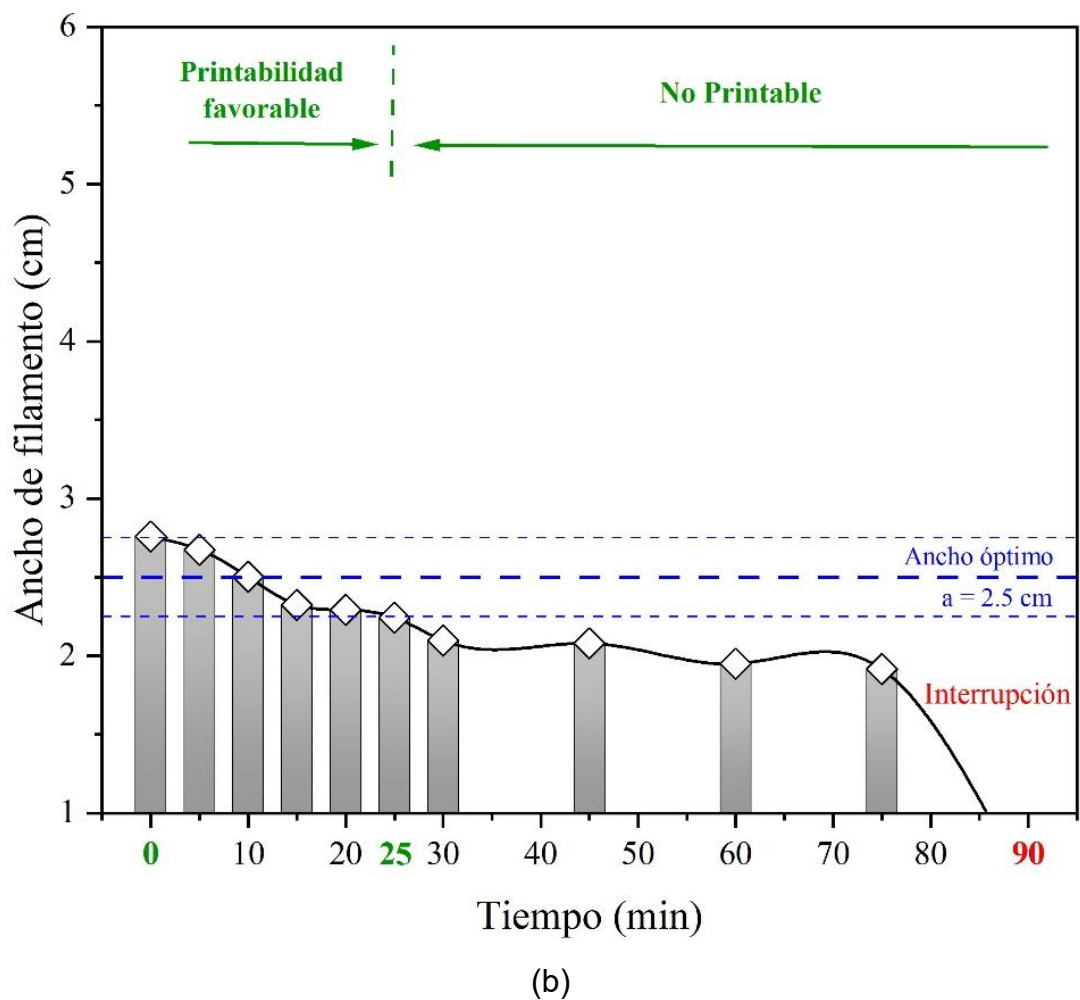
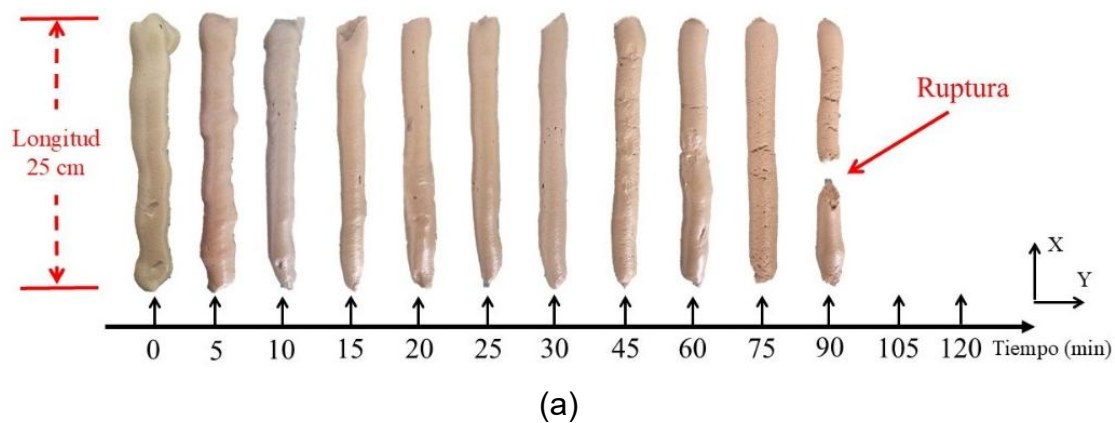


Figura 53. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 80% de TPE y $a/\text{cm} = 0.30$.

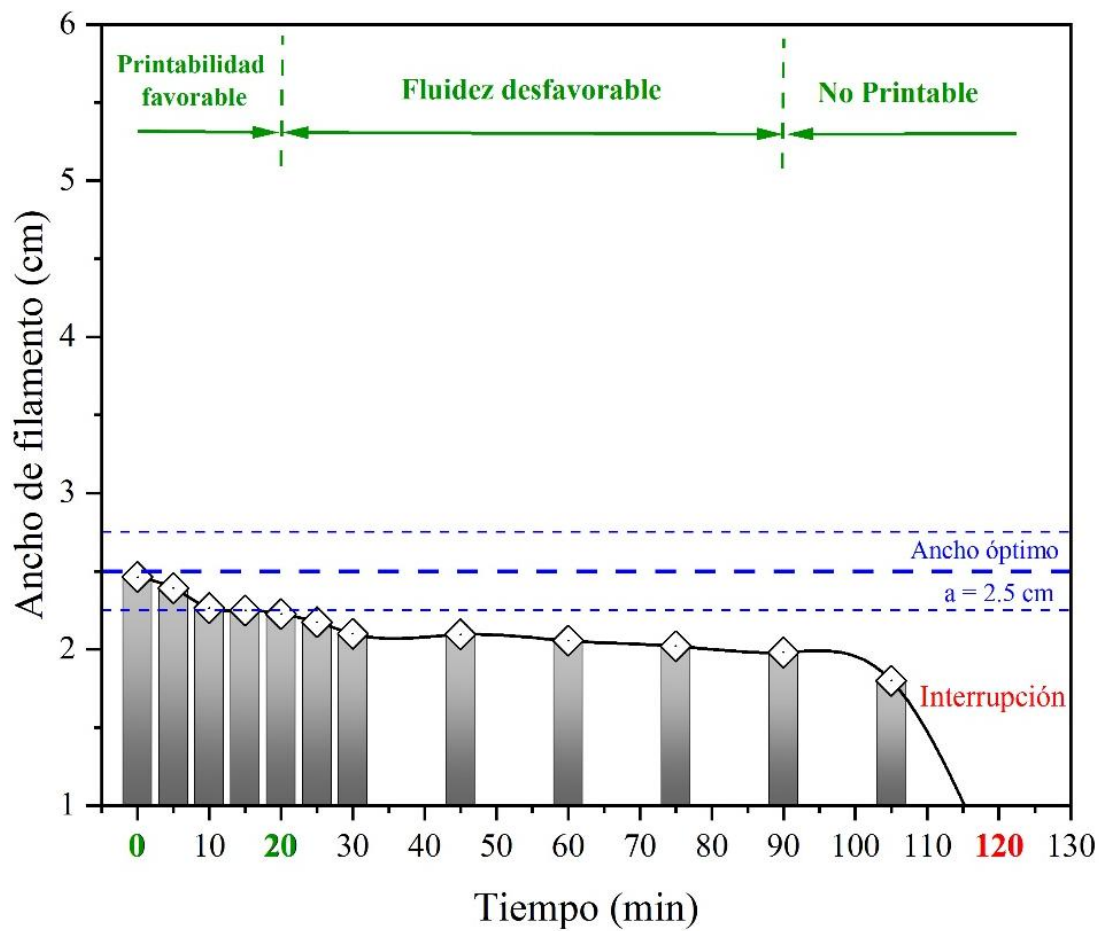
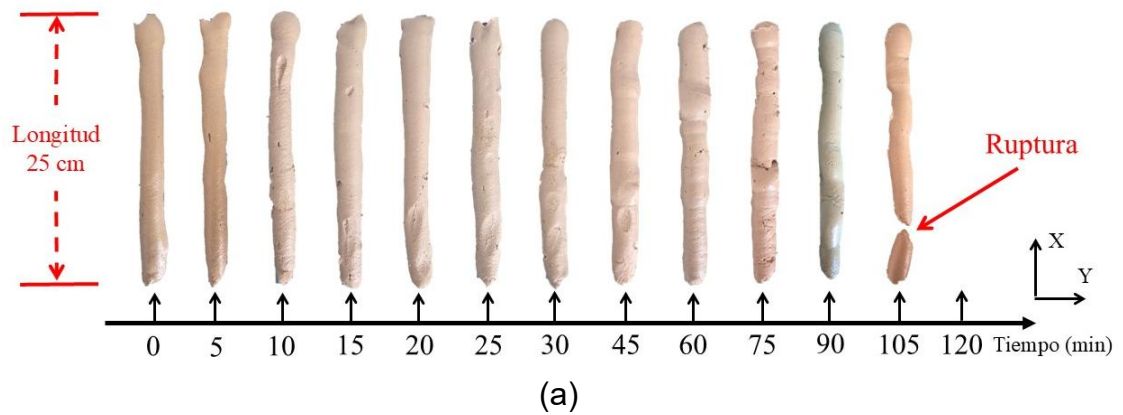


Figura 54. Resultados de la prueba de tiempo abierto: a) esquema fotográfico de los filamentos extruidos a lo largo del tiempo; b) evolución del ancho del filamento (cm) en función del tiempo para la pasta con 90% de TPE y $a/\text{cm} = 0.30$.

4.4. Propiedades reológicas.

4.4.1. Curvas de flujo de las pastas printables.

En las Figuras 55-57 se presentan las curvas de flujo de las pastas printables ($a/cm=0.30$) medidas en un intervalo de 0-120 min y ajustadas con el modelo de Herschel-Bulkley. En los tres casos se observó un comportamiento no newtoniano con adelgazamiento por corte tipo pseudoplástico; además, a medida que avanzó el tiempo, las curvas tendieron a desplazarse hacia arriba para una misma tasa de corte, lo que indicó un incremento progresivo de la resistencia al flujo por estructuración física (tixotropía) y por la evolución temprana del sistema (floculación y productos iniciales de hidratación) [30,33,133].

El aumento del contenido de TPE incrementó la magnitud del esfuerzo de corte y aceleró su evolución temporal. P. ej., la pasta con 70% de TPE (Figura 55) mantuvo esfuerzos de corte iniciales entre ≈ 0 -26 Pa en el dominio de medición y mostró un incremento gradual en el tiempo, asociado con una ventana operativa más amplia observada en el tiempo abierto. Por otro lado, con 80% de TPE (Figura 56) los esfuerzos de corte incrementaron entre ≈ 0 -149 Pa. Además, se observó en el intervalo de tiempo de 105 a 120 min un incremento de ≈ 74 Pa a 149 Pa respectivamente. Esto nos sugiere que, pasado este intervalo de tiempo, la pasta requirió el doble de esfuerzo de corte para generar el flujo, este incremento se le atribuye a la fracción arcillosa que genera una mayor cohesión

a la pasta pasados los 90 min, lo cual coincidió con lo observado en la prueba del tiempo abierto, pasado este tiempo, la pasta dejó de ser extruible [34,38,39].

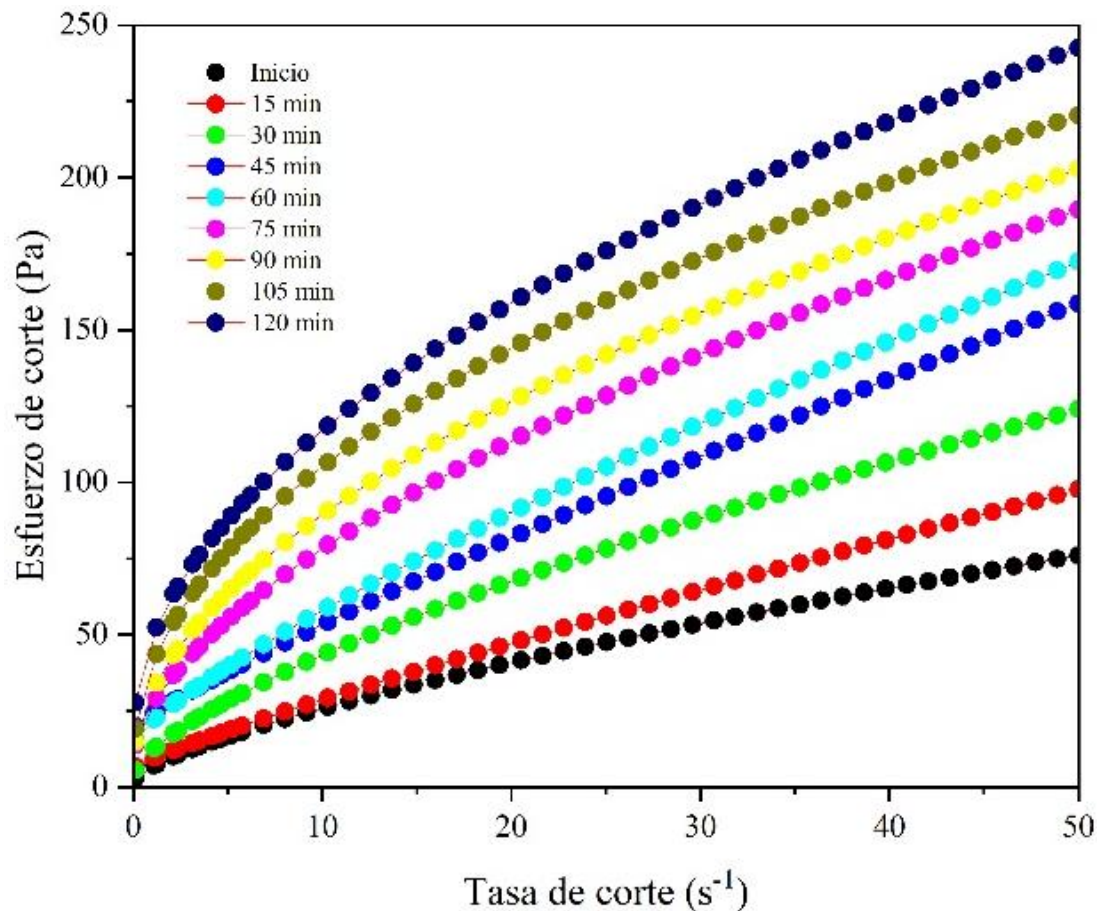


Figura 55. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 70% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.

Interesantemente, el efecto se intensificó cuando el contenido de TPE fue del 90% (Figura 57), donde los esfuerzos oscilaron ≈ 910 Pa hacia los últimos intervalos, se observaron valores de 0-200 Pa en los primeros 60 min, de ≈ 200 -400 Pa a los 90 min y de ≈ 400 -900 a los 120 min, sugiriendo un incremento exponencial del esfuerzo de corte a un intervalo de tiempo constante; este comportamiento concuerda con la disminución del ancho de extrusión a tiempos

intermedios en el ensayo de tiempo abierto. Asimismo, la pasta tuvo un comportamiento dilatante en los primeros 30 minutos, posterior a este tiempo se presentó el comportamiento pseudoplástico, confirmando la extrudabilidad continua hasta los 90 minutos previo a rigidizarse.

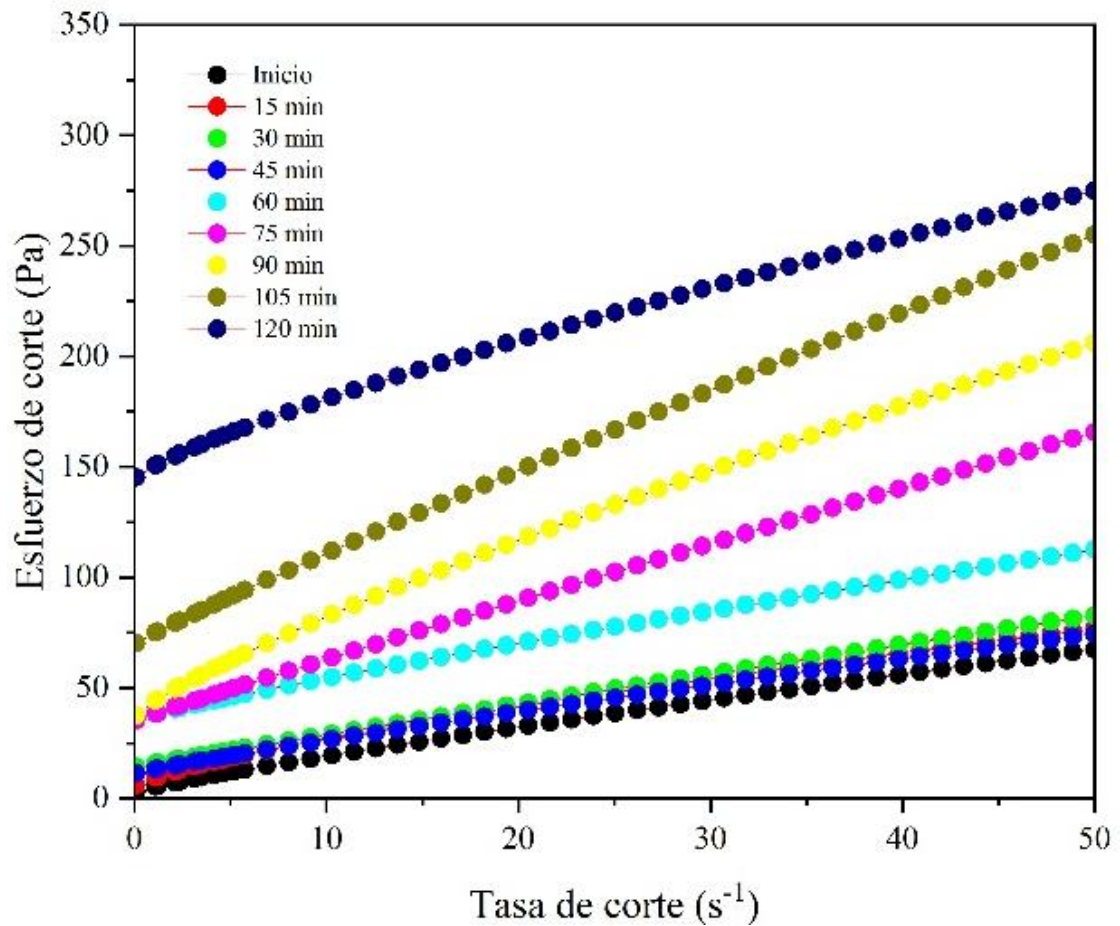


Figura 56. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 80% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.

Por lo tanto, las curvas de flujo confirmaron que a una a/cm constante, incrementar el contenido de TPE generó una pasta más cohesiva en función del tiempo, lo cual redujo el tiempo abierto e incrementó los esfuerzos de corte exponencialmente a medida que el TPE variaba en porcentajes del 70% al 90%.

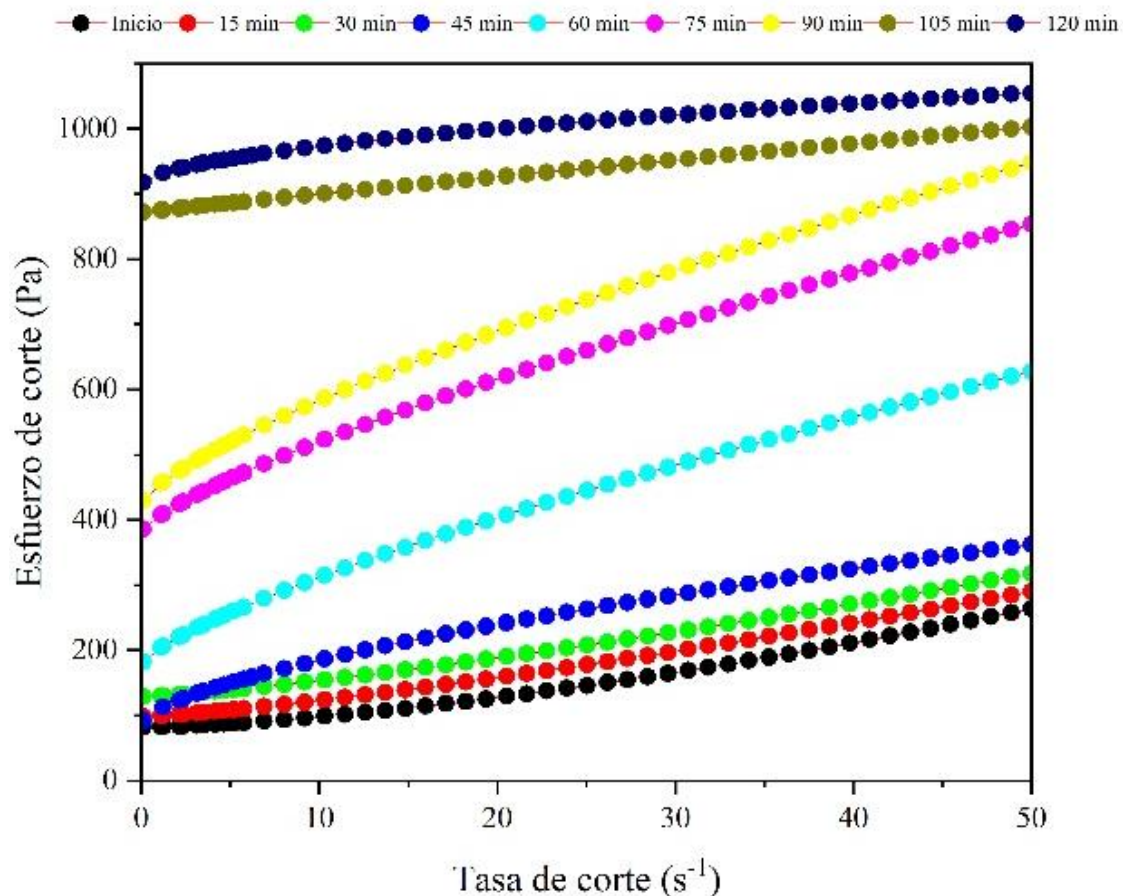
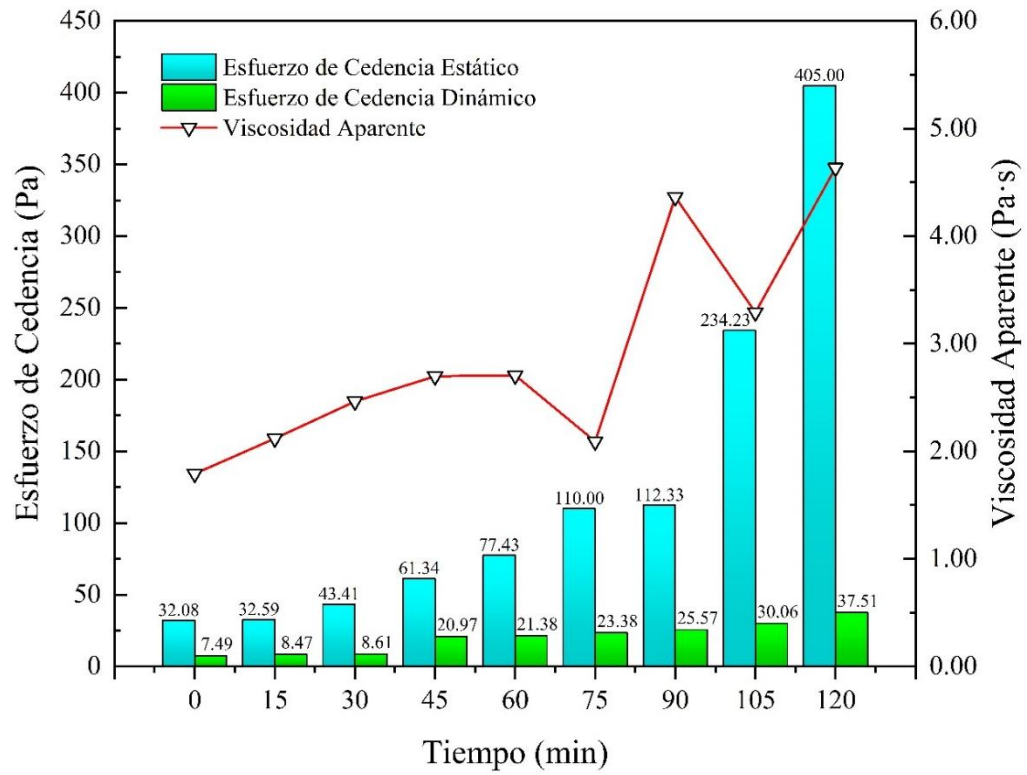


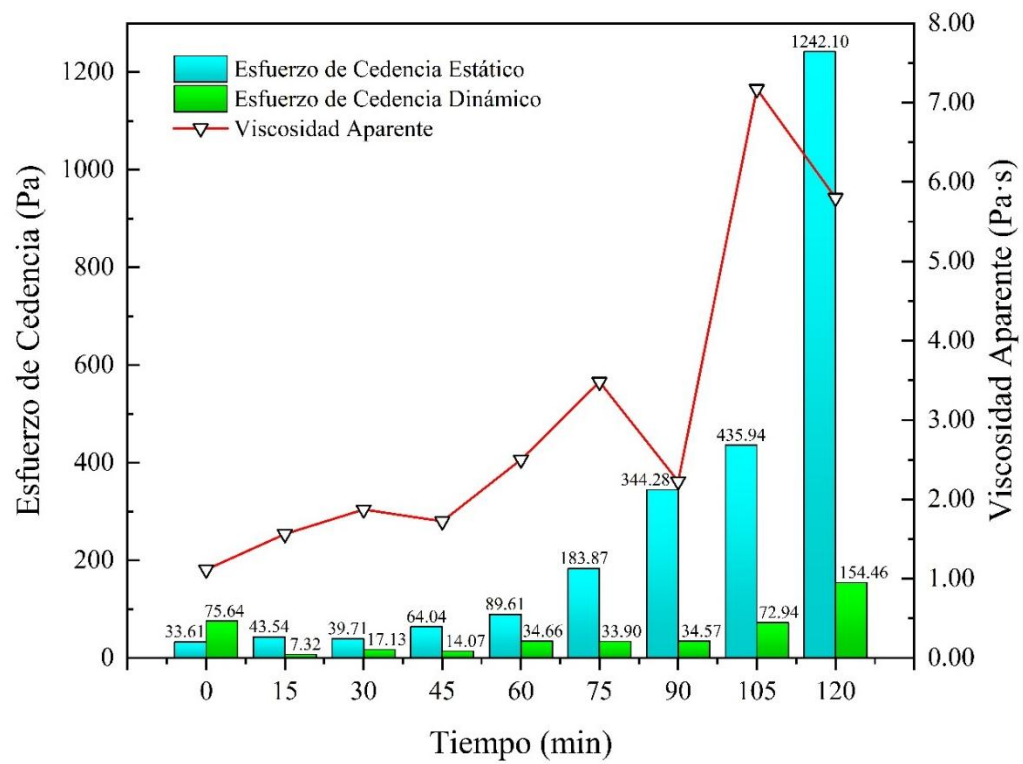
Figura 57. Resultados de curvas de flujo de la pasta con 90% de TPE y $a/cm = 0.30$ a diferentes intervalos de tiempo aplicando el modelo reológico de Herschel-Bulkley.

4.4.2. Esfuerzos de cedencia estáticos, dinámicos y viscosidades aparentes de las pastas printables.

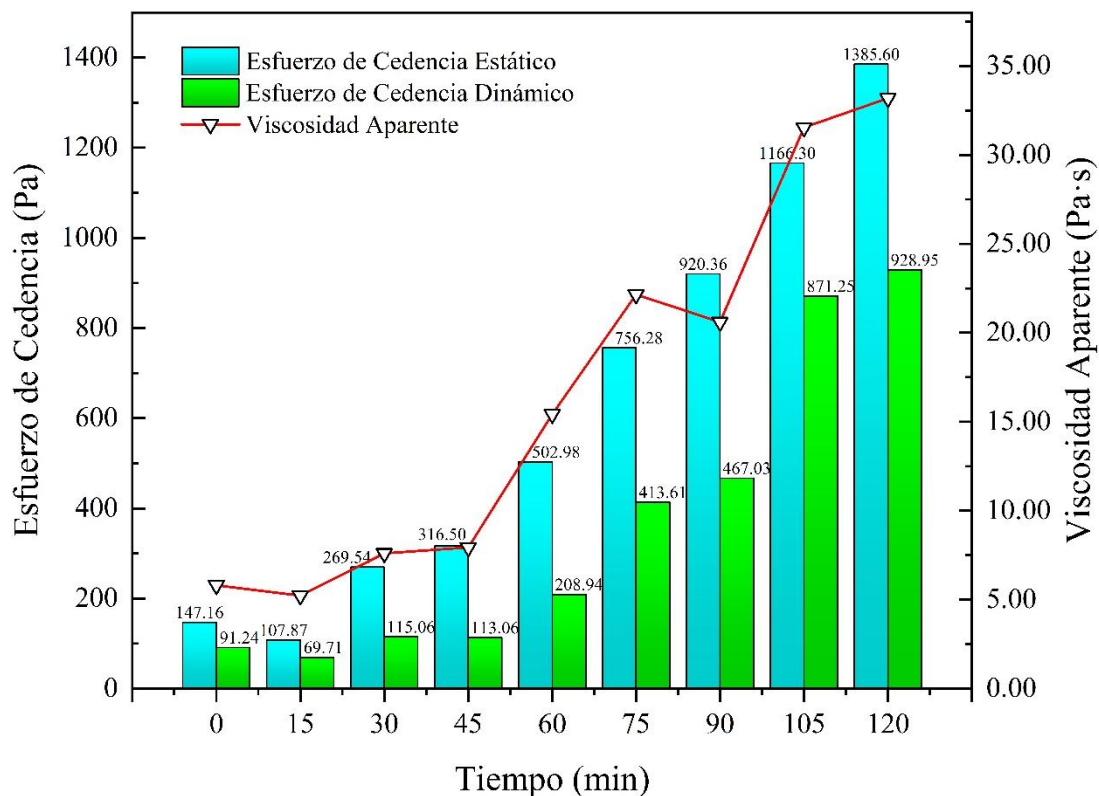
En la Figura 58 se observó que, para las tres pastas printables ($a/cm=0.30$), la respuesta reológica evolucionó con el tiempo por estructuración y avance de la hidratación: el ECE y el ECD aumentaron de forma no lineal, siendo siempre el primero mayor que el segundo, mientras que la viscosidad aparente varió en un rango entre 1.80-33.00 Pa·s.



(a)



(b)



(c)

Figura 58. Resultados comparativos de ECE, ECD y viscosidades aparentes en el tiempo para pastas con: a) 70% TPE y $a/cm = 0.30$; b) 80% TPE y $a/cm = 0.30$ y c) 90% TPE y $a/cm = 0.30$.

Para 70% de TPE (Fig. 58a), el material mostró el comportamiento más estable dentro del intervalo de ensayo. P. ej., el ECE pasó de ≈ 32 Pa (inicio) a ≈ 405 Pa (120 min), mientras que el ECD incrementó de ≈ 7 -9 Pa a ≈ 38 Pa. La viscosidad aparente se mantuvo en un rango bajo de entre ≈ 2 -5 Pa·s, manteniendo un incremento casi constante en el intervalo de 0 a 60 min, sin embargo, pasado ese período de tiempo la viscosidad se duplicó, incrementando el ECE de 112.33 a 234.23 Pa, sugiriendo un incremento en las tasas de corte para generar el flujo del material una vez alcanzado los 90 min. Este comportamiento explicó el por qué a los 90 minutos los filamentos dejaron de ser extruidos en el tiempo abierto. Por otro lado, el ECD fue inferior al ECE en todos

los casos, mostrando un incremento casi lineal con respecto del tiempo, esta condición sugiere que el material tiene la capacidad de poder ser extruido sin generar su flujo durante la deposición de las capas subsecuente, lo cual concordó con una edificabilidad máxima del 90% y una printabilidad favorable del 83% [23].

En otro orden de ideas, cuando se incorporó el 80% de TPE (Fig. 58b), el ECE aumentó desde ≈ 34 Pa hasta los ≈ 1242 Pa (120 min), mostrando un incremento a partir de los 45 minutos, pero el ECD a los 15 min se mantuvo en valores superiores al ECE, esto debido a una alta fluidez atribuida a la lenta reacción del CP con el TPE [166], pero pasado este intervalo la pasta comenzó a presentar el mismo comportamiento que en la mezcla del 70% con TPE, sin embargo, tanto la viscosidad aparente como el ECE se duplicaron a los 60 min y posteriormente se cuadruplicaron a los 90 min, mostrando una tendencia simultáneamente exponencial. Esto demostró que la pasta tuvo la capacidad de imprimir filamentos en intervalos de tiempo tempranos (<15 min) pero a un tiempo abierto de impresión más corto de 25 min comparado con los 60 min de la mezcla con 70% TPE. También explicó como con una buena calidad de extrusión (89%) y extrudabilidad aceptable (67%), la pasta presentó una ventana operativa más sensible: su tiempo abierto se redujo respecto a 70% TPE y su edificabilidad fue limitada (30%), porque el material pasó relativamente rápido de una condición extruible a un estado de mayor resistencia interna que favoreció discontinuidades del filamento impreso conforme avanzó el tiempo.

Por otro lado, la pasta con 90% de TPE (Fig. 58c), fue la que tuvo un comportamiento reológico más alto y con la mayor tasa de endurecimiento y estructuración [17,23,34]. P.ej., el ECE evolucionó de ≈ 147 Pa a ≈ 1386 Pa, y el ECD de ≈ 91 Pa a ≈ 929 Pa de 0 min a los 120 min. La viscosidad aparente se ubicó en el rango más elevado entre 5-33 Pa·s, con incrementos lineales a partir de los 45 min. Este comportamiento coincidió en que (i) su tiempo abierto fue el más corto (ruptura temprana del filamento) y (ii) correspondió con una edificabilidad baja

(20%), aunque la mezcla haya conservado una extrudabilidad aceptable (74%) y calidad de extrusión alta (95%), la rápida ganancia de ECE/ECD y el aumento de viscosidad aparente incrementaron la demanda del esfuerzo de extrusión y, por lo tanto, favorecieron la pérdida de continuidad (interrupción), lo que limitó el apilamiento de las capas.

4.5. Optimización multivariable con base en el desempeño reológico, mecánico y de printabilidad.

En esta sección se discutió el desempeño de las pastas considerando los tres dominios experimentales: la RC en cubos a los 7 y 28 días (MPa), la printabilidad (%) y la caracterización reológica considerando el ECE y ECD (Pa), identificando las combinaciones con mayor potencial de optimización con base en la resistencia objetivo de 7 MPa y una printabilidad en el rango de lo aceptable o superior (>60%) para el diseño de la TCI3D con TPE y CP.

4.5.1. Modelamiento de las pastas de TPE/CP para impresión 3D mediante el MSR.

En la tabla 6 se muestran los modelos de regresión para cada una de las respuestas, así como sus respectivos R^2 considerando como factores el TPE (A), la a/cm (B), la interacción de ambos (AB) y el término cuadrático (AA) (Ec. 28-31).

En todos los casos se obtuvieron coeficientes de determinación $R^2 > 80\%$, con excepción del modelo del ECD, cuyo R^2 fue de 76.41%. Los modelos de RC mostraron un R^2 de 98.99% y 98.73% a 7 y 28 días respectivamente, lo que indicó un ajuste robusto del modelo y que la variación de la RC quedó influenciada por el contenido de TPE y la relación a/cm [93,148]. De forma general, los términos lineales negativos de TPE y a/cm mostraron la disminución de resistencia y de cohesión al aumentar la sustitución de TPE y el contenido de agua, mientras que los términos cuadráticos e interacción sugirieron la existencia de valores intermedios de TPE y a/cm que maximizan la RC y la printabilidad, así como valores mínimos a partir de los cuales la mezcla se vuelve demasiado fluida o cohesiva. Asimismo, en los modelos de ECE y ECD los términos cuadráticos del TPE resultaron dominantes, evidenciando una respuesta fuertemente no lineal en la que valores intermedios de TPE mostraron un incremento en las propiedades de printabilidad, pero sustituciones elevadas generaron aumentos acelerados de los esfuerzos de cedencia [35].

La jerarquía e impacto de los factores se apreció en los diagramas de Pareto (Figuras 59-63), que resumen los resultados del ANOVA con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0.05$), para el cual todos los efectos que superaron la línea de referencia (≈ 2.09) presentaron un $p\text{-value} < 0.05$. Para la RC a 7 y 28 días (Figuras 59 y 60) el factor A fue el efecto estandarizado dominante, seguido por B y por los términos AA y AB. Esto confirmó que la RC fue influenciada principalmente por el contenido de TPE y, en segundo término, por la cantidad de agua, con una contribución no despreciable de la curvatura en el TPE y de la interacción entre factores, lo que justifica el empleo de un modelo cuadrático de MSR en lugar de un modelo lineal simple [93].

Tabla 6. Modelos de regresión obtenidos mediante MSR para las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

Variable de respuesta	Unidades	Modelo de regresión	R ² (%)
Resistencia de compresión en cubos (7 días)	MPa	$RC_{7días} = 130.82 - 1.931(TPE) - 212.10\left(\frac{a}{cm}\right) + 0.005537(TPE)^2 + 2.306(TPE)\left(\frac{a}{cm}\right)$ Ec. 28	98.99
Resistencia de compresión en cubos (28 días)	MPa	$RC_{28días} = 272.4 - 4.980(TPE) - 323.9\left(\frac{a}{cm}\right) + 0.02149(TPE)^2 + 3.690(TPE)\left(\frac{a}{cm}\right)$ Ec. 29	98.73
Printabilidad (P)	%	$P = -68 + 4.99(TPE) + 690\left(\frac{a}{cm}\right) + 0.0138(TPE)^2 - 23.40(TPE)\left(\frac{a}{cm}\right)$ Ec. 30	88.02
Esfuerzo de Cedencia Estático (ECE)	Pa	$ECE = 4477 - 85.4(TPE) - 6175\left(\frac{a}{cm}\right) + 0.4110(TPE)^2 + 67.3(TPE)\left(\frac{a}{cm}\right)$ Ec. 31	80.65
Esfuerzo de Cedencia Dinámico (ECD)	Pa	$ECD = 322 - 11.27(TPE) + 925\left(\frac{a}{cm}\right) + 0.1197(TPE)^2 - 18.40(TPE)\left(\frac{a}{cm}\right)$ Ec. 32	76.41

En el caso de la printabilidad (Figura 61), el efecto principal de B superó ampliamente al resto de los términos, mientras que A y AB mostraron efectos menores, pero todavía significativos y el término cuadrático AA no superó el umbral estadístico. Esto indicó que, dentro del dominio experimental, la variación de la relación a/cm fue el factor que tuvo mayor influencia para controlar la printabilidad de las pastas y que tanto la cantidad de TPE como la interacción de ambos tuvo un efecto muy bajo pero significativo.

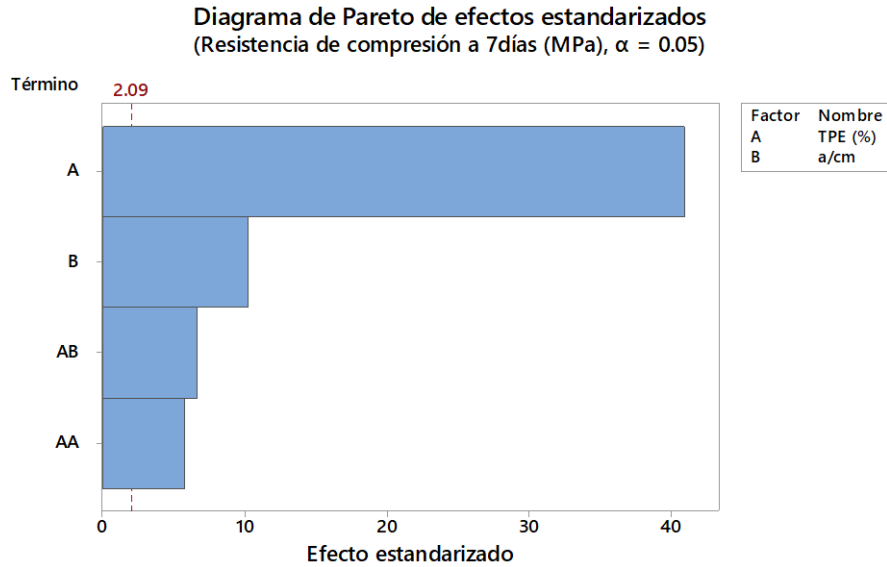


Figura 59. Gráfica de Pareto para resistencia de compresión en cubos a 7 días de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

Por otro lado, para el ECE y el ECD (Figuras 62 y 63) el término cuadrático AA resultó el más importante, seguido de B y luego de A y AB, todos por encima de la línea de significancia. Esta jerarquía confirmó que las propiedades reológicas dependieron fuertemente de la naturaleza no lineal del contenido de TPE [93,148,149]. Sin embargo, para el caso del ECD, la a/cm tuvo un efecto casi similar al término cuadrático del TPE, sugiriendo una contribución de ambos factores para disminuir la resistencia al corte del material, generando incrementos en el ECD y en consecuencia mayor fluidez.

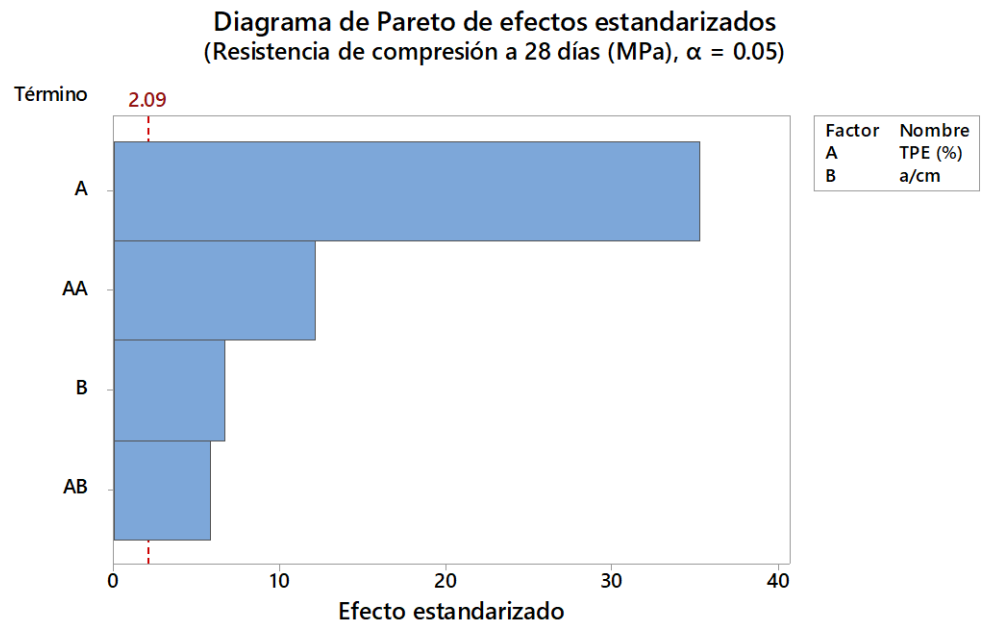


Figura 60. Gráfica de Pareto para resistencia de compresión en cubos a 28 días de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

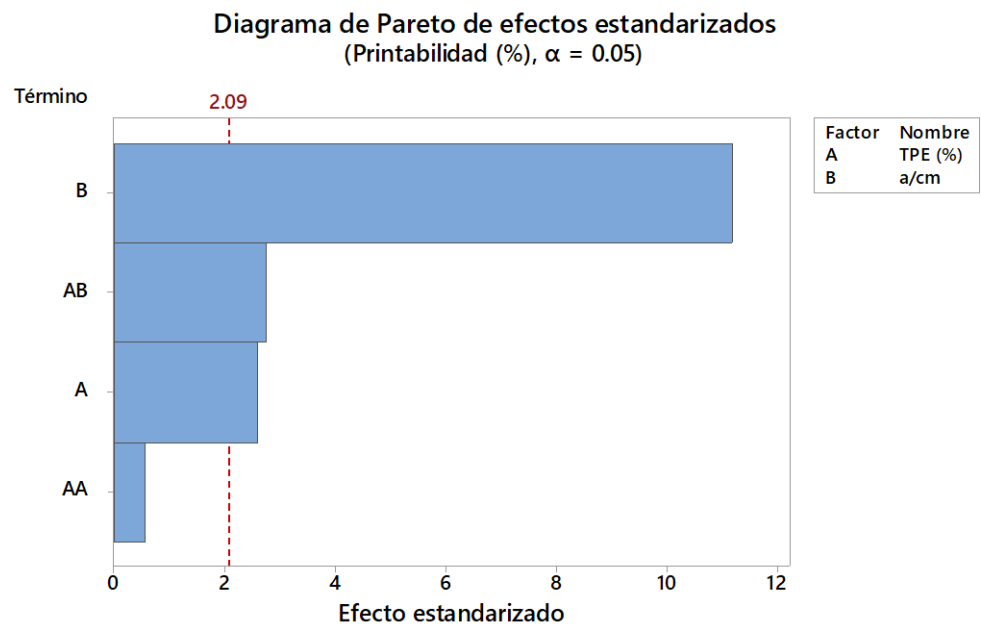


Figura 61. Gráfica de Pareto para la printabilidad de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

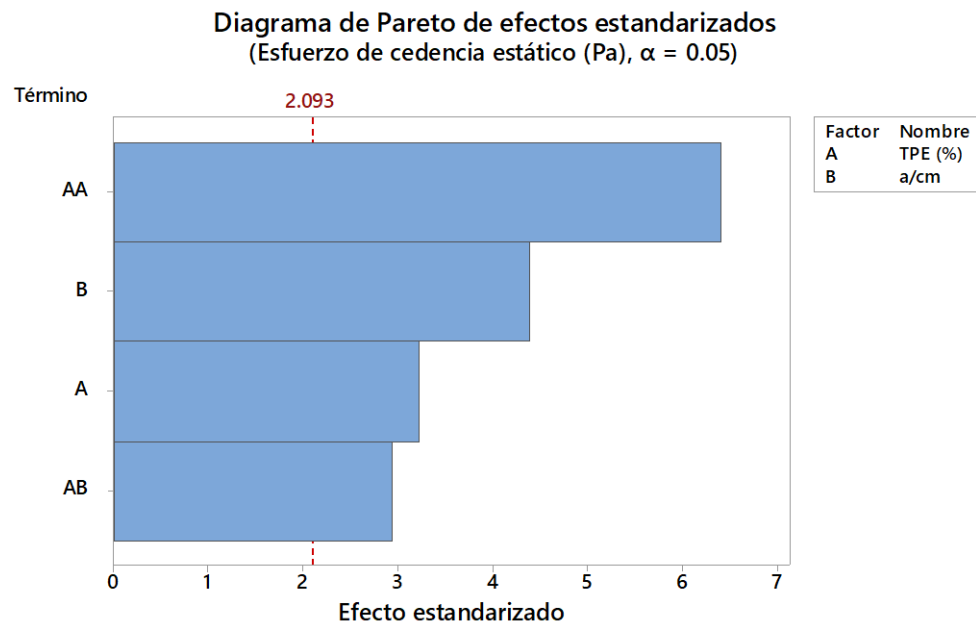


Figura 62. Gráfica de Pareto para el esfuerzo de cedencia estático de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

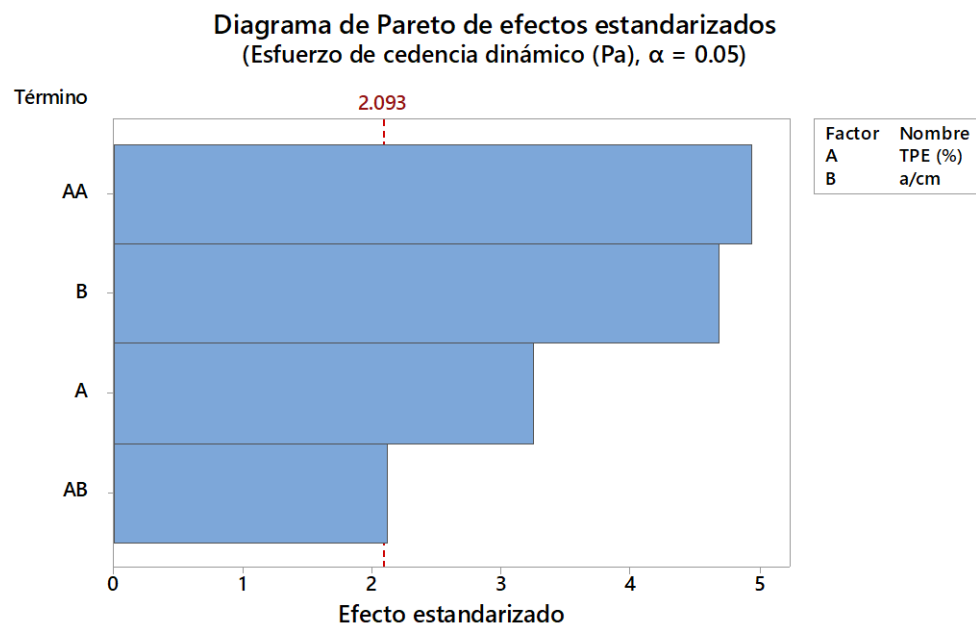


Figura 63. Gráfica de Pareto para el esfuerzo de cedencia dinámico de las pastas de TPE/CP para impresión 3D.

Tabla 7. Resumen de resultados de cada una de las propiedades evaluadas.

a/cm	TPE (%)	RC en cubos (5×5×5 cm)				Printabilidad (%)	D.E. (σ)	ECE (Pa)	D.E. (σ)	ECD (Pa)	D.E. (σ)
		RC 7d (MPa)	D.E. (σ)	RC 28d (MPa)	D.E. (σ)						
0.30	60	12.62	0.36	21.01	0.42	55.00	1.53	225.89	1.29	30.70	1.07
	70	8.14	0.30	8.01	0.17	83.00	2.08	32.08	0.47	7.49	0.34
	80	2.87	0.25	3.55	0.23	62.00	1.15	43.54	0.12	7.32	0.40
	90	0.76	1×10 ⁻³	0.84	0.05	63.00	1.53	107.87	0.56	69.71	0.56
0.35	60	8.93	0.34	14.87	0.54	41.00	2.08	61.35	0.82	3.96	0.81
	70	5.46	0.09	6.08	0.15	3.00	0.00	27.59	0.23	1.55	0.11
	80	1.79	0.22	2.46	0.16	3.00	0.00	29.60	0.87	4.88	0.75
	90	0.38	0.02	0.57	0.03	3.00	0.00	55.32	1.28	11.63	0.83

Nota: TPE: Tierra producto de excavación; a/cm: relación agua/aglutinante; RC: Resistencia de compresión; D.E.: Desviación estándar; ECE: Esfuerzo de cedencia estático; ECD: Esfuerzo de cedencia dinámico.

4.5.2. Superficies de respuesta de las pastas de TPE/CP para impresión 3D mediante el MSR.

Con base en los modelos obtenidos mediante el MSR, se generaron las superficies de respuesta y los diagramas de contorno para evaluar el efecto simultáneo del contenido de TPE (%) y la relación a/cm sobre la RC (7 y 28 días), la printabilidad (%) y los esfuerzos de cedencia (estático y dinámico) de las pastas TPE/CP para impresión 3D (Figuras 64-68). En general, las gráficas permitieron identificar no solo la dirección del cambio de cada respuesta, sino también las regiones donde los efectos fueron apreciables y se presentaron las relaciones entre el desempeño mecánico, reológico y de printabilidad.

En la Figura 64, la RC a 7 días presentó una tendencia decreciente al incrementar el contenido de TPE, con una variación prácticamente monótona desde valores entre 60-65% hasta valores mínimos de 85-90% (Figura 64a). Esta influencia del contenido de TPE se observó en el grafico de contorno (Figura 64b), donde las bandas fueron casi paralelas al eje de la a/cm , indicando que, dentro del intervalo evaluado, la a/cm tuvo un efecto secundario con respecto al efecto del porcentaje de sustitución de TPE. En términos de desempeño, la región con $RC_{7d} \geq \sim 7$ MPa se concentró aproximadamente por debajo del ~ 70 -72% de TPE, con una mejoría al utilizar a/cm más bajas.

Asimismo, para la RC a 28 días (Figura 65), se observó la misma tendencia. P. ej., la RC_{28d} disminuyó conforme aumentó el TPE, con puntos máximos en el extremo del 60% TPE y mínimos entre 80-90% TPE (Figura 65a). El diagrama de contorno (Figura 65b) mostró que el contenido de TPE controló mayoritariamente la respuesta, ya que la influencia de a/cm fue comparativamente menor dentro del rango 0.30-0.35. En consecuencia, la región con $RC_{28d} \geq \sim 7$ MPa se ubicó de manera aproximada para contenidos de TPE inferiores a ~ 73 -75%, mientras que por encima de ese intervalo la resistencia

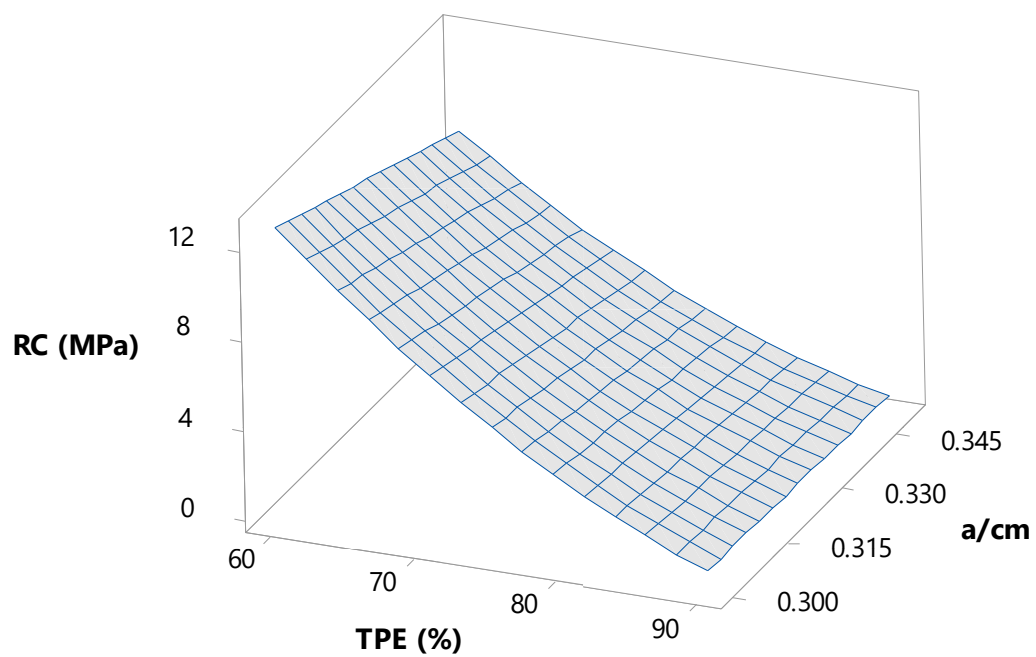
tendió a disminuir a rangos bajos. Este comportamiento fue coherente con un efecto de dilución del aglutinante, es decir, al aumentar el TPE se redujo la cantidad de CP disponible para formar productos de hidratación continuos, limitando la densificación microestructural y la ganancia de resistencia, especialmente cuando el contenido de TPE fue elevado [21,166].

En cuanto a la printabilidad (Figura 66), la superficie mostró un comportamiento condicionado por la relación a/cm . La printabilidad se redujo sistemáticamente al aumentar la a/cm (Figura 66a). En el gráfico de contorno (Figura 66b) se distinguió una región favorable en la parte baja del gráfico (aprox. $a/cm \leq 0.31-0.32$), donde la printabilidad alcanzó los valores más altos ($\approx 50-60\%$) a lo largo de un intervalo amplio de TPE. Además, al aproximarse a $a/cm \geq 0.34-0.35$ la printabilidad descendió a rangos bajos ($\approx 0-20\%$), con un decremento más fuerte cuando se combinó con contenidos de TPE altos. En términos operativos, esto sugirió que el control del contenido de agua fue decisivo para mantener la cohesión y la estabilidad geométrica durante la I3D, mientras que el porcentaje de TPE actuó como un modificador de la viscosidad, especialmente en condiciones donde las a/cm fueron mayores [17,20,145].

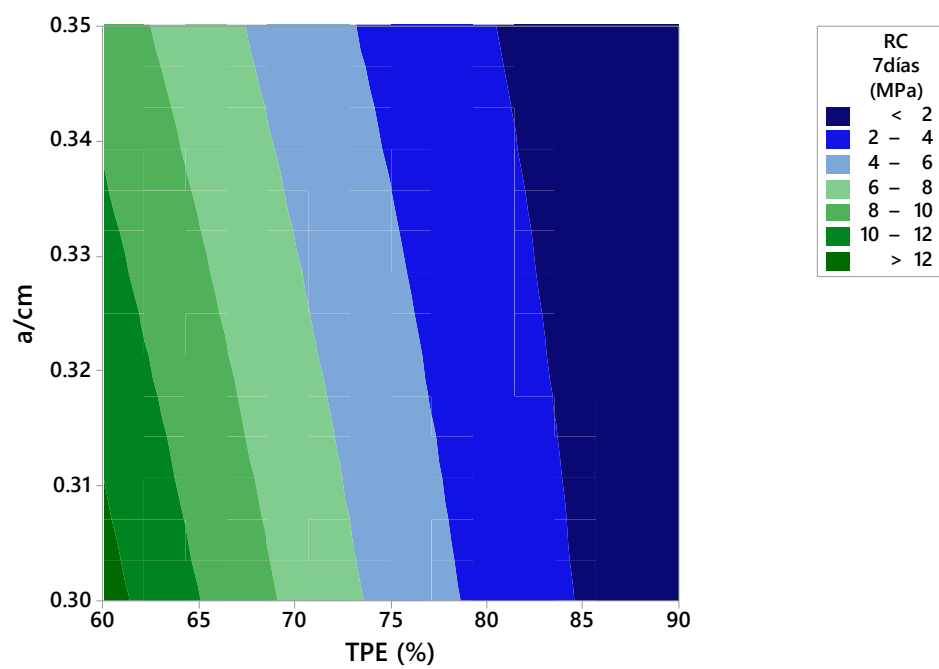
Con respecto al ECE (Figura 67), la respuesta exhibió una tendencia no lineal con respecto del contenido de TPE (Figura 67a). El contorno (Figura 67b) mostró un mínimo de ECE en una región intermedia cercana a los 75-80% de TPE hacia a/cm altos, mientras que los valores aumentaron hacia el extremo de TPE bajos (60-65%) y, en menor medida, hacia TPE altos dependiendo de la a/cm . Asimismo, disminuir la a/cm tendió a incrementar el ECE, lo cual es compatible con un aumento de la fracción sólida efectiva y la estructuración inicial de la pasta, condiciones que favorecen la cohesión en reposo necesaria para sostener capas [11,12].

El ECD (Figura 68) también presentó una respuesta cuadrática y con una región mínima (Figura 68a). El gráfico de contorno (Figura 68b) mostró valores de ECD bajos entre 70-75% de TPE cuando la a/cm fue elevada, mientras que los valores más altos se concentraron hacia TPE altos ($\approx 85-90\%$) combinados con a/cm bajas ($\approx 0.30-0.31$). Por lo tanto, el ECE y ECD confirmaron que la relación a/cm gobernó fuertemente la resistencia al flujo (al reducir a/cm aumentaron los esfuerzos de cedencia), mientras que el contenido de TPE introdujo curvatura (comportamiento no lineal) al modificar simultáneamente la demanda de agua, la resistencia al corte entre las partículas y la capacidad de estructuración [33,88,166].

En general, las Figuras 64-68 delimitaron una ventana de trabajo donde pueden identificarse el equilibrio entre comportamiento mecánico y desempeño mediante I3D. P. ej., al utilizar a/cm bajas ($\approx 0.30-0.32$) se favorecieron tanto la printabilidad como los esfuerzos de cedencia, pero la RC solo se mantuvo en rangos útiles cuando el TPE no fue excesivo (aprox. $\leq 73-75\%$ para cumplir con $RC_{28d} \geq 7$ MPa).

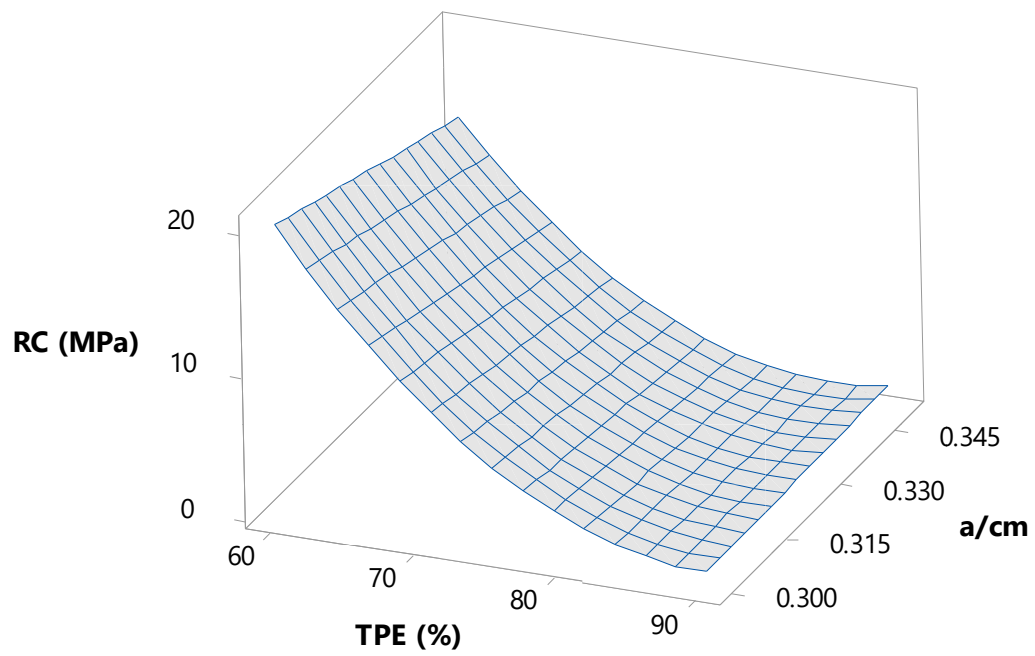


(a)

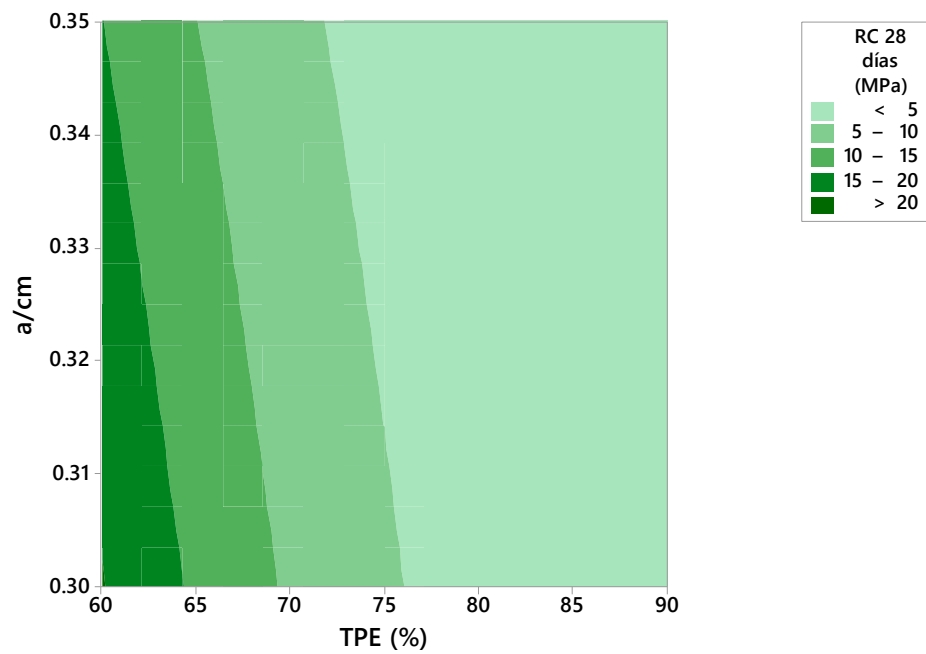


(b)

Figura 64. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la resistencia de compresión a 7 días para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.

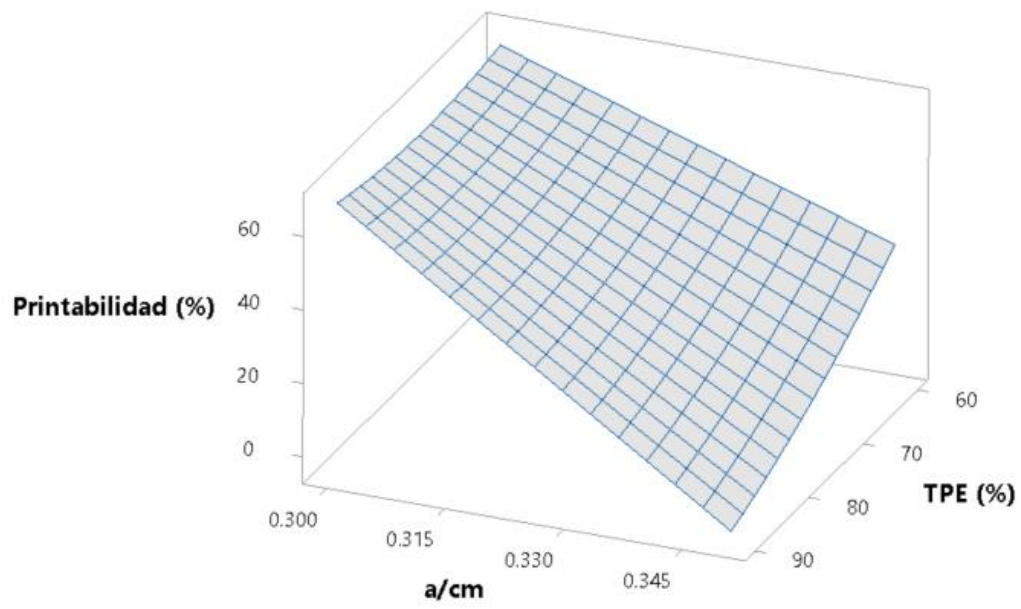


(a)

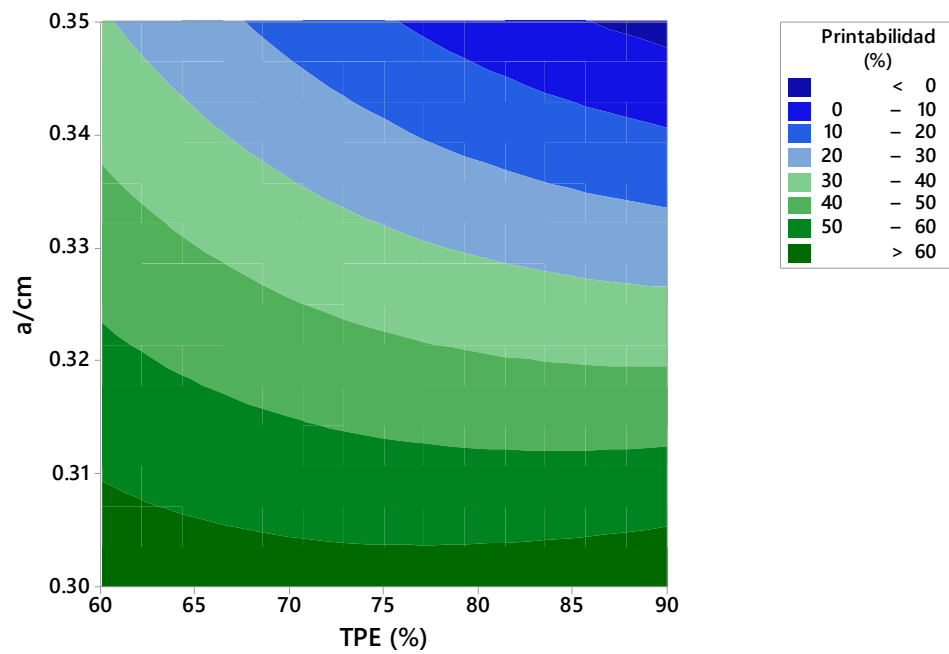


(b)

Figura 65. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la resistencia de compresión a 28 días para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.

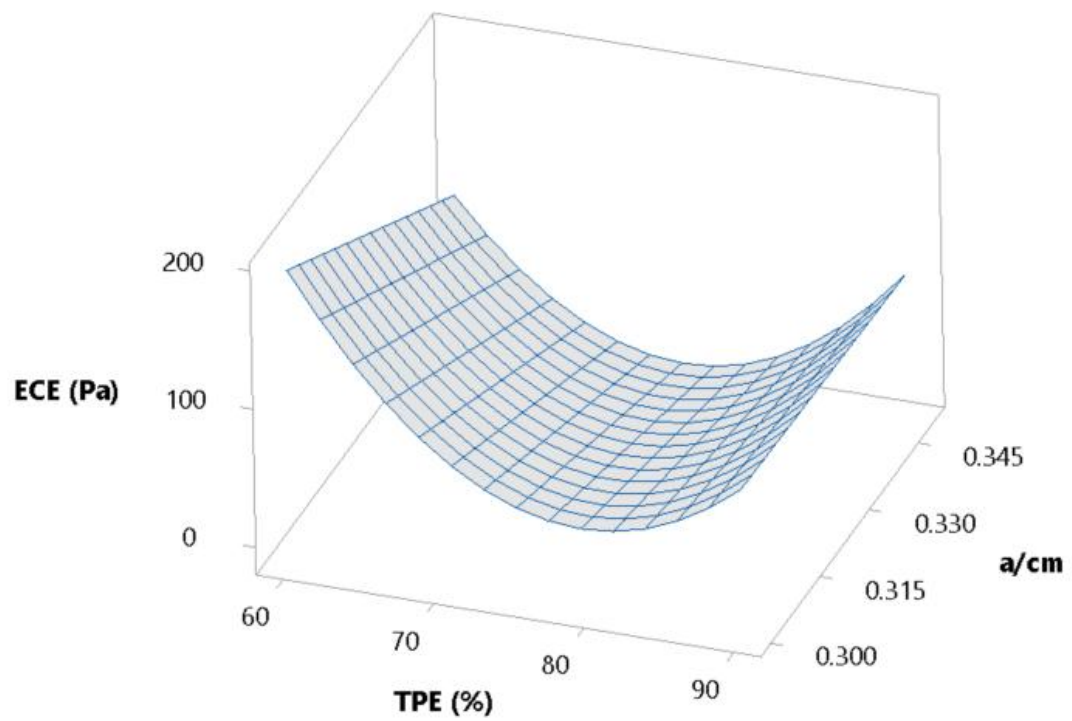


(a)

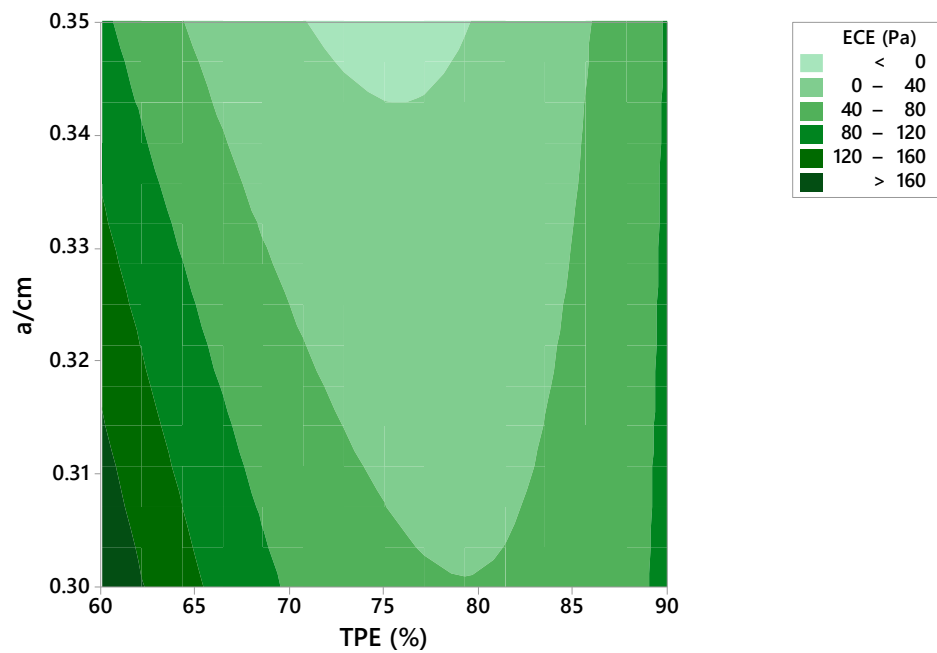


(b)

Figura 66. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno de la printabilidad para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.

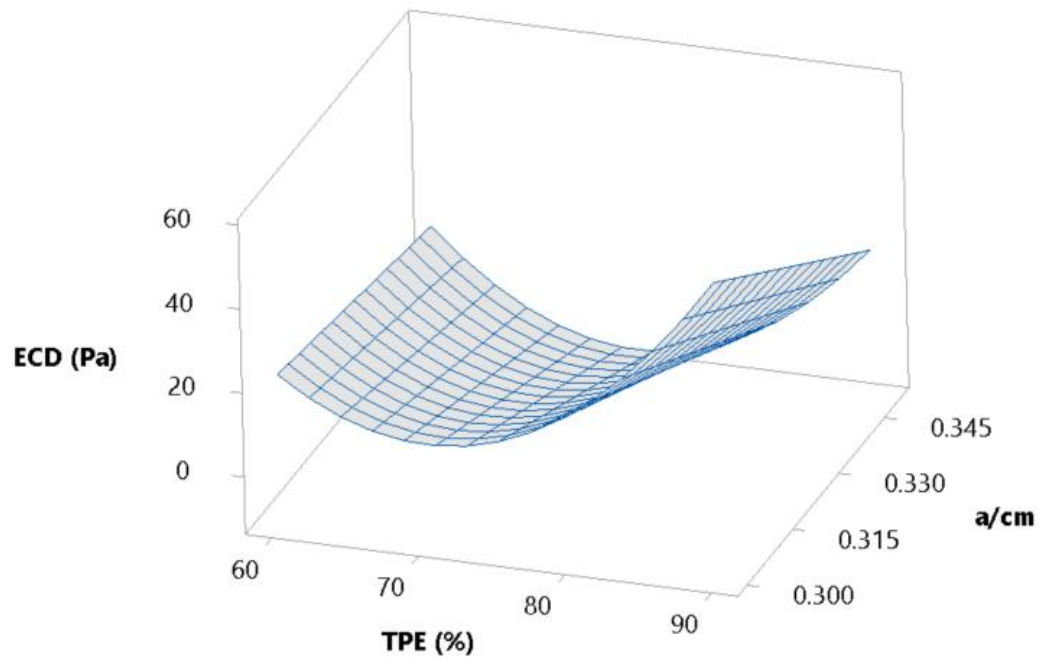


(a)

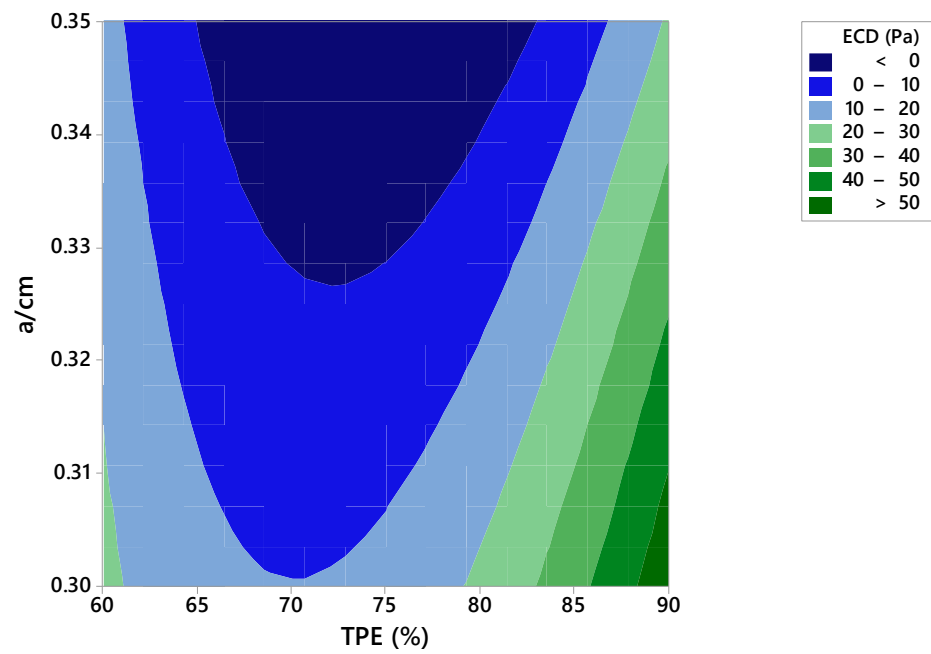


(b)

Figura 67. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno del esfuerzo de cedencia estático para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.



(a)



(b)

Figura 68. (a) Superficie de respuesta y (b) gráfica de contorno del esfuerzo de cedencia dinámico para mezclas de TPE/CP para impresión 3D.

4.5.3. Optimización de las propiedades de las pastas para la TCI3D.

El modelo de regresión de la superficie de respuesta de las pastas de TPE/CP, permitió realizar la optimización multivariable de las propiedades de la resistencia de compresión (7 y 28 días), la printabilidad, el ECE y el ECD en función de los niveles de los factores (TPE y a/cm), determinando condiciones específicas para el análisis. Con base en los resultados de la matriz experimental de esta investigación, la optimización multivariable realizada consideró:

- a) Maximizar la resistencia de compresión a 7 y 28 días, siempre y cuando sea por encima de 7 MPa en ambos casos.
- b) Maximizar la printabilidad, siempre y cuando sea por encima del 60%.
- c) Minimizar el ECE y el ECD considerados como valores iniciales de flujo.

La Tabla 8 resume los parámetros de optimización, la dosificación de la mezcla optimizada, los valores predichos por el modelo para las propiedades evaluadas y los resultados obtenidos mediante la corroboración experimental.

Esta combinación coincidió con las mezclas que, en la matriz experimental, habían mostrado simultáneamente las mayores RC y porcentajes de printabilidad dentro de los rangos aceptables. La comparación entre valores predichos y experimentales confirmó la capacidad predictiva de los modelos de MSR. Para la RC a 7 y 28 días, las diferencias fueron menores a 1 MPa (12.77 vs 12.62 MPa y 20.24 vs 21.01 MPa, respectivamente), atribuidos con los altos coeficientes de determinación obtenidos para estas respuestas ($R^2 \approx 99\%$), lo que indica que la combinación de TPE y a/cm explicó casi toda la variabilidad observada. En la printabilidad, el modelo estimó un 66.67%, mientras que experimentalmente se alcanzó 81%, manteniendo la misma tendencia de comportamiento pese a la subestimación, semejante con un R^2 intermedio ($\sim 88\%$). En el caso del ECE y el ECD, los valores predichos (193.93 y 22.52 Pa) fueron inferiores a los medidos

(225.89 y 30.70 Pa), lo que refleja la mayor dispersión de estas respuestas y los coeficientes más bajos de $\approx 81\%$ y 76% , pero preservando el orden relativo y el ajuste de los esfuerzos de cedencia de la pasta optimizada ^[93].

La deseabilidad compuesta de la solución ($D=0.61$) evidenció que el punto óptimo corresponde a un compromiso entre objetivos en conflicto, es decir, maximizar la RC y la printabilidad y, simultáneamente, mantener un ECE y un ECD en un nivel suficiente para garantizar una edificabilidad sin afectar la extrudabilidad y la calidad de extrusión. Bajo estos criterios, la combinación de 60% de TPE con una $a/cm=0.30$ satisfizo las restricciones impuestas ($RC \geq 7$ MPa, $P \geq 60\%$) y se ubicó en una región del espacio de diseño donde los modelos mostraron un buen ajuste, proporcionando una formulación para una TCI3D a base de TPE con CP técnicamente viable para su aplicación en I3D y con potencial para ser escalada a la fabricación de elementos tipo tabicón.

La figura 69 muestra el tabicón impreso en 3D con dimensiones nominales de $21 \times 14 \times 10$ cm (largo, ancho y alto respectivamente) usando la TCI3D de TPE/CP. En el cual se observa como la tinta logró imprimir el espécimen exitosamente, alcanzado las 10 capas máximas de la geometría considerada como una edificabilidad del 100%, además, las dimensiones promedio del tabicón impreso fueron de $22.40 \times 14.50 \times 9.80$ cm con respecto de las dimensiones nominales, sugiriendo una precisión dimensional relativa $>93\%$. Por lo tanto, se logró el objetivo de imprimir el tabicón 3D con una precisión dimensional relativamente aceptable, mostrando que la mezcla de TPE/CP optimizada es útil para utilizarse como TCI3D. Los resultados presentados sugieren que este tipo de mezclas podrían tener el potencial para utilizarse en la I3D de elementos con un mayor tamaño, promoviendo la escalabilidad de la misma.

Tabla 8. Resultados de la optimización de la TCI3D a base de TPE/CP.

	pasta optimizada (TCI3D)		
Factores de diseño	TPE (%)	a/cm	
	60.00	0.30	
Diseño de mezcla	Material	Cantidad (g)	
	TPE	600.00	
	CPC	400.00	
	H ₂ O	300.00	
	Total	1300.00	
Propiedad	Unidades	Valores predichos	Valores experimentales
RC 7 días	MPa	12.77±0.98	12.62±0.36
RC 28 días	MPa	20.24±0.94	21.01±0.42
Printabilidad	%	66.67±0.77	81.00±3.08
ECE	Pa	193.93±0.16	225.89±1.29
ECD	Pa	22.52±0.69	30.70±1.07



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 69. Tabicón impreso en 3D usando la tinta optimizada de TPE/CP para un modelo con patrón de impresión en zigzag.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La investigación abordó el desarrollo, caracterización y optimización de una tinta cementante para impresión 3D (TCI3D) elaborada a partir de tierra producto de excavación (TPE) y cemento Portland (CP), con el propósito de fabricar elementos tipo tabicón estructural con resistencia mínima de 7 MPa. A partir de la caracterización reológica, de printabilidad y mecánica, complementada con modelamiento mediante Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), se obtuvieron las siguientes conclusiones generales, organizadas conforme a las secciones de resultados:

1. Caracterización de las materias primas. El TPE presentó una composición química promedio dominada por SiO_2 (~52 %), CaO (~25 %) y Al_2O_3 (~12 %), con Fe_2O_3 , K_2O , MgO y TiO_2 en menores proporciones. Estas concentraciones, atribuidas con la presencia de cuarzo, calcita, feldespatos y filosilicatos identificados por DRX y FTIR, confirmaron que el TPE se comportó como una materia prima silico-calcárea adecuada para matrices cementantes. Además, los contenidos de materia orgánica fueron de 0.02-0.14% y junto con la ausencia de bandas orgánicas en FTIR y la ubicación de todos los puntos en regiones inorgánicas de la carta de plasticidad, se concluye que el TPE evaluado fue esencialmente inorgánico y cumple con los criterios normativos para su uso como tierra estabilizada. Por otro lado, los índices de plasticidad ($\approx 1-10$ %, promedio

~5%), la DTP ($d_{50} \approx 49 \mu\text{m}$ con baja desviación) y las densidades ($\sim 2300 \text{ kg/m}^3$) mostraron variabilidad moderada entre lotes y una morfología por MEB de partículas angulosas con agregados finos adheridos. Estos resultados permitieron definir un control de calidad del TPE como materia prima para su uso en TCI3D, siempre que se mantengan propiedades similares a las obtenidas en la experimentación. La clasificación SUCS ubicó los lotes principalmente como arenas pobremente graduadas con finos limosos/arcillosos (SM, SP-SC, SP-CL/ML, SP-ML, SW-CL, SW-CH). A pesar de las diferencias texturales, las propiedades químicas y físicas promedio resultaron suficientemente consistentes para diseñar una tinta única a partir de la mezcla global de TPE.

2. Resistencia de compresión. En especímenes cúbicos, la resistencia de compresión decreció al aumentar el contenido de TPE y la relación a/cm. Las mezclas con 60 y 70% de TPE y a/cm=0.30 alcanzaron el valor objetivo de 7 MPa a los 28 días (≈ 21 y 8 MPa, respectivamente), mientras que las formulaciones con 80-90% de TPE o a/cm=0.35 no alcanzaron el umbral estructural. Asimismo, en tabicones impreso, la mezcla con 60% de TPE y a/cm=0.30 alcanzó ≈ 8 MPa a 28 días, cumpliendo la resistencia mínima objetivo; la mezcla con 70% de TPE mostró ≈ 6 MPa y se situó ligeramente por debajo del criterio. El cambio de geometría de cubos a tabicones impresos generó reducciones de resistencia del 60% para la mezcla de 60% TPE y $\approx 37\%$ para la de 70% TPE, atribuibles a la anisotropía por deposición capa a capa, la presencia de interfaces débiles entre los filamentos y la geometría hueca del elemento.

3. Propiedades de printabilidad. La combinación de los ensayos de fluidez entre mesa y minicono, índices de extrudabilidad, calidad de extrusión, edificabilidad y printabilidad permitió definir un rango de fluidez y asentamiento asociados a una printabilidad aceptable. Las mezclas con a/cm=0.30 se ubicaron dentro de esta ventana, mientras que las formulaciones con a/cm=0.35 resultaron excesivamente fluidas, con asentamientos elevados, baja edificabilidad y

printabilidades $\leq 40\%$. Entre las pastas con $a/cm=0.30$, la pasta con 70% de TPE mostró la printabilidad más alta ($\approx 80\%$), con índices de extrudabilidad y calidad de extrusión clasificados como buenas, mientras que la pasta con 60% de TPE presentó printabilidad aceptable pero mejor desempeño mecánico. Esto evidenció que la mezcla óptima para impresión no necesariamente coincide con la de mayor resistencia, sino con un equilibrio entre estabilidad geométrica y facilidad de extrusión. Las pruebas de tiempo abierto revelaron ventanas de impresión diferenciadas: la pasta con 70% de TPE mantuvo un ancho de filamento adecuado durante ≈ 60 min, mientras que las pastas con 80 y 90% de TPE mostraron intervalos útiles mucho más cortos (≈ 25 y 20 min). El aumento del contenido de TPE y un menor porcentaje de cemento, aceleró la estructuración y redujo el tiempo de impresión. La relación entre fluidez (minicono), asentamiento y printabilidad permitió proponer un “área printable” que funciona como criterio práctico de diseño previo a las pruebas en impresora, mostrando que es posible anticipar el desempeño de impresión a partir de ensayos simples en laboratorio.

4. Propiedades reológicas. El modelo de Herschel-Bulkley utilizado en las curvas de flujo confirmaron el comportamiento pseudoplástico con un esfuerzo de cedencia inicial para todas las pastas printables. El esfuerzo de corte para una misma tasa aumentó con el tiempo de acondicionamiento, evidenciando estructuración y ganancia de rigidez en reposo, condición necesaria para la edificabilidad de las capas impresas. Los ECE y ECD, así como la viscosidad aparente, se incrementaron notablemente al aumentar el contenido de TPE de 70 a 90% y con el tiempo de ensayo. Las pastas con 90% de TPE presentaron los ECE, ECD y viscosidades más altas, favoreciendo la estabilidad de capa, pero penalizando la extrudabilidad y reduciendo el tiempo abierto; las pastas con 70% de TPE mostraron valores intermedios más compatibles con el rango de fluidez y la ventana de impresión observada. Los rangos de ECE, ECD y viscosidad aparente obtenidos se situaron dentro de los valores reportados para materiales

cementantes imprimibles, aunque hacia el extremo superior para la pasta con 90% de TPE. Esto confirma que el TPE aporta cohesión y estabilidad dimensional, pero su contenido debe limitarse para evitar bloqueos en la extrusión. La comparación integrada de las propiedades reológicas con los índices de printabilidad evidenció que los rangos óptimos de ECE y viscosidad no coinciden con la máxima resistencia de compresión, por lo que el diseño de la TCI3D requiere un ajuste entre rendimiento mecánico, estabilidad geométrica y procesabilidad en la impresora.

5. Análisis estadístico. Los modelos de regresión obtenidos mediante MSR para RC (7 y 28 días), printabilidad, ECE y ECD mostraron coeficientes de determinación $R^2 > 80\%$, excepto el modelo de ECD, que presentó un ajuste menor pero aceptable. Los modelos de resistencia de compresión alcanzaron los mayores R^2 (≈ 98.9 y 98.7%), lo que evidenció una alta capacidad predictiva de la respuesta mecánica en función de TPE y a/cm . El análisis de los coeficientes y las gráficas de Pareto mostró que el contenido de TPE fue el factor dominante sobre la resistencia de compresión (efectos lineales y cuadráticos significativos), mientras que la relación a/cm fue el factor principal que controló la printabilidad. Para el ECE y ECD, el término cuadrático de TPE y las interacciones con a/cm resultaron determinantes, confirmando un comportamiento no lineal y la necesidad de explorar regiones intermedias de diseño. Todos los efectos significativos se identificaron con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$). La optimización multivariable, considerando como criterios $RC \geq 7$ MPa a 7 y 28 días, printabilidad $\geq 60\%$ y minimización simultánea de ECE y ECD, condujo a una formulación óptima con 60% de TPE y $a/cm = 0.30$, con deseabilidad compuesta $D = 0.6099$. Los valores experimentales de RC, printabilidad y esfuerzos de cedencia para esta mezcla coincidieron razonablemente con las predicciones, validando el uso de la MSR como herramienta para el diseño de TCI3D a partir de TPE y CP. Los resultados de esta sección demostraron que es posible utilizar modelos estadísticos robustos para integrar, en un solo esquema de decisión, las

propiedades mecánicas, de printabilidad y reológicas y derivar formulaciones de la TCI3D a base de TPE que satisfacen simultáneamente requisitos estructurales y de procesabilidad. Con ello se confirmó la hipótesis de que una tinta cementante elaborada con TPE y cemento Portland puede optimizarse para imprimir tabicones con resistencia mínima de 7 MPa, contribuyendo al aprovechamiento del TPE en sistemas constructivos impresos en 3D.

Recomendaciones y trabajos futuros

Las recomendaciones y trabajos futuros derivados de esta tesis se orientan tanto al uso práctico del TPE en tintas cementantes para impresión 3D, como a la consolidación científica y tecnológica de este sistema constructivo.

1. En primer lugar, los resultados permiten recomendar el uso del TPE como materia prima para su uso en TCI3D siempre que sus propiedades se mantengan dentro de una ventana de aceptación similar a la determinada en esta investigación: composiciones dominadas por SiO_2 , CaO y Al_2O_3 en los rangos observados, contenidos de materia orgánica inferiores al límite normativo, índices de plasticidad bajos a moderados ($\approx 1\text{-}10\%$) y distribuciones de tamaño de partícula con d_{50} cercano a $50\text{ }\mu\text{m}$. En la práctica, esto implica implementar un esquema de control de calidad que combine ensayos rápidos (límites de Atterberg, contenido de MO, DTP y densidad) con verificaciones periódicas mediante DRX, FRX y FTIR para confirmar la naturaleza inorgánica y la presencia de fases minerales compatibles con el desempeño reológico y mecánico requerido.
2. La formulación con 60% de TPE y 40% de CP, a una relación $a/\text{cm}=0.30$, se identificó como punto de partida recomendable para el desarrollo de una TCI3D a partir de TPE locales, ya que logra simultáneamente resistencias a compresión superiores a los 7 MPa en cubos y tabicones,

así como una printabilidad global aceptable. Esta mezcla puede utilizarse como referencia para ajustes específicos cuando el TPE presente ligeras variaciones de granulometría o plasticidad. Las mezclas con contenidos de TPE ≥ 70 % deben emplearse con cautela, priorizando aplicaciones no estructurales o elementos con menores exigencias mecánicas, pues si bien ofrecen buena printabilidad, tienden a mostrar resistencias más bajas y tiempos abiertos más reducidos. De forma operativa, se recomienda adoptar el ensayo de minicono, el índice de printabilidad y la verificación del tiempo abierto como herramientas de control rápido en obra o planta piloto, utilizando las ventanas de fluidez y asentamiento definidas en este trabajo como criterios iniciales de aceptación antes de iniciar una jornada de impresión.

3. En el ámbito de comportamiento mecánico, los resultados evidencian que la resistencia de elementos impresos no puede inferirse directamente a partir de probetas moldeadas. La reducción de 37-60% observada al pasar de cubos a tabicones impresos, asociada a la anisotropía por deposición, a la existencia de interfaces entre cordones y a la geometría hueca, indica que el diseño estructural debe basarse en ensayos realizados sobre elementos impresos con la misma orientación y secuencia constructiva prevista en servicio. Se recomienda, por tanto, que futuras aplicaciones utilicen resistencias con características determinadas en tabicones o muretes impresos y adopten factores de seguridad que consideren explícitamente esta pérdida de capacidad. Asimismo, será necesario estudiar la influencia de la orientación de impresión respecto al eje de carga, la altura de capa, el espaciamiento entre filamentos y las condiciones de curado sobre la respuesta mecánica y la durabilidad de los elementos.

4. Para trabajos futuros, resulta pertinente extender la metodología a TPE procedentes de otras zonas geológicas y a otros tipos de ligantes (p. ej., cementos compuestos, sistemas con adiciones puzolánicas, LC3 o CAA) con el fin de reducir aún más el contenido de clínker y las emisiones asociadas. La incorporación de fibras (sintéticas o naturales) y aditivos reológicos específicos podría contribuir a mejorar la adherencia entre capas y mitigar la anisotropía de resistencia, aspecto que merece una campaña experimental dedicada. Adicionalmente, será necesario evaluar propiedades de durabilidad (absorción, permeabilidad, retracción, resistencia a ciclos por humedecimiento y secado y por agentes agresivos) en elementos impresos, para completar la validación del material en condiciones de servicio reales.
5. Asimismo, se recomienda desarrollar estudios sistemáticos sobre los parámetros de la impresora (diámetro de boquilla, velocidad de extrusión, velocidad de desplazamiento, altura de capa, patrón de relleno y tiempo de espera entre capas) y su interacción con la reología de la tinta optimizada. Estos estudios deberían incorporarse con campañas de impresión de muretes y paneles a escala real, incluyendo monitoreo geométrico, medición de deformaciones y evaluación de la respuesta bajo carga axial y combinada, con el fin de avanzar desde el nivel de tabicones hacia sistemas de muro completos.
6. La aplicación de la MSR demostró ser una herramienta eficaz para integrar propiedades mecánicas, de printabilidad y reológicas en el diseño de la TCI3D. Un trabajo futuro consiste en ampliar el espacio de diseño incorporando nuevos factores (dosificación de aditivos químicos, contenido de fibras, parámetros del proceso de impresión) y respuestas adicionales (tiempo abierto, deformaciones elásticas inmediatas, deformaciones diferidas), así como en desarrollar modelos predictivos que

vinculen directamente parámetros reológicos (ECE, ECD, viscosidad y tasa de estructuración) con indicadores operativos de printabilidad. La validación de estos modelos en distintas escalas y con diferentes TPE permitirá avanzar hacia guías de diseño y especificaciones normativas para tintas cementantes a base de TPE.

Finalmente, para consolidar el enfoque de economía circular planteado en esta tesis, será conveniente complementar el análisis técnico con evaluaciones de ciclo de vida y de costo-beneficio que comparen la TCI3D basada en TPE con soluciones de mampostería convencional. Estos estudios, combinados con la generación de manuales de control de calidad del TPE y de la tinta, podrán servir de base para propuestas normativas y para la implementación de programas piloto de vivienda digna, asequible y sostenible construida mediante I3D con residuos de excavación.

Problemas y limitaciones del estudio

- Número y tipo de ligante. Solo se empleó un cemento Portland (CPC 30R) sin explorar otros ligantes o adiciones (puzolanas, LC3, geopolímeros), por lo que la optimización reológica y mecánica está restringida a este sistema cementante.
- Diseño experimental limitado. Los modelos obtenidos no son extrapolables fuera de esos rangos ni consideran la interacción con aditivos químicos, fibras o parámetros del proceso de impresión.
- Escala y geometría de los ensayos mecánicos. Las propiedades mecánicas se evaluaron en cubos de 5×5×5 cm y en tabicones impresos de un solo diseño geométrico y orientación de carga, sin estudiar otras

geometrías, configuraciones de apilado ni estados de esfuerzo más complejos (flexión, tracción, corte).

- Carácter a corto plazo de la evaluación. Solo se determinaron resistencias a 7 y 28 días; no se consideraron propiedades de durabilidad, por lo que la vida útil en servicio de los elementos impresos permanece sin cuantificar.
- Condiciones controladas de impresión. Las pruebas de printabilidad y tiempo abierto se realizaron en condiciones de laboratorio, con un único equipo y parámetros de impresión fijos; no se consideraron variaciones de temperatura, viento o radiación solar propias de condiciones reales de obra.
- Limitaciones reológicas. El análisis reológico se basó en curvas de flujo y en ECE/ECD aparentes obtenidos con una sola geometría de medición, sin estudiar en detalle fenómenos de deslizamiento en pared ni efectos de historial de corte más complejos, lo que introduce incertidumbre en la magnitud absoluta de los parámetros.

PRODUCTOS GENERADOS.

A lo largo del desarrollo de este proyecto de investigación, se pudieron generar algunos productos de difusión y contribución científica como:

- Conferencia magistral en el marco del 3^{er} aniversario de la Sección Estudiantil del American Concrete Institute del Tecnológico Nacional de México campus Nuevo Laredo, Tamaulipas el 14 de junio del 2025. Presentando la ponencia: *“Reutilización de tierra producto de excavación en la elaboración de una tinta cementante de impresión 3D para alcanzar la Vivienda Digna Asequible y Sostenible (ViDAS) en México – análisis comparativo de costos, rendimiento y sostenibilidad”*.

- Participación en el 33rd International Materials Research Congress 2025 llevado a cabo en Cancún, México, el 21 de agosto del 2025. Presentando en modalidad

virtual la ponencia titulada: *“Evaluation of excavated clay performance for its potential application in 3D-printing: design of a clay-based cementitious ink for optimal printability”*, cuyos resultados presentados formaron parte de la generación de esta tesis.

- Participación en el comité organizador del 3er Simposio del Cuerpo Académico Consolidado de Tecnología del Concreto: *“Economía Circular, Sostenibilidad y Responsabilidad Social Universitaria para la industria de la construcción”*, llevado a cabo en modalidad híbrida en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León los días 22 y 23 de octubre del 2025.

- Conferencia magistral para estudiantes del Capítulo Interuniversitario de la Sociedad Geológica Mexicana en el marco de su 3^{er} Encuentro Nacional Interuniversitario de Ciencias de la Tierra, con la ponencia: *“De la tierra a la infraestructura: geología, sostenibilidad y economía circular en la industria de la construcción”*, llevado a cabo el 22 de octubre del 2025.

- Artículo científico publicado: *“Circular economy in the 3D printing construction industry: a design, durability, materials, and processes solution to achieve decent, affordable, and sustainable housing in Nuevo León and Mexico”*, el día 15 de mayo del 2024 en la Revista ALCONPAT Vol. 14, No. 2 (2024). DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>

- Artículo científico en revisión: *“Alkaline-activated cements circular materials using medium-purity metakaolin and high limestone content: correlational analysis of ultrasonic pulse velocity and electrical resistivity to predict compressive strength”*.

- Artículo científico en revisión: *“Rapid optimization methodology for 3d-printing potential application: correlation between chemical composition and printability properties of excavation soil waste inks”*

- Participación en el proyecto de la SECIHTI: “Soluciones nacionales de economía circular para la industria de la construcción mediante el desarrollo por diseño eficiente de tecnologías y materiales circulares para lograr la vivienda digna, asequible y sostenible usando impresión 3D”. Como parte de la convocatoria: Maduración de tecnologías, mejoramiento de la inventiva y retos tecnológicos para la atención de problemáticas nacionales prioritarias, en conjunto con el Dr. José Manuel Mendoza Rangel, el Dr. Jorge Humberto Díaz Aguilera y el Dr. José Raúl Zapata Padilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS.

1. Instituto de la Vivienda. (2021). *Diagnostico Instituto de la Vivienda de Nuevo León*. Diagnóstico de FOMERREY e IVNL. https://pbr-sed.nl.gob.mx/sites/default/files/diagnostico_ivnl.pdf
2. ONU-Hábitat. (2018). *Vivienda y ODS en México*. https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/VIVIENDA_Y_ODS.pdf
3. Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A. M., & Flatt, R. J. (2019). Digital Concrete: A Review. En *Cement and Concrete Research* (Vol. 123). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
4. Krishnaraja, A. R., & Guru, K. V. (2021). 3D Printing Concrete: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1055(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1055/1/012033>
5. Camarena, E. K. C., Cuellar, N. L. R., & De La Torre Salazar, J. R. (2022). Viability of 3D printing of concrete for the constructability of social housing.

Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July.
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.58>

6. Singh, N., Colangelo, F., & Farina, I. (2023). Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151310121>
7. Mendoza-Rangel, J. M., Zapata-Padilla, J. R., Anguiano-Pérez, F. D., Velásquez-Hernández, M. I., Mares-Chávez, S., Espino-Robles, E. E., Alvarado-López, J. I., López-Serna, M. A., Mendoza-Jiménez, J. A., & Díaz-Aguilera, J. H. (2024). Circular economy in the 3D printing construction industry: a design, durability, materials, and processes solution to achieve decent, affordable, and sustainable housing in Nuevo León and Mexico. En *Revista Alconpat* (Vol. 14, Número 2, pp. 115–140). Asociacion Latinoamericana de Control de Calidad, Patologia y Recuperacion de la Construccion. <https://doi.org/10.21041/ra.v14i2.735>
8. Liu, Z., Jiang, Q., Zhang, Y., Li, T., & Zhang, H.-C. (2016, junio 27). Sustainability of 3D Printing: A Critical Review and Recommendations. *Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing*. <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8618>
9. Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968>
10. 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>

11. 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>
12. 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>
13. Wilson, T. T., Mativenga, P. T., & Marnewick, A. L. (2023). Sustainability of 3D Printing in Infrastructure Development. *Procedia CIRP*, 120, 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.035>
14. Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
15. Sun, B., Zeng, Q., Wang, D., & Zhao, W. (2022). Sustainable 3D printed mortar with CO₂ pretreated recycled fine aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104800>
16. Wang, X., Li, W., Guo, Y., Kashani, A., Wang, K., Ferrara, L., & Agudelo, I. (2024). Concrete 3D printing technology for sustainable construction: A review on raw material, concrete type and performance. *Developments in the Built Environment*, 17, 100378. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100378>
17. Perrot, A., Rangeard, D., & Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>
18. Gomaa, M., Jabi, W., Veliz Reyes, A., & Soebarto, V. (2021). 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. *Automation in Construction*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>

19. Buson, M. A., Varum, H., & Rezende, M. A. P. de. (2023). *First Impressions on 3D Printing with Earth-Based Mortar at FEUP*. <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1624.v1>
20. Curth, A., Pearl, N., Castro-Salazar, A., Mueller, C., & Sass, L. (2024). 3D printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and Life Cycle Assessment. *Construction and Building Materials*, 421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135714>
21. Perrot, A., Jacquet, Y., Caron, J. F., Mesnil, R., Ducoulombier, N., De Bono, V., Sanjayan, J., Ramakrishnan, S., Kloft, H., Gosslar, J., Muthukrishnan, S., Mechtcherine, V., Wangler, T., Provis, J. L., Dörfler, K., Krakovska, E., Roussel, N., & Keita, E. (2024). Snapshot on 3D printing with alternative binders and materials: Earth, geopolymers, gypsum and low carbon concrete. *Cement and Concrete Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107651>
22. Ferretti, E., Moretti, M., Chiusoli, A., Naldoni, L., de Fabritiis, F., & Visonà, M. (2022). Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. *Materials*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15030743>
23. Rocha, D., Faria, P., & Lucas, S. S. (2024). Additive Manufacturing of Earth-Based Materials: A Literature Review on Mortar Composition, Extrusion, and Processing Earth. En *Materials* (Vol. 17, Número 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma17010202>
24. Keita, E., & Perrot, A. (2023). Processing of earth-based materials: current situation and challenges ahead. *RILEM Technical Letters*, 8, 141–149. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.186>
25. Paiva, R. de L. M., Martins, A. P. S., Caldas, L. R., Reales, O. A. M., & Toledo Filho, R. D. (2022). Earth-Based Mortars: Mix Design, Mechanical Characterization and Environmental Performance Assessment. *Bio-Based*

Building Materials, 1, 271–278.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/cta.1.271>

26. Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5–20.
<https://doi.org/10.3989/ic.10.046>
27. Carnevale, E. (2024). *Tierra de excavación: de residuo a materia prima*. Ecohabitar. <https://ecohabitar.org/tierra-de-excavacion-de-residuo-a-materia-prima/>
28. Tovar, E. (2023). *Construyendo con residuos: Transformando la tierra excavada en arquitectura*. ArchDaily.
<https://www.archdaily.mx/mx/999672/construyendo-con-residuos-transformando-tierra-excavada-en-arquitectura>
29. Daneels, A. (2015). *Los sistemas constructivos de tierra en el México prehispánico*. SIACOT.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6085993#:~:text=Esta%20cultura%20constructiva%20se%20diversifica%20en%20una%20tradici%C3%B3n,Madre%20Occidental%20en%20el%20Postcl%C3%A1sico%20Temporano%20%281200-1450%20d.C.%29.>
30. Rehman, A. U., & Kim, J.-H. (2021). 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials*, 14(14), 3800.
<https://doi.org/10.3390/ma14143800>
31. Nakase, K., Hashimoto, K., Sugiyama, T., & Kono, K. (2024). Influence of print paths on mechanical properties and fracture propagation of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 438.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137019>
32. Tourtelot, J., Ghattasi, I., Roy, R. L., Bourgès, A., & Keita, E. (2020). *Rheological behaviour of earthen materials for 3D printing*. LEHM.

33. Maierdan, Y., Armistead, S. J., Mikofsky, R. A., Huang, Q., Ben-Alon, L., Srubar, W. V., & Kawashima, S. (2024). Rheology and 3D printing of alginate bio-stabilized earth concrete. *Cement and Concrete Research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107380>
34. Nguyen, V. B. Q., Kang, H.-S., & Kim, Y.-T. (2018). Effect of clay fraction and water content on rheological properties of sand–clay mixtures. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), 576. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7748-0>
35. Rückrich, S., Agranati, G., & Grobman, Y. J. (2023). Earth-based additive manufacturing: A field-oriented methodology for evaluating material printability. *Architectural Science Review*, 66(2), 133–143. <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2154739>
36. Zhu, G., Zhu, L., & Yu, C. (2017). Rheological properties of soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
37. Soda, P. R. K., Dwivedi, A., C M, S., & Gupta, S. (2024). Development of 3D printable stabilized earth-based construction materials using excavated soil: Evaluation of fresh and hardened properties. *Science of the Total Environment*, 924. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171654>
38. Elhassan, A. A. M., Mnzool, M., Smaoui, H., Jendoubi, A., Elnaim, B. M. E., & Faihan Alotaibi, M. (2023). Effect of clay mineral content on soil strength parameters. *Alexandria Engineering Journal*, 63, 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.012>
39. Asaf, O., Bentur, A., Larianovsky, P., & Sprecher, A. (2023). From soil to printed structures: A systematic approach to designing clay-based materials for 3D printing in construction and architecture. *Construction and Building Materials*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133783>
40. Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 338). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>

41. Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. En *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 14, Número 4, pp. 1319–1342). Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>
42. Zhang, Y., Jiang, S., Quan, D., Fang, K., Wang, B., & Ma, Z. (2024). Properties of Sustainable Earth Construction Materials: A State-of-the-Art Review. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Número 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16020670>
43. Hussain, M., Zmamou, H., Provost, A., Mahieu, A., Leblanc, N., Levacher, D., Chenot, E., & Kane, A. (2023). Feasibility for the Recovery of Excavated Soils in Compressed Earth Blocks as a Sustainable Building Material. *Environments*, 10(8), 131. <https://doi.org/10.3390/environments10080131>
44. Banihashemi, S., Meskin, S., Sheikhhoshkar, M., Mohandes, S. R., Hajirasouli, A., & LeNguyen, K. (2024). Circular economy in construction: The digital transformation perspective. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100715. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100715>
45. Montalbano, G., Santi, G., & Khoulood, N. (2024). Rammed earth construction: a circular solution for sustainable building. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11(1). [https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).SUS-01](https://doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).SUS-01)
46. Bolaños, J. L. (2024). *Aprovechamiento de residuos de construcción en el Estado de Nuevo León*. Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de Ingeniería Civil.
47. Gobierno de Nuevo León. (2022). *La Nueva Ruta es: Hogar, nuevo hogar*. Antecedentes. <https://www.nl.gob.mx/nueva-ruta-vivienda>
48. Gobierno de Nuevo León. (2024). *Buscará Estado crear ley de economía circular en Medio Ambiente*. Monterrey, NL. <http://www.nuevoleon.gob.mx/boletines-comunicados-y-avisos/buscara-estado-crear-ley-de-economia-circular-en-medio-ambiente>

49. Alami, A. H., Olabi, A. G., Ayoub, M., Aljaghoub, H., Alasad, S., & Abdelkareem, M. A. (2023). 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. *Buildings*, 13(4), 924. <https://doi.org/10.3390/buildings13040924>
50. Gangotra, A., Del Gado, E., & Lewis, J. I. (2023). 3D printing has untapped potential for climate mitigation in the cement sector. *Communications Engineering*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00054-7>
51. 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>
52. 3DPRINTEDHOUSE. (2021). *Project Milestone*. <https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone/?utm>.
53. ICON. (2022). *ICON and Lennar Announce Community of 3D-printed Homes is Now Underway in Georgetown, TX*. <https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-and-lennar-announce-community-of-3d-printed-homes-is-now-underway-in-georgetown-tx?utm>.
54. Government of Dubai. (2021). *Dubai Municipality wins innovation award for the largest 3D printed building*. <https://www.dm.gov.ae/2021/03/08/dubai-municipality-wins-innovation-award-for-the-largest-3d-printed-building/?utm>.
55. Valencia, N. (2017). *World's First 3D Printed Bridge Opens in Spain*. <https://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain?utm>.
56. PERI Group. (2017). *Germany's first 3D printed home*. <https://www.peri3dconstruction.com/>.
57. WASP. (2024). *3D printer: Crane WASP. 3DWASP*. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>

58. WASP. (2018). *The first 3D printed House with earth* | GAIA. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>.
59. WASP. (2021). *3D printed House TECLA*. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>.
60. De La Torre Salazar, J. R., Chavez Camarena, E. K., & Rengifo Cuellar, N. L. (2022). Viability of 3D printing of concrete for the constructability of social housing. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions"*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.58>
61. Conconcreto. (2021). *Conozca la primera impresora 3D gran formato de concreto en Colombia*. <https://conconcreto.com/sala-de-prensa/conozca-la-primera-impresora-3d-gran-formato-de-concreto-en-colombia/?utm>.
62. COBOD. (2023). *Impresión 3D para construcción llegando a América Latina: El primer edificio impreso en 3D fabricado en Guatemala en la región sísmica*. <https://cobod.com/3d-construction-printing-coming-to-latin-america-the-first-3d-printed-building-made-in-guatemala-in-seismic-region/?utm>.
63. Pintos, P. (2024). *Casa Semilla / Universidad del Bío-Bío*. <https://www.archdaily.mx/mx/1026461/casa-semilla-universidad-del-bio-bio>.
64. Fleming, S. (2019). *This start-up is 3D-printing an entire neighbourhood in Mexico*. <https://www.weforum.org/stories/2019/12/3d-printed-homes-neighborhood-tabasco-mexico/>.
65. CEMEX. (2022). *CEMEX es la primera compañía que introduce impresión 3D con concreto en México*. <https://www.cemex.com/es/w/cemex-es-la-primera-compania-que-introduce-impresion-3d-con-concreto-en-mexico>.
66. Wahlström, M., Bergmans, J., Teittinen, T., Bachér, J., & Paduart, A. (2020). *Construction and Demolition Waste: challenges and opportunities in a circular economy*.

67. Sánchez-Roldán, Z., Zamorano, M., & Martín-Morales, M. (2022). The use of recycled aggregates in the construction sector: a scientific bibliometric analysis. *Materiales de Construcción*, 72(345), e277. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.07421>
68. Kumar, V., Bhat, S. A., Kumar, S., & Verma, P. (Eds.). (2024). *Environmental Engineering and Waste Management*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-58441-1>
69. Van Elsen, L., Decoster, W., De Splenter, P., & Van Snick, A. (2020). *Belgian sustainable building solutions & smart cities*.
70. Venugopal Reddy, P., Nakkeeran, G., Roy, D., & Alaneme, G. U. (2024). Evaluating the use of recycled fine aggregates in 3D printing: a systematic review. En *Discover Applied Sciences* (Vol. 6, Número 12). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06358-3>
71. De Villiers, W., Mwongo, M., Babafemi, A. J., & Van Zijl, G. (2024). Quantifying Recycled Construction and Demolition Waste for Use in 3D-Printed Concrete. *Recycling*, 9(4), 55. <https://doi.org/10.3390/recycling9040055>
72. Araiza-Aguilar, J. A., Gutiérrez-Palacios, C., Rojas-Valencia, M. N., Nájera-Aguilar, H. A., Gutiérrez-Hernández, R. F., & Aguilar-Vera, R. A. (2019). Selection of Sites for the Treatment and the Final Disposal of Construction and Demolition Waste, Using Two Approaches: An Analysis for Mexico City. *Sustainability*, 11(15), 4077. <https://doi.org/10.3390/su11154077>
73. Mercader-Moyano, P., Camporeale, P. E., & López-López, J. (2022). A construction and demolition waste management model applied to social housing to trigger post-pandemic economic recovery in Mexico. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 40(7), 1027–1038. <https://doi.org/10.1177/0734242X211052856>
74. CMIC. (2013). *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM%20RCD%20Completo.pdf>

75. NOM-052-SEMARNAT-2005, Pub. L. No. 6, Diario Oficial 6 (2006).
76. Quintero-Navarro, H. A., Rojas-Valencia, M. N., & Martínez-Cruz, A. (2025). Rehabilitation of Urban Parks with Recycling of Construction and Demolition Waste in Mexico City. *New Environmentally-Friendly Materials*, 3(1), 46–62. <https://doi.org/10.55121/nefm.v3i1.312>
77. Gobierno de Nuevo León. (2024). *Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE)*. https://www.nl.gob.mx/es/simeprode?utm_source=chatgpt.com.
78. Medina de la Cruz, R., Ibarra, A., Gómez, R., Gutiérrez, F., & González, P. (2009). *Programa estatal de gestión integral de residuos de Nuevo León 2009-2015*.
79. Norma Ambiental Estatal NAE-SMA-008-2022, que tiene como finalidad establecer el manejo integral de los residuos de la construcción en el Estado de Nuevo León., NAE-SMA-008-2022 1 (2022).
80. Fuentes, M. (2024, mayo 12). *De vanguardia: NL reciclará residuos de construcción*. <https://www.publimetro.com.mx/nuevo-leon/2024/05/12/estrenara-nuevo-leon-planta-de-reciclaje-de-residuos-de-construccion/?utm>.
81. Perales-Santillan, M. E., Díaz-Aguilera, J. H., & Mendoza-Rangel, J. M. (2024). Evaluation of the rheological behavior for alkaline-activated cements of metakaolin and limestone for its potential application in 3D printing. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 48(5), 3231–3239. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01363-3>
82. Suryanto, B., Higgins, J., Aitken, M. W., Tambusay, A., & Suprobo, P. (2023). Developments in Portland cement/GGBS binders for 3D printing applications: Material calibration and structural testing. *Construction and Building Materials*, 407, 133561. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133561>

83. Robayo Salazar, R., Muñoz, M. A., & Mejía de Gutiérrez, R. (2023). Desarrollo de mezclas para impresión 3d basadas en cemento portland y adiciones de metacaolín, micro sílice y carbonato. *Ingeniería y Competitividad*, 25(4). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i4.13116>
84. 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. *Journal of Building Engineering*, 84, 108501. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.108501>
85. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101115>
86. Daher, J., Kleib, J., Benzerzour, M., Abriak, N. E., & Aouad, G. (2023). The Development of Soil-Based 3D-Printable Mixtures: A Mix-Design Methodology and a Case Study. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071618>
87. Bhusal, S., Sedghi, R., & Hojati, M. (2023). Evaluating the Printability and Rheological and Mechanical Properties of 3D-Printed Earthen Mixes for Carbon-Neutral Buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/su152115617>
88. Mai, I., Gossler, J., Khader, N., Lowke, D., & Hack, N. (2024). *Workflow for Earth-Based 3D-Printing* (pp. 71–80). https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_8
89. Cuevas, K., Strzałkowski, J., Kim, J.-S., Ehm, C., Glotz, T., Chougan, M., Ghaffar, S. H., Stephan, D., & Sikora, P. (2023). Towards development of sustainable lightweight 3D printed wall building envelopes – Experimental and numerical studies. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01945. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01945>

90. Ferretti, E., Moretti, M., Chiusoli, A., Naldoni, L., De Fabritiis, F., & Visonà, M. (2022). Mechanical Properties of a 3D-Printed Wall Segment Made with an Earthen Mixture. *Materials*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/ma15020438>
91. Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., & Kim, J. H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>
92. Li, M., Weng, Y., Liu, Z., Zhang, D., & Wong, T. N. (2022). Optimizing of chemical admixtures for 3D printable cementitious materials by central composite design . *Materials Science in Additive Manufacturing*, 1(3), 16. <https://doi.org/10.18063/msam.v1i3.16>
93. Wang, C., Lian, J., Fang, Y., Fan, G., Yang, Y., Huang, W., & Shi, S. (2025). Rheological Optimization of 3D-Printed Cementitious Materials Using Response Surface Methodology. *Materials*, 18(17), 3933. <https://doi.org/10.3390/ma18173933>
94. Kaushik, S., Sonebi, M., Amato, G., Das, U. K., & Perrot, A. (2023). Optimisation of Mix Proportion of 3D Printable Mortar Based on Rheological Properties and Material Strength Using Factorial Design of Experiment. *Materials*, 16(4), 1748. <https://doi.org/10.3390/ma16041748>
95. Simwanda, L., David, A. B., Perampalam, G., Olalusi, O. B., & Sykora, M. (2025). Optimisation of Interlayer Bond Strength in 3D-Printed Concrete Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks. *Buildings*, 15(20), 3794. <https://doi.org/10.3390/buildings15203794>
96. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, Diario Oficial de la Federación 1 (2003).
97. Criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los

elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo., Pub. L. No. 161, NOM-161-SEMARNAT-2011 (2011).

98. Lineamientos técnicos de operación que deberán cumplir las personas físicas o morales que lleven a cabo todo tipo de obras de construcción, urbanización y demolición (pública y privada); actividades asociadas a la misma; así como las relacionadas con la operación, limpieza y/o mantenimiento de vías, patios y espacios, públicos y privados; para prevenir y controlar la emisión de partículas contaminantes a la atmósfera, NAE-SDS-002-2019 (2019).
99. Curth, A., Pearl, N., Wissemann, E., Cousin, T., Alkhayat, L., Jackow, V., Lee, K., Moldow, O., Ismail, M., Mueller, C., & Sass, L. (2024). EarthWorks: Zero waste 3D printed earthen formwork for shape-optimized, reinforced concrete construction. *Construction and Building Materials*, 449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138387>
100. Carcassi, O. B., Maierdan, Y., Akemah, T., Kawashima, S., & Ben-Alon, L. (2024). Maximizing fiber content in 3D-printed earth materials: Printability, mechanical, thermal and environmental assessments. *Construction and Building Materials*, 425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135891>
101. Tarhan, Y., & Perrot, A. (2023). Reinforcement of 3D printable earth-based mortar with natural textile material. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.056>
102. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra, NMX-AA-132-SCFI-2016 (2016).
103. Ling, L., Yang, J., Yao, W., Xing, F., Sun, H., & Li, Y. (2024). Recycled Excavation Soils as Sustainable Supplementary Cementitious Materials: Kaolinite Content and Performance Implications. *Materials*, 17(10), 2289. <https://doi.org/10.3390/ma17102289>

104. Xu, R., & Huang, T. (2024). Comparison of the Use of Excavated Soil Recycled Fine Aggregate as a Substitute for River Sand in Mortar Mixing. *Buildings*, 14(7), 1917. <https://doi.org/10.3390/buildings14071917>
105. Bryson, Z. E., Srubar, W. V, Kawashima, S., & Ben-Alon, L. (2022). *Towards 3D printed earth-and bio-based insulation materials: a case study on light straw clay*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6611395>
106. Priyadharshini, P., Ramamurthy, K., & Robinson, R. G. (2018). Reuse potential of stabilized excavation soil as fine aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 192, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.141>
107. Guan, L., Chen, Y., Ye, W., Wu, D., & Deng, Y. (2023). Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling: Physical properties, mechanical properties, and microstructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.104995>
108. Saad, L., Nouri, M., Tahlaiti, M., Khelidj, A., Fruchet, J., & Suraneni, P. (2025). Analysis of the Influence of Excavated Soil Sand Characteristics on the Rheological and Mechanical Properties of Hydraulic Mortars. *Buildings*, 15(3), 353. <https://doi.org/10.3390/buildings15030353>
109. Wang, B., Xiao, J., Zheng, Z., Gan, W., Shen, J., & Wang, J. (2025). Assessment of construction spoil generation: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 532, 146879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146879>
110. Riviera, P. P., Bellopede, R., Marini, P., & Bassani, M. (2014). Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.002>

111. Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department. (2021). *New Mexico earthen building materials code*. <https://www.srca.nm.gov/parts/title14/14.007.0004.html>.
112. Auroville Earth Institute. (s/f). *Raw Material*. <https://dev.earth-auroville.com/raw-materials/>.
113. Taypondou Darman, J., Keyangue Tchouata, J. H., Ngôn Ngôn, G. F., Ngapgue, F., Lindou Ngakoupain, B., & Tchedele Langollo, Y. (2022). Evaluation of lateritic soils of Mbé for use as compressed earth bricks (CEB). *Heliyon*, 8(8), e10147. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10147>
114. Materials and construction for earth buildings, NZS 4298:2024 (2024).
115. Malaeb, Z., AISakka, F., & Hamzeh, F. (2019). 3D Concrete Printing. En *3D Concrete Printing Technology* (pp. 115–136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3>
116. Vasilic, K. (2025). Standardization Aspects of Concrete 3D Printing. *RILEM Technical Letters*, 9, 98–105. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2024.201>
117. Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Tan, M. J., Qian, S. Z., Leong, K. F., & Chua, C. K. (2016). Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. *Materials Science Forum*, 861, 177–181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.861.177>
118. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109719>
119. Kaliyavaradhan, S. K., Ambily, P. S., Prem, P. R., & Ghodke, S. B. (2022). Test methods for 3D printable concrete. *Automation in Construction*, 142, 104529. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104529>
120. Lu, B., Weng, Y., Li, M., Qian, Y., Leong, K. F., Tan, M. J., & Qian, S. (2019). A systematical review of 3D printable cementitious materials. En *Construction*

and Building Materials (Vol. 207, pp. 477–490). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>

121. Ma, G., Li, Z., & Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 162, 613–627.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
122. Lafhaj, Z., Rabenantoandro, A. Z., el Moussaoui, S., Dakhli, Z., & Youssef, N. (2019). Experimental Approach for Printability Assessment: Toward a Practical Decision-Making Framework of Printability for Cementitious Materials. *Buildings*, 9(12), 245. <https://doi.org/10.3390/buildings9120245>
123. Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., & Sanjayan, J. (2019). Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 202, 770–783.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
124. 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>
125. Quah, T. K. N., Tay, Y. W. D., Lim, J. H., Tan, M. J., Wong, T. N., & Li, K. H. H. (2023). Concrete 3D Printing: Process Parameters for Process Control, Monitoring and Diagnosis in Automation and Construction. *Mathematics*, 11(6), 1499. <https://doi.org/10.3390/math11061499>
126. Alhussain, A., Duarte, J. P., & Brown, N. C. (2024). Developing a data-driven filament shape prediction model for 3D concrete printing. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1363370>
127. Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221–1232.
<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>

128. Kemer, H., Bouras, R., Sonebi, M., Mesboua, N., & Benmounah, A. (2021). Slump Test: A New Empirical Model for High Yield Stress Materials. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 11(2), 107–112. <https://doi.org/10.2478/jaes-2021-0014>
129. Roussel, N., Stefani, C., & Leroy, R. (2005). From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 817–822. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.032>
130. Maia, L. (2023). Evaluation of the Fresh Properties of Cement Pastes: Part I—Response Models Applied to Changes in the One-Variable-at-a-Time Method. *Materials*, 16(11), 4139. <https://doi.org/10.3390/ma16114139>
131. Ozawa, K., Maekawa, K., & Okamura, H. (1993). Development of high performance concrete. *Journal of the Faculty of Engineering*, 41:3, 381–439.
132. Deshpande, A. P., Krishnan, J. M., & Kumar, P. B. S. (2010). Rheology of complex fluids. En *Rheology of Complex Fluids*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6>
133. Dinger, D. R. (2002). *Rheology for Ceramists*. www.DingerCeramics.com
134. Irgens, F. (2014). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01053-3>
135. Anguiano-Pérez, F. D., Díaz-Aguilera, J. H., & Mendoza-Rangel, J. M. (2024). Factorial analysis and modeling of chemical admixtures' influence on Portland cement paste rheology. *Discover Civil Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00062-2>
136. Yousaf, A., Khan, S. A., & Koç, M. (2025). Material, process, and design optimization of local earthen soil reinforced with natural fiber waste and nanoclay for 3DP of functional structures. *Journal of Building Engineering*, 111, 113502. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113502>

137. Industria de la construcción – mampostería – resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines-método de ensayo, NMX-C-036-ONNCCE-2013 (2013).
138. Industria de la construcción-mampostería-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de ensayo, NMX-C-404-ONNCCE-2012 (2012).
139. Industria de la construcción-mampostería-determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones-método de ensayo, NMX-C-038-ONNCCE-2013 (2013).
140. 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>
141. Rahal, S., Kaci, A., & Skoudarli, A. (2023). Evaluation of mechanical anisotropy induced by 3D printing process for earth-based materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.192>
142. Heras Murcia, D., Genedy, M., & Reda Taha, M. M. (2020). Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>
143. Rudziewicz, M., Maroszek, M., Setlak, K., Góra, M., & Hebda, M. (2024). Optimization of Foams—Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Mixtures Dedicated for 3D Printing. *Materials*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/ma17164106>
144. Wagner, J. S., Silveira, M. V. G., Vanderlei, R. D., & Das, S. (2025). Comparative analysis of mold-cast and 3D-printed cement-based components: implications for standardization in additive construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 52(4), 388–404. <https://doi.org/10.1139/cjce-2024-0169>

145. Zhai, C., Wang, J., (Paul) Tu, Y., Chang, G., Ren, X., & Ding, C. (2023). Robust optimization of 3D printing process parameters considering process stability and production efficiency. *Additive Manufacturing*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103588>
146. Gu, H., Sun, J., Zhang, J., Xu, Y., Li, B., & Wu, W. (2020). Effect of material ratio on the performances in 3D cement printing and its optimization. *AIP Advances*, 10(12). <https://doi.org/10.1063/5.0030186>
147. Montgomery, D. C. (2004). *Design and Analysis of Experiments* (LIMUSA, Ed.; 2a ed., Vol. 1).
148. Yue, Y., Ren, J., Yang, K., Wang, D., Qian, J., & Bai, Y. (2022). Investigation and Optimisation of the Rheological Properties of Magnesium Potassium Phosphate Cement with Response Surface Methodology. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196815>
149. Zhu, L. L., Yao, J., Zhao, Y., Ruan, W., Ge, Y., & Guan, X. M. (2023). Printability and early mechanical properties of material composition modified 3D printing engineered cementitious composites based on the response surface methodology. *Journal of Building Engineering*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107837>
150. 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>
151. SEDATU. (2021). *Programa Nacional de Vivienda 2021-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/643644/PNV_28.05.2021.pdf
152. INEGI. (2014). *Estadísticas históricas de México 2014 - 2. Vivienda y urbanización*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espan

ol/bvinegi/productos/nueva_estruc/HyM2014/2%20%20Vivienda_Urban_.pdf

153. SIESCO. (2022). *Rezago Habitacional*. Comisión Nacional de Vivienda. <https://siesco.conavi.gob.mx/siesco/rezago.aspx>
154. SHF, & HACIENDA. (2024). *Índice SHF de precios de la vivienda en México, cuarto trimestre de 2023*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/891735/Bnnr-IndicesSHF-23-4T.pdf>
155. INEGI. (2020). *Panorama sociodemográfico de México 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197926.pdf
156. CONEVAL. (2024). *Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2024*.
157. CONAMA. (2018). *Economía circular en el sector de la construcción*. Fundación CONAMA.
158. Khan, S. A., Jassim, M., Ilcan, H., Sahin, O., Bayer, İ. R., Sahmaran, M., & Koc, M. (2023). 3D printing of circular materials: Comparative environmental analysis of materials and construction techniques. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02059>
159. Graham-Nye, J. (2022, mayo 20). *La economía circular: cómo puede llevarnos hacia un cambio real*. World Economic Forum. <https://es.weforum.org/stories/2022/05/la-economia-circular-como-puede-llevarnos-por-el-camino-del-cambio-real/>
160. Wei, L., Chen, Z. Y., Yao Chen, J., Gao, Y., Zhou, J., & Chai, S. X. (s/f). *Optimization of 3D printing parameters and evaluation on compressive performance of printed three types of soil*. <https://ssrn.com/abstract=4992884>
161. Siddika, A., Mamun, M. A. Al, Ferdous, W., Saha, A. K., & Alyousef, R. (2020). 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges. En *Journal*

of Sustainable Cement-Based Materials (Vol. 9, Número 3, pp. 127–164). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1705199>

162. Laguna-Torres, C. A., González-López, J. R., Guerra-Cossío, M., Guerrero-Baca, L. F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M. Z., & Zaldívar-Cadena, A. A. (2024). Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135449>
163. Bailly, G. C., El Mendili, Y., Konin, A., & Khoury, E. (2024). Advancing Earth-Based Construction: A Comprehensive Review of Stabilization and Reinforcement Techniques for Adobe and Compressed Earth Blocks. *Eng*, 5(2), 750–783. <https://doi.org/10.3390/eng5020041>
164. Hale, S. E., Roque, A. J., Okkenhaug, G., Sørmo, E., Lenoir, T., Carlsson, C., Kupryianchyk, D., Flyhammar, P., & Žlender, B. (2021). The Reuse of Excavated Soils from Construction and Demolition Projects: Limitations and Possibilities. *Sustainability*, 13(11), 6083. <https://doi.org/10.3390/su13116083>
165. Paula Junior, A. C., Jacinto, C., Turco, C., Fernandes, J., Teixeira, E., & Mateus, R. (2022). Analysis of the effect of incorporating construction and demolition waste on the environmental and mechanical performance of earth-based mixtures. En *Construction and Building Materials* (Vol. 330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127244>
166. Moevus, M., Jorand, Y., Olagnon, C., Maximilien, S., Anger, R., Fontaine, L., & Arnaud, L. (2016). Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. *Materials and Structures*, 49(4), 1555–1568. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0595-5>

167. Perrot, A., Rangeard, D., & Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Samuel Mares Chávez

**Candidato para el Grado de
Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**

Tesis: OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS, DE PRINTABILIDAD Y MECÁNICAS DE UNA TINTA CEMENTANTE ELABORADA CON BASE EN RESIDUO DE TIERRA PRODUCTO DE EXCAVACIÓN PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D

Campo de estudio: Ciencia e Ingeniería de Materiales de Construcción

Datos personales:

Nacido en Nuevo Laredo, Tamaulipas el 22 de enero de 2001, hijo de Samuel Mares Ledezma y Juana Idalia Chávez Ortiz.

Educación:

Egresado del Tecnológico Nacional de México campus Nuevo Laredo como Ingeniero Civil en 2024, presentando exitosamente su proyecto de investigación: *“Estudio y solución Vial en la Intersección de Calle Anáhuac y Avenida Reforma en el Municipio de Nuevo Laredo, Tamaulipas”* ante el comité universitario, primer lugar en la generación 2019-2023.

Experiencia Profesional:

Técnico especializado en la rama de movilidad sostenible e ingeniería de tránsito desde 2019, Construcción sostenible, circular y con materiales con base en tierra, así como consultor de análisis estadístico y metodología de la investigación desde 2024.