



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D

Jorge Miguel Maldonado Acevedo

Asesorado por Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas

Guatemala, octubre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE MIGUEL MALDONADO ACEVEDO

ASESORADO POR ING. PLINIO ESTUARDO HERRERA RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 05 de mayo de 2023.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge Maldonado', with a long horizontal line extending to the right.

Jorge Miguel Maldonado Acevedo

Guatemala, 13 de octubre de 2023

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro:

Por este medio me es grato manifestarle, que, en calidad de asesor, he procedido a la revisión final del trabajo de graduación titulado "**Caracterización reológica de mezclas de concreto para impresión 3D**", desarrollado por el estudiante JORGE MIGUEL MALDONADO ACEVEDO.

Asimismo, se determino que dicho trabajo, además de ser un valioso aporte a la ingeniería del país, en especial para la implementación de nuevas tecnologías de construcción, ha sido elaborado conforme a los objetivos planteados, por lo que me permito recomendar su aprobación.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,



Ingeniero Plinio Estuardo Herrera Rodas
Ingeniero Civil Colegiado No. 3876
Asesor de Tesis

Plinio Estuardo Herrera Rodas
Ingeniero Civil
Colegiado No. 3876

Guatemala, 16 de octubre de 2,023

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D” desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, Jorge Miguel Maldonado Acevedo, quién contó con la asesoría del Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D**, presentado por: **Jorge Miguel Maldonado Acevedo**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, octubre de 2023





Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.725.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA IMPRESIÓN 3D**, presentado por: **Jorge Miguel Maldonado Acevedo**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.



Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Con todo mi amor, todo lo que soy y puedo ser, es gracias a él.
- Mis padres** Jorge Félix Maldonado Enríquez y Claudia Vanessa Acevedo de Maldonado. Por creer en mí, su gran cariño, apoyo, ejemplo y motivación en todo sentido de mi vida, que este logro sea una mínima recompensa a sus sacrificios, los amo.
- Mi hermana** Lucia Vanessa Maldonado Acevedo. Por la unidad que siempre ha existido entre nosotros, se mantenga por siempre, te amo.
- Mi familia** De quienes he aprendido grandes lecciones de vida y me siento respaldado.
- Mis amigos** Por el apoyo, consejos y convivencia juntos, que sin duda ayudaron a mi formación.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Con respecto y orgullo, por haber tenido la oportunidad de formarme como profesional durante estos años.
Facultad de ingeniería	Por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.
Mi asesor	Ingeniero Plinio Estuardo Herrera Rodas, por toda la ayuda, consejos y enseñanzas prestados en la elaboración del presente trabajo de graduación.
Ingeniero	Ariel Osorio, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.
Cementos Progreso	Por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo de graduación junto con un gran equipo de profesionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CONTEXTUAL	1
1.1. Mezclas de concreto.....	1
1.1.1. Generalidades del concreto	2
1.1.2. Tipos de cemento	7
1.1.3. Aditivos químicos.....	11
1.2. Características reológicas	14
1.2.1. Generalidades de las características reológicas.....	14
1.2.2. Ensayo de reómetro	18
1.3. Desarrollo de los ensayos complementarios	23
1.3.1. Prueba de corte con aspas (<i>shear vane test</i>)	23
1.3.2. Ensayo de asentamiento	25
1.3.3. Ensayo cono de penetración	26
1.3.4. Masa unitaria	28
1.3.5. Temperatura	31
1.3.6. Contenido de aire	32
1.3.7. Ensayo a compresión	34
1.4. Otros ensayos complementarios	38
1.5. Construcciones con impresión 3D	40

1.6.	Estudio de las mezclas de concreto	41
1.6.1.	Laboratorio CETEC de Cementos Progreso	42
1.6.2.	Lugar de ejecución de la impresora 3D	43
1.6.3.	Materiales utilizados para la mezcla del concreto ...	47
2.	RESULTADOS DE LA METODOLOGIA DE INVESTIGACION	51
2.1.	Consideraciones de la investigación	51
2.2.	Método y recolección de datos.....	52
2.3.	Procesamiento y análisis de la información	52
2.3.1.	Diseño teórico de mezclas	53
2.3.2.	Análisis granulométrico arena	54
2.3.3.	Características físicas del agregado fino.....	55
2.3.4.	Elaboración de mezcla, ensayos y núcleos de concreto	56
2.3.4.1.	Diseño de mezcla.....	56
2.3.4.2.	Elaboración de mezcla y ensayo cono de penetración.....	58
2.3.4.3.	Ensayo masa unitaria y cono de penetración.....	60
2.3.4.4.	Ensayo asentamiento	65
2.3.4.5.	Ensayo de temperatura	66
2.3.4.6.	Ensayo contenido de aire	67
2.3.4.7.	Ensayo prueba de corte con aspas (<i>shear vane test</i>)	68
2.3.4.8.	Ensayo a compresión	75
2.3.4.9.	Ensayo reómetro	82
2.4.	Resumen de resultados	90
	CONCLUSIONES.....	93

RECOMENDACIONES..... 95
REFERENCIAS 97
APÉNDICES 99
ANEXOS..... 105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Aumento de la resistencia del concreto por curado constante en distinto rango de tiempo.	5
2.	Elementos dañados por ataque de sulfatos.	8
3.	Curvas de fluidez de fluidos no newtonianos.	17
4.	Curva de flujo	19
5.	Curvas de flujo y viscosidad, modelo reológico de Bingham.....	20
6.	Gráficas de flujo dinámico del concreto.....	21
7.	Ejemplo de curva de crecimiento de corte y curva de flujo	23
8.	Modelo 3D de la casa impresa.....	44
9.	Estructuras de casa impresa 3D.	45
10.	Impresión 3D modelo a escala.....	45
11.	Fotografía de casa impresa en 3D	46
12.	Análisis granulométrico arena	55
13.	Cono de penetración. NTG 41051 h1.....	59
14.	Ensayo masa unitaria, según NTG 41050.....	62
15.	Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 1.	73
16.	Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 2.	74
17.	Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 3.	75
18.	Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 1.	80
19.	Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 2.	81
20.	Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 3.	82
21.	Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 1.....	84
22.	Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 1.....	85

23.	Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 2.	86
24.	Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 2.	87
25.	Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 3.	88
26.	Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 3.	89

TABLAS

I.	Diseño de mezcla No. 1	53
II.	Diseño de mezcla No.2.....	53
III.	Diseño de mezcla No.3.....	54
IV.	Características físicas del agregado fino	56
V.	Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.1.....	57
VI.	Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.2.....	57
VII.	Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.3.....	57
VIII.	Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 1.	59
IX.	Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 2.	59
X.	Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 3.	60
XI.	Resultados masa unitaria en tiempo 0.....	61
XII.	Resultados Cono de penetración y masa unitaria mezcla 1.	62
XIII.	Resultados Cono de penetración y masa unitaria mezcla 2.	63
XIV.	Resultados Cono de penetración y masa unitaria mezcla 3.	64
XV.	Resultados de asentamiento	66
XVI.	Resultados temperatura de mezclas.....	67
XVII.	Resultados, contenido de aire.	68
XVIII.	Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 1.....	70
XIX.	Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 2.....	71
XX.	Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 3.....	72
XXI.	Resistencia a compresión mezcla 1.....	77
XXII.	Resistencia a compresión mezcla 2.....	78

XXIII.	Resistencia a compresión mezcla 3.....	79
XXIV.	Resultados ensayo reómetro.	89

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
τ_0	Esfuerzo inicial de corte
$\dot{\gamma}$	Gradiente de velocidad
M.U.	Masa unitaria
%	Porcentaje
“	Pulgadas
μ	Viscosidad

GLOSARIO

ACI	American Concrete Institute.
Aditivos	Sustancia química que se incorpora a la mezcla de concreto para modificar sus propiedades o características.
Asentamiento	Medida de fluidez o consistencia utilizando el cono de Abrams.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Concreto	Piedra artificial resultado de la combinación de cemento, agua y agregados pétreos.
Consistencia	Estado de fluidez y rigidez en estado fresco.
Curado	Control en la hidratación y temperatura controlada luego de su colocación inicial.
Exudación	Fenómeno que ocurre durante el proceso de endurecimiento del concreto fresco, desplazándose el agua hasta la superficie.

Fraguado	Proceso de endurecimiento inicial del material después de haber sido mezclado y colocado en su ubicación final.
NTG	Normas Técnicas Guatemaltecas.
PCA	Portland Cement Association.
Reología	Rama de la física que se enfoca en el estudio del flujo y deformación de fluidos.
Reómetro	Aparato de laboratorio utilizado para medir propiedades reológicas.
Revolución	Rotación completa de un objeto o partícula alrededor de un punto fijo.
Robustez	Capacidad de un sistema, proceso o entidad para resistir y adaptarse a cambios.
Trabajabilidad	Propiedad del concreto o mortero en estado fresco que determina sus características de trabajo.

RESUMEN

En Guatemala, existe la oportunidad de realizar pruebas en impresión 3D con concreto a escala real, sin duda un hito para la industria de la construcción en el país y la región. Actualmente, se trabaja en desarrollar proyectos para imprimir estructuras habitables y se espera con esto, impulsar nuevos sistemas, nuevas formas de construir viviendas y aportar a la reducción del enorme déficit habitacional en nuestro país.

Un aspecto primordial de la impresión 3D es el material para imprimir, y el estudio de las mezclas de concreto para impresión 3D se hace imprescindible para el desarrollo de esta nueva tecnología. Si no se conoce el material para impresión 3D, es poco probable tener éxito en la construcción de un elemento o una vivienda con esta tecnología. Entre todas las propiedades a analizar, destacamos la forma en que se mueve una mezcla, como se desplaza en estado fresco y otras características como el tiempo de endurecimiento. A todas estas propiedades les denominamos reología de la mezcla, y es precisamente en lo que se centrará este estudio.

Para evaluar estas propiedades, se elaboraron 3 diferentes mezclas que tienen potencial de ser utilizadas en la impresora 3D. Estas mezclas se sometieron a ensayos de consistencia, temperatura, porcentaje de aire, masa unitaria y resistencia a compresión, ensayos realizados en base a las Normas Técnicas Guatemaltecas (NTG) de COGUANOR (Comisión Guatemalteca de Normas).

Adicionalmente, se realizaron ensayos especiales, como el de resistencia a esfuerzo de corte a través del tiempo, con la finalidad de evaluar la reología de la mezcla. Estos procedimientos se realizaron en base a documentaciones y experiencias de nuevos estudios para este tipo de mezclas para impresión 3D. Actualmente, no existen normativas específicas para evaluar las características físicas y propiedades mecánicas del material cementante que se utilizará para una impresión 3D.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características físicas y propiedades mecánicas de tres mezclas de concreto para impresión 3D con énfasis en el comportamiento reológico de las mismas, variando aditivos y tipos de cemento.

Específicos

1. Evaluar la consistencia de tres mezclas de concreto adecuadas para impresión 3D en los primeros 60 minutos.
2. Generar curvas de esfuerzo de corte versus tiempo para tres diferentes mezclas de concretos para impresión 3D.
3. Evaluar características de asentamiento, masa unitaria, contenido de aire y temperatura del concreto para impresión 3D en estado fresco.
4. Evaluar la resistencia a la compresión de tres mezclas de concreto para impresión 3D.

INTRODUCCIÓN

Desde inicios de la humanidad han sido necesarios espacios de refugio y habitabilidad para estar protegidos de las diferentes condiciones que puedan poner en peligro la vida y la salud. A lo largo del tiempo, se han mejorado los diseños de viviendas y edificaciones, aplicando un sin número de métodos de construcción.

Con el paso del tiempo, los avances tecnológicos han podido facilitar y mejorar metodologías que comúnmente se utilizan, se han puesto a prueba nuevos sistemas constructivos que pueden complementar o incluso sustituir parcialmente los que se utilizan de forma convencional hoy en día. Este es el caso de la impresión 3D con concreto, una moderna técnica de construcción con la que se pretende hacer más eficiente el proceso.

La tecnología de impresión 3D en concreto, permite que los proyectos, ya sean elementos estructurales o elementos urbanos, por mencionar algunos, se impriman a partir de archivos computarizados utilizando un concreto especial que permite la colocación de capas horizontales sobrepuestas, construyendo los objetos progresivamente.

En esta investigación se realizaron diferentes ensayos y estudios en búsqueda de que el material cumpla con características reológicas óptimas que garanticen una buena adherencia e integridad en la construcción, evitando que el elemento o estructura que se está imprimiendo, colapse o se deforme.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CONTEXTUAL

1.1. Mezclas de concreto

El concreto consiste en la mezcla de cemento, agregados que son normalmente arena y piedrín (grava), agua y en algunos casos aditivos químicos. La combinación de todos estos crea una masa que endurece con el tiempo a consecuencia de la reacción química del cemento con el agua y se forma una roca artificial.

Los agregados en las mezclas de concreto forman una parte muy importante de la misma, ocupan aproximadamente entre un 60 % a 75 % del volumen total de una mezcla de concreto. Con respecto al volumen del agua ocupado dentro de la mezcla, este se encuentra aproximadamente entre un 14 % al 21 %, el aire también ocupa un porcentaje de volumen dentro de la mezcla que puede llegar a ocupar hasta un 8 % y el cemento, ocupa entre un 7 % al 15 % del total de la mezcla.

Tanto el diseño teórico de una mezcla de concreto, como elaborar la mezcla en campo, con las buenas prácticas y proporcionamiento son de gran importancia debido a que de estas condiciones depende que se obtengan las resistencias requeridas para la construcción de alguna edificación en un proyecto.

1.1.1. Generalidades del concreto

El concreto es considerado el material de construcción más utilizado en el mundo, se aplica en elementos estructurales para viviendas, edificaciones, infraestructura vial, entre otros. Se prefiere su uso debido a la capacidad de soportar grandes cargas a compresión, su costo, durabilidad y la trabajabilidad para adaptarse a las formas que se requieran.

Según el foro número 11 de sostenibilidad del concreto del ACI, se consumen alrededor de 4.9 toneladas de cemento por /persona/año en el mundo, lo que equivale a alrededor de 2 m³ de concreto por persona/año.

Existen diferentes características que se estudian en el concreto sobre todo las condiciones en estado fresco, endurecido y la durabilidad del mismo a través del tiempo.

Entre las características analizadas en el concreto fresco relacionadas a la trabajabilidad, podemos mencionar la manejabilidad, la consistencia, la facilidad de colocación y el inicio del fraguado. El concreto recién mezclado debe de tener una consistencia adecuada según su uso, debe de ser plástico o semifluido con la posibilidad de poder ser moldeado a mano. En una mezcla correctamente elaborada y plástica, el material cementante envuelve todas las partículas de pedrín y arena. Además, todas estas partículas deben de mantenerse unidas evitando que exista segregación entre las mismas.

Durante la colocación del concreto en consistencia plástica, este fluye lentamente sin segregarse, en algunas ocasiones en la fundición de elementos estructurales delgados y fuertemente armados se requiere de una mezcla con mayor trabajabilidad para asegurar la colocación correcta del material. En este tipo de situaciones es favorable que la mezcla se encuentre en un estado más fluido procurando mantener la relación agua-cemento. Una alternativa comúnmente utilizada es la aplicación de aditivos plastificantes para lograr un concreto más fluido sin demeritar su calidad.

De la trabajabilidad dependen varias propiedades como: la consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, exudación y facilidad de acabado. El ensayo de asentamiento, en cono de Abrams es un buen indicador para la medida de consistencia, trabajabilidad y humedad del concreto. Se considera un concreto con baja trabajabilidad cuando se tiene un valor bajo de asentamiento, esto indica que es un concreto rígido y seco, por el contrario, un concreto con alta trabajabilidad obtiene un valor mayor de asentamiento indicando que es un concreto más fluido y húmedo, por lo tanto, más fluido.

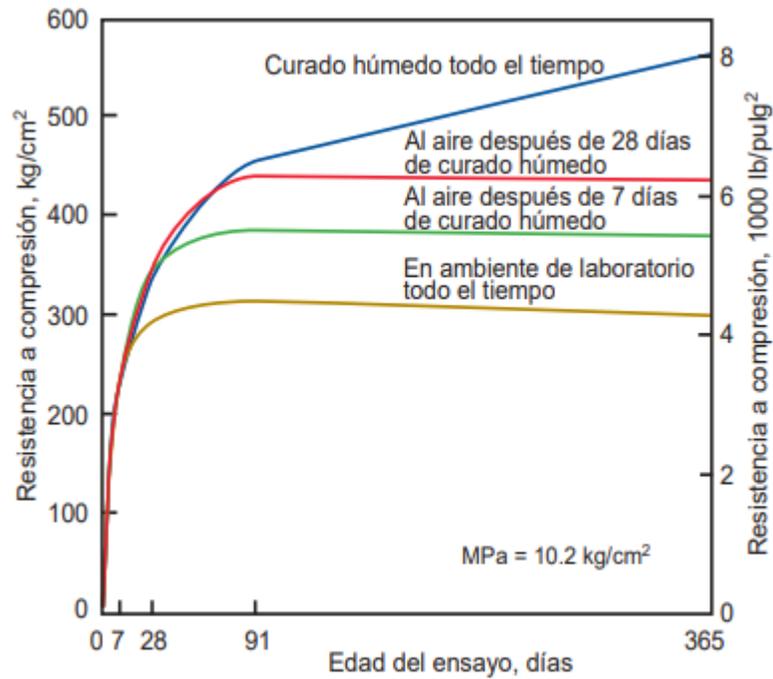
La temperatura de colocación es otro factor que influye en la consistencia del concreto, debido a que, a mayor temperatura los agregados pueden estar más secos, la reacción química de la mezcla libera más calor y pierde una cantidad de agua en el proceso de hidratación del cemento. El conocimiento de esta reacción química entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento del concreto. Factores como la cantidad de yeso en la composición química del cemento, la finura, aditivos, cantidad de agua adicionada y temperatura de los agregados influyen en ese tiempo de fraguado y endurecimiento del concreto.

Luego del proceso de mezcla y elaboración de un concreto, comienza el proceso del endurecimiento; Según la Asociación del Cemento Portland (2018), estos factores suman a la resistencia del concreto en su proceso de endurecimiento:

- El cemento que aún no se ha hidratado y esté presente en la mezcla.
- Que el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté por encima de aproximadamente 80 %.
- La temperatura del concreto permanezca favorable.

Si la humedad relativa dentro del concreto baja del 80 % o la temperatura del concreto baja a menos de 0, el proceso de endurecimiento se interrumpe, y ya no se incrementa la resistencia como se muestra en la figura 1. Por el contrario, si se realiza un proceso de curado y se optimizan las condiciones, se puede lograr un incremento en la resistencia del concreto; El curado del concreto puede realizarse humedeciendo superficialmente el elemento de concreto con agua, adecuando las condiciones ambientales si fuese posible o utilizando componentes químicos que contribuyan a mantener esa humedad y temperatura óptima en el concreto.

Figura 1. **Aumento de la resistencia del concreto por curado constante en distinto rango de tiempo**



Fuente: Portland Cement Association (2002), (2002). *Diseño y control de mezclas de concreto*.

La resistencia, que es el valor esperado más importante, se puede definir como la capacidad máxima de resistencia a carga axial. Esta resistencia se expresa en unidades de fuerza distribuidas en unidades de área. Normalmente como kilogramos por centímetros cuadrados (Kg/cm²), megapascales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (lb/pulg² o psi) normalmente a una edad de 28 días.

Existen diferentes edades para pruebas, siempre y cuando se relacionen con la resistencia a 28 días; La resistencia a 7 días representa aproximadamente un 75 % de la resistencia a los 28 días, la resistencia a los 56 y 90 días, exceden en 10 % y 15 % de la resistencia a los 28 días según PCA (2018). La resistencia a compresión se logra como resultado de varios factores, por ejemplo: la relación agua-cemento utilizada, la calidad del curado, las condiciones ambientales y la edad del concreto.

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura es utilizado normalmente para el diseño de infraestructura vial, losas, placas, entre otros. Se puede usar un índice de resistencia a flexión empírico en base a la resistencia a compresión del concreto. En concreto de peso normal, este índice corresponde a alrededor de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascuales o de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en psi (libra fuerza por pulgadas cuadrada).

La resistencia a tensión del concreto es aproximadamente un 8 % a 12 % de la resistencia a compresión, se estima entre 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cúbico o de 5 a 7.5 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en psi (libra fuerza por pulgada cuadrada). Con respecto a la resistencia a esfuerzos por corte, se estima que puede ser entre un 8 % al 14 % de la resistencia a compresión.

1.1.2. Tipos de cemento

El cemento es un polvo fino que reacciona al hidratarse con el agua, comúnmente se utilizan cemento portland y cementos hidráulicos adicionados. Estos cementos normalmente son compuestos por silicatos de calcio hidráulicos, el resultado de un proceso químico genera el Clinker, que al ser pulverizado y combinado con yeso se obtiene el cemento portland.

A continuación, se describen los diferentes tipos de cemento según las normativas más utilizadas en el medio. Es importante recalcar, que las normas americanas ASTM C150 y ASTM C595 se colocan únicamente como referencia, porque la única norma de cemento vigente en Guatemala, es la normativa guatemalteca COGUANOR NTG 41095, que está basada en la norma americana ASTM C1157, de cementos hidráulicos por desempeño.

La ASTM C 150, Especificación de Norma para el Cemento Portland, establece 8 diferentes tipos de cementos para ser aplicados en diferentes condiciones.

Cemento tipo I cemento normal para uso general, puede ser aplicado en pavimentos de concreto, losas, elementos estructurales con armaduras, puentes, tanques, tubería de concreto, para fabricación de unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado. También existe la variante del cemento tipo I, llamado cemento tipo IA referente a un cemento con las mismas características adicionado con aire.

Cemento tipo II moderada resistencia a los sulfatos se utiliza cuando sea necesaria la protección al ataque por sulfatos, pueden ser utilizados en estructuras normales y miembros expuestos a suelos, también a condiciones expuestas al agua subterránea. El cemento tipo II puede soportar ataques por sulfatos debido a que contiene menos del 8 % de aluminato tricálcico, los ataques a sulfatos provocan una desintegración del concreto, pérdida de la cohesión entre sus partículas y también su resistencia, un cemento que fue afectado por ataque de sulfato luce como en la figura 2. De igual forma, el cemento tipo II, tiene la variante de aire incluido, denominado cemento tipo IIA.

Figura 2. **Elementos dañados por ataque de sulfatos**



Fuente: Portland Cement Association (2002). *Diseño y control de mezclas de concreto*.

Cemento tipo III alta resistencia inicial, ofrece resistencia a edades tempranas, a una semana o menos, es similar al cemento tipo I en su composición química y física, sin embargo, las partículas del cemento tipo III se muelen más finas, normalmente son utilizados para elementos estructurales donde se requiere remover en un tiempo menor los encofrados o se requiere poner en servicio más rápidamente. El cemento tipo III también tiene su variante con aire incluido denominado, cemento tipo IIIA.

Cemento tipo IV bajo calor de hidratación, son utilizados en situaciones donde se debe de reducir la cantidad de calor generado por la hidratación, por ejemplo, en estructuras de concreto masivo, grandes presas, ambientes con temperaturas considerablemente elevadas.

Cemento tipo V alta resistencia a sulfatos, utilizado en condiciones de alta concentración de sulfatos, pueden ser suelos o agua subterránea. El desarrollo de resistencia es más lento que el cemento tipo I. El cemento tipo V contiene como máximo un 5 % de contenido de aluminato tricálcico, tiene una baja permeabilidad lo cual atribuye a la protección de la armadura en el elemento estructural.

Todas las variantes de cemento con aire incluido (tipo IA, IIA y IIIA) mantienen la misma composición de los cementos respectivamente, pero se les agrega cierta cantidad de material incorporador de aire que se muelen junto con el Clinker. La adición de aire en los cementos optimiza la resistencia a congelamiento y deshielo del concreto.

Los cementos hidráulicos adicionados, son aquellos que se producen por la molienda uniforme y conjunta de dos o más tipos de materiales finos, estos pueden ser cemento portland, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, puzolanas, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales. Estos cementos tienen otra clasificación, según la ASTM C 595, son los siguientes 5 tipos de cemento:

- Tipo IS: cemento portland de escoria
- Tipo IP y tipo P: cemento portland puzolánico
- Tipo I (PM): cemento portland modificado con puzolana
- Tipo S: cemento de escoria o siderúrgico

- Tipo I (SM): cemento portland modificado con escoria

Con respecto a la clasificación con base a la normativa NTG 41095 *Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*. Los cementos son clasificados de la siguiente manera:

- Tipo UG: uso general
- Tipo AR: alta resistencia inicial
- Tipo DLR: desarrollo lento de resistencia
- Tipo MRS: moderada resistencia a los sulfatos
- Tipo ARS: alta resistencia a los sulfatos
- Tipo MCH: moderado calor de hidratación
- Tipo BCH: bajo calor de hidratación

Cemento UG, el cemento para uso general puede ser utilizado para toda clase de obras, elementos estructurales, cimentaciones, obras pequeñas, medianas y grandes.

Cemento AR, cemento de alta resistencia inicial. Utilizado para obras de concreto simple, reforzado y preesforzado de endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Para la fabricación de elementos estructurales que requieren un desencofrado y desmoldado rápido.

Cemento DLR, cemento de desarrollo lento de resistencia. Comúnmente utilizado para la estabilización de suelos, concreto compactado con rodillo para pavimentos.

Cemento MRS, cemento de moderada resistencia a los sulfatos. Para uso recomendado en construcciones cercanas a terrenos y aguas que contienen

sulfatos, concreto en aguas marinas o en ambientes marinos, expuestos a moderadas concentraciones de sulfatos de calcio, sodio y magnesio.

Cemento ARS, alta resistencia a sulfatos. Para uso recomendado en construcciones cercanas a terrenos y aguas que contienen sulfatos, concreto en aguas marinas o en ambientes marinos, expuestos a altas concentraciones de sulfatos de calcio, sodio y magnesio.

Cemento MCH, cemento de moderado calor de hidratación. Utilizado en obras con fundición de concreto masivo, susceptibles de fuertes retracciones por variaciones térmicas y peligro de fisuración, como por ejemplo fundiciones de grandes dimensiones, muros gruesos y grandes losas en ambientes muy calurosos.

Cemento BCH, cemento de bajo calor de hidratación. Se utiliza cuando interesa que el concreto desarrolle poco calor de hidratación, como el caso de las presas de concreto, bases de grandes dimensiones y otras construcciones masivas.

1.1.3. Aditivos químicos

Los aditivos químicos, son otros ingredientes que pueden pertenecer a una mezcla de concreto. La incorporación de aditivos tiene como objetivo modificar ciertas características físicas de la mezcla de concreto en estado endurecido o en estado plástico (fresco), por ejemplo, la reducción de costos, superación de ciertas condiciones durante el tiempo de mezclado, transporte, colocación y curado.

La PCA (2018) clasifica los aditivos según sus funciones, como se muestran a continuación:

- Aditivos incorporadores de aire
- Aditivos reductores de agua
- Plastificantes (fluidificantes)
- Aditivos acelerantes
- Aditivos retardantes
- Aditivos de control de hidratación
- Inhibidores de corrosión
- Inhibidores de retracción
- Inhibidores de reacción álcali-agregado
- Aditivos colorantes
- Aditivos para mejorar manejabilidad, adherencia, impermeabilizantes, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

Existen otro tipo de clasificaciones de acuerdo a los efectos que producen estos aditivos, según la ASTM C 494 y la NTG 41070, los aditivos se clasifican en:

- Tipo A reductores de agua
- Tipo B retardantes de fraguado
- Tipo C acelerantes
- Tipo D reductores de agua-retardantes
- Tipo E reductores de agua-acelerantes
- Tipo F reductores de agua de alto rango
- Tipo G reductores de agua de alto rango-acelerantes
- Tipo S de desempeño específico

Los aditivos utilizados para el estudio son retardantes de fraguado y reductores de agua. Los aditivos reductores de agua se usan para disminuir la cantidad de agua en una mezcla teniendo como resultado una manejabilidad y asentamiento mayor, estos aditivos disminuyen el contenido de agua aproximadamente entre un 5 % al 10 %. La aplicación de este tipo de aditivos mantiene la resistencia de diseño, ya que logra disminuir la relación agua-cemento. La diferencia de resistencia entre un concreto con la misma cantidad de cemento, aire y asentamiento, conteniendo el aditivo reductor de agua puede ser entre un 10 % al 25 % mayor a la resistencia de un concreto sin el uso de este aditivo.

El uso del aditivo reductor de agua no produce una contracción crítica que genera fisuras en el concreto. Puede disminuir, aumentar o no tener ningún efecto en la exudación del concreto, esto depende de la composición química del aditivo. Según la tabla 6.1 del PCA (ver anexo 1). Aditivos de concreto según su clasificación, a la hora de utilizar un aditivo reductor de agua el proceso de fraguado tiende a retardarse por lo que se recomienda utilizar un aditivo acelerante.

Los aditivos acelerantes se usan para reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto, también se puede acelerar utilizando un cemento de alta resistencia inicial, teniendo una relación agua-cemento baja, usando reductores de agua o curando el concreto a altas temperaturas.

Por el contrario, los aditivos retardantes se utilizan para retrasar el proceso de fraguado del concreto, otra alternativa para la reducción del tiempo de fraguado es bajar la temperatura del concreto a través del enfriamiento del agua de la mezcla y de los agregados. Los aditivos retardantes son ideales de usar en

situaciones donde se requieran fundiciones de gran tamaño, elaboración de acabados especiales, el bombeo del concreto, entre otros.

1.2. Características reológicas

Las características reológicas, son las principales características que se han utilizado hasta la actualidad, para el análisis de las mezclas de concreto para impresión 3D. A continuación, se desarrolla el tema de reología, enfocándolo principalmente al tema de estudio del presente trabajo.

1.2.1. Generalidades de las características reológicas

La reología se considera una ciencia que estudia la fluidez y la deformación de la materia bajo la influencia de cierta fuerza mecánica, esta definición propone The American Society of Rheology. Esto incluye sólidos, líquidos y gases, sin embargo, el término abarca de forma general a los fluidos.

El concreto y el mortero en estado fresco puede llegarse a considerar un fluido, tiene la capacidad de movilizarse de una forma ordenada, con una consistencia blanda y se adapta fácilmente a la mayoría de las figuras a las que es aplicada.

La viscosidad según Morhell (2015) se define como una medida de resistencia que el fluido opone a la fuerza de deformación provocado por un esfuerzo de corte. Es la relación entre la fuerza de corte contra el gradiente de velocidad. La viscosidad tiene unidades de presión-tiempo, normalmente se mide en Pascal-segundo y los viscosímetros que son aparatos especiales para medir la viscosidad, dan los valores de la viscosidad en Poises (P) equivalente a 0.1 Pa*s.

Existen diferentes variables que pueden cambiar la viscosidad de un fluido, principalmente se encuentra la presión, la temperatura, la composición química del fluido y la densidad. Es importante mencionar que los fluidos más afectados por el cambio de presión son los gases.

Independientemente de estos factores, si se considera una presión, temperatura, densidad y composición química constantes, y el fluido mantiene una viscosidad constante independientemente de la relación esfuerzo de corte y gradiente de velocidad, es considerado entonces un fluido newtoniano. Claro ejemplo de este tipo de fluidos es el agua y los aceites vegetales.

Por otra parte, están los fluidos que no mantienen su viscosidad luego de aplicar esfuerzo de corte a diferente velocidad, llegan a tener menor o mayor viscosidad conforme se aumente o disminuya la velocidad de corte, a todos estos fluidos se les denomina que presentan un comportamiento no newtoniano.

Los fluidos no newtonianos presentan entre dos o más fases en flujo, es decir, su comportamiento con respecto a la viscosidad varía dependiendo de la fase en que se encuentre. En las posibles diferentes condiciones de flujo, las partículas se ordenan de diferente manera, lo que provoca cambios en su fluidez y por lo tanto en su viscosidad. En resumen, esto provoca que la relación esfuerzo de corte y gradiente de velocidad no presente un comportamiento lineal y la viscosidad deja de ser una constante.

Los fluidos no newtonianos pueden ser clasificados, para esto es necesario realizar la gráficas de fluidez que son:

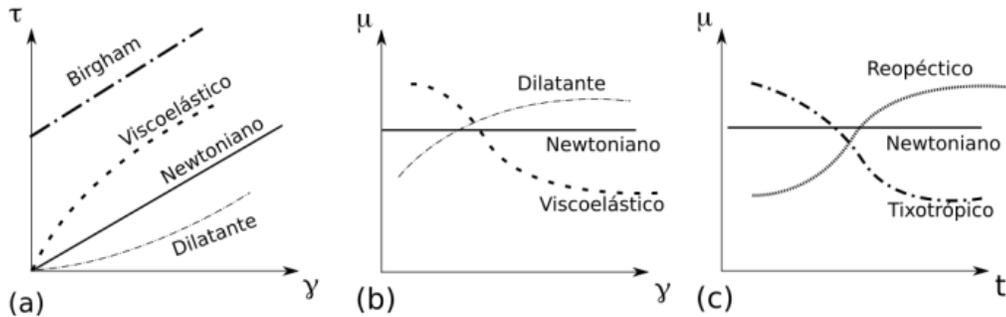
- Esfuerzo de corte versus gradiente de velocidad
- Viscosidad versus gradiente de velocidad

Con estas gráficas los fluidos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Viscoelásticos: es el fluido en el que la viscosidad es menor cuando el gradiente de velocidad es mayor.
- Dilatantes: es el fluido que aumenta su viscosidad cuando aumenta el gradiente de velocidad.
- Newtonianos: fluido que no cambia su viscosidad al variar el gradiente de velocidad.
- Bingham: se comporta como un sólido elástico hasta cierto límite y luego comienza a fluir como un fluido viscoelástico.
- Tixotrópicos: la viscosidad de este fluido disminuye con el tiempo de aplicación de esfuerzo de corte, pero tiene la capacidad de volver al valor original de viscosidad en cierto tiempo de reposo sin la aplicación de esfuerzo de corte.
- Reopéctico: su comportamiento es el mismo que el tixotrópico a diferencia de que la viscosidad aumenta en vez de disminuir.

A continuación, se muestran algunas curvas de fluidez de fluidos no newtonianos:

Figura 3. **Curvas de fluidez de fluidos no newtonianos**



Fuente: Morhell (2015). *Microciscosimetro capilar para fluidos complejos*.

Para caracterizar el comportamiento reológico en una mezcla de concreto, se deben de tomar medidas en estado fresco principalmente, se observa la deformación y resistencia que se provoca en un material debido a cierta fuerza mecánica de corte y también su trabajabilidad. Dentro de las características más críticas para una aplicación de un concreto se pueden mencionar las siguientes: trabajabilidad, compactación, estabilidad y consistencia. Estas propiedades definirán la característica reológicas, la habilidad del concreto para fluir y su viscosidad.

Se puede decir entonces que las propiedades reológicas principales de un concreto en estado fresco o plástico están relacionadas con respecto al comportamiento de su viscosidad, también su adherencia, la estabilidad de la mezcla, y por otro lado la compactación que es otro factor importante relacionada a su peso unitario y homogeneidad de la mezcla.

Todas estas propiedades reológicas del concreto no se pueden estandarizar para diferentes mezclas, como se mencionó anteriormente, dependen también de la composición química de los materiales, condiciones

externas como la temperatura, presión, y no existe un método definido para establecer cómo será su comportamiento reológico.

1.2.2. Ensayo de reómetro

La realización de este ensayo tiene como finalidad conocer y analizar las propiedades reológicas de las mezclas en estudio, no necesariamente los valores obtenidos de estas propiedades tienen que ser idénticos al realizarlo con un aparato similar, hay factores que cambian esos valores, por ejemplo, el aspa utilizada. Este ensayo proporciona los siguientes valores principalmente:

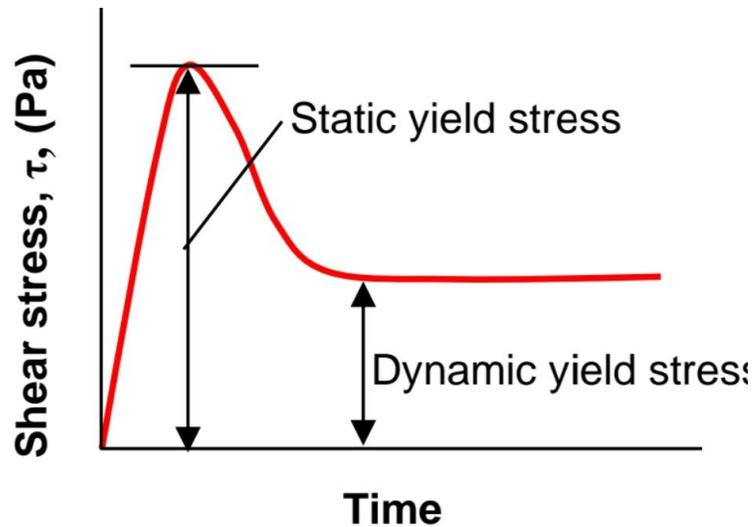
- Torque máximo correspondiente al límite elástico estático
- Viscosidad
- Curva de crecimiento de corte
- Curva de fluidez

Todos estos valores de esfuerzo, curvas y viscosidad, prácticamente se obtienen del valor necesario de esfuerzo para cumplir con una revolución a través del tiempo, con este aparato es posible realizar dos ensayos. El primero es la prueba de crecimiento de corte en donde las aspás rotan a una velocidad constante de 0.025 rev/s, y se toman los datos a través del tiempo. El mayor valor que se obtiene en este ensayo corresponde al límite elástico estático.

El segundo ensayo que puede realizar este aparato, es elaborar una curva de flujo, que servirá para determinar el límite elástico dinámico y la viscosidad plástica. Esta prueba comienza con un periodo inicial de “rompimiento” en donde se rompe la estructura tixotrópica del fluido y se pueden tomar los datos de la fuerza de corte. Luego, la velocidad de las aspás de corte varía en diferentes

velocidades, dando valores de torque distintos, a partir de estos valores se define la curva de flujo y los parámetros de Bingham.

Figura 4. Curva de flujo



Fuente: ICAR plus. (2021). *ICAR Plus Rheometer specification RHM-4000*.

En la figura número 4, se presenta la curva de flujo en condiciones ideales identificando los límites elásticos, estáticos y dinámicos.

El primer parámetro de Bingham es la fuerza mínima que se requiere para que el fluido comience a moverse y los valores están en pascales (Pa) o libras sobre pulgada cuadrada (psi). El otro parámetro que se mide es la viscosidad plástica que como se mencionó anteriormente, es la medida de la resistencia del fluido al moverse.

El análisis del modelo reológico de Bingham propone la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 1})$$

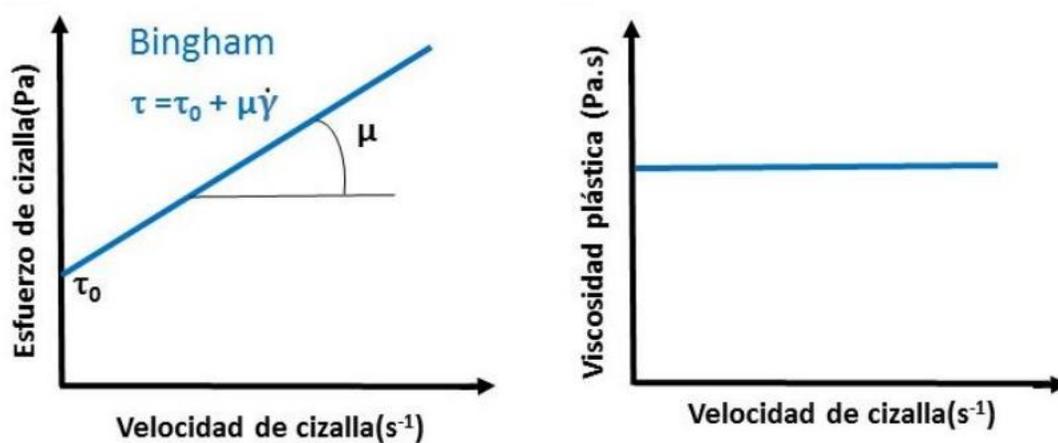
Donde:

τ_0 = valor del esfuerzo inicial de corte donde el material comienza a fluir.

μ = proporciona el valor de la viscosidad plástica.

$\dot{\gamma}$ = velocidad de corte.

Figura 5. **Curvas de flujo y viscosidad, modelo reológico de Bingham**

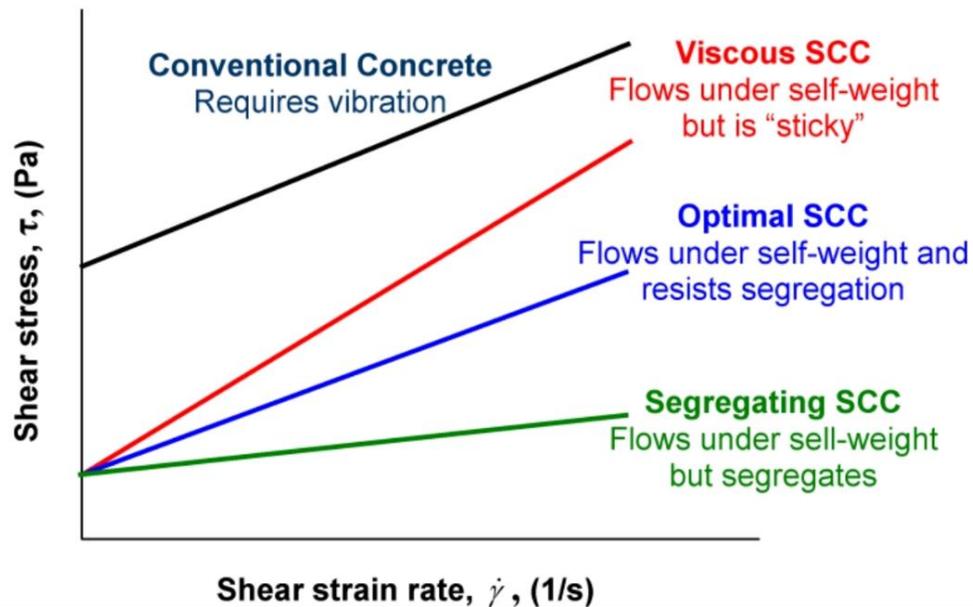


Fuente: Diez (2019). *Comportamiento reológico de cementos y morteros activados alcalinamente: influencia de las variables del proceso.*

Como se muestra en la figura 5, el punto inicial de la gráfica es el esfuerzo inicial de corte para iniciar el flujo. La pendiente de la línea es la viscosidad plástica y afecta a la resistencia del flujo después de que se ha superado el límite elástico estático.

El límite elástico estático, el límite elástico dinámico y la viscosidad plástica del concreto son los valores que presenta este ensayo. Si el límite elástico es alto, contribuye a que la mezcla no se segregue y también a que no genere tanta presión en su formaleta, sin embargo, para facilitar el bombeo, el autocompactado y la colocación, si es recomendable que la mezcla presente un límite elástico dinámico menor, sin embargo, esta mezcla puede segregarse.

Figura 6. **Gráficas de flujo dinámico del concreto**



Fuente: ICAR plus. (2021). *ICAR Plus Rheometer specification RHM-4000*.

En la figura número 6, se presentan diferentes gráficas del flujo dinámico de un concreto convencional versus concretos autocompactables con diferentes viscosidades y consistencias. En la gráfica de color negro se observa el comportamiento de flujo de un concreto convencional, este concreto tiene un alto límite elástico dinámico y requiere de vibración en la mayoría de los casos para que se consolide bien la mezcla en algún molde.

Por otra parte, se muestran las mezclas autocompactables con un bajo límite elástico dinámico, se muestra la gráfica de color rojo, con una viscosidad mayor y más pegajosa por lo que su colocación será un poco más costosa que la gráfica en verde y azul, pero menor que la de un concreto convencional. Por otra parte, la gráfica verde que presenta una viscosidad plástica menor será mucho menos difícil de colocar y hacerla fluir, pero muy propensa a la segregación. Por lo tanto, se debe de buscar el equilibrio entre la facilidad de flujo y la resistencia a la segregación.

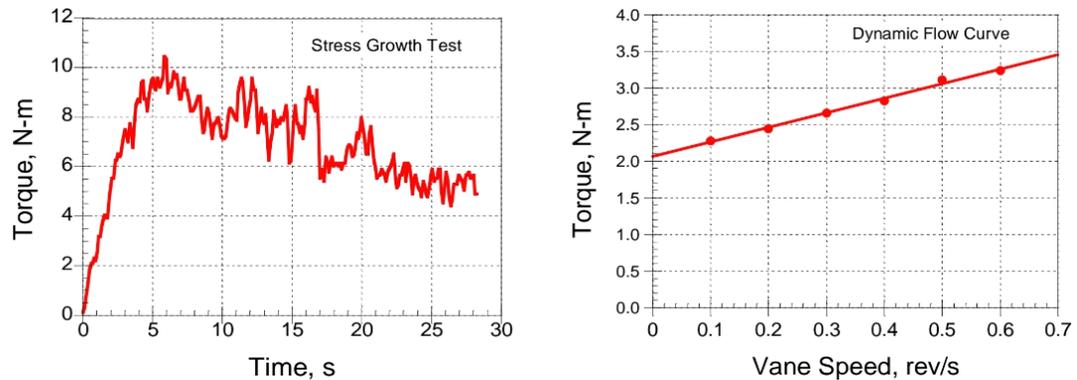
La forma de lograr una mezcla que cumpla con lo antes mencionado se podrá obtener realizando ensayos basados en controlar estas características.

Para realizar este ensayo, se tomarán en cuenta los siguientes parámetros y condiciones:

- Un concreto con asentamiento mayor a 2 pulgadas, de lo contrario el concreto estará demasiado rígido para poder ser ensayado con el aparato.
- Tamaño máximo del agregado hasta 1 1/4"
- La velocidad de rotación de las aspas se comprende dentro de 0.001 a 0.667 revoluciones por segundo.
- Torque mínimo de 0.01 N-m
- Torque máximo para ensayo de 90 N-m, no mayor a 2 segundos
- Torque constante máximo de 32 N-m
- Duración de la prueba: 1 minuto

Al realizar los ensayos, se obtendrán las curvas de crecimiento de tensión y la curva de flujo como se muestra en la figura 7

Figura 7. **Ejemplo de curva de crecimiento de corte y curva de flujo**



Fuente: ICAR plus. (2021). *ICAR Plus Rheometer specification RHM-4000*.

Los valores de fuerza máxima correspondiente al límite elástico dinámico y la viscosidad los proporciona directamente el aparato para su análisis. Al igual que el valor de fuerza del límite elástico estático y el torque máximo en la curva de crecimiento de corte.

1.3. Desarrollo de los ensayos complementarios

Existen otros ensayos que pueden complementar la información para el análisis de las mezclas y que podrían ser más prácticos para elaborarlos en el desarrollo de alguna construcción.

1.3.1. Prueba de corte con aspas (*shear vane test*)

Prueba de corte con aspas (*shear vane test*), este ensayo se realizó en base a los procedimientos propuestos por el equipo de COBOD, distribuidora de las impresoras 3D. Al realizar este ensayo se obtienen valores de esfuerzo de corte a través del tiempo. Se analiza la mezcla que se está imprimiendo desde el

tiempo de su realización hasta 60 minutos después. En base a estos datos obtenidos se puede conocer a qué velocidad se puede imprimir en base a los datos recomendados por COBOD (2022) (ver tabla 1 y figura 8). A mayores valores de esfuerzo de corte que tenga la mezcla a través del tiempo, mayor será la velocidad de impresión. Para realizar este ensayo se requiere del siguiente equipo:

- Aparato de aspas conformado por un cuerpo cilíndrico torsional y con 3 paletas intercambiables de diferente tamaño que se utilizan según la resistencia esperada de la mezcla, las medidas de las paletas son de 32x16; 40x20 y 50.8x25.4mm de altura y diámetro respectivamente.
- Recipiente con capacidad de contener el material suficiente para realizar el ensayo.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se debe de elaborar la mezcla de impresión y llenar el recipiente directamente de la extrusora de la impresora. Seguidamente, se utiliza el aparato shear vane test, colocando el valor de medición en 0, se coloca el tamaño de paleta que se requiere y se inserta en la mezcla del recipiente hasta que quede totalmente cubierta por el material, luego se realiza una revolución completa en sentido de las agujas del reloj, cuando se completa la revolución y ya no se esté aplicando esfuerzo se extrae el aparato y se anota la medida.

Este procedimiento se repite, desde insertar la paleta, girar el aparato y tomar mediciones en el siguiente tiempo: 0, 5, 10, 20, 45 y 60 minutos. Los valores anotados se deben de ser ajustar por un factor dependiendo del aspa que se utiliza, estos se especifican en el ajuste de cada aparato utilizado, si se utiliza

el aspa más pequeña, el valor obtenido del ensayo deberá de ser multiplicado por 2, el aspa de tamaño mediano se queda con el valor obtenido y los obtenidos con el aspa grande deberán de ser divididos dentro de 2. Todos estos resultados luego de multiplicarlos o divididos por su respectivo factor, tienen dimensionales en Newtons sobre centímetro cuadrado (N/cm²).

Se recomienda tener estos datos en KPa para el análisis, para ello se deberá de convertir de N/cm² a Kpa, por el método de estequiometría, sabiendo que 1 N/cm² es equivalente a 10 Kpa.

1.3.2. Ensayo de asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó en base a los procedimientos de la norma NTG 41017 h4 *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico*. El ensayo tiene como objetivo la medición del asentamiento de la mezcla de concreto en campo y en laboratorio (NTG, 2010).

El equipo utilizado para este ensayo se describe a continuación:

- Molde metálico o plástico que no reaccione genere una reacción química con el concreto, el molde debe de tener la capacidad suficiente para mantener las dimensiones y tolerancias especificadas durante su uso y no debe ser absorbente. En el anexo 2 se especifican las mediciones y forma del molde metálico.
- Varilla apisonadora, debe de ser una varilla recta de acero con punta redondeada con diámetro de 16 mm (5/8 de pulgada) ± 2 mm (1/16 de pulgada) y una longitud de por lo menos 100 mm (4 pulgadas) mayo que la profundidad del molde donde se hará la compactación.

- Dispositivo de medición, una regla, una cinta métrica o un instrumento similar de medición rígido o semirrígido marcado en incrementos de 5 mm (1/4 de pulgada).

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se realiza la mezcla con todos los ingredientes que la conforman, se humedece el molde y se coloca en una superficie plana no absorbente y nivelada. De la mezcla de concreto se llena el molde en tres capas, cada una aproximadamente a un tercio del volumen del molde, en cada capa se debe de varillar en forma de espiral 25 veces uniformemente en la sección transversal de cada una.

Al llenar todo el molde y varillar la última capa, se debe de emparejar la superficie del concreto mediante el enrase, luego se sostiene firmemente hacia el molde hacia abajo y se remueve todo el exceso de concreto que se encuentra alrededor. Por último, se retira el molde levantándolo en dirección vertical sin movimientos laterales o de torsión y se mide el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie de concreto.

Este ensayo se realizó únicamente al terminar cada mezcla evaluada.

1.3.3. Ensayo cono de penetración

Este ensayo se realizó tomando el procedimiento de la norma NTG 41051 h1 *Método de ensayo. Evaluación de morteros de pega para mampostería simple y reforzada antes de la construcción y durante la construcción.*

En el ensayo se analiza principalmente la consistencia de la mezcla en base a la penetración del cono. El equipo utilizado para este ensayo se describe a continuación:

- Molde de forma cilíndrica, con diámetro interior de 76 ± 1.6 mm y una profundidad de aproximadamente 88.1 mm, con capacidad de 400 ± 1 ml. El molde debe de tener un espesor uniforme, el espesor de la pared y la base no puede ser menor a 2.9 mm. El peso total del molde vacío no debe de ser menor a 900 g.
- Apisonador. Debe de cumplir con las especificaciones del método de ensayo NTG 41003 h4. La cara de apisonamiento debe de ser plana, con ángulos rectos.
- Rodo de madera. Una vara de madera, con un diámetro de 16mm y longitud de 152 mm.
- Penetrómetro de cono. Un aparato de Vicat utilizado en los métodos de ensayos de ASTM C 187 debe de ser modificado para medir las penetraciones del cono hasta una profundidad de 89 mm.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se realiza la mezcla con todos los ingredientes que la conforman y se toma la muestra inmediatamente después de completado el mezclado.

Se llena el molde de 400 ml con la mezcla realizada en 3 capas diferentes de igual volumen, apisonando cada capa 20 veces con el apisonador de forma circular completando una revolución. Luego del llenado completo se deben de

dar golpes en cinco diferentes puntos del molde. Por último, se corta a ras el exceso de mezcla formando una superficie plana y nivelada. Todo este procedimiento de llenado, apisonamiento y enrasado del molde, debe ser realizado en no más de 1.5 minutos.

Se levanta el cono de penetración y se coloca el molde con mezcla debajo del cono hasta que la punta del mismo descansa sobre un borde del molde. Luego se aprieta el tornillo de sujeción del cono para colocar el indicador de penetración en 0 de la escala. Se centra el molde debajo del cono y se suelta con giro rápido del tornillo de sujeción, la lectura se toma en milímetros pasado los 30 segundos desde su penetración.

Este ensayo se realizará en 0, 15, 30 y 45 minutos luego de su elaboración.

1.3.4. Masa unitaria

Con respecto al ensayo de masa unitaria, se podrán utilizar 2 diferentes metodologías de ensayo. Uno en base a la norma NTG 41017-h5 Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria), rendimiento (volumen de concreto producido) y contenido de aire (gravimétrico) del concreto. Y también podría realizarse con el ensayo de masa unitaria con base a la metodología de la norma NTG 41050 mortero de pega para unidades de mampostería. especificaciones.

Con respecto a la metodología de la norma NTG 41017 h5, solamente se toma la masa unitaria, se requiere del siguiente equipo para llevar a cabo dicho ensayo:

- Balanza, con una exactitud de 45 g, el rango de uso debe abarcar desde la masa del recipiente de medida vacío hasta la masa del recipiente más su contenido a 2600 Kg/m³.
- Varilla de apisonado, una varilla de acero con punta redonda, recta y lisa, con un diámetro de 16 mm ± 2 mm, el largo de la varilla debe ser por lo menos 100 mm mayor que la profundidad del recipiente donde se hará el apisonado y no debe exceder de 600 mm.
- Recipiente de medida, el recipiente debe de ser de forma cilíndrica de acero, la capacidad del recipiente está en base al tamaño máximo nominal del agregado grueso. Se puede observar en el anexo 3.
- Placa enrasadora, de acero en forma rectangular y plana de al menos 6mm

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se comienza realizando un volumen adecuado de la mezcla con todos los ingredientes que la conforman, luego se comienza a llenar el recipiente de medida en el número de capas requeridas por el método, cada capa debe de ser varillada 25 veces para los recipientes de 14 L o menores, y con 50 varilladas para recipientes de volumen de 28.

Luego se coloca en la balanza y se mide el peso total del recipiente más el material, para obtener el valor de la masa unitaria se utilizará la siguiente ecuación:

$$M.U. = \frac{Mr_m - Mr}{V_r} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

M.U.: masa unitaria (Kg/m^3)

Mrm: masa del recipiente y material (Kg)

Mr: masa del recipiente (Kg)

Vr: volumen del recipiente (m^3)

Con respecto al ensayo en base a la norma NTG 41050, se analizará principalmente la masa unitaria de la mezcla, en diferentes tiempos. El equipo utilizado para este ensayo será el siguiente:

- Molde de forma cilíndrica, con diámetro interior de $76 \pm 1.6\text{mm}$ y una profundidad de aproximadamente 88.1 mm, con capacidad de 400 ± 1 ml. El molde debe de tener un espesor uniforme, el espesor de la pared y la base no puede ser menor a 2.9mm. El peso total del molde vacío no debe de ser menor a 900g
- Apisonador. Debe de cumplir con las especificaciones del método de ensayo NTG 41003 h4. La cara de apisonamiento debe de ser plana, con ángulos rectos.
- Rodo de madera. Una vara de madera, con un diámetro de 16mm y longitud de 152 mm.
- Balanza. Que tenga una precisión de 1g o entre el 0.3 % de la carga de ensayo.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se realiza la mezcla con todos los ingredientes que la conforman y se toma la muestra inmediatamente después de completado el mezclado y también se analizarán luego de 15, 30 y 45 minutos.

Se llena el molde de 400 ml con la mezcla realizada en 3 capas diferentes de igual volumen, apisonando cada capa 20 veces con el apisonador de forma circular completando una revolución. Luego del llenado completo se deben de dar golpes en cinco diferentes puntos del molde. Por último, se corta a ras el exceso de mezcla formando una superficie plana y nivelada. Todo este procedimiento de llenado, apisonamiento y enrasado del molde debe ser realizado en no más de 1.5 minutos.

Se coloca en la balanza y se toma la lectura del peso del recipiente con la mezcla en gramos. Luego se utiliza la ecuación 2 para obtener la masa unitaria de la mezcla.

1.3.5. Temperatura

La medición de la temperatura se realizó conforme a la metodología propuesta por la norma NTG 41053 *Método de ensayo. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado.*

El procedimiento mostrará los valores de temperatura que genera la reacción exotérmica de la mezcla. El equipo a utilizar será el siguiente:

- Recipiente. El recipiente debe de ser capaz de contener una cantidad de mezcla que pueda cubrir todas las direcciones del sensor del dispositivo medidor de temperatura, de al menos 3 pulgadas.

- Dispositivo medidor de temperatura. El aparato medidor de temperatura debe de tener una aproximación de ± 0.5 °C y con capacidad de medir temperaturas dentro del rango de 0 °C a 50 °C, también tiene que permitir una inmersión en la mezcla de al menos 3 pulgadas.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se debe de colocar el dispositivo medidor de temperatura de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 3 pulgadas en el concreto recién mezclado, luego se debe de presionar suavemente en la superficie de los alrededores donde se introdujo el dispositivo para eliminar vacíos provocados por la inmersión del mismo.

El rango de tiempo para tomar la medición deberá de ser mayor de dos minutos y menor de cinco minutos, no se debe de sacar el medidor de temperatura de la mezcla a la hora de tomar la lectura.

Los resultados de este ensayo serán obtenidos en °C solamente al inicio de cada ensayo de peso unitario a los siguientes tiempos: 0, 15, 30 y 45 minutos para ver el comportamiento de la temperatura.

1.3.6. Contenido de aire

Contenido de aire, el aire dentro de la mezcla elaborada se medirá realizando los procedimientos propuestos por la norma NTG 41017 h7 *Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión* y también en base a la norma española UNE-EN 1015-7 métodos de ensayo de los morteros para albañilería específicamente en la parte 7 determinación del contenido en aire en el mortero fresco.

El análisis del contenido de aire será influyente en resultados como su masa unitaria, su resistencia a compresión, su capacidad de adherencia. Para realizar este ensayo se requieren de los siguientes materiales y equipos:

- Medidor de aire. Son medidores que emplean el principio de la ley de Boyle, pueden ser utilizados los medidores de aire tipo A o B. En el estudio se utilizarán medidores tipo B que dan el resultado directo del porcentaje de vacíos.
- Recipiente de medición. Es parte también del aparato medidor de aire, es normalmente de forma cilíndrica, fabricado en acero u otro metal que no sea atacable por la pasta de cemento. Debe de ser hermético.
- Varilla de apisonar. Dependiendo del medidor de aire se utilizarán apisonadores que cumplan con las especificaciones del método de ensayo. Por ejemplo, según NTG 41003 h4 se debe de utilizar una varilla de apisonar de acero con punta redonda y lisa con diámetro de $16 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. La longitud de la varilla debe de ser por lo menos de 100 mm, mayor a la profundidad del recipiente.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se debe de realizar la mezcla con todos los ingredientes que la conforman, luego se rellena el recipiente de medición del aparato medidor de aire en 4 capas de aproximadamente 1 pulgada cada una con 10 apisonamientos en forma de espiral. Luego se enraza la superficie del recipiente y se coloca sobre el recipiente el aparato medidor de aire, se ajusta y asegura.

Dentro de una de las válvulas se comienza a introducir agua para cubrir los espacios que quedan en la superficie, se empieza a generar la presión de aire en el aparato hasta que llegue a un valor de porcentaje de vacíos 0 y se libera dentro del sistema, dando como resultado la cantidad de aire representado en porcentaje.

1.3.7. Ensayo a compresión

La resistencia a compresión, puede ser medida siguiendo la metodología NTG 41017 h1 método de ensayo. determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto conjunto a la norma NTG 41061 práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra y también puede ser medidas con el ensayo en base a la norma NTG 41003 h4 método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado.

En base a la metodología de la norma NTG 41017 h1 se realizarán mediciones a 1, 3, 7 y 28 días luego de realizada la mezcla. Para desarrollar este ensayo se requiere el siguiente equipo:

- Moldes cilíndricos con un diámetro de al menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado. La longitud debe ser dos veces el diámetro del cilindro, y debe de ser al menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso. Es importante mencionar que, para ensayos de aceptación respecto a una resistencia a la compresión especificada, los cilindros deben ser de 6 por 12 pulgadas o de 4 por 8 pulgadas.

- Varilla de apisonado, con punta redonda, recta y lisa. El diámetro depende de los requisitos (ver anexo 4).
- Mazo, con una cabeza de goma o cuero crudo con un peso de 1.25 ± 0.50 lb.
- Varilla de enrasado.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se realizará la mezcla con todos los ingredientes que la conforman, luego se rellenará el cilindro en un número de capas según las dimensiones del mismo, como se muestra en el anexo 2. Después de cada capa varillada, se golpean los lados exteriores del molde levemente entre 10 a 15 veces con el mazo para eliminar vacíos.

Luego de ser moldeados, se colocan en una superficie plana y para su proceso de endurecimiento, deben de estar almacenados por un periodo de hasta 48 horas y comenzar el proceso de curado inicial. Se recomienda dejarlos en constante hidratación.

Como siguiente paso, deberán de someterse al ensayo de compresión a las 4 diferentes edades, tomando como resultado el esfuerzo máximo soportado.

Siguiendo los parámetros de la norma NTG 41003 h4 para la resistencia de compresión en cubos, se analizarán los valores obtenidos a 1, 3, 7 y 28 días de edad. Para la realización de este ensayo se requieren de los siguientes materiales y equipos:

- Pesas y dispositivos de pesaje, cumpliendo con los requisitos de norma NTG 41043.
- Moldes de especímenes cúbicos de 50 mm, deben de estar ajustados herméticamente, no deben de tener más de tres compartimientos cúbicos y deben de ser separables en no más de 2 partes. Deben de estar elaborados de metal duro no reactivo con morteros de cemento.
- Mezcladora mecánica activada eléctricamente cumpliendo con las especificaciones de la norma NTG 41002.
- Apisonador, debe ser de un material no absorbente, no abrasivo ni quebradizo, cumpliendo con la norma de ensayo NTG 41003 h4.
- Gabinete o cuarto húmedo, para mantener a los especímenes en el periodo de curado, esto debe de cumplir con los requisitos de la norma NTG 41059.
- Máquina de ensayo, de tipo hidráulico o de tornillo, la carga aplicada al espécimen de ensayo debe ser indicada con una exactitud de ± 1 %.

A continuación, se detalla el procedimiento:

Se debe de realizar la mezcla en base al diseño propuesto, cuidando las relaciones agua-cemento propuestas. Luego se colocan en los moldes apisonando de manera manual en 3 capas de aproximadamente 1 pulgada de espesor cada una con 32 apisonamientos de forma recta. Al completar el apisonado, la parte superior de todos los cubos deben de ser niveladas pasando

el borde recto de la espátula con un movimiento aserrado sobre la longitud del molde.

Luego se procede al almacenamiento de los especímenes de ensayo, realizado inmediatamente después de completar el moldeo deben de ser colocados en un gabinete o cuarto húmedo durante al menos 20 a 72 horas con sus superficies expuestas al aire húmedo pero protegidas del goteo de agua. Luego de pasadas estas horas, se sumergen en agua saturada de cal, en tanques de almacenaje hasta la hora de su ensayo.

Como siguiente procedimiento se procede a la determinación de la resistencia a compresión de los especímenes, todos los especímenes de ensayo deben de ser rotos dentro de las tolerancias prescritas en la tabla I del apéndice.

Luego de sacado el espécimen de los tanques de almacenaje, se seca cada para llevarlos a una condición de superficie seca y se les remueve cualquier incrustación que tenga. Se coloca el espécimen en la máquina de ensayo a compresión aplicando carga al elemento. Siguiendo a eso, se debe de anotar la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo y se calcula la resistencia a compresión con la siguiente ecuación:

$$f'c = P/A \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$f'c$ = resistencia a compresión en lb/pulg²

P = carga total máxima en lbf

A = área de la superficie en pulg²

Se realizarán 2 cubos para las edades de 1, 3, 7 días y 3 cubos para la edad de 28 días.

1.4. Otros ensayos complementarios

Los ensayos complementarios son ensayos que pueden contribuir al análisis de las variables planteadas en los objetivos de este proyecto, aplicable para las mezclas diseñadas que se presentan en este trabajo específicamente, en la actualidad no existen normas que describan el procedimiento de ensayo para las mezclas que se utilizaran en la impresora 3D.

El *flow* (flujo) tiene como objetivo, analizar el flujo que tiene la mezcla de morteros hidráulicos, este ensayo se realiza en base a la norma NTG 41003 h13 método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico. Resumidamente el ensayo consta de realizar la mezcla con todos sus ingredientes, colocarlo en un molde en 2 capas cada una con 20 apisonamientos colocado sobre una mesa de flujo. Se levanta el molde y debe de dejarse caer la mesa de flujo 25 veces en 15 s.

La medición de este será la resultante del diámetro debido a dejar caer la mesa de flujo con la mezcla, entre mayor sea el diámetro, mayor será su flujo, se deben de hacer promedio de cuatro lecturas de diámetros en milímetros.

Retención de agua, en este ensayo se determina la capacidad de la mezcla de mortero para retener agua, un parámetro para determinar si la mezcla perderá agua de su dosificación y también la cantidad de vacíos. Esta metodología se puede adaptar al procedimiento de la norma NTG 41104 h2 método de ensayo. Determinación de la retención de agua en morteros a base de cemento hidráulico y cernidos.

En resumen, el método de ensayo consiste en determinar el flujo del mortero como primer paso y luego se somete a una succión controlada durante 60 segundos, seguidamente luego de la succión el material se retira y nuevamente se realiza el ensayo de fluidez, determinando si la mezcla perdió fluidez, de ser así, se considera que hubo pérdida de agua.

El cálculo para obtener el valor de la retención es la siguiente:

$$\text{Retención de agua en \%} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

A = medición del flujo luego de la succión

B = flujo inmediatamente después del mezclado inicial

Ensayo resistencia a la adherencia, en este ensayo se mide la capacidad de resistencia a la adherencia de la mezcla, este ensayo se realiza en base a la normativa ASTM C952-12 método de prueba estándar para la fuerza de adherencia del mortero. La importancia de esta prueba va enfocado al análisis de la adherencia entre cada capa impresa, el procedimiento de está prácticamente se resume en realizar la mezcla con las proporciones e ingredientes establecidos colocándolo en una pared o superficie provisional de ensayos con su respectiva pieza que servirá para la extracción del material.

Luego se realiza el ensayo a 7 y 28 días utilizando el aparato que medirá la resistencia a la adherencia de la mezcla. Los resultados se dan normalmente en unidades de fuerza sobre área, para este caso son N/ mm².

1.5. Construcciones con impresión 3D

La impresión 3D es una nueva tecnología para la construcción. La impresión 3D tiene como finalidad optimizar procesos constructivos, reducir tiempo de desarrollo, optimizar materiales y ser amigable con el ambiente.

La tecnología de impresión 3D se puede relacionar muy bien con la metodología BIM, se utilizan softwares de la familia Autodesk, como fusión 360 ultimaker Cura, Tinker Cad, Autodesk BIM360, Mesh lab, entre otros. Para el procedimiento de la impresión 3D, se debe comenzar con tener un modelo en alguno de los softwares mencionados anteriormente, configurarlo para imprimirlo en 3D (configuración de velocidad de impresión, calidad de impresión, espesores de capas), conocer el material a utilizar y cómo se comporta en la impresión 3D y, por último, después de haber considerado todos estos pasos se procede a la construcción del modelo.

En impresión 3D se han realizado algunas construcciones. En 2014 la empresa DUS arquitectura construyó una casa sobre el canal de Ámsterdam con material plástico con un brazo robótico que le llamaron Kamermarker. En 2016 se construyó un puente peatonal en Madrid, España, por la compañía ACCIONA en donde utilizaron un material de concreto con microfibras. (Sharma & Sinha, 2021, p. 7)

Una de las obras impresas en concreto con la tecnología COBOD se construyó en 2021. Recientemente la empresa danesa COBOD Internacional se asoció con la empresa alemana PERI Group para imprimir en 3D una casa de dos pisos en Wallenhausen, Alemania.

La impresora 3D utilizada fue la COBOD BOD2, que pudo imprimir capas de concreto de hasta 30 centímetros de espesor. El proceso de impresión se llevó a cabo en el sitio de construcción y tardó aproximadamente dos semanas.

La casa de dos pisos tiene una superficie habitable de 160 metros cuadrados y cuenta con una estructura de concreto impreso en 3D, así como con elementos de vidrio y acero. Esta casa es la primera obra impresa en 3D utilizando tecnología COBOD en Alemania (PERI, 2021)

1.6. Estudio de las mezclas de concreto

El estudio del concreto es de gran importancia para el sector constructivo, abarca desde el análisis de sus agregados, la composición química del cemento, sus reacciones químicas con el agua, todo esto con la finalidad de poder obtener el valor de resistencia requerida conforme a las necesidades técnicas.

Comúnmente los ensayos más realizados en campo y ejecución de una obra para evaluar un concreto son los siguientes:

- Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.
- Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.
- Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria), rendimiento (volumen de concreto producido) y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.

- Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

1.6.1. Laboratorio CETEC de Cementos Progreso

El laboratorio CETEC, pertenece al Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, S.A (CID). Se inició como un laboratorio de concreto el 7 de julio de 1992 como dependencia principal del Departamento de Asesoría y Servicios Técnicos de Cementos Progreso.

A través de los años, el CID se ha especializado en la investigación de materiales de construcción. El laboratorio CETEC está acreditado bajo la norma ISO 17025 y COGUANOR NTG/ISO/IEC 17 025:2005 con 32 ensayos debidamente acreditados y reconocidos por el ente nacional con la finalidad de estudiar los materiales de construcción y poder brindar asesoría técnica a los clientes internos y externos a la corporación sobre las soluciones para los diferentes productos de construcción, de igual forma se capacitan clientes, estudiantes universitarios, técnicos y demás operarios relacionados al sector de la construcción.

El laboratorio CETEC cuenta con los siguientes laboratorios:

- Laboratorio químico
- Laboratorio de cementos, cales y morteros
- Laboratorio de concreto fresco
- Laboratorio de concreto endurecido
- Laboratorio de agregados
- Laboratorio de prefabricados
- Laboratorio de diseño

- Servicios externos (concreto fresco y endurecido)
- Laboratorio de mecánica de suelos
- Laboratorio de petrografía
- Otras determinaciones y estudios referentes a concreto

En el laboratorio CETEC, se realizaron las actividades de investigación de este proyecto, con la finalidad de impulsar el desarrollo tecnológico, apoyar en la optimización de costos y mejorar el desempeño de la impresión 3D con concreto.

1.6.2. Lugar de ejecución de la impresora 3D

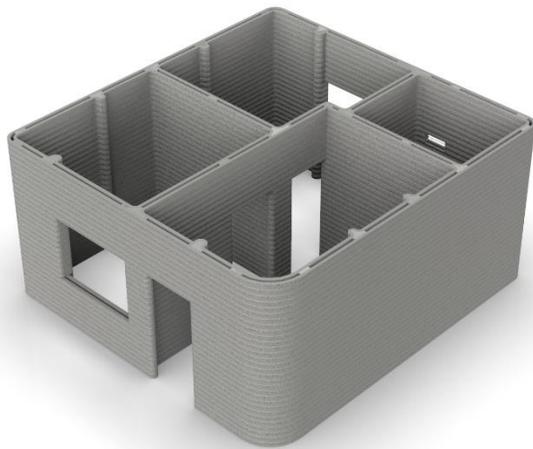
La ejecución de las impresiones 3D con concreto ha tenido lugar en plantas de producción de la empresa Cementos Progreso, en Guatemala. La primera impresión con concreto, se realizó en planta la Pedrera en el año 2022 donde se comenzaron a imprimir cortos segmentos en forma de muros, de no más de 0.5 metros de altura con diferentes dosificaciones de mezcla.

Luego se realizaron diferentes estructuras en escala real incluyendo refuerzo de acero para mejorar la adherencia entre las capas. Entre las primeras impresiones, se destaca la impresión de una parada de bus como se muestra en la figura 9.

El primer proyecto de construcción con finalidades habitacionales fue un prototipo de una casa a escala real que satisface con las áreas básicas. En el proyecto se realizaron diferentes aplicaciones de mezclas para analizar el comportamiento de cada una en reología, tiempos de fraguado y como resultado de estas pruebas se obtuvieron nuevas consideraciones a la hora de la impresión con las diferentes mezclas, la estructura está reforzada en sus nodos con acero.

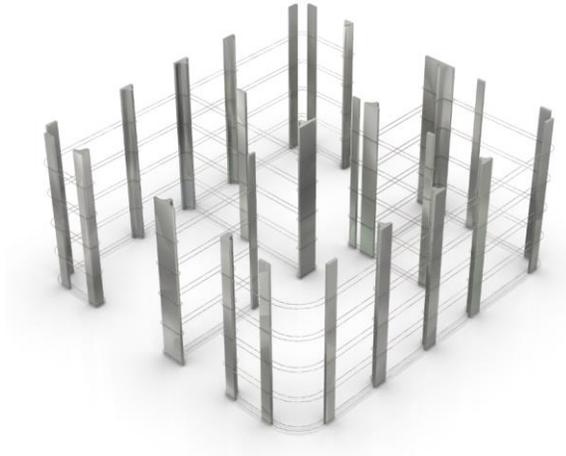
Este prototipo de vivienda impresa en 3D con concreto podría ser un modelo a replicar para ejecutarlo en algún proyecto habitacional en serie. A continuación, se muestran fotos del proyecto:

Figura 8. **Modelo 3D de la casa impresa**



Fuente: Laboratorio CETEC. (2022). *Resultados de modelado 3D*.

Figura 9. **Estructuras de casa impresa 3D**



Fuente: Laboratorio CETEC. (2022). *Resultados de modelado 3D*.

Figura 10. **Impresión 3D modelo a escala**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Figura 11. **Fotografía de casa impresa en 3D**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Los siguientes proyectos que se han planificado se llevarán a cabo en planta San Miguel, en Sanarate, El Progreso. Se planifica realizar nuevas impresiones con fines habitacionales utilizando alguna variación o actualización de las mezclas diseñadas en este estudio. Estas impresiones deberán de superar nuevos retos debido a que serán a la intemperie en un clima cálido y con condiciones ambientales no controladas.

Debido a las condiciones climáticas del lugar deberán de establecerse nuevas consideraciones para el desarrollo óptimo de la impresión. Definitivamente, la mezcla de concreto sufrirá cambios con respecto a su relación A/C debido a la alta temperatura del lugar, el tiempo de fraguado también será afectado y el curado de la estructura requerirá de un mayor control.

El uso futuro de la impresora 3D se tiene un gran campo de trabajo, entre ellos pueden desarrollarse proyectos en vivienda, mobiliario y otros proyectos de infraestructura en donde puedan desarrollarse esta nueva tecnología constructiva. A largo plazo, se pretende que este sistema constructivo contribuya en alguna medida, en la disminución del déficit habitacional en el país.

1.6.3. Materiales utilizados para la mezcla del concreto

La mezcla de concreto utilizado para la impresión 3D, está conformada por los mismos materiales que se utilizan para elaborar un concreto convencional, siendo estos:

- Cemento
- Agregados
- Aditivos
- Agua

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron cementos de Cementos Progreso, los cuales se comercializan dentro del país.

Cemento UGC, cumple con la normativa COGUANOR NTG-41095 *Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*, es un cemento hidráulico de uso general en la construcción con adición de puzolana natural. Por lo tanto, puede ser utilizado para todas las actividades típicas de la construcción. Este cemento ofrece una resistencia mínima a compresión de 4060 PSI a los 28 días desde su elaboración en mezclas de laboratorio.

Cemento ARI, cumple con la normativa COGUANOR NTG-41095 *Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*, es un cemento hidráulico de Alta Resistencia Inicial con adiciones minerales utilizado normalmente para la fabricación de bloques de concreto, tubos y elementos prefabricados. También es muy utilizado para la construcción de edificaciones que requieran una mayor resistencia estructural. El cemento ARI alcanza una resistencia mínima de 5800 PSI a los 28 días desde su elaboración en mezclas de laboratorio.

Cemento CFB, cumple con la normativa COGUANOR NTG-41095 *Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*, es un cemento tipo Portland de alta resistencia inicial con adiciones minerales utilizado también para la fabricación de bloques de concreto y elementos prefabricados. Se espera tener una resistencia mayor de 5800 PSI a 28 días.

Arena 0 - 3.36 mm es un agregado fino con una densidad relativa de 2.69, un porcentaje de absorción de 0.3 % y un módulo de finura de 2.52. Este material será utilizado para conformar la mezcla que se podrá imprimir en la impresora.

Con respecto a los aditivos utilizados, son los siguientes:

- Fibra
- Reductor de agua
- Reductor de agua y retardante
- Modificador reológico

La fibra adicionada, es un refuerzo para el concreto y mortero que controla el agrietamiento. Este aditivo no afecta en los resultados de los ensayos del asentamiento de la mezcla.

Reductor de agua, es un aditivo líquido reductor de agua de alto rango y superplastificante de alto desempeño para concreto.

Aditivo reductor de agua y retardante para uso en el concreto y materiales a base de cemento. Su uso es adecuado para la producción de mezclas de concretos y morteros. La reducción de la relación agua/cemento, el aumento de la trabajabilidad, el tiempo de trabajabilidad y el aumento de resistencia son las principales ventajas de utilizar este aditivo.

2. RESULTADOS DE LA METODOLOGIA DE INVESTIGACION

2.1. Consideraciones de la investigación

Para la realización del siguiente estudio, se propusieron 3 diseños de mezclas cada una con diferente composición de sus respectivos ingredientes, estos diseños estarán realizados y evaluados en base a parámetros que se han obtenido de los ensayos a los que se han sometido mezclas anteriores y han sido útiles a la hora de la impresión.

Con cada uno de los ensayos mencionados, se obtendrán los datos para poder determinar el comportamiento de las mezclas realizadas y así obtener una que sea óptima para la impresión, junto con nuevos valores y parámetros que servirán para proponer nuevas mezclas en un futuro próximo. La reología de las mezclas de concreto para impresión 3D no ha tenido un estudio previo en Guatemala, este será el primer análisis en base a criterios y experiencias de otras impresiones que se han realizado en el mundo de forma empírica.

Se adaptaron ciertas normas y metodologías de ensayos existentes para el análisis de las propiedades mecánicas y características físicas que se analizaron en este estudio, prácticamente se tendrán los primeros parámetros establecidos por la ejecución de diferentes impresiones e intentos errados.

2.2. Método y recolección de datos

La recolección de datos fue una fase importante de este estudio, para cada mezcla ensayada se realizaron 3 repeticiones de los ensayos, recopilando y promediando los resultados obteniendo así los datos más precisos.

Recopilando valores de sus características reológicas, se utilizaron principalmente los valores obtenidos con el reómetro, que serán su límite elástico dinámico y estáticos de la muestra, su viscosidad y curvas de crecimiento de corte y fluidez.

Con respecto al ensayo de *shear vane test*, se analizaron los datos de esfuerzo de corte para cada una de las mezclas, estos resultados se presentaron en KPa con el cálculo correspondiente, fueron tabulados y graficados para tener la comparación entre ellos.

Con respecto a los datos de resistencia a compresión, y características físicas como lo son su masa unitaria, el contenido de aire y temperatura, son obtenidos de los ensayos y procedimientos con las adaptaciones descritas anteriormente en este trabajo.

2.3. Procesamiento y análisis de la información

A continuación, se presentan los procedimientos, ajustes y datos de las propuestas del diseño teórico de las mezclas para impresión 3D y resultados de los ensayos.

2.3.1. Diseño teórico de mezclas

El diseño teórico de la mezcla de concreto considera un tipo de cemento, un agregado y 4 aditivos proporcionándolos en diferente cantidad. Estas propuestas se obtuvieron en base a mezclas que han sido utilizadas anteriormente en impresiones de mobiliario y pruebas.

- Mezcla No.1

Tabla I. **Diseño de mezcla No. 1**

Material	Cantidad (%) para m³
Cemento 1	40.44
Agua	13.82
Arena	45.64
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla No.2

Tabla II. **Diseño de mezcla No.2**

Material	Cantidad (%) para m³
Cemento 2	39.64
Agua	13.64
Arena	46.62
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla No.3

Tabla III. **Diseño de mezcla No.3**

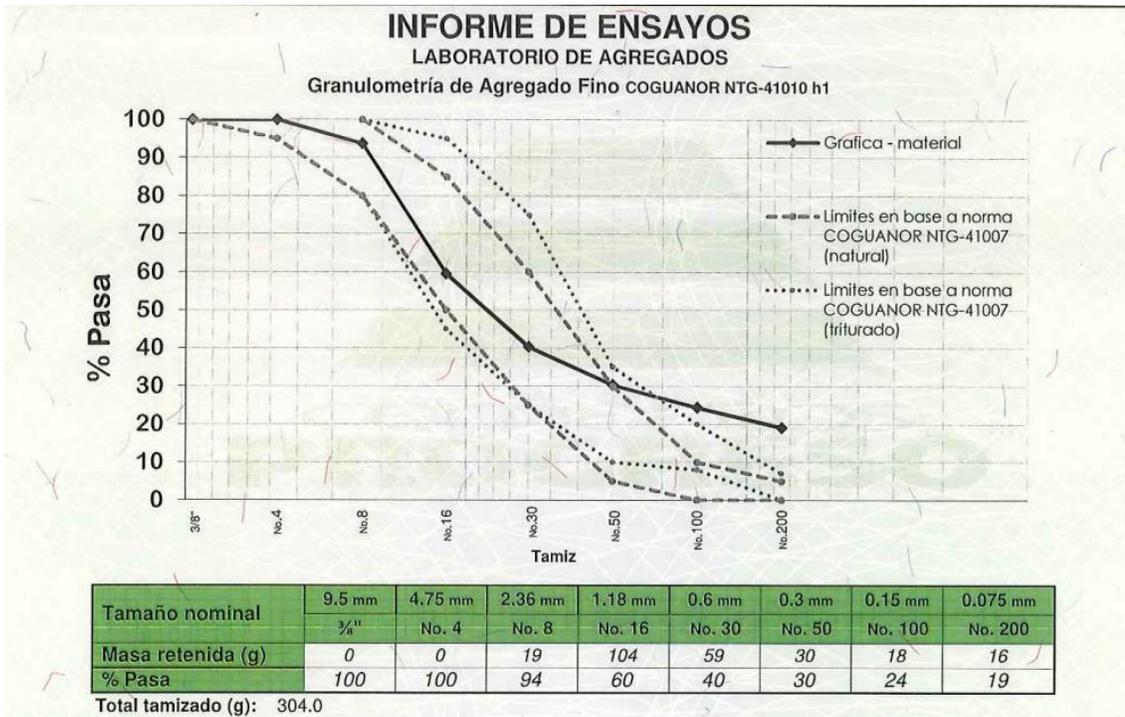
Material	Cantidad (%) para m³
Cemento 1	40.51
Agua	13.94
Arena	45.47
Total, aditivos	0.08

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Análisis granulométrico arena

A continuación, se presenta el análisis granulométrico de la arena, representado por su curva granulométrica en escala semilogarítmica. El ensayo fue realizado en el laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Figura 12. Análisis granulométrico arena



Fuente: Laboratorio CETEC. (2023). *Informes de ensayos.*

2.3.3. Características físicas del agregado fino

Resultados de las características físicas del agregado fino utilizado en la mezcla para impresión 3D:

Tabla IV. **Características físicas del agregado fino**

Característica física	Norma	Resultado
Densidad relativa (s.s.s.)	COGUANOR NTG-41010 h09	2.69
Densidad aparente compactada (Kg/m ³)	COGUANOR NTG-41010 h2	1920
Absorción (%)	COGUANOR NTG-41010 h09	0.3
Densidad aparente suelta (Kg/m ³)	COGUANOR NTG-41010 h2	1700
Contenido de humedad (%)	COGUANOR NTG-41010 h19	0.2
Densidad aparente húmeda (Kg/m ³)	COGUANOR NTG-41010 h2	1660
Materia orgánica (No. color)	COGUANOR NTG-41010 h4	0
Módulo de finura (MF)	COGUANOR NTG-4110 h1	2.52

Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Elaboración de mezcla, ensayos y núcleos de concreto

A continuación, se presenta el procedimiento y consideraciones en la elaboración de las mezclas de concreto, los ensayos realizados y la recopilación de los resultados.

2.3.4.1. Diseño de mezcla

En la elaboración de las mezclas para los ensayos respectivos, se siguieron los procedimientos normalizados con el equipo adecuado para obtener resultados satisfactorios en los objetivos del presente trabajo. (Ver capítulo 1.3).

Se realizaron mezclas de un volumen de 0.01 m³ para cada una, para la mezcla 1, 2 y 3 respectivamente, quedando la siguiente distribución en peso:

Tabla V. **Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.1**

Material	Cantidad (%)
Cemento 1	40.44
Agua	13.95
Arena	45.51
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.2**

Material	Cantidad (%)
Cemento 2	39.63
Agua	13.78
Arena	46.49
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cantidad para volumen de ensayo, mezcla No.3**

Material	Cantidad (%)
Cemento 1	40.51
Agua	14.07
Arena	45.33
Total, aditivos	0.08

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.2. Elaboración de mezcla y ensayo cono de penetración

El proceso para la elaboración fue el siguiente:

Se comenzó aplicando en un bote la mezcla previamente homogenizada con los aditivos, agregados y cemento, junto con una parte del agua total del diseño. Luego, se mezcló durante un tiempo de 5 minutos agregando agua conforme el comportamiento de la mezcla hasta completar la cantidad de agua total que estaba establecida por el diseño.

Previo a esto se realizó el ensayo de penetración de cono, con el cual se buscaba que diera un resultado entre el rango de 35mm a 45mm de penetración, en la figura 14 se muestra el cono de penetración con la mezcla de diseño antes de ser ensayada.

En la mayoría de casos cuando se realizó la mezcla, el rango de penetración quedaba debajo de los 35mm, por lo tanto, fue necesario agregar más agua dentro de la mezcla para que la penetración fuera mayor, este proceso fue de manera gradual y diferente para cada una de las mezclas. Luego de ciertas repeticiones se obtuvieron los resultados de cantidad de materiales para el volumen de ensayo presentados en las tablas IX, X y XI.

Figura 13. **Cono de penetración. NTG 41051 h1**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Tabla VIII. **Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 1**

Material	Cantidad (%)
Cemento 1	40.44
Agua	19.50
Arena	45.51
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 2**

Material	Cantidad (%)
Cemento 2	39.63
Agua	18.87

Continuación de la tabla IX.

Material	Cantidad (%)
Arena	46.49
Total, aditivos	0.10

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cantidad para volumen de ensayo (modificada), mezcla 3**

Material	Cantidad (%)
Cemento 1	40.51
Agua	20.35
Arena	45.33
Total, aditivos	0.08

Fuente: elaboración propia.

Cada una de las mezclas tuvo un tiempo total de mezclado de 7 minutos.

2.3.4.3. Ensayo masa unitaria y cono de penetración

Luego de realizar la mezcla y el ensayo del cono de penetración, se procedió a analizar la masa unitaria de cada mezcla en un tiempo 0, utilizando la ecuación 2 y los datos obtenidos del peso del recipiente y el volumen cuando se desarrolló el ensayo. En la tabla XII se muestran los resultados de cada repetición de mezcla y su respectivo promedio.

Tabla XI. **Resultados masa unitaria en tiempo 0**

Mezcla 1 masa unitaria (Kg/m³)		
Número de prueba	Resultado (Kg/m ³)	Promedio (Kg/m ³)
1	2021	2011.58
2	2007	
3	2006.75	
Mezcla 2 masa unitaria (Kg/m³)		
Número de prueba	Resultado (Kg/m ³)	Promedio (Kg/m ³)
1	2027.75	2045.42
2	2047.25	
3	2061.25	
Mezcla 3 masa unitaria (Kg/m³)		
Número de prueba	Resultado (Kg/m ³)	Promedio (Kg/m ³)
1	1999.75	1996.75
2	2000	
3	1990.5	

Fuente: elaboración propia.

Este procedimiento de medición de masa unitaria y el cono de penetración, se analizó en tiempo 0, 15, 30 y 45 minutos de haberse realizado la mezcla, en la figura 15 se muestra el recipiente lleno con la mezcla y un valor de peso en gramos. Los resultados se presentan en las tablas XIII, XIV y XV para las mezclas 1, 2 y 3 respectivamente.

Figura 14. **Ensayo masa unitaria, según NTG 41050**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Tabla XII. **Resultados cono de penetración y masa unitaria mezcla 1**

Cono penetracion					
prueba #1					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00			1.5446	2021	41
0:15:00	0.7362	400	1.5449	2021.75	39
0:30:00			1.5501	2034.75	37
0:45:00			1.551	2037	35

Continuación de la tabla XII.

Cono penetracion					
Prueba #2					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7362	400	1.539	2007	38
0:15:00			1.542	2014.5	37
0:30:00			1.545	2022	32
0:45:00			1.5464	2025.5	32
Prueba #3					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7362	400	1.5396	2006.75	41
0:15:00			1.5449	2020	41
0:30:00			1.5471	2025.5	38
0:45:00			1.5513	2036	34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados cono de penetración y masa unitaria mezcla 2**

Cono penetracion					
Prueba #1					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7367	400	1.5478	2027.75	47
0:15:00			1.5547	2045	45
0:30:00			1.5575	2052	40
0:45:00			1.5575	2052	39

Continuación de la tabla XIII.

Cono penetracion					
Prueba #2					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7367	400	1.5556	2047.25	40
0:15:00			1.5609	2060.5	35
0:30:00			1.5571	2051	35
0:45:00			1.5575	2052	35
Prueba #3					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7367	400	1.5614	2061.25	38
0:15:00			1.5631	2065.5	33
0:30:00			1.5661	2073	31
0:45:00			1.568	2077.75	29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados cono de penetración y masa unitaria mezcla 3**

Cono penetracion					
Prueba #1					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7362	400	1.5361	1999.75	41
0:15:00			1.538	2004.5	37
0:30:00			1.5422	2015	30
0:45:00			1.5452	2022.5	30

Continuación de la tabla XIV.

Cono penetracion					
Prueba #2					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7362	400	1.5362	2000	43
0:15:00			1.5398	2009	39
0:30:00			1.5404	2010.5	36
0:45:00			1.5449	2021.75	34
Prueba #3					
Tiempo en minutos	Peso cono (Kg)	Volumen cono (cm³)	Peso cono +mezcla (Kg)	M.U. (Kg/m³)	Medida de penetración (mm)
0:00:00	0.7362	400	1.5346	1990.5	38
0:15:00			1.5381	1999.25	36
0:30:00			1.5383	1999.75	34
0:45:00			1.5386	2000.5	31

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.4. Ensayo asentamiento

El ensayo de asentamiento se realizó luego de terminar el tiempo final de mezclado, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 1.3.2. En la tabla XVI se presentan los valores de asentamiento para cada mezcla y repetición, presentando un promedio entre los 3 valores finales. En el apéndice 1 se muestra una imagen del ensayo.

Tabla XV. **Resultados de asentamiento**

Mezcla 1 asentamiento		
Número de prueba	Resultado (pulg)	Promedio (pulg)
1	3	3.5
2	3.5	
3	4	
Mezcla 2 asentamiento		
Número de prueba	Resultado (pulg)	Promedio (pulg)
1	4	3.67
2	3.5	
3	3.5	
Mezcla 3 asentamiento		
Número de prueba	Resultado (pulg)	Promedio (pulg)
1	2.75	3.42
2	3.5	
3	4	

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.5. Ensayo de temperatura

Para el ensayo de temperatura, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla XVII, realizando los procedimientos descritos en el capítulo 1.3.5. En el apéndice 2 se muestra la toma de temperatura para una prueba.

Tabla XVI. **Resultados temperatura de mezclas**

Temperatura mezcla 1		
Número de prueba	Temperatura ambiente (C°)	Temperatura mezcla (C°)
1	25	27.5
2	23.5	28
3	23.5	25
Temperatura mezcla 2		
Número de prueba	Temperatura ambiente (C°)	Temperatura mezcla (C°)
1	23	26
2	24.5	28
3	24	28.5
Temperatura mezcla 3		
Número de prueba	Temperatura ambiente (C°)	Temperatura mezcla (C°)
1	24	25
2	26	27
3	22	24.5

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.6. Ensayo contenido de aire

En la tabla XVIII, se presentan los resultados obtenidos siguiendo los procedimientos descritos en el capítulo 1.3.6., además se realiza un promedio para establecer una cantidad general que represente el contenido de aire de las formulaciones de mezcla. En el apéndice 3 se muestra una medición del instrumento del contenido de aire que presenta la mezcla 1.

Tabla XVII. **Resultados, contenido de aire**

Mezcla 1 contenido de aire (%)		
Número de prueba	Resultado (%)	Promedio (%)
1	4	4,00
2	4	
3	4	
Mezcla 2 contenido de aire (%)		
Número de prueba	Resultado (%)	Promedio (%)
1	3,9	4,00
2	4	
3	4,1	
Mezcla 3 contenido de aire (%)		
Número de prueba	Resultado (%)	Promedio (%)
1	3,7	3,80
2	3,8	
3	3,9	

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.7. Ensayo prueba de corte con aspas (*shear vane test*)

En la elaboración del ensayo de corte con aspas, fue necesario la realización de una operación matemática como se especifica en el capítulo 1.3.1. Se utilizó el aspa de tamaño grande, al cual es necesario multiplicar la lectura obtenida por 0.5 que dan resultados en N/cm² y luego convertirlo a unidades de Kpa, se muestra un ejemplo para la lectura número 3, de la prueba 1 en la primera mezcla realizada.

- Ejemplo

Datos:

Lectura *shear vane*: 0.2

Factor de conversión: 1 N/cm² = 10 KPa

Factor del instrumento, aspa grande= 0.5

Operación matemática:

$$0.2 * 0.5 = 0.1 \frac{N}{cm^2} * \frac{10 KPa}{1 \frac{N}{cm^2}} = 1 KPa$$

Este mismo procedimiento fue elaborado para cada una de las lecturas tomadas el estudio.

En la tabla XIX, XX y XXI se muestran los resultados de la mezcla 1, 2 y 3 respectivamente. Para la representación de los resultados obtenidos por el ensayo, se realizó un promedio de las lecturas de corte y se graficó ese valor con respecto al tiempo transcurrido, hasta 60 minutos. En las figuras 16, 17 y 18 se muestran las gráficas.

Tabla XVIII. Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 1

<i>Shear vane test mezcla 1</i>									
Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3			Promedio de esfuerzos
Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Esfuerzo corte (Kpa)
0:00:00	0	0,000	0:00:00	0,000	0,000	0:00:00	0,2	1,000	0,000
0:02:00	0	0,000	0:02:00	0,000	0,000	0:02:00	0,2	1,000	0,000
0:05:00	0,2	1,000	0:05:00	0,200	1,000	0:05:00	0,4	2,000	1,000
0:10:00	0,2	1,000	0:10:00	0,400	2,000	0:10:00	0,4	2,000	2,000
0:20:00	0,2	1,000	0:20:00	0,600	3,000	0:20:00	0,4	2,000	2,000
0:30:00	0,4	2,000	0:30:00	0,600	3,000	0:30:00	0,4	2,000	2,000
0:45:00	0,6	3,000	0:45:00	0,800	4,000	0:45:00	0,6	3,000	3,000
0:60:00	0,8	4,000	0:60:00	1,000	5,000	0:60:00	0,8	4,000	4,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 2**

<i>Shear vane test mezcla 2</i>									
Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3			Promedio de esfuerzos
Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Esfuerzo corte (Kpa)
0:00:00	0,2	1,000	0:00:00	0,200	1,000	0:00:00	0,2	1,000	1,000
0:02:00	0,2	1,000	0:02:00	0,200	1,000	0:02:00	0,4	2,000	1,000
0:05:00	0,2	1,000	0:05:00	0,200	1,000	0:05:00	0,4	2,000	1,000
0:10:00	0,2	1,000	0:10:00	0,400	2,000	0:10:00	0,4	2,000	2,000
0:20:00	0,2	1,000	0:20:00	0,400	2,000	0:20:00	0,4	2,000	2,000
0:30:00	0,2	1,000	0:30:00	0,400	2,000	0:30:00	0,6	3,000	2,000
0:45:00	0,4	2,000	0:45:00	0,600	3,000	0:45:00	0,6	3,000	3,000
0:60:00	0,6	3,000	0:60:00	0,600	3,000	0:60:00	0,8	4,000	3,000

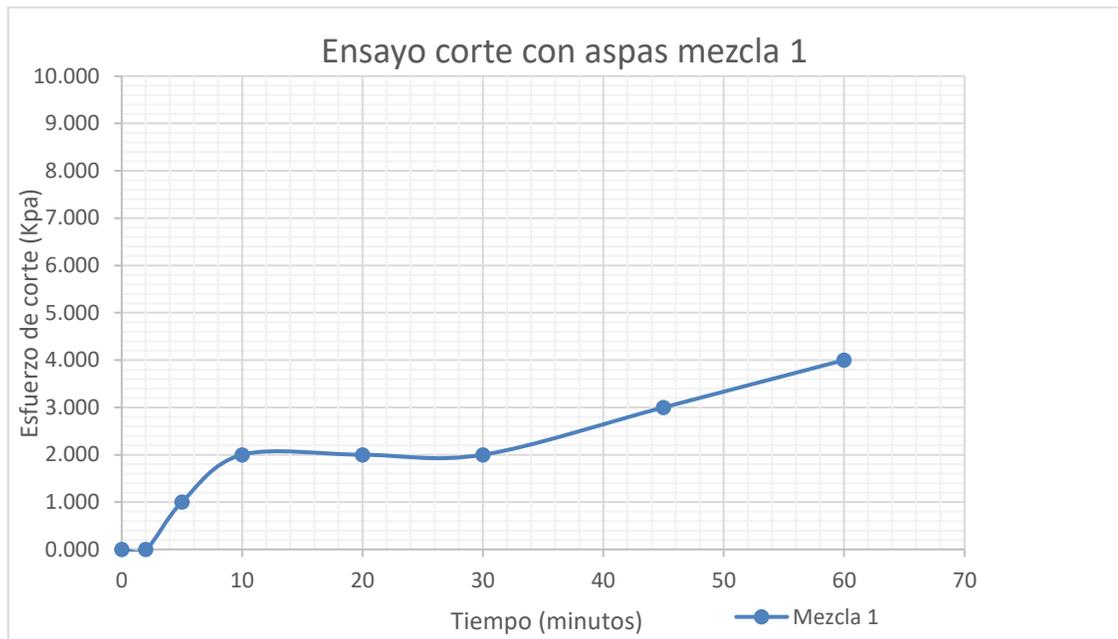
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados ensayo de corte con aspas mezcla 3**

<i>Shear vane test mezcla 3</i>									
Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3			Promedio de esfuerzos
Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Tiempo en minutos	Lectura <i>shear vane</i>	Esfuerzo corte (Kpa)	Esfuerzo corte (Kpa)
0:00:00	0,2	1,000	0:00:00	0,200	1,000	0:00:00	0,2	1,000	1,000
0:02:00	0,2	1,000	0:02:00	0,200	1,000	0:02:00	0,2	1,000	1,000
0:05:00	0,2	1,000	0:05:00	0,200	1,000	0:05:00	0,2	1,000	1,000
0:10:00	0,2	1,000	0:10:00	0,400	2,000	0:10:00	0,4	2,000	2,000
0:20:00	0,4	2,000	0:20:00	0,400	2,000	0:20:00	0,4	2,000	2,000
0:30:00	0,4	2,000	0:30:00	0,400	2,000	0:30:00	0,5	2,500	2,000
0:45:00	0,6	3,000	0:45:00	0,600	3,000	0:45:00	0,6	3,000	3,000
0:60:00	0,8	4,000	0:60:00	0,800	4,000	0:60:00	1,2	6,000	5,000

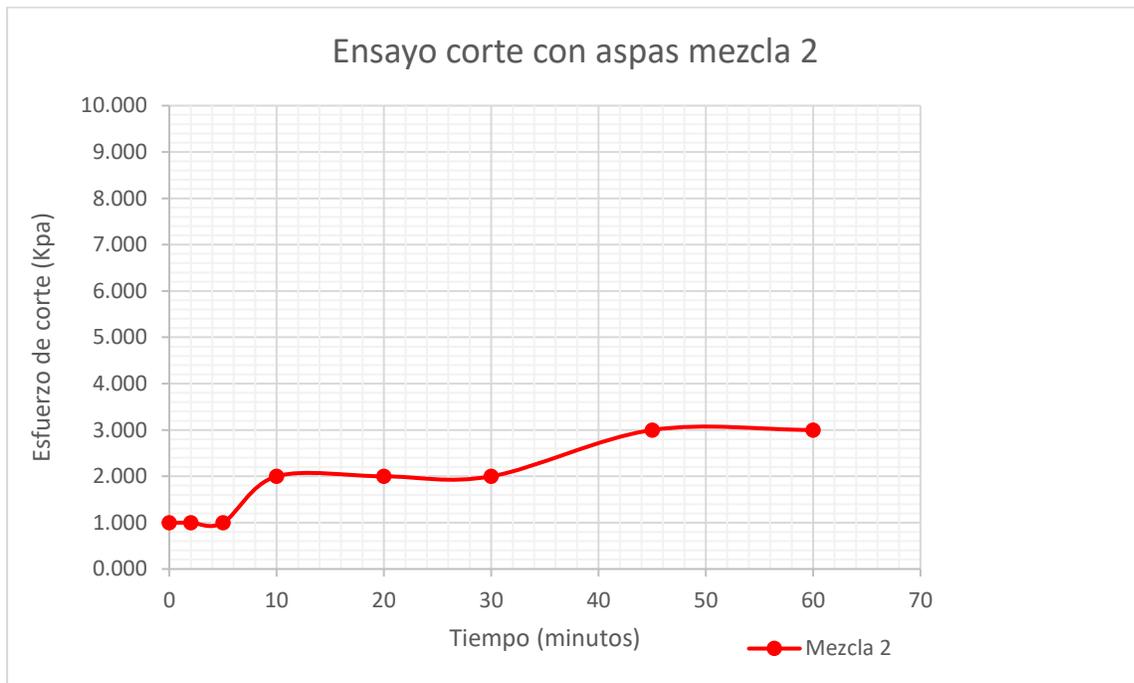
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 1**



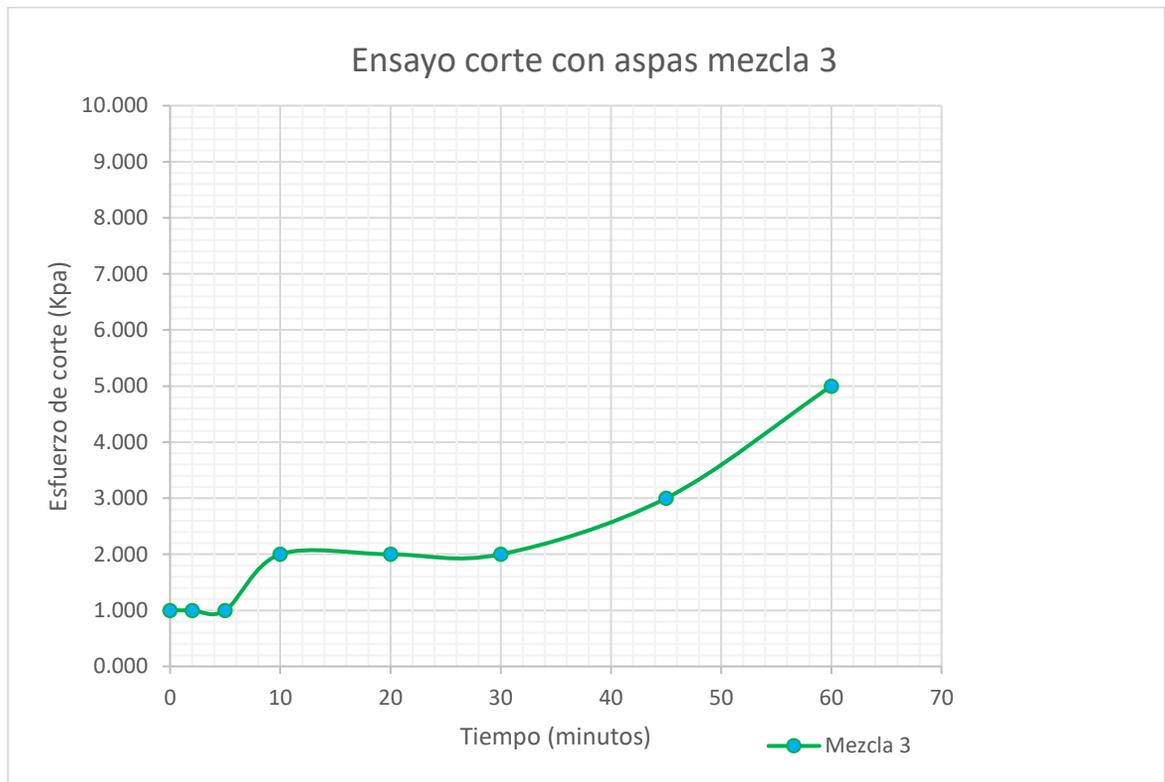
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 16. **Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 2**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 17. **Gráfica esfuerzo de corte versus tiempo mezcla 3**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

2.3.4.8. Ensayo a compresión

Los resultados de los ensayos de compresión son presentados a edades de 1, 3, 7 y 28 días. Realizando un cilindro por cada edad de 1,3 y 7 días, en total se ensayaron cilindros de las edades mencionadas anteriormente por cada formulación propuesta.

Con respecto a los cilindros con edades de 28 días, si se realizaron 2 por prueba, en total se ensayaron 6 cilindros con edades de 28 días por cada formulación propuesta. Al final para representar el comportamiento de resistencia

a compresión por edad, se realizó un promedio de la resistencia por edades y crear la gráfica de resistencia a compresión (psi) versus edad (días).

En las tablas XXII, XXIII, XXIV se muestran los resultados obtenidos por ensayos y edades. En las figuras 19,20 y 21, se muestran las gráficas resistencia a compresión versus edad de las mezclas 1, 2 y 3 respectivamente.

En los apéndices 4 y 5 se muestran imágenes de la realización del ensayo.

Tabla XXI. Resistencia a compresión mezcla 1

Resultados ensayo a compresión mezcla 1												
ID Especimen	F. Hechura	F. Rotura	Largo	Diametro	Masa	Edad	Falla	PSI (lb/pulg ²)	(MPa)	Dias	Promedio por edades (PSI)	
M1/P1	10/07/2023	11/07/2023	204,0	101,3	3,28	1	6	1697,01	11,70			
M1/P2	11/07/2023	12/07/2023	204,0	101,0	3,30	1	3	1808,48	12,47	1	1813,38	
M1/P3	13/07/2023	14/07/2023	204,0	101,3	3,29	1	2	1934,66	13,34			
M1/P1	10/07/2023	13/07/2023	204,0	101,3	3,35	3	3	3118,16	21,50			
M1/P2	11/07/2023	14/07/2023	204,0	101,0	3,32	3	2	2903,71	20,02	3	3010,93	
M1/P3	13/07/2023	17/07/2023	204,0	101,0	3,34	4	3	2822,24	19,46			
M1/P1	10/07/2023	17/07/2023	204,0	101,3	3,37	7	2	3786,46	26,11			
M1/P2	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,0	3,32	7	2	3665,84	25,27	7	3668,40	
M1/P2	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,3	3,36	7	2	3642,35	25,11			
M1/P3	13/07/2023	20/07/2023	204,0	101,0	3,33	7	2	3578,94	24,68			
M1/P1	10/07/2023	07/08/2023	204,0	101,0	3,35	28	5	4884,16	33,68			
M1/P1	10/07/2023	07/08/2023	204,0	101,0	3,37	28	2	4925,80	33,96			
M1/P2	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,3	3,36	28	2	4522,35	31,18	28	4591,78	
M1/P2	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,34	28	2	4527,54	31,22			
M1/P3	13/07/2023	10/08/2023	204,0	101,0	3,35	28	3	4368,23	30,12			
M1/P3	13/07/2023	10/08/2023	204,0	101,3	3,36	28	2	4322,60	29,80			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Resistencia a compresión mezcla 2

Resultados ensayo a compresión mezcla 2												
ID Especimen	F. Hechura	F. Rotura	Largo	Diametro	Masa	Edad	Falla	PSI (lb/pulg ²)	(MPa)	Dias	Promedio por edades (PSI)	
M2/P1	11/07/2023	12/07/2023	204,0	101,0	3,34	1	2	4203,5	29,0			
M2/P2	11/07/2023	12/07/2023	204,0	101,3	3,33	1	2	3512,7	24,2	1	3855,82	
M2/P3	13/07/2023	14/07/2023	204,0	101,3	3,35	1	2	3851,3	26,6			
M2/P2	11/07/2023	14/07/2023	204,0	101,0	3,39	3	3	4808,1	33,2			
M2/P1	11/07/2023	14/07/2023	204,0	101,0	3,40	3	3	5117,7	35,3	3	5047,09	
M2/P3	13/07/2023	17/07/2023	204,0	101,0	3,45	3	2	5215,4	36,0			
M2/P2	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,0	3,41	7	3	5389,2	37,2	7	5381,07	
M2/P2	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,0	3,40	7	2	5304,1	36,6			
M2/P1	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,3	3,32	7	2	5126,7	35,3			
M2/P3	13/07/2023	20/07/2023	204,0	101,0	3,40	7	2	5704,2	39,3			
M2/P1	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,42	28	2	5830,9	40,2			
M2/P1	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,41	28	5	6113,3	42,1	28	6142,68	
M2/P2	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,40	28	5	6174,9	42,6			
M2/P3	13/07/2023	10/08/2023	204,0	101,0	3,43	28	2	6395,8	44,1			
M2/P3	13/07/2023	10/08/2023	204,0	101,0	3,46	28	3	6198,4	42,7			

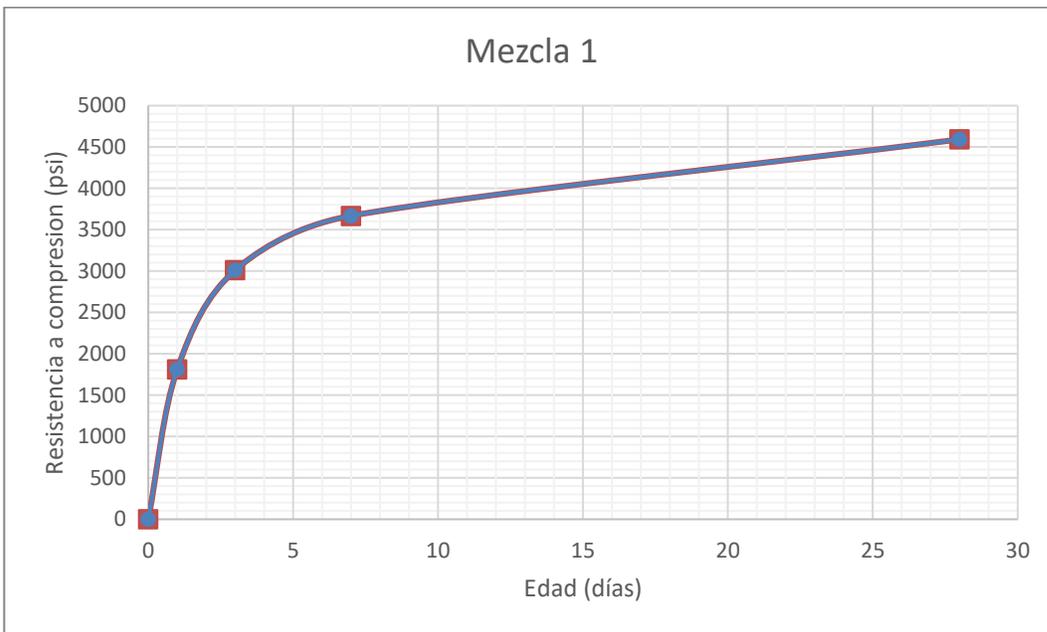
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Resistencia a compresión mezcla 3

Resultados ensayo a compresión mezcla 3												
ID Especimen	F. Hechura	F. Rotura	Largo	Diametro	Masa	Edad	Falla	PSI (lb/pulg ²)	(MPa)	Dias	Promedio por edades (PSI)	
M3/P1	11/07/2023	12/07/2023	204,0	101,0	3,26	1	3	1899,0	13,1			
M3/P2	11/07/2023	12/07/2023	204,0	101,0	3,24	1	3	1050,0	7,2	1	1419,69	
M3/P3	17/07/2023	18/07/2023	204,0	101,3	3,26	1	3	1310,1	9,0			
M3/P2	11/07/2023	14/07/2023	204,0	101,3	3,30	3	3	2430,0	16,8	3	2527,37	
M3/P1	11/07/2023	14/07/2023	204,0	101,0	3,32	3	3	2876,6	19,8			
M3/P3	17/07/2023	20/07/2023	204,0	101,0	3,31	3	2	2275,5	15,7			
M3/P2	11/07/2023	18/7/2023	204,0	101,0	3,30	7	6	3980,8	26,8	7	3474,91	
M3/P1	11/07/2023	18/07/2023	204,0	101,3	3,34	7	2	3228,0	22,3			
M3/P3	17/07/2023	24/07/2023	204,0	101,3	3,33	7	3	3215,9	22,2			
M3/P1	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,3	3,36	28	5	4230,8	29,2			
M3/P1	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,3	3,32	28	2	4058,1	28,0			
M3/P2	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,31	28	6	3893,9	27,4	28	4069,14	
M3/P2	11/07/2023	08/08/2023	204,0	101,0	3,32	28	3	3892,1	26,8			
M3/P3	17/07/2023	14/08/2023	204,0	101,0	3,36	28	3	4067,7	28,0			
M3/P3	17/07/2023	14/08/2023	204,0	101,3	3,33	28	3	4272,2	29,5			

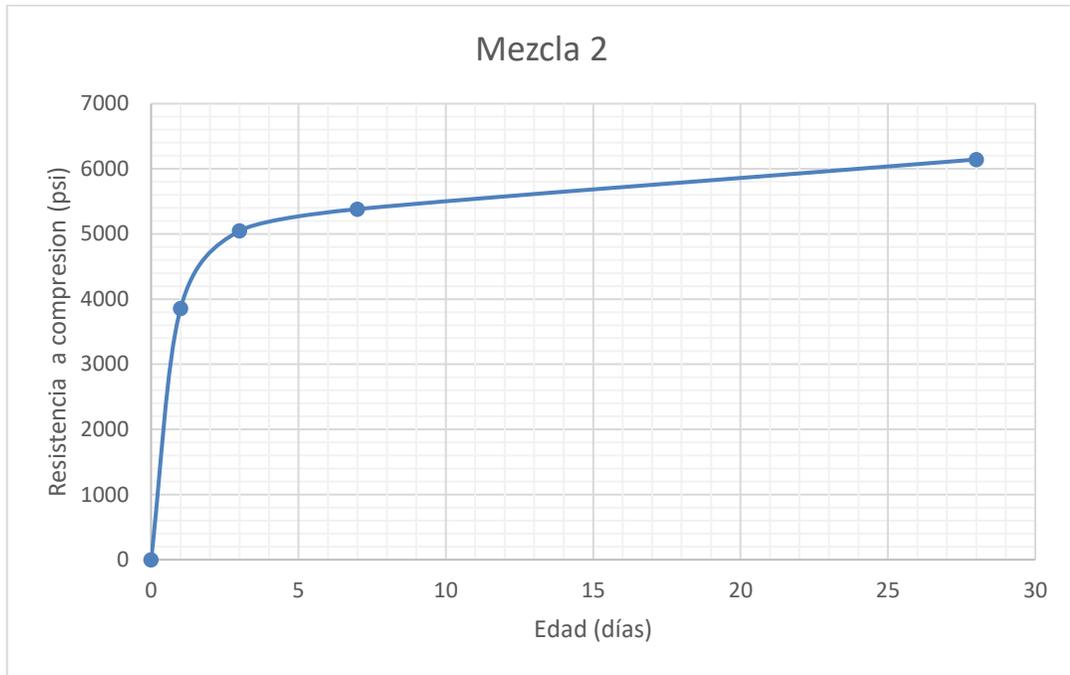
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 1**



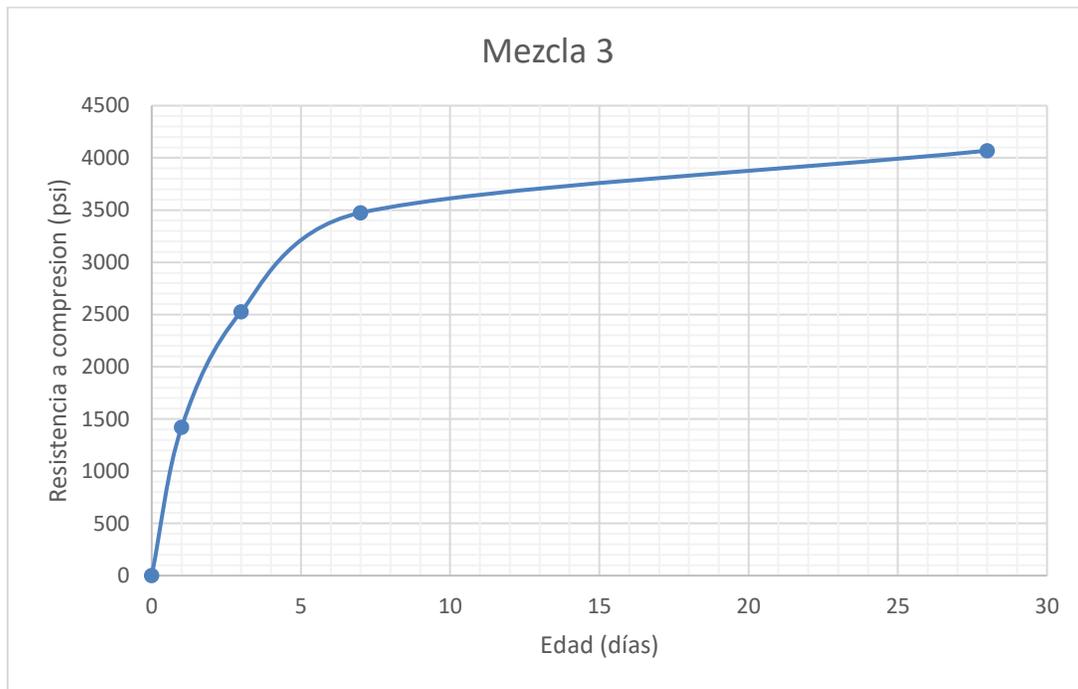
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 19. **Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 2**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 20. **Gráfica resistencia a compresión versus edad mezcla 3**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

2.3.4.9. Ensayo reómetro

Con respecto al desarrollo del ensayo con el reómetro, fue necesario tomar en cuenta todas las generalidades explicadas en el capítulo 1.2 con respecto a la viscosidad. Se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 1.2.2. con el aparato ICAR Rheometer.

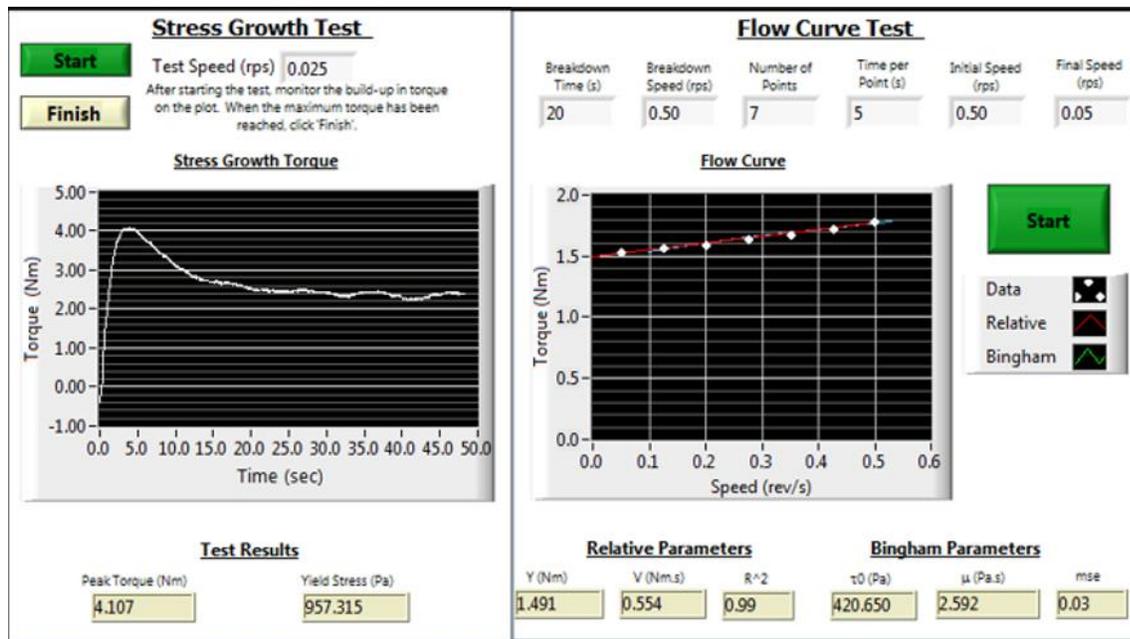
Para cada mezcla, se realizaron 2 pruebas de las que se tomaron los datos de viscosidad y esfuerzo de corte, entre la prueba 1 y prueba 2 solamente se dio un tiempo de 5 minutos de diferencia para ver el cambio en sus características, utilizando la misma mezcla realizada.

El aparato proporciona gráficas donde se puede observar cómo se comporta el fluido conforme aplica sus cambios de velocidad y cargas. En cada ensayo se obtiene una gráfica donde se puede observar su límite elástico y estático, y otra donde se muestra la curva de flujo que tiene como finalidad poder ser comparado con el modelo reológico de Bingham. Toda esta información se encuentra explicada más ampliamente en el capítulo 1.2.2.

A continuación, se mostrarán 2 gráficas por cada prueba realizada en cada mezcla, siguiendo el esquema que el aparato ICAR propone como se muestra en la figura 7 del presente trabajo.

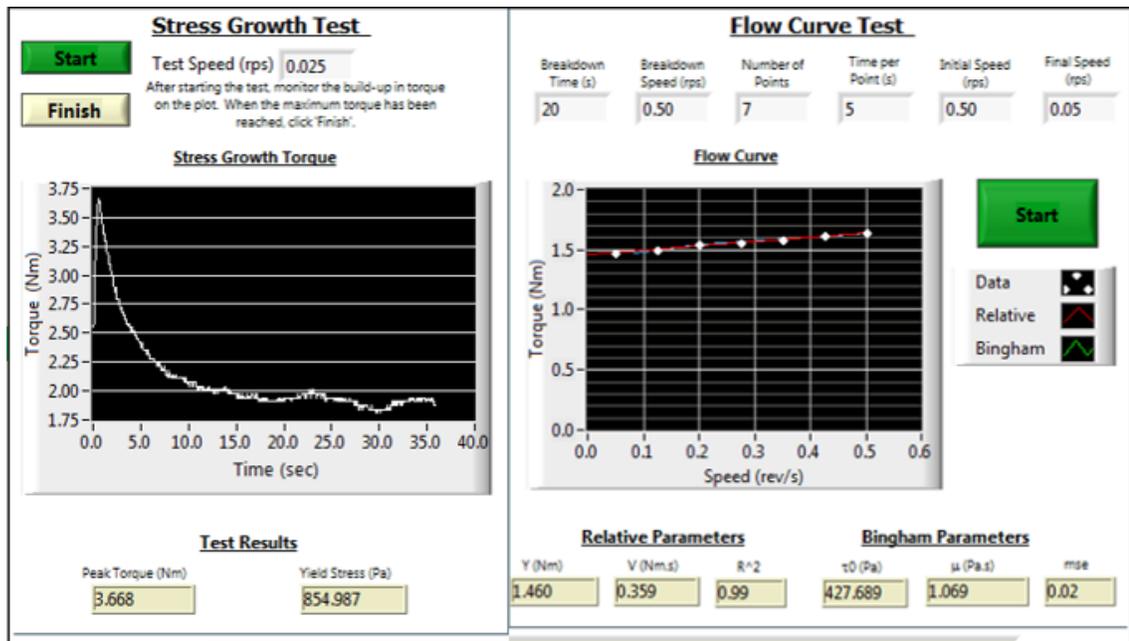
De la figura 22 a 27, se presentan las gráficas mencionadas anteriormente. Recopilando los datos obtenidos por el aparato, se presentan en la tabla XXV los resultados de prueba 1 y 2 para cada mezcla, especificando el esfuerzo de corte y la viscosidad de la mezcla.

Figura 21. Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 1



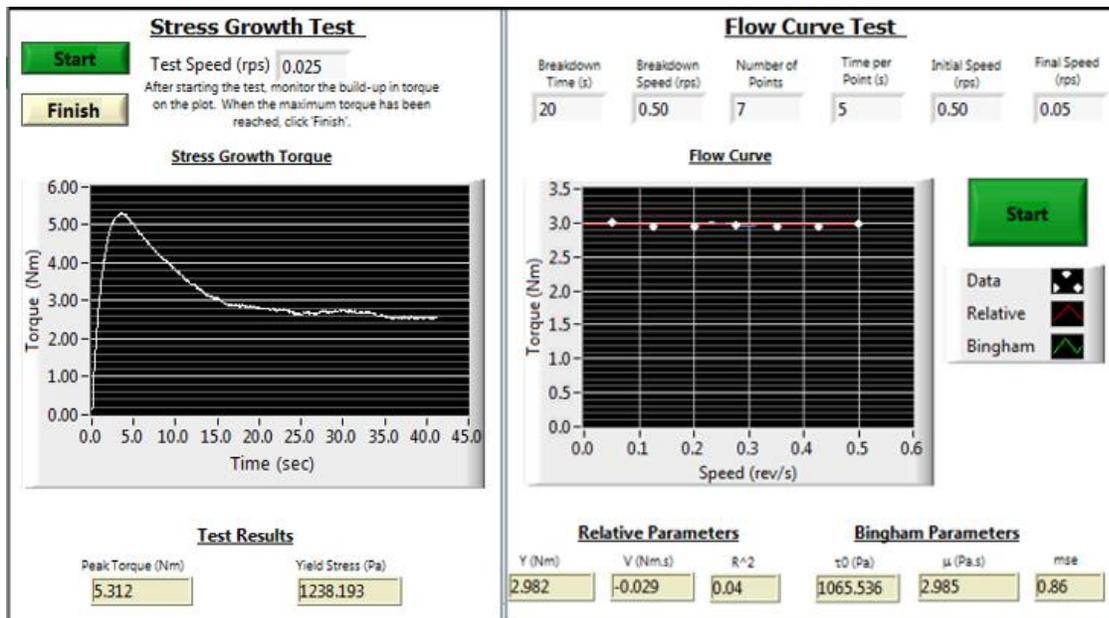
Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Figura 22. Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 1



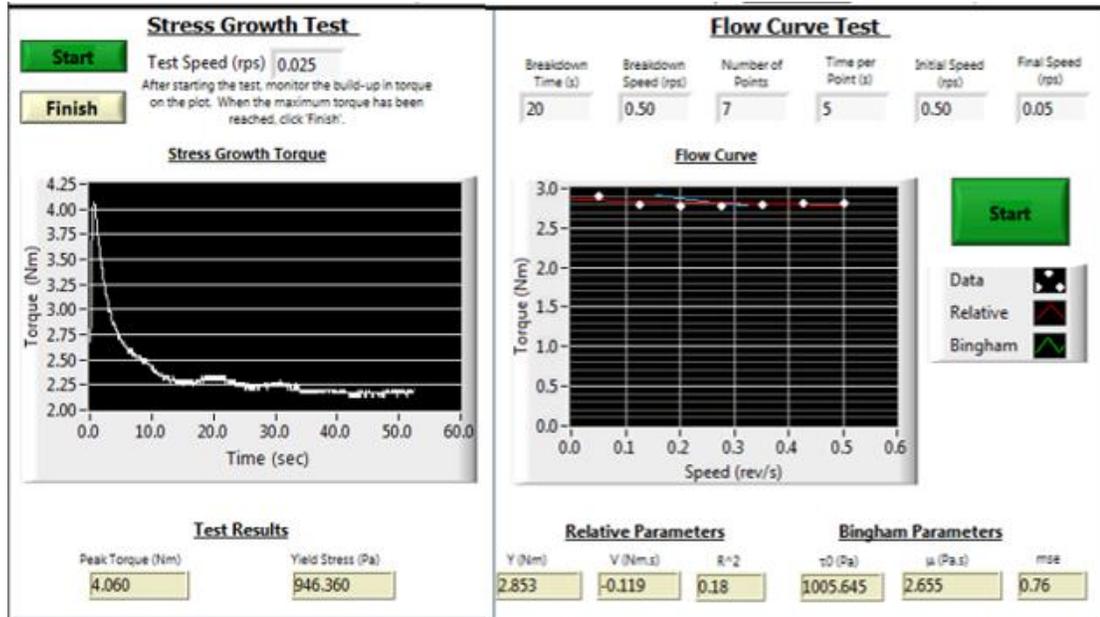
Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Figura 23. Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 2



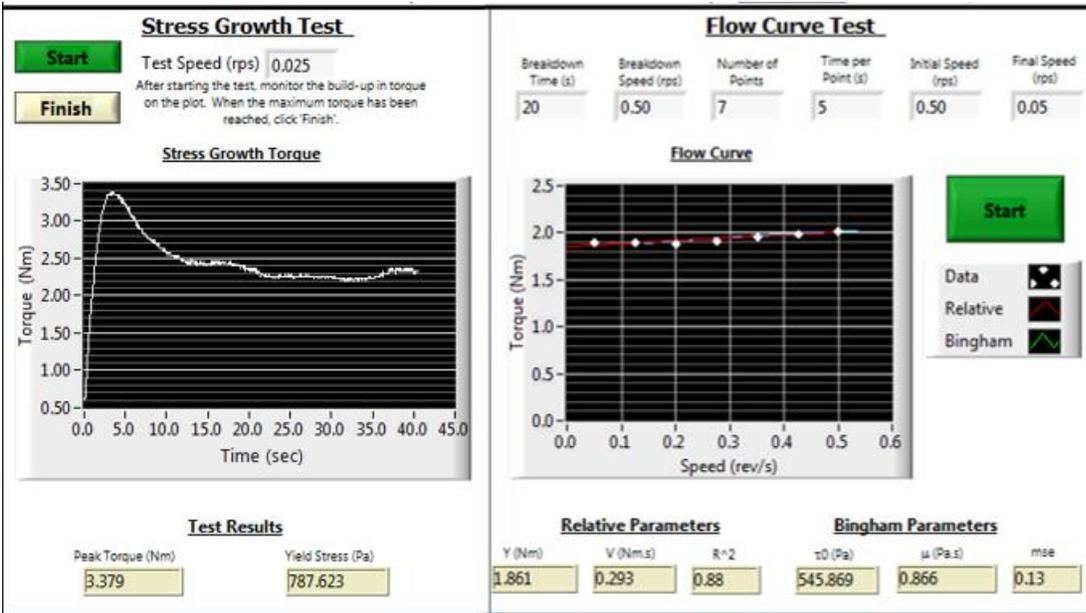
Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Figura 24. Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 2



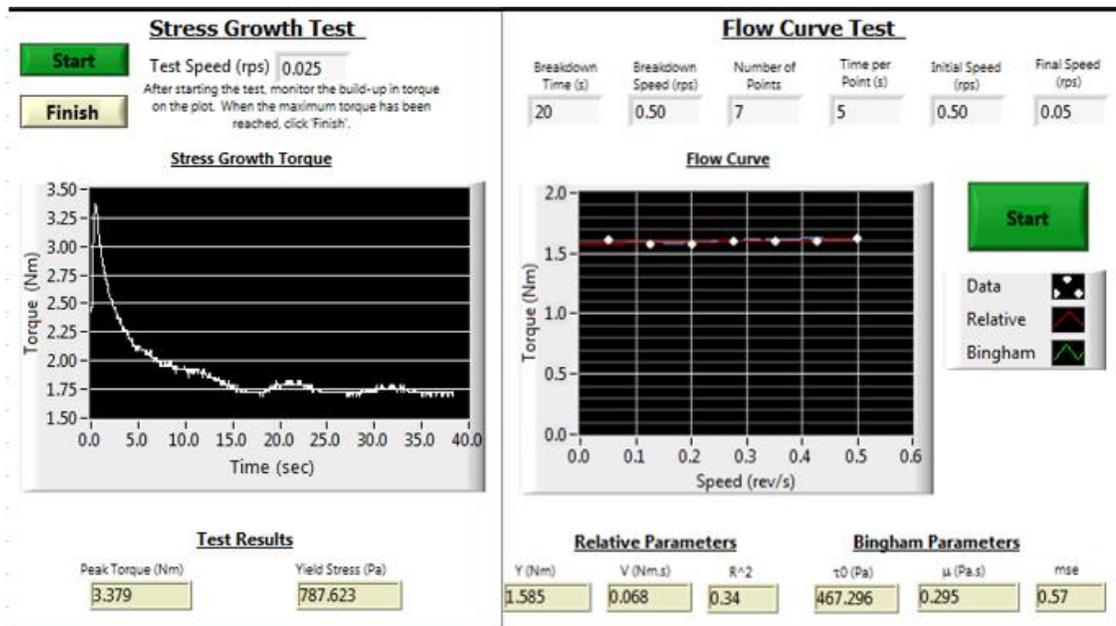
Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Figura 25. Ensayo reómetro, prueba 1, mezcla 3



Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Figura 26. **Ensayo reómetro, prueba 2, mezcla 3**



Fuente: elaboración propia, realizado con programa ICAR Rheometer.

Tabla XXIV. **Resultados ensayo reómetro**

Resultados reómetro mezcla 1		
Número de prueba	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)
Prueba 1	957.315	2.592
Prueba 2	854.987	1.069
Resultados reómetro mezcla 2		
Número de prueba	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)
Prueba 1	1238.193	2.985
Prueba 2	946.36	2.655

Continuación de la tabla XXIV.

Resultados reómetro mezcla 3		
Número de prueba	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)
Prueba 1	787.623	0.866
Prueba 2	787.623	0.295

Fuente: elaboración propia.

2.4. Resumen de resultados

- Los resultados de los ensayos de laboratorio que se presentan en este trabajo contribuyen a recopilar nuevos parámetros para futuros estudios que permiten la funcionalidad de una mezcla de concreto para impresión 3D.
- Luego de concluir el ciclo total de mezclado de las pruebas, la resistencia a esfuerzos de corte es baja. A través del tiempo, las mezclas van aumentando gradualmente la capacidad de resistencia a corte, comportándose dicho aumento casi de forma lineal. Se destacan los resultados de la mezcla 3, que presenta la mayor resistencia a corte luego de 60 minutos desde su elaboración con un valor final de 5 Kpa. La misma mezcla de igual forma destaca por su cambio en el valor de penetración, transcurridos 45 minutos desde su elaboración, con un valor promedio de 9 mm de diferencia entre la lectura en tiempo 0 y la lectura en un tiempo de 45 minutos.
- Con respecto a la consistencia de las mezclas, se mantienen valores de asentamiento muy similares, no habiendo una diferencia de por lo menos

media pulgada. Se mantuvo un rango entre 35 mm a 45 mm de penetración en un tiempo 0, la variación radica principalmente en características como su capacidad a resistencia a corte y viscosidad, que también pueden ser interpretadas con una inspección táctil, evaluando la fluidez, temperatura y la sensación de viscosidad que se perciba. En el mismo análisis de penetración, se observó que la masa unitaria aumentaba conforme la penetración iba disminuyendo, podría interpretarse que son valores inversamente proporcionales debido al comportamiento que se muestran en los resultados.

- En la evaluación de sus características físicas de las mezclas en estado fresco, presentan un valor promedio similar entre las tres con respecto al contenido de aire y su asentamiento, la temperatura si tiene una variación entre mezclas, siendo la mezcla 1 y 2 las que dieron un mayor valor y que dentro de su formulación contienen el aditivo 1 retardante. De igual manera estas mismas mezclas presentan una diferencia con respecto a la masa unitaria inicial, siendo la mezcla 2 la de mayor valor de 2045.42 Kg/m³ y la mezcla 3 con valor de 1996.75 Kg/m³.
- El análisis de sus propiedades mecánicas de las mezclas en estado endurecido, presentó resultados favorables de resistencia, dichos valores sí tuvieron variación con respecto a cada formulación de mezcla realizada. Todas las mezclas presentan un comportamiento en aumento de la resistencia a compresión común de mezclas de concreto convencionales utilizadas para construcciones con metodologías actualmente conocidas y aplicadas, mantienen la curva característica de aumento en la resistencia a compresión a una edad mayor. La mezcla 2 presentó el valor de resistencia mayor a 28 días, de 6142.68 PSI.

- Los resultados de evaluación reológica obtenidos directamente con el aparato reómetro, presentó los valores de esfuerzo de corte y viscosidad para cada una de las mezclas. El cambio entre la prueba 1 y prueba 2 de cada una, presenta una disminución en valores de viscosidad y esfuerzo de corte en la mayoría de los casos, esto se provocó por el corto tiempo entre la prueba 1 y 2 ensayados en el mismo punto de análisis, lo cual no permitió que el concreto recuperara su consistencia. La mezcla 2 presentó el mayor valor de viscosidad inicial, de 2.985 Pa*s y le mezcla 3 el menor, de 0.866 Pa*s.

CONCLUSIONES

1. En la consistencia de las mezclas de concreto para impresión 3D, destacan valores iniciales de viscosidad bajos, de no más de 3 Pa*s. Presentan similitud en sus características físicas como el contenido de aire y su trabajabilidad, al igual que el valor de penetración inicial dentro del rango propuesto, el que ha sido un parámetro para asegurar que las mezclas se comporten de forma similar en cuanto a las características mencionadas anteriormente y que han sido funcionales para su uso en impresión 3D.
2. El cambio de la consistencia de las mezclas a través del tiempo, es gradual. Transcurrido los 60 minutos de análisis, las mezclas aumentan el valor de resistencia a corte y un menor valor de penetración en la mezcla. Analizando dichas características, como la capacidad de resistencia a corte, presenta una relación directamente proporcional con respecto al tiempo. En tanto, se presenta una relación inversamente proporcional en la penetración en la mezcla con respecto al tiempo. Inicialmente, las mezclas 2, 1 y 3 dieron de resultado valores de masa unitaria de mayor a menor respectivamente, comportamiento similar al que se presentó en la medición de temperatura, en el mismo orden, asimismo el porcentaje de aire en la mezcla, lo que evidencia que son características poco relevantes entre mezclas.
3. Bajo las condiciones de laboratorio los resultados son los que se muestran en las gráficas 15 ,16 y 17, sin embargo, al utilizar las mezclas bajo

condiciones de campo, los valores pueden variar debido a condiciones de temperatura y humedad del ambiente.

4. La resistencia a compresión de las mezclas a 28 días de edad presenta valores aceptables comparándolos con las mezclas comúnmente utilizadas en obras de construcción, lo que las hace totalmente aptas para ser utilizadas en elementos estructurales portantes, según sea necesario.
5. La importancia del análisis en la resistencia a corte de las mezclas de concreto en estado fresco, radica en la geometría del elemento que se imprimirá y la velocidad con la que se pretende imprimir. Estos factores determinarán si se requiere una mezcla con alto aumento de resistencia a corte en un tiempo corto o, por el contrario, que se presente un valor de aumento de resistencia a corte en un periodo de tiempo más largo. Esto beneficiará en mejor calidad de impresión, evitando deformaciones no deseadas, el colapso de las estructuras y juntas frías entre capas de impresión.
6. Con el equipo utilizado para el desarrollo de construcciones con esta tecnología, se facilita trabajar con mezclas que presenten valores reológicos de viscosidad baja en un tiempo inicial para contribuir con el flujo en el bombeo de la mezcla, hasta llegar a la boquilla de extrusión de la impresora.
7. De las formulaciones de mezcla propuestas para el desarrollo de este estudio, la mezcla 3 presenta las mejores características físicas y mecánicas para ser utilizada en impresión 3D, bajo las condiciones de este estudio, destacando principalmente su aumento de resistencia a corte a través del tiempo y su baja viscosidad en tiempos iniciales.

RECOMENDACIONES

1. Realizar el análisis de la mezcla en el lugar de impresión bajo las condiciones climáticas del área, al principio de cada impresión, comparando estos resultados con los parámetros ya establecidos y presentados en este trabajo, para ajustes en dosificaciones.
2. Evaluar la utilización de aditivos acelerantes en las mezclas, con el fin de analizar si esto permite aumentar la velocidad de impresión.
3. Estudiar la robustez de las mezclas para impresión 3D, para que sean menos susceptibles a las variaciones en todo el proceso.

REFERENCIAS

- COBOD. (15 de septiembre de 2022). Cementos Progreso, la mayor cementera de Guatemala, lidera la aplicación de las impresoras de construcción 3D de COBOD en América Latina para reducir el déficit de viviendas. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.mynewsdesk.com/dk/cobod-international/pressreleases/cementosprogreso-la-mayor-cementera-de-guatemala-lidera-la-aplicacion-de-las-impresorasde-construccion-3d-de-cobod-en-america-latina-para-reducir-el-deficit-de-viviendas3204335>
- Diez, S. (2019). *Comportamiento reológico de cementos y morteros activados alcalinamente: influencia de las variables del proceso* (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, España.
- Laboratorio CETEC. (2022). *Resultados de modelado 3D*. Guatemala: Autor.
- Laboratorio CETEC. (2023). *Informes de ensayos*. Guatemala: Autor.
- Morhell, N. (2015). *Microciscosimetro capilar para fluidos complejos* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
- Normas Técnicas Guatemaltecas (2010). *41017 h1 Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Guatemala: Autor.

Normas Técnicas Guatemaltecas (2012). *41051 h1 Método de ensayo. Evaluación de morteros de pega para mampostería simple y reforzada antes de la construcción y durante la construcción*. Guatemala: Autor.

Normas Técnicas Guatemaltecas (2019). *NTG 41017 h4 Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico*. Guatemala: Autor.

PERI. (20 de octubre de 2022). 3D Construction Printing. 3D Construction Printing. [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://www.peri.com/en/business-segments/3d-construction-printing.html>.

Portland Cement Association. (2002). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, EB201. Estados Unidos: Autor.

Portland Cement Association (2018). *Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal*. Estados Unidos: Autor.

Sharma, R & Sinha, S. (febrero, 2021). Emerging Trends in 3D Printing in Construction Using Artificial Intelligence [Tendencias emergentes en la impresión 3D en la construcción utilizando inteligencia artificial]. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 5(2), 6-7. <https://ijses.com/wp-content/uploads/2021/02/110-IJSES-V5N1.pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1. Ensayo de asentamiento



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 2. **Temperatura de la mezcla**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 3. Contenido de aire



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 4. **Cilindros 4”X8”**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 5. **Ensayo a compresión**



Fuente: [Fotografía de Jorge Miguel Maldonado]. (Guatemala, Guatemala.2023). Colección particular. Guatemala.

ANEXOS

Anexo 1. Aditivos de concreto según su clasificación

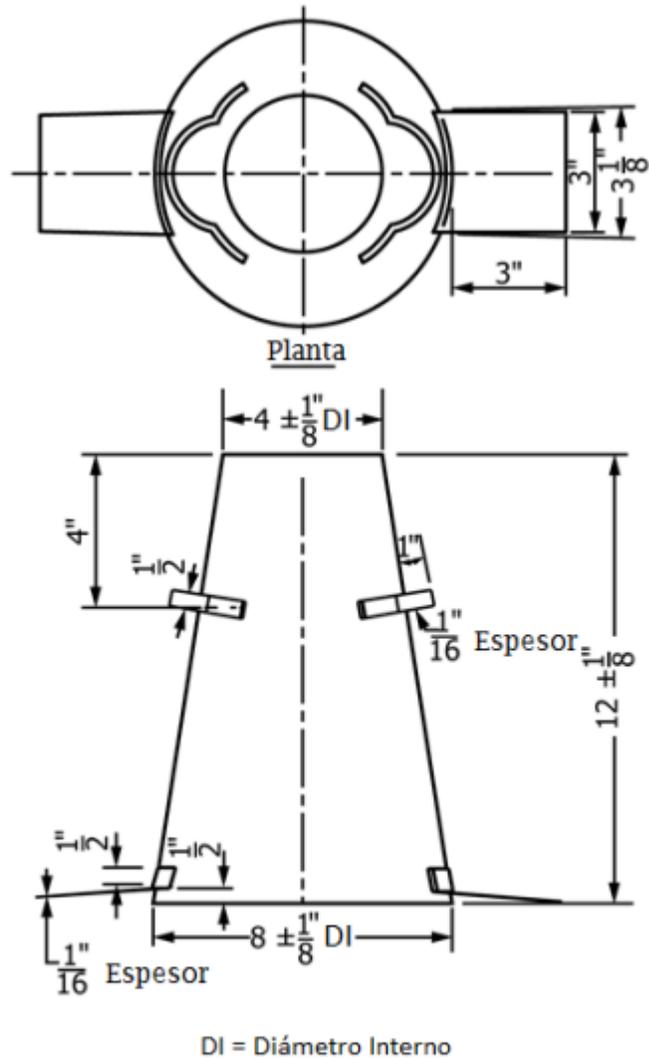
Tipo de Aditivo y Normas	Efecto Deseado	Material
Acelerador	Acelerar el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia temprana	Cloruro de calcio, (ASTM D 98 and AASHTO M 144) trietanolamina, tiocianato de sodio, formiato de calcio nitrito de calcio, nitrato de calcio
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo C), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NMX-C-356, NTC 1299 (tipo C), NTP 334.088		
Adherencia	Aumentar la resistencia de adherencia	Cloruro polivinilo, acetato polivinilo, acrílicos, copolímeros de butadienoestireno
Aditivo para Lechada	Ajustar las propiedades de la lechada para aplicaciones específicas	Consulte los aditivos inclusores de aire, aceleradores, retardadores y reductores de agua
Agente Espumante	Producir concreto ligero y concreto celular con baja densidad	Surfactantes catiónicos o aniónicos Proteína hidrolizada
Anti-deslave	Aumentar la cohesión del concreto para su colocación bajo agua	Celulosa, polímero acrílico
A Prueba de Humedad	Retrasar la penetración de humedad en el concreto seco	Jabones de estearato de calcio o amonio u oleato Estearato butilo Productos de petróleo
Auxiliar de bombeo	Mejorar las condiciones de bombeo	Polímeros orgánicos y sintéticos Floculantes orgánicos Emulsiones orgánicas de parafina, alquitrán, asfalto, acrílicos Bentonita y sílice pirogénica Cal hidratada (ASTM C 141)
Colorante	Producir concreto coloreado	Negro de humo modificado, óxido férrico, tierra de sombra, óxido de cromo, óxido de titanio y azul cobalto
ASTM C 979, NMX-C 313, NTC 3760		
Control de Hidratación	Suspender y reactivar la hidratación del cemento con un estabilizador y un activador	Ácidos carboxílicos Sales de ácidos orgánicos conteniendo fósforo
Formador de gas	Causar expansión antes del fraguado	Polvo de aluminio
Fungicida, germicida e insecticida	Inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos	Fenoles polihalogenados Emulsiones de dieldrin Compuestos de cobre
Impermeabilizantes	Disminuir la permeabilidad	Látex Estearato de calcio
Inclusores (incorporador) de Aire	Mejorar la durabilidad en los ambientes sujetos a congelación-deshielo, sales, sulfatos y ambientes álcali reactivos Mejorar la durabilidad	Sales de resinas de madera (resina vinsol) Algunos detergentes sintéticos Sales de lignina sulfonatada Sales de ácidos de petróleo Sales de material protináceo Ácidos grasos y resinosos y sus sales Sulfonatos de alquilbenzeno Sales de hidrocarburos sulfonatados
ASTM C 260, AASHTO M 154, COVENIN 0357, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NGO 41069, NMX-C-200, NTC 3502, NTP 334.089, NGO 41016		
Inhibidor de reacción álcali-agregado	Reducir la expansión por reactividad álcali-agregado	Sales de bario, nitrato de litio, carbonato de litio, hidróxido de litio
Inhibidor de Corrosión	Reducir la corrosión del acero en ambientes con alta concentración de cloruros	Nitrito de calcio, nitrito de sodio, benzoato de sodio, ciertos fosfatos y fluosilicatos, fluoaluminatos, esteramina
Purgador de aire (reductor de aire)	Disminuir el contenido de aire	Fosfato tributilo, ftalato dibutilo, alcohol octilo, ésteres insolubles en ácidos carbónico y bórico, silicones
Reductor de agua	Reducir en hasta 5% el contenido de agua	Lignosulfonatos Ácido carboxílico hidroxilato Carbohidratos (también tienden a retardar el fraguado, entonces normalmente se añade un acelerador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo A), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		

Continuación del anexo 1.

Tipo de Aditivo y Normas	Efecto Deseado	Material
Reductor de agua y acelerador	Reducir en hasta 5% el contenido de agua y acelerar el fraguado	Véase reductor de agua (se añade acelerador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo E), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua y retardador	Reducir en hasta 5% el contenido de agua y retardar el fraguado	Véase reductor de agua (se añade retardador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo D), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua de alto rango	Reducir en hasta 12% el contenido de agua	Véanse superplastificantes
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo F), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua de alto rango y retardador	Reducir en hasta 12% el contenido de agua y retardar el fraguado	Véanse superplastificantes y reductores de agua
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo G), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua de medio rango	Reducir el contenido de agua de 6% a 12% sin retardo del fraguado	Lignosulfonatos Policarboxilatos
Reductor de contracción	Disminuir la contracción por secado	Éter alkil polioxialkileno Propileno glicol
Retardador	Retardar el tiempo de fraguado	Lignina Bórax Azúcares Ácido tartárico y sales
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo B), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299 (tipo B), NTP 334.088		
Superplastificante	Aumentar la fluidez del concreto Disminuir la relación agua-cemento	Formaldehido condensado de melamina sulfonato Formaldehido condensado de naftaleno sulfónico Lignosulfonatos Policarboxilatos
ASTM C 1017 (tipo 1), IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 4023 (tipo F), NTP 334.088		
Superplastificante y Retardador	Aumentar la fluidez del concreto con tiempo de fraguado retardado Disminuir la relación agua-cemento	Véanse superplastificantes y reductores de agua
ASTM C 1017 (tipo 2), IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 4023 (tipo G)		

Fuente: Portland Cement Association. (2002). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto, EB201.*

Anexo 2. **Capacidad de los recipientes de medida**



Unidades Dimensionales									
mm	[2]	[3]	[15]	[25]	[75]	[80]	[100]	[200]	[300]
pulg	1/16	1/8	1/2	1	3	3 1/8	4	8	12

Fuente: Normas Técnicas Guatemaltecas (2019). *NTG 41017 h4 Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.*

Anexo 3. Capacidad de los recipientes de medida

Tamaño nominal máximo del agregado grueso		Capacidad del recipiente ^A	
pulgadas	mm	Pie ³	L
1	25.0	0.2	6
1 ½	37.5	0.4	11
2	50.0	0.5	14
3	75.0	1.0	28
4 ½	112.0	2.5	70
6	150.0	3.5	100

^A Se utilizara el tamaño indicado del recipiente para ensayar el concreto que contenga agregado de un tamaño nominal máximo igual o menor al que se encuentra en la lista. El volumen real del recipiente será cuando menos el 95% del volumen nominal listado.

Fuente: Normas Técnicas Guatemaltecas (2019). *NTG 41017 h4 Método de ensayo.*

Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.

Anexo 4. Requisitos de moldeado por varillado

Tipo y Tamaño del Espécimen	Numero de Capas de Aproximadamente Igual profundidad	Número de golpes de Varilla por capa
Cilíndricos.		
Diámetro mm [Pulg]		
100 [4]	2	25
150 [6]	3	25
225 [9]	4	50
Vigas:		
Ancho. mm [Pulg]		
150 [6] a 200 [8]	2	Vea 9.3
200 [> 8]	3 ó más de igual profundidad, cada una	Vea 9.3
Sin exceder 150 mm [6pulg.]		

Fuente: Normas Técnicas Guatemaltecas (2019). *NTG 41017 h4 Método de ensayo.*

Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.

Anexo 5. **Tolerancias permisibles de ensayos.**

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 horas	$\pm \frac{1}{2}$ hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

Fuente: Normas Técnicas Guatemaltecas (2019). *NTG 41017 h4 Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.*