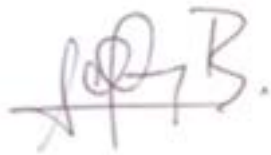


DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE BLOQUE DE MAMPOSTERÍA EMPLEANDO CONCRETO CELULAR

Esteban Alberto Bolaños Delgado
Víctor Eduardo Ruano Gaviria

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface,
en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda
un Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Civil



Anibal Cesar Maury Ramírez
Jurado


Manuel Alejandro Rojas Manzano
Director

José Javier Martínez Echeverri
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de
Magister en Ingeniería Civil.


HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS Mgtr
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 20 de febrero de 2024

Autores:

**Esteban Alberto Bolaños Delgado
Víctor Eduardo Ruano Gaviria**

Título del Trabajo de Grado:

**“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE BLOQUE DE MAMPOSTERÍA EMPLEANDO
CONCRETO CELULAR”**

Director:

Manuel Alejandro Rojas Manzano

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.

Firma del director del Trabajo de Grado

Datos de estudiantes

Nombre	Esteban Alberto Bolaños Delgado	Victor Eduardo Ruano Gaviria
Cédula	1.083.813.865	1.107.099.120
Código	8964242	8963339
Dirección	Cr 93b #96-19, Bajo Jordán. Cali – Valle	Carrera 24c #33c-17, casa 37, Ciudadela Santa Mónica. Cali – Valle
Correo electrónico	esbolanosd@javerianacali.edu.co	victorrg@javerianacali.edu.co
Celular	3160436967	3118620084
Profesión	Ingeniero Civil	Ingeniero Civil
Nombre empresa donde labora	Consortio PCC	Contratista
Cargo que ocupa	Ingeniero residente de costos	Ingeniero residente de obra

DEDICATORIA

A Dios, por darnos vida y sabiduría para cumplir esta meta.

A nuestros padres, por ser nuestro apoyo y refugio.

A Danna y Jessica, por su amor, apoyo y motivación.

Gracias familia, no lo hubiéramos logrado sin ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por permitirnos ser parte de su programa de posgrado y brindarnos las instalaciones para cumplir este sueño.

Al Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano, por su apoyo, dedicación, paciencia, respeto, motivación, consejos, recomendaciones y conocimiento impartido durante el desarrollo de este proyecto, su apoyo fue fundamental.

Al personal de laboratorio, en especial a Erlo Travi y el semillero de investigación, su aporte y colaboración fue invaluable.

A nuestros compañeros de estudio por su apoyo, carisma y motivación, espero que esta amistad permanezca por siempre.

A todos muchas gracias, esta investigación no hubiera sido posible sin su ayuda.

RESUMEN

La creciente demanda de materiales de construcción no renovables, como la arcilla para la fabricación de ladrillos, en la región de Santiago de Cali, Colombia, ha generado proyecciones preocupantes de un déficit habitacional para la próxima década. Este panorama se ve agravado por la baja productividad y el ineficiente manejo de materias primas en la industria de la construcción en Colombia. Ante esta problemática, surge la necesidad de explorar nuevos materiales que respondan a la demanda creciente y, al mismo tiempo, mitiguen el impacto ambiental

En este contexto, el objetivo principal del estudio es desarrollar un prototipo de bloque en concreto celular utilizando materiales disponibles en la región y cumpliendo con las especificaciones de la normativa colombiana vigente para mampostería. Este enfoque busca mitigar el uso de mampostería tradicional con diseños de bloques empleando este tipo de concreto liviano, tanto en la construcción tradicional como en edificaciones de alta envergadura, aprovechando las propiedades mecánicas, termoacústicas y arquitectónicas de este material.

El proceso experimental inicia con la caracterización de los materiales empleados en el concreto celular, los cuales se adquieren en la ciudad de Cali. Se realizan ensayos de caracterización de la arena, los tipos de cemento y los aditivos espumantes. Posteriormente, se llevan a cabo diversos ensayos para obtener las variables del concreto celular, incluyendo la formación y densidad de la espuma, la dosificación del concreto celular con diversas densidades, y la exploración de fundiciones en probetas prismáticas y cilíndricas. Se evalúan variables como la relación aditivo/agua, el tipo de curado para las muestras, el método de mezclado y el tipo de arena y cemento.

Los resultados obtenidos revelan que, a pesar de fabricar bloques de concreto celular con una densidad cercana a los 1.400 kg/m^3 , la resistencia a la compresión promedio alcanzo los 1,46 MPa, con una absorción promedio del 18,1%. Estos valores, respaldados por la fabricación de muretes que mostraron una resistencia promedio de 1,52 MPa, indican que las propiedades obtenidas podrían no ser suficientes para su aplicación como bloques no estructurales según las normativas vigentes.

PALABRAS CLAVE: Concreto celular, espuma, bloques de mampostería, muretes

ABSTRACT

The increasing demand for non-renewable construction materials, such as clay for brick production, in the Santiago de Cali region, Colombia, has generated worrying projections of a housing deficit for the next decade. This scenario is exacerbated by the low productivity and inefficient handling of raw materials in the construction industry in Colombia. Faced with this problem, there is an urgent need to explore new materials that respond to the growing demand and, at the same time, mitigate environmental impact.

In this context, the main objective of the study is to develop a prototype of a cellular concrete block using materials available in the region and complying with current Colombian regulations for masonry. This approach aims to reduce the use of traditional masonry by employing designs with lightweight concrete blocks in both traditional and high-rise construction, capitalizing on the mechanical, thermo-acoustic, and architectural properties of this material.

The experimental process begins with the characterization of materials used in cellular concrete, acquired in the city of Cali. Characterization tests of sand, types of cement, and foaming agents are conducted. Subsequently, various tests are carried out to obtain the variables of cellular concrete, including the formation and density of the foam, dosing cellular concrete with various densities, and exploring castings in prismatic and cylindrical specimens. Variables such as the additive/water ratio, the type of curing for samples, the mixing method, and the type of sand and cement are evaluated.

The obtained results reveal that, despite manufacturing cellular concrete blocks with a density close to 1,400 kg/m³, the average compressive strength reached 1.46 MPa, with an average absorption of 18.1%. These values, supported by the production of small walls showing an average resistance of 1,81 MPa, suggest that the obtained properties may not be sufficient for their application as non-structural blocks according to current regulations.

KEYWORDS: Cellular concrete, foam, masonry blocks, small walls

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE BLOQUE DE MAMPOSTERÍA EMPLEANDO
CONCRETO CELULAR

Esteban Alberto Bolaños Delgado
Víctor Eduardo Ruano Gaviria

Director: Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Maestría en Ingeniería Civil
Énfasis en Construcciones
Santiago de Cali – Valle del Cauca

2024

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1.1	<i>Planteamiento del problema</i>	2
1.1.2	<i>Pregunta de investigación</i>	3
1.1.3	<i>Alcance del trabajo de grado</i>	3
1.2	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	4
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.3	JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	5
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	HISTORIA DEL CONCRETO LIGERO	7
2.2	ANTECEDENTES NACIONALES.....	9
2.3	CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO LIGERO.....	11
2.3.1	<i>Concreto ligero a base de agregados livianos</i>	11
2.3.2	<i>Concreto ligero sin finos</i>	12
2.3.3	<i>Concreto ligero celular</i>	12
2.4	PROPIEDADES CONCRETO CELULAR	14
2.4.1	<i>Resistencia a compresión y densidad</i>	14
2.4.2	<i>Módulo de elasticidad</i>	16
2.4.3	<i>Resistencia a la flexión</i>	17
2.4.4	<i>Aislamiento térmico</i>	17
2.5	AGENTES ESPUMANTES	19
2.6	PROCESO DE PRODUCCIÓN – MEZCLADO DE CONCRETO CELULAR	20
2.7	NORMATIVA DE CONCRETO CELULAR	22
2.8	APLICACIONES	23
2.8.1	<i>Utilidades del concreto celular</i>	23
2.8.2	<i>Bloques de concreto celular</i>	25
2.9	DÉFICIT DE VIVIENDA	26

3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	29
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	30
3.1.1	<i>Origen de materiales.....</i>	<i>31</i>
3.1.2	<i>Cemento</i>	<i>32</i>
3.1.3	<i>Agregado fino.....</i>	<i>35</i>
3.1.4	<i>Aditivo Espumante</i>	<i>38</i>
3.2	ESTUDIO DE VARIABLES DEL CONCRETO CELULAR.....	39
3.2.1	<i>Generación de espuma.....</i>	<i>39</i>
3.2.2	<i>Estabilidad y selección de aditivo espumante</i>	<i>54</i>
3.2.3	<i>Metodología de dosificación por ACI 523.3R-14.....</i>	<i>65</i>
3.2.4	<i>Relación aditivo espumante/agua.....</i>	<i>72</i>
3.2.5	<i>Tipo de curado</i>	<i>75</i>
3.2.6	<i>Método de mezclado en volumen – tipos de mezcladoras</i>	<i>79</i>
3.2.7	<i>Agregados finos</i>	<i>84</i>
3.2.8	<i>Tipo de cemento</i>	<i>88</i>
3.3	DEFINICIÓN DE CURVA RESISTENCIA VS DENSIDAD	91
3.3.1	<i>Curva con arena de trituración y Mastercell 10</i>	<i>92</i>
3.3.2	<i>Curva con arena de río y Concrecell 33.....</i>	<i>95</i>
3.4	ENSAYOS EN BLOQUES Y MURETES	98
3.4.1	<i>Prueba piloto de fabricación de bloques</i>	<i>99</i>
3.4.2	<i>Definición de geometría y dosificación de bloques</i>	<i>103</i>
3.4.3	<i>Fabricación de bloques y muretes</i>	<i>104</i>
3.4.4	<i>Ensayos en bloques.....</i>	<i>107</i>
3.4.5	<i>Ensayos en muretes.....</i>	<i>108</i>
4	RESULTADOS	110
4.1	CURVA RESISTENCIA VS DENSIDAD	110
4.1.1	<i>Curva con arena de trituración (Mastercell 10).....</i>	<i>110</i>
4.1.2	<i>Curva con arena de río (Concrecell 33).....</i>	<i>113</i>
4.2	ENSAYOS EN BLOQUES Y MURETES	115

4.2.1	<i>Prueba Piloto</i>	115
4.2.2	<i>Ensayos en bloques</i>	116
4.2.3	<i>Ensayos en muretes</i>	117
5	CONCLUSIONES	118
5.1	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	119
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
7	GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES	127
8	ANEXOS	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Recopilación de esfuerzo a compresión, densidad y mezcla de concreto celular obtenida por varios autores (Ramamurthy et al., 2009a).....	15
Tabla 2: Ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad para el mortero celular (Medina & Yañez, 2014b).....	17
Tabla 3: Clasificación de mampostería según la resistencia a compresión de los bloques (NTC 4026, 1997; NTC 4076, 2017).....	25
Tabla 4: Propiedades físicas y mecánicas del cemento ART	32
Tabla 5: Características físicas de la arena de trituración y río.	35
Tabla 6: Resultados de densidad de aditivos espumantes norma ASTM D1217-20 (2020) .	38
Tabla 7: Resultados de sólidos suspendidos a través de la norma ASTM D5907.....	39
Tabla 8: Dosificación de concreto ligero propuesta por (Acosta & González, 2003b) variando la densidad.	41
Tabla 9: Parámetros de fundición: generación de espuma	41
Tabla 10: Proceso estándar de mezclado de concreto celular (ASTM C305-06, 2011; NTC 112, 2021).....	42
Tabla 11: Parámetros de segunda fundición: generación de espuma	44
Tabla 12: Cantidades en peso para fundiciones de concreto celular empleando EucoCell 1000 kg/m ³	46
Tabla 13: Resultados de densidad y resistencia a 7 días de fundiciones empleando EucoCell 1000.....	47
Tabla 14: Parámetros con preformación de espuma sin diluir.....	62
Tabla 15: Parámetros con preformación de espuma sin diluir.....	64
Tabla 16: Parámetros de fundición: Metodología ACI 523.....	66
Tabla 17: Cantidades en peso para fundición de concreto celular de 800 kg/m ³	71

Tabla 18: Parámetros de fundición: relación aditivo/agua	73
Tabla 19: Cantidades en peso para las tres fundiciones de concreto celular de 1500 kg/m ³ variando relación aditivo/agua.....	73
Tabla 20: Resultados de densidad y resistencia de fundiciones variando relación aditivo/agua	74
Tabla 21: Parámetros de fundición: tipo de curado	77
Tabla 22: Cantidades en peso para la fundición de 9 cubos de 1.200 kg/m ³	78
Tabla 23: Resultados de densidad y resistencia de fundiciones variando el tipo de curado..	78
Tabla 24: Parámetros de fundición: método de mezclado en volumen – tipos de mezcladoras	80
Tabla 25: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1.500 kg/m ³ variando la maquina mezcladora	81
Tabla 26: Resultados de densidad, resistencia y absorción de fundiciones variando la maquina mezcladora	83
Tabla 27: Parámetros de fundición: agregados finos.....	85
Tabla 28: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1600 kg/m ³ variando el tipo de arena	86
Tabla 29: Resultados de resistencia y asentamiento para mezclas empleando arena de río y trituración.....	87
Tabla 30: Parámetros de fundición: tipo de cemento	89
Tabla 31: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1.400 kg/m ³ variando el tipo de cemento	90
Tabla 32: Parámetros de fundición: Curva resistencia vs densidad con arena de trituración (prueba piloto).....	93
Tabla 33: Cantidades de materiales en peso para 1 m ³ de concreto celular con densidades desde 1.200 hasta 1.800 kg/m ³	94

Tabla 34: Parámetros de fundición: Curva resistencia vs densidad con arena de río	96
Tabla 35: Cantidades de materiales en peso para 1 m ³ de concreto celular con densidades desde 800 hasta 1.600 kg/m ³	97
Tabla 36: Parámetros de fundición: Prueba piloto de fabricación de bloques con arena de río	101
Tabla 37: Cantidades de materiales en peso para 1 m ³ de concreto celular para prueba piloto de fabricación de bloques con arena de río	101
Tabla 38: Proceso de mezclado en maquina planetaria.	102
Tabla 39: Parámetros de fundición: fabricación de bloques con arena de río	105
Tabla 40: Cantidades de materiales en peso para 1 m ³ de concreto celular fabricación de bloques de mampostería con arena de río	106
Tabla 41: Resistencia mínima y Absorción permitida según densidad de unidades de mampostería (NTC 4076, 2017)	107
Tabla 42: Resultados de compresión, absorción y asentamiento para curva con fundiciones piloto	112
Tabla 43: Resultados de compresión para muestras curadas en aire e inmersión	114
Tabla 44: Resistencia a compresión para fundición piloto de bloques	115
Tabla 45: Resultados de compresión y absorción de bloques de mampostería	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Panteón de Agripa – 126 d.C (Rengifo & Yupangui, 2013a).	8
Figura 2: Clasificación del concreto celular (Chica & Alzate, 2019).....	13
Figura 3: Aislamiento térmico de una vivienda con porcentajes de incidencia de calor en el exterior (Rengifo & Yupangui, 2013a).....	18
Figura 4: Materiales para la elaboración de concreto celular Fuente: Acevedo Agudelo et al. (2012).....	20
Figura 5: Secuencia general de mezclado para producir concreto celular (ACI 523.3R-14, 2014).	22
Figura 6: Diagrama de países de LAC con déficit de vivienda en porcentaje con respecto al total de familias por país, según datos del BID (2021).....	27
Figura 7: Esquema metodológico por etapas.....	29
Figura 8: Aparato de Blaine, Ensayo de finura del cemento.	33
Figura 9: Ensayos para determinar el peso específico del cemento.	33
Figura 10: a) Preparación de la muestra. b) Ensayo para determinar la consistencia normal del cemento.	34
Figura 11: a) Pasta de consistencia normal. b) Equipo de Vicat. c) Ensayo de tiempo de fraguado del cemento.	34
Figura 12: a) Elaboración cubos 50mm. b) Desencofrado de especímenes. c) Ensayo de resistencia a la compresión del cemento.	35
Figura 13: a) Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos. b) Equipo de tamizado.....	36
Figura 14: Granulometría de arena de trituración y arena de río, límites según NTC 77 (2018).	36
Figura 15: a) Arena seca al aire para masas unitarias. b) Proceso de tarado.	37

Figura 16: a) Ensayo de materia orgánica en área de trituración. b) Rango de colorímetro después de 24horas en arena de río.....	37
Figura 17: Ensayo de gravedad específica y absorción en arena de trituración, matraz de ensayo.	38
Figura 18: a) Muestra de Concrecell 33 y b) Estado seco al horno.	39
Figura 19: a) Adición de aditivo espumante durante el mezclado en mezcladora de eje vertical pequeña. b) Vaciado de mezcla en formaletas.....	42
Figura 20: Prisma de primera fundición de concreto celular.....	43
Figura 21: Tiempo de mezclado vs densidad en estado fresco empleando aditivo Eucocell 1000.....	47
Figura 22: Elementos para agitador mecánico: a) Taladro percutor de velocidad variable y b) varilla lisa con terminación circular rodeada de resortes.....	49
Figura 23: Tanque generador de espuma.....	50
Figura 24: Pistola a presión de agua y formadora de espuma con depósito de 1 litro.....	51
Figura 25: Componentes del cañón de espuma de fabricación manual.....	52
Figura 26: Detalle de T donde se conecta la entrada de aire y las válvulas de control.....	52
Figura 27: Espuma generada con taladro y aditamento.....	55
Figura 28: Densidad de espuma en el tiempo empleando aditivo Mastercell y generada con taladro y aditamento, variando la concentración aditivo/agua.....	56
Figura 29: Densidad de espuma en el tiempo generada con tanque espumante, para los tres aditivos con una relación 1/40.....	57
Figura 30: Generación de espuma con máquina espumante: a) Preparación de depósito con válvula cerrada. b) Calibración de válvulas de control C) Salida de espuma desde cañón.....	58
Figura 31: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, variando el número de esponjas, usando Concrecell 33 con relación 1/40.....	59

Figura 32: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo MasterCell 10, variando la relación aditivo/agua	60
Figura 33: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo Eucozell 1000, variando la relación aditivo/agua	60
Figura 34: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo Concrecell 33, variando la relación aditivo/agua.....	61
Figura 35: Cubos deformados de fundición con espuma preformada sin diluir	63
Figura 36: Cubos frágiles y desintegrados en fundición con aditivo diluido a 1/40	64
Figura 37: Fundición de cubos de 800 kg/m ³ . a) Cubos desencofrados tras 24 horas. b) Cubos flotando en agua en proceso de curado	71
Figura 38: Cubos desencofrados tras 24 horas de fundición de mezcla a)1/20 y b)1/40	74
Figura 39: Densidad fresca vs resistencia promedios para las tres mezclas variando aditivo/agua.....	75
Figura 40: Cubos sometidos a diferentes tipos de curado: a) Curado en cámara, b) Curado al aire, c) Curado en inmersión de agua.....	77
Figura 41: Densidad después de curado vs resistencia promedios para las tres mezclas variando el tipo de curado.....	79
Figura 42: Vaciado de espuma preformada en a) mezcladora de eje vertical grande y b) mezcladora basculante	82
Figura 43: a) Espuma adherida en aspas de mezcladora convencional. b) Mezcla homogénea de concreto celular en mezcladora pastelera grande.....	84
Figura 44: Prueba de asentamiento de concreto celular usando a) arena de trituración y b) arena de río.....	87
Figura 45: Proceso de fabricación y ensayo de cilindros: a) vaciado de mezcla en formaletas previo a enrazar, b) fraguado de muestras, c) desencofrado de cilindros e inicio de curado, d) ensayo a compresión	98

Figura 46: Juego de tres formaletas fabricadas en madera de pino con 8 secciones de 10x12,5x22cm.....	100
Figura 47: Mezcladora planetaria de 40 litros.	102
Figura 48: Bloques obtenidos de la prueba piloto a) una vez finalizado el proceso de curado, b) en proceso de refrentado con yeso y c) ensayado a compresión	103
Figura 49: Bloque perforado de mampostería no estructural con dimensiones de 10x20x30 cm y peso promedio de 4,5 kg. Fuente: www.ladrillerasanbenito.com	104
Figura 50: Formaletas en panel MDF laminado con capacidad para 6 bloques cada una. ..	105
Figura 51: 12 bloques fundidos de 10x20x30 cm de concreto celular	106
Figura 52: Preparación de bloques para ensayos: a) bloques en horno para absorción b) refrentado y c) ensayo a compresión	108
Figura 53: a) Fabricación de los 3 muretes con mortero de pega y b) ensayo a compresión	109
Figura 54: Curva de densidad vs resistencia para fundiciones piloto con arena de trituración y aditivo Mastercell 10.....	111
Figura 55: Resultados de absorción y asentamiento para fundiciones piloto con arena de trituración y aditivo Mastercell 10.....	111
Figura 56: Curva de densidad vs resistencia en cilindros para fundiciones con arena de río y aditivo Concrecell 33	113

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia, en el año 2020 el déficit habitacional alcanzó un nivel de 31,4% con un total de 5.103 hogares en dichas condiciones, dato inferior al registrado en 2019, donde además muestra que el déficit cuantitativo, relacionado a los hogares que habitan viviendas que tienen insuficiencias estructurales y de espacio que no permiten un adecuado entorno para las personas, se ubica en 8% mientras el déficit cualitativo el cual se refiere al componente del análisis de variables como: tipo de vivienda, material de paredes, cohabitación y hacinamiento no mitigable fue de 23,4% (CAMACOL & URBANA, 2022).

Dado el crecimiento de la industria en el país, es necesario implementar nuevas alternativas de construcción que sean sostenibles, y además que ofrezcan las mismas o similares características de los métodos convencionales (CAMACOL & URBANA, 2021). Estos nuevos procesos hacen que los proyectos civiles o de construcción deban cambiar la metodología, presupuesto y ejecución de obras para adaptarse a ellos (Lazo, 2017a).

A causa de la demanda de unidades residenciales, especialmente casas VIS en el Valle del Cauca, se está pronosticando falta de materia prima para la elaboración de bloques de arcilla, pues este elemento es uno de los principales protagonistas en este tipo de construcciones; se estima que por cada m² vendido, el 62% de estas propiedades son fabricadas en mampostería, bien sea estructural o confinada, mientras que el 36% representa el sistema industrializado (muros delgados), y por último con el 2% están otros sistemas constructivos, dentro de ellos la mampostería en concreto (CAMACOL & URBANA, 2021; DANE, 2021b)

Por ello, como una alternativa de los bloques de arcilla, se propone la mampostería en concreto celular que presentan propiedades como menor peso y densidad que el concreto convencional, mejor manejabilidad y buen aislante térmico y acústico. Así mismo, dependiendo de las propiedades como densidad, absorción de agua y resistencia a compresión, este material puede implementarse en muros divisorios, muros estructurales y pantallas aislantes (Izquierdo & Ortega, 2017a).

Es así como en este trabajo se pretende desarrollar un prototipo de bloque de mampostería destinado a muros no estructurales, empleando para su fabricación concreto celular. El proceso inició caracterizando los materiales obtenidos en la región: cemento, agregado fino y espumante; después, se realizó el diseño de mezcla basado en normas vigentes obteniendo sus propiedades físico – mecánicas; y, por último, se fabricaron y ensayaron los bloques y muretes de mampostería con el diseño de mezcla final.

1.1 Definición del problema de investigación

1.1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el crecimiento continuo de construcción de viviendas da lugar a una demanda de materiales cuyas fuentes de recursos son no renovables, entre ellas se tiene las canteras para producción de cemento, acero y arcilla para fabricación de ladrillo. Cifras en el departamento del Valle del Cauca muestran que para el fin de la década el déficit de vivienda rondará el 25% en el centro urbano y del 30% para la zona rural, por lo que se verán afectados las materias primas para satisfacer esta demanda de viviendas; no obstante, el panorama de disponibilidad de este último recurso es preocupante, pues en el Valle de Cauca, la materia prima para la fabricación de ladrillo está en decadencia (CAMACOL & URBANA, 2021). Estudios recientes estiman que para el 2030 la población en la ciudad de Santiago de Cali va a aumentar un 20%, acelerando la demanda de bloques de arcilla que es la principal fuente de construcción en mampostería en la ciudad, recrudeciendo la materia prima con la cual se elaboran estos elementos (Prieto et al., 2019).

De igual manera la baja productividad de la industria de la construcción en Colombia, de la mano del desperdicio y la no reutilización de materias primas en procesos constructivos se suma a la problemática ya expuesta e impulsa la búsqueda de nuevos materiales. Estudios recientes muestran que la construcción presenta un 35% de atraso a nivel tecnológico comparado con empresas de desarrollo tecnológico, en gran medida debido a las practicas constructivas que en su mayoría son artesanales (Prieto et al., 2019).

En Colombia, la energía embebida en viviendas corresponde en promedio a un 12% de las energías fósiles consumidas en el país y 68% por otras fuentes (Chen & Chen, 2011), mostrando

que el mayor porcentaje de ésta es destinado a edificaciones contemporáneas, construidas con diferentes técnicas; para ello se emplea entre el 59,6% y el 66,7% de energía para materiales estructurales como concreto, acero de refuerzo y mampostería confinada (Dimoudi & Tompa, 2008; García et al., 2016). En el Valle del Cauca, en los últimos doce meses se ha iniciado la construcción de 25.554 unidades de vivienda, siendo Cali el municipio con mayor participación (30%) con un total de 7.766 unidades, de las cuales la vivienda de interés social (VIS) lidera con un 76%. Por su parte Jamundí es el segundo municipio con un 29% de participación en construcción de viviendas, con un 85% de ellas destinada a viviendas VIS (CAMACOL & URBANA, 2021)

Es ahí donde nace la idea de mitigar el uso de mampostería tradicional con los diseños de bloques en concreto celular tanto en la construcción tradicional como en edificaciones de alta envergadura, ya que estos presentan propiedades mecánicas, termo-acústicas, arquitectónicas y económicas para la fabricación de este nuevo material de construcción que ha empezado a revolucionar la industria de países como Italia, en donde utilizan este material para insonorizar teatros dado su capacidad disipar el sonido, o aligerar losas de pisos superiores aprovechando sus bajas densidades (Luzardo & Arraga, 2004; Medina & Yañez, 2014a).

1.1.2 Pregunta de investigación

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto se le pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las propiedades físico – mecánicas y diseño geométrico para el prototipo de bloque de mampostería fabricado con concreto celular según la normativa colombiana?

1.1.3 Alcance del trabajo de grado

Este trabajo experimental correlacional consistió en el diseño de un prototipo de bloque de mampostería sólido o perforado fabricado a partir de un diseño de mezcla de concreto celular; este elemento podrá ser implementado en la fabricación de muros estructurales o no estructurales siguiendo los parámetros de la normativa colombiana vigente.

Inicialmente, se llevó a cabo la caracterización de la arena, el cemento y el agente espumante, lo que significa que este proyecto de investigación tendrá validez para estos materiales obtenidos en la región. Aunque se describan las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales, es importante anotar que los resultados serán válidos para los materiales utilizados y las condiciones particulares de ensayo. Es posible que características geológicas de la región afecten la réplica de los resultados en otros lugares. A continuación, se realizaron una serie de pruebas piloto para determinar el método de mezclado, la adición del espumante y la dosificación. Se produjeron concretos celulares de diversas densidades siguiendo la metodología de la ACI 523.3r-14 y las propuestas de autores reconocidos como Luzardo & Arraga (2004); Medina & Yañez (2014^a); Rengifo & Yupangui (2013a). Posteriormente, se creó un prototipo de bloque de mampostería macizo, utilizando la dosificación del concreto celular con los mejores resultados obtenidos. Estos bloques y muretes fueron sometidos a ensayos para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, siguiendo la norma (NTC 4076, 2017).

Cabe mencionar que los bloques de concreto se moldearon utilizando formaletas de madera, y se diseñaron con dimensiones que permitieran su ensayo en la máquina universal, así como la formación de muretes conforme a las regulaciones.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de bloque en concreto celular utilizando materiales disponibles en la región y teniendo en cuenta las especificaciones de la normativa colombiana vigente para mampostería.

1.2.2 Objetivos específicos

El objetivo general se alcanza al desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar y caracterizar las materias primas adecuadas para la producción de concreto celular disponibles en la ciudad de Santiago de Cali.

- Determinar las propiedades físico-mecánicas de diferentes dosificaciones de concreto celular para seleccionar la de mejor desempeño.
- Evaluar el compartimento mecánico de bloques y muretes fabricados con concreto celular para dar cumplimiento a la normativa colombiana vigente de mampostería.

1.3 Justificación del trabajo de grado

A lo largo de la historia, la construcción ha evolucionado notablemente, los cambios pueden observarse en el diseño arquitectónico, en el propio oficio de construir y, especialmente, en el tipo de materiales utilizados. Así mismo, la concepción de calidad en una vivienda ha variado notablemente durante los últimos 20 años. Hasta hace dos décadas, lo que se valoraba en una vivienda era su robustez, dada por el peso del material o el espesor de las paredes; hoy en cambio, la calidad está asociada a la sustentabilidad y la eficiencia, lo que se logra con materiales livianos y de escasa transmitancia térmica y acústica (Cervantes Abarca, 2008).

Al hablar de tecnologías constructivas alternativas que ayudan a mejorar la calidad de vida de los habitantes, se destaca el concreto liviano. Este material ofrece características únicas como trabajabilidad, maniobrabilidad, resistencia a cambios de ambientes térmicos y a fluctuación de sonidos, por lo cual es una buena alternativa a considerar en diversos proyectos de construcción dadas sus características estructurales, arquitectónicas y su buena relación beneficio – costo (Cervantes Abarca, 2008).

Dada la alta demanda de vivienda en nuestra región y los desafíos que esto implica, como el incremento del uso de materiales de construcción, su logística de producción y la escasez de recursos naturales no renovables, se ve la necesidad de buscar nuevas alternativas de construcción más rentables, sostenibles y que tengan la posibilidad de suplir esa demanda cumpliendo con los requerimientos técnicos. Es ahí donde el uso de bloques de concreto celular se torna un sistema protagonista, especialmente por la mayor rapidez de construcción, si se lo compara con los métodos tradicionales para la construcción de vivienda (CAMACOL & URBANA, 2021).

El concreto celular es un material compuesto por cemento, agregados finos y agentes espumantes, que, al combinarse, generan una estructura liviana y porosa, ideal para la fabricación de bloques de baja densidad. Gracias a la multifuncionalidad que ofrece este compuesto, puede ser

empleado en vías, estructuras no portantes, aislamientos y en general en cualquier tipo de obra civil. Por tal motivo se propone implementar este tipo de concreto en la fabricación de bloques de mampostería útil en la construcción de viviendas acatando la normativa colombiana y sirviendo como principal sustituto de los ladrillos convencionales de arcilla.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se da a conocer el origen del concreto ligero y ejemplificación de sus primeros usos, posteriormente, se describe su evolución en el tiempo y sus principales tipos y variaciones, las cuales dependen principalmente de los agregados y agente espumante, entre ellos está: concreto ligero a base de agregados livianos, concreto ligero sin finos y concreto ligero celular. Se da una descripción y uso de bloques de mampostería fabricado con este tipo de concretos empleados en muros divisorios o portantes y finalmente, se presenta un análisis del déficit de vivienda a nivel internacional y nacional.

2.1 Historia del concreto ligero

El concreto es un compuesto de conglomerante (compuesto por la mezcla de cemento y agua) y materiales inertes, obteniendo mayor resistencia de trabajo con el pasar del tiempo mediante procesos de curado. Los materiales inertes se agregan a la mezcla, ya que poseen resistencias similares a una piedra artificial, estos deben ser de diferente tamaño para que el volumen de la pasta a utilizar sea mínimo; por último, al concreto se añade generalmente algún tipo de aditivo y/o adiciones con el propósito de mejorar ciertas propiedades que por sí mismo no las posee (Guzmán, 2001).

La resistencia para concretos normales está en el rango de 180 a 300 kg/cm² con peso unitario alrededor de 2.400 kg/m³, mientras que para los concretos especiales alcanzan resistencias hasta 2.000 kg/cm² con peso unitario de más de 3.200 kg/m³ (Abd elaty, 2014; Guzmán, 2001).

Se considera concretos livianos o ligeros a aquellos que tengan un peso unitario menor que el concreto convencional ($\rho < 2.000 \text{ kg/m}^3$). Este tipo de material permite optimizar el diseño no estructural, reduciendo la carga muerta, por ende la reducción de las secciones de: entrepisos, pañete y otros elementos de carga liviana. En términos generales el concreto liviano es un material de construcción con características similares al concreto tradicional, pero con características como menor peso, capacidad aislante y económico. Si el concreto se desea usar como aislante térmico deberá contener un volumen considerable de espacios vacíos y por lo tanto su resistencia mecánica disminuirá, así, en este tipo de concretos la densidad puede llegar a 800 kg/m³ o incluso menos (Shon et al., 2021; Sutmoller, 2018).

Si bien el concreto celular es de reciente implementación en Colombia y de amplio uso en el mundo, su historia se remonta a la época de los Romanos, pues fueron uno de los primeros en utilizar el concepto de concreto liviano o ligero. La Figura 1 esquematiza el Panteón de Agripa (Italia), una de las principales estructuras que emplea concreto ligero, y cuyos elementos disminuyen gradualmente de peso a medida que se incrementa su altura hasta llegar a la cúpula, la cual está compuesta por cemento y piedra pómez. No obstante, el continuo desarrollo de esta mezcla se vio truncado debido a los inconvenientes que representaba su fabricación y técnicas de fundición (Rengifo & Yupangui, 2013a).



Figura 1: Panteón de Agripa – 126 d.C (Rengifo & Yupangui, 2013a).

Una de las principales variantes del concreto ligero es el concreto celular el cuál se compone por cemento, agregado fino, agua y principalmente la inclusión de vacíos mediante un agente espumante o generador de gases en la mezcla. Este tipo de concreto se ha desarrollado con el fin de buscar una reducción de peso y por consiguiente, menores cargas muertas en las edificaciones. Un estudio realizado sobre efectos del concreto celular en procesos industriales encontró una forma muy eficaz de reducir esta densidad mediante la introducción de vacíos estables dentro de la matriz de pasta de cemento (Chica & Alzate, 2019).

Inglaterra fue uno de los pioneros en introducir el termino aligerante en su sistema constructivo, pero el concepto de espuma no se desarrollaría sino hasta mediados de la década de los treinta implementando las escorias espumosas de alto horno, desde entonces se ha usado como

agregado de peso ligero. Antes de la última guerra mundial, el concreto a base de espuma se utilizaba en el Reino Unido, principalmente en la fabricación de bloques para muros no portantes (Luzardo & Arraga, 2004).

Por otro lado, el origen del concreto celular o también conocido como concreto aireado se le atribuye también a Suecia desarrollado en la primera mitad del siglo XX, más precisamente en los años 20, cuando se instaló la primera planta para producir elementos prefabricados livianos con la marca YTONG (Silva, 2009a). En Estados Unidos el desarrollo en gran escala de este concreto fue más rápido que en ninguna otra parte del mundo, debido principalmente al gran tamaño de este país originando altos costos de transporte de materiales hasta los sitios de obra, sumado también a los costos de la mano de obra relativamente altos en esa época (Luzardo & Arraga, 2004).

En el continente europeo, este material ha sido usado intensamente durante los últimos 80 años, en el Medio Oriente desde hace unos 40 años, en Estados Unidos se fabrica industrialmente desde mediados de los años 90 y en Australia y Sudamérica se han instalado plantas para producir este tipo de unidades livianas de hormigón bajo licencia de las casas matrices Hebel, Celcon, Xella, entre otras, desde hace 20 años (Silva, 2009a).

En países latinoamericanos como en Chile, este material se utilizó inicialmente en los años 50 como núcleo de paneles prefabricados, con lo cual se lograba disminuir el peso del muro y mejorar las condiciones de aislación térmica y acústica, a su vez la primera planta de producción de hormigón celular se instaló en el año 1958 bajo la firma Sihl-Púmex (Silva, 2009a). En Venezuela se emplea el concreto celular para vivienda industrializada, losas de pavimentación y rellenos, no obstante, pese a que es más económico, es vendido a mayor precio que el concreto convencional, ya que son explotadas sus propiedades físicas como aislantes térmicos o acústicos y la auto nivelación (Luzardo & Arraga, 2004; Medina & Yañez, 2014a).

2.2 Antecedentes Nacionales

En Colombia, el sector de la construcción ha sido un segmento clave para la economía del país, pues es un generador de empleo y un importante impulsor de otras industrias, como la de materiales de construcción y la manufactura. Indudablemente, se erige como un actor central en el progreso de la sociedad, dado que tiene un papel directo en la creación de infraestructuras

residenciales, sistemas de transporte, instalaciones sanitarias y diversos proyectos. Este sector no solo contribuye al desarrollo de la cultura, sino que también fomenta el crecimiento económico del país (Acevedo Agudelo et al., 2012).

Además, cabe mencionar que es un sector que ha mostrado un comportamiento cíclico, con períodos de expansión y contracción. Por ejemplo, durante la crisis económica global de 2008-2009 y la reciente pandemia de COVID-19, el sector experimentó desaceleraciones significativas. Sin embargo, también ha habido períodos de fuerte crecimiento, impulsados por factores como políticas gubernamentales favorables, inversión en infraestructura y dinamismo del mercado inmobiliario. No obstante, a pesar de los beneficios económicos y sociales asociados al desarrollo de la infraestructura a nivel nacional, es evidente la falta de inversión en investigación destinada al progreso de la industria (Mejía Martino, 2011).

El uso del concreto celular es todavía limitado en comparación con el concreto tradicional a nivel mundial, por consiguiente, su fabricación en nuestro país también es reducida; una de las causas es la preferencia de uso de materiales convencionales, además existen ciertas limitaciones para su elaboración como el acceso a materias primas específicas, tecnología, conocimiento técnico y regulaciones locales.

A pesar de ello, y con la evidente falta aún de conocimiento e implementación de materiales como el concreto celular, en Colombia se ha venido presentando un avance en la adopción de tecnologías en el sector de la construcción. Esto es parte de una tendencia global en la cual la industria de la construcción está adoptando diversas tecnologías para aumentar la eficiencia, reducir costos, mejorar la calidad y seguridad, y promover prácticas más sostenibles. De hecho, empresas de construcción en Colombia han comenzado a adoptar estas tecnologías en los materiales de construcción, como lo es ATA CONCRETO CELULAR, quienes cuentan con concreto celular como insumo importante para la planificación, diseño, gestión y operación de proyectos de construcción de manera más eficiente. Aun así, la inversión en tecnología en el sector de la construcción en Colombia enfrenta varios desafíos, incluyendo la resistencia al cambio, la falta de capital para invertir en nuevas tecnologías y la necesidad de personal capacitado para utilizar estas herramientas.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el país el uso del concreto celular es reducido, a pesar de que, se han realizado diferentes tipos de obras civiles con este material, de esta manera surge así la necesidad de incrementar los estudios académicos sobre este material y promover el uso de este. Además, es importante la inversión en tecnologías que puede provenir de las propias empresas de construcción, pero también la búsqueda de oportunidades de financiamiento por parte del gobierno y organismos internacionales que busquen fomentar la innovación y la sostenibilidad en el sector. Por otro lado, es necesario, para que la adopción de estas tecnologías sea exitosa, invertir en la formación y capacitación de los trabajadores del sector. Esto incluye no solo a los ingenieros y arquitectos, sino también a los técnicos y operarios. Esto también puede favorecer que, a medida que estas tecnologías se adopten más ampliamente, también evolucione la regulación y los estándares relacionados, lo que puede requerir una inversión por parte de las empresas para asegurarse de que cumplen con las nuevas normativas.

2.3 Clasificación del concreto ligero

La clasificación de los concretos ligeros depende generalmente de los materiales que lo componen y el método de elaboración, se puede entonces agrupar en tres categorías (Izquierdo & Ortega, 2017a):

2.3.1 *Concreto ligero a base de agregados livianos*

Concreto ligero a base de agregados de baja gravedad específica. Estos agregados pueden ser: ser orgánicos e inorgánicos, naturales o artificiales y de granulometría continua o discontinua. Entre los agregados orgánicos está la cascarilla de arroz, la viruta de madera y el poliestireno expandido. Dentro de los naturales está la piedra pómez, la escoria volcánica y diatomita. Por último, entre los artificiales se encuentran las pizarras, los esquistos, arcillas expandidas, ladrillo triturado, mica esponjada, perlita expandida, la carlita, escoria de altos hornos y algunas cenizas industriales (Fouad, 2008; Izquierdo & Ortega, 2017a).

2.3.2 *Concreto ligero sin finos*

Es preparado como un concreto convencional, pero omitiendo el agregado fino, lo que genera un gran número de vacíos y conlleva a aligerar el material. El tamaño máximo del agregado grueso debe estar entre 1,0 y 2,0 cm. La pasta de cemento no debe formar un relleno entre el agregado grueso, sino que una los puntos de contacto de dichas partículas. El peso unitario es aproximadamente dos terceras partes más bajo que un concreto convencional y su resistencia es media.

2.3.3 *Concreto ligero celular*

Es preparado mediante la incorporación de agentes espumantes u originadores de gas con el fin de generar vacíos. Estas pequeñas celdas de aire no se comunican entre sí. Su peso volumétrico varía entre 400 kg/m³ a 1.800 kg/m³ generalmente, pero se han podido lograr densidades de 200 kg/m³ (rango inferior) y 2.200 kg/m³ (rango superior), dependiendo del uso que se ha querido darle.

Existen diversas formas de preparar el concreto celular espumante que se resumen en las siguientes categorías (Chica & Alzate, 2019):

- Métodos que dependen de una reacción química.
- Métodos que dependen de un mezclado mecánico.
- Métodos híbridos, depende tanto de un mezclado mecánico, un aditivo espumante y una reacción química.

Dado que este compuesto no presenta agregado grueso, no se le puede nombrar como “concreto” estrictamente hablando, sin embargo, dado su amplio y antiguo uso ya es bien conocido como concreto espumoso, o de manera general como concreto celular (Doniec, 2008). En la Figura 2 se esquematiza y clasifica el concreto celular dependiendo de factores como el agente espumante, el método de producción, la humedad y el tipo de curado:

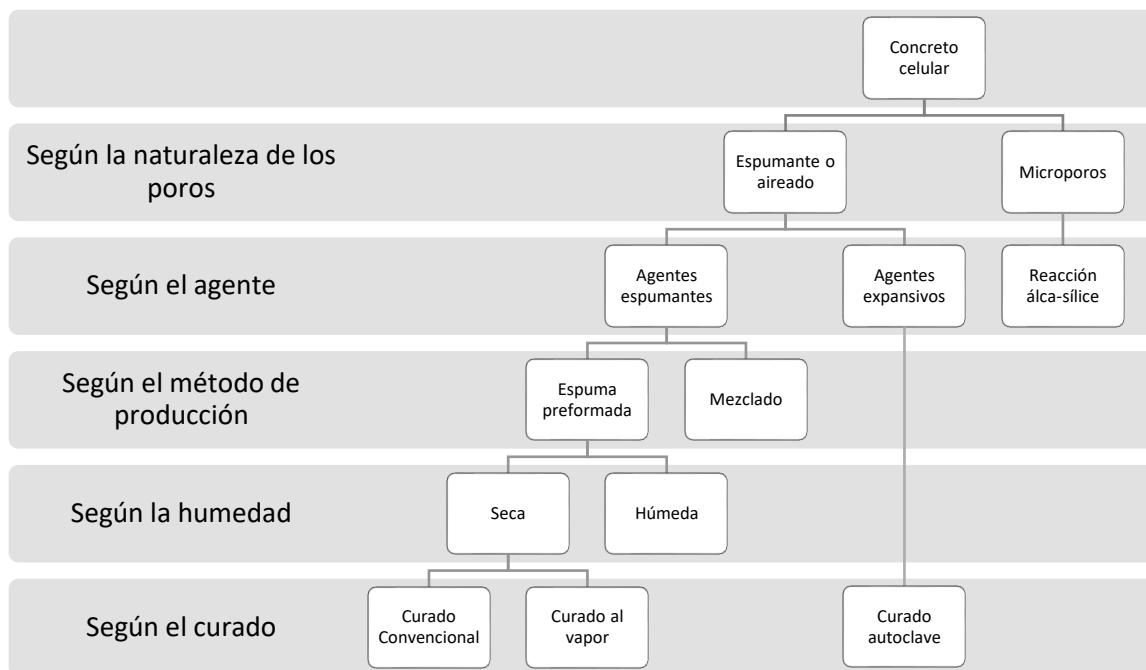


Figura 2: Clasificación del concreto celular (Chica & Alzate, 2019).

La producción de una mezcla de concreto celular estable depende de factores tales como: el agente espumante, el método de producción de la espuma y el diseño de la mezcla. En el método de producción por mezclado, se agrega el agente espumante a un mezclador que crea burbujas debido a su alta velocidad de rotación. Este método es fácil de realizar, estandarizado y ampliamente utilizado, sin embargo, puede producir un gran volumen de burbujas dañadas que comprometen la cantidad de aire incluido. En el método de la espuma preformada, se requiere el uso de equipos de aire comprimido para crear las burbujas que luego se van a agregar al mortero para crear la estructura celular. Esta espuma preformada puede estar seca o húmeda, no obstante, la espuma seca es más estable y genera burbujas con tamaños inferiores a 1 mm lo que facilita el mezclado y bombeo uniforme. Por otro lado, la espuma húmeda produce burbujas de entre dos y cinco milímetros (2–5 mm), pero es menos estable en comparación con la espuma seca. El método de espuma preformada es el más extendido debido a algunas ventajas comparativas con el método de mezcla: bajo consumo de agente espumante y una relación directa entre la cantidad de agente utilizado y el contenido de aire incluido en la mezcla (Chica & Alzate, 2019).

2.4 Propiedades concreto celular

El concreto celular u hormigón celular o aireado, se caracteriza por ser un tipo de concreto que incorpora un agente espumante, generando un aumento en su volumen simultáneamente con la adquisición de propiedades mejoradas de trabajabilidad y reducción de peso (Izquierdo & Ortega, 2017b). Este tipo de concreto se produce añadiendo un aditivo al hormigón fresco o generando gas en la mezcla de hormigón para que forme burbujas pequeñas y uniformes en el material. Estas burbujas son las que proporcionan la estructura celular y le dan al concreto celular muchas de sus características distintivas.

El concreto celular, si se produce y cuida adecuadamente, puede ser tan duradero como el concreto tradicional. Además, es un material que se puede cortar, taladrar y dar forma con herramientas convencionales, lo que facilita su instalación y adaptación en obra. Otra característica distintiva, es que, al reducir la cantidad de materiales agregados y al utilizar menos cemento (en comparación con el concreto convencional de la misma resistencia), el concreto celular puede ser una opción más sostenible en términos de uso de recursos y huella de carbono.

2.4.1 Resistencia a compresión y densidad

Una de las características más notables del concreto celular es su densidad baja en comparación con el concreto tradicional, pues varía desde 400 kg/m^3 hasta 1.950 kg/m^3 (Izquierdo & Ortega, 2017b). Esto se traduce en una reducción del peso muerto de las estructuras, lo que puede ser beneficioso para el diseño estructural y la economía de los proyectos, no obstante, se ve sacrificado su resistencia esfuerzos de compresión.

El concreto es empleado principalmente para resistir este tipo de esfuerzos y si bien, en los lugares donde la resistencia a la tracción o la resistencia al corte son de primordial importancia, la resistencia a la compresión puede ser utilizada para obtener estos otros dos parámetros. El cemento mezclado con el resto de los materiales desarrolla su resistencia con la hidratación continua a diferentes tiempos de curado. El rango en el que el concreto gana resistencia es más rápido al principio y la velocidad de ganancia de esta disminuye con la edad (Abdelaty, 2014).

Tarasov et al. (2010) estudiaron la resistencia a la compresión demostrando que esta es una función de la densidad en estado endurecido y disminuye fuertemente con una disminución en la

densidad. Sin embargo, Wee et al. (2006) examinaron la interacción entre el contenido de espuma, la compresión a la resistencia y densidad, y reveló que el aumento del contenido de espuma no aumenta el tamaño del vacío, pero aumenta el número de huecos por unidad de volumen, por lo tanto, disminuye la densidad sin pérdida sustancial en la resistencia a la compresión.

Wee et al. (2006) proponen que una vez que se sobrepasa el contenido óptimo de espuma, los espacios de aire comienzan a fusionarse y el tamaño de los vacíos aumenta, y que a su vez reduce la fuerza tensoactiva. Se encontró además que la inclusión de vacíos de aire en el concreto celular tiene un efecto mayor en la compresión que en el módulo elástico

Ramamurthy et al. (2009a) recopilaron información de diferentes mezclas de concreto celular, en donde se relaciona su dosificación, densidad en estado endurecido y resistencia a la compresión a los 28 días. Estos resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Recopilación de esfuerzo a compresión, densidad y mezcla de concreto celular obtenida por varios autores (Ramamurthy et al., 2009a).

Autor	Proporción de cemento (kg/m³)	S/C	Proporción W/C	F/C	Densidad kg/m³	Resistencia a la compresión (28 días)
McCormick	335-446	0,79-2,8	0,35-0,57		800-1.800	1,8-17,6
Tam et al.	390	1,58-1,73	0,6-0,8		1.300-1.900	1,81-16,72
Regan y Arasteh		0,6	0,45-0,6		800-1.200	4-16
Van Deijk	Cemento-arena				280-1.200	0,16-10 (91 días)
ACI 523, 1r-1992	Cemento				240-640	0,48-3,1
	Cemento-arena				400-560	0,9-1,72
Hunaiti		3			1.667	12,11
Kaersley y Booyens	Cemento-reemplazo ceniza volante				1.000-1.500	1,8-19,9
Durack y Weiqing	270-398	1,23-2,5	0,61-0,82		982-1.185	1-6
	137-380		0,48-0,7	1,48-2,5	541-1.003	3-15 (77 días)
Aldridge	Cemento-arena				400-1.600	0,5-10
Kearsley y Wainwright	Cemento-reemplazo ceniza volante				1.000-1.500	2-18
	193-577		0,6-1,17			
Tikalsky et al.	Cemento				490-660	0,71-2,07
	149-420		0,4-0,45			
	Cemento-reemplazo ceniza volante				1.230-1.500	0,23-1,1
	57-149		0,5-0,57			

Autor	Proporción de cemento (kg/m ³)	S/C	Proporción W/C	F/C	Densidad kg/m ³	Resistencia a la compresión (28 días)
Jones y McCarthy	300	1,83-3,17	0,5	1,22-2,11	1.000-1.400	1-2
			1,11-1,56		1.000-1.400	3,9-7,3
Jones y McCarthy	500	1,5-2,3	0,3	1,15-1,77	1.400-1.800	10-26
	500		0,65-0,83		1.400-1.800	20-43
Nambiar y Ramamurthy	Cemento-arena (mediana)				800-1.350	1-7
	Cemento-arena (fina)				800-1.350	2-11
	Cemento-reeplazo ceniza volante				650-1.200	4-19
S/C: Arena-cemento, F/C: Cemento-ceniza volante; W/c: Agua-cemento						

2.4.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es una medida de la rigidez de un material y es particularmente relevante en el diseño estructural para predecir deformaciones bajo cargas. En el caso del concreto celular, su módulo de elasticidad es generalmente menor que el del concreto convencional debido a su estructura porosa, ya que, los valores se encuentran desde 1 a 8 Kn/mm² para densidades entre 500 y 1.500 Kg/m³, respectivamente (Ramamurthy et al., 2009b como se citó en Medina & Yañez, 2014b).

El valor exacto del módulo de elasticidad del concreto celular puede variar dependiendo de varios factores, tales como la densidad del concreto, ya que, a mayor densidad del concreto celular, mayor será su módulo de elasticidad. También depende de la composición y proporción de la mezcla, del método de producción, del tipo y la cantidad de agente espumante utilizado y del grado de curado. En la Tabla 2 se puede apreciar algunos valores del módulo de elasticidad del concreto celular, los cuales varían a su resistencia a compresión y a la densidad.

Tabla 2: Ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad para el mortero celular (Medina & Yañez, 2014b)

Autor	Módulo de elasticidad	Notación
Narayanan & Ramamurthy, 2000	$6000 (\alpha)^{1,5} S$	α – Densidad seca al horno [gr/cm ³], S Resistencia a la compresión [kg/cm ²]
	$1550 S^{0,7}$	S Resistencia a la compresión [kg/cm ²]
	$3000 S_p$	S_p Fuerza del prisma [kg/cm ²]
	$k \gamma_{dry} (F'c)^{0,5}$	γ_{dry} Densidad seca [kg/m ³], $F'c$ Resistencia a compresión [MPa], k Coeficiente que oscila desde 1,5 a 2,0
Tada, 1986	$c_1(\rho - c_2)$	c_1 y c_2 son constantes, ρ Densidad seca [kg/m ³]
	$5,31 W - 853$	W Densidad desde 200 a 800 [kg/m ³]
“Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete”, 1967	$33 W^{1,5} \sqrt{F'c}$	Ecuación de Pauwn, W Densidad del mortero celular [kg/m ²]
M, R & McCarthy, 2005	$0,99 F'c^{0,67}$	$F'c$ Resistencia a la compresión [N/mm ²][kN/mm ²]

2.4.3 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una propiedad importante del concreto celular cuando se utiliza en aplicaciones que están sujetas a cargas de flexión, como losas y paneles. Al igual que otras propiedades mecánicas, la resistencia a la flexión del concreto celular es generalmente menor que la del concreto convencional debido a su estructura porosa y ligera.

La resistencia a la flexión del concreto celular regularmente varía en función de varios factores tales como la densidad del concreto, pues los concretos celulares de mayor densidad tendrán una resistencia a la flexión más alta que aquellos de menor densidad. Por otro lado, depende también del método de producción y la composición de la mezcla, como la proporción que se usa de cemento, agua, agregados y otros aditivos que pueden influir en la resistencia a la flexión. Es importante también, tener en cuenta que un buen proceso de curado puede mejorar la resistencia a la flexión al permitir una hidratación completa del cemento.

2.4.4 Aislamiento térmico

Dada su estructura porosa, el concreto celular ofrece una excelente resistencia térmica debido a su microestructura celular. En este sentido, se postula que los elementos menos densos contienen

más vacíos en su composición, lo que contribuye a una menor conductividad térmica. Específicamente, un muro sólido de concreto celular exhibe una baja conductividad térmica, con valores cercanos a tener conductividades alrededor de $0.40 \text{ W}/(^{\circ}\text{K}\cdot\text{m})$ para densidades en torno a $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Izquierdo & Ortega, 2017b).

Esto debido a que a acción de agente espumante en la mezcla crea numerosos alveolos que contienen millones de micro células de aire, regularmente repartidos, y no comunicados entre sí, logrando una vez fraguado, un material termoaislante de hasta diez veces mayor que el hormigón convencional (Ramamurthy et al., 2009a).



Figura 3: Aislamiento térmico de una vivienda con porcentajes de incidencia de calor en el exterior (Rengifo & Yupangui, 2013a).

Como en la mayoría de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto celular, la conductividad térmica depende de la densidad seca, el contenido de humedad y de los componentes del material, así como la cantidad de poros y su distribución, por lo tanto, entre más finos sean los poros mejor es el aislamiento (Ramamurthy et al., 2009a).

2.5 Agentes espumantes

El papel de los agentes de formación de espuma en el mortero celular es crear pequeñas burbujas de aire mediante la reducción de la tensión superficial de una solución y el aumento de la estabilidad de las burbujas de aire (Panesar, 2013b).

Este es el material que hace diferente al mortero convencional, proporcionándole ligereza y aportando propiedades termo acústicas y de fuego, este agente también se le llama agente incorporado de aire.

Cuando los agentes espumantes son incorporados en el agua de la mezcla, este va a producir cavidades de burbujas discretas que se incorporan en la pasta de cemento. Las propiedades del hormigón espumado dependen principalmente de la calidad de la espuma y la dosis de esta (Gelim & Ali, 2011).

Los dos tipos de agente espumante más usados son:

- Sintético: Adecuado para densidades de 1.000 kg/m^3 superiores o iguales.
- Proteína: Adecuada para densidades de 400 kg/m^3 a 1.600 kg/m^3 .

Las espumas de base de proteínas-tienen un peso equivalente alrededor de 80 g/lit. Estos agentes espumantes provienen de las proteínas animales de cuerno, la sangre, los huesos de las vacas, los cerdos y otros restos de los cadáveres de animales. Esto conduce no sólo a considerables variaciones en la calidad, debido a las diferentes materias primas empleadas, sino que también a un muy intenso hedor de esos agentes espumantes (Gelim & Ali, 2011).

Sin embargo, a pesar de que los dos tipos de espumas proporcionan a la mezcla las características apropiadas, se ha encontrado en los orígenes microscópicos que la estabilidad de esta es muy diferente.

Para la espuma sintética, la interacción de repulsión entre las capas adsorbidas ofrece una película fina y una espuma estable, mientras que, para la espuma de proteína el mecanismo para la estabilización está relacionada con el confinamiento de los agregados dentro de las películas delgadas, atrapado allí cuando las burbujas entran en contacto (Saint-Jalmes, Peugeot, Ferraz, & Langevin, 2005).

2.6 Proceso de producción – mezclado de concreto celular

La fabricación del concreto celular puede llevarse a cabo de dos maneras distintas. En primer lugar, se puede incorporar espuma preformada mediante un generador de espuma, lo que implica la preparación separada del mortero y la espuma (ver Figura 5). La segunda alternativa consiste en la adición de un aditivo espumante a la mezcla de concreto, donde la integración de este aditivo con el concreto genera los poros en la mezcla (Huertas, 2021a).

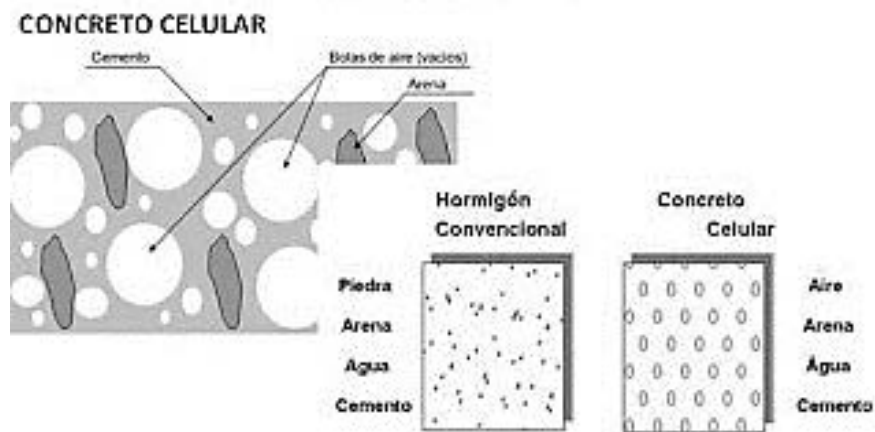


Figura 4: Materiales para la elaboración de concreto celular Fuente: Acevedo Agudelo et al. (2012)

Es así como, la elaboración del concreto celular involucra una serie de pasos específicos que aseguran la incorporación de burbujas de aire o gas en la mezcla, resultando en la característica estructura porosa del material. A continuación, se describe un proceso general para la producción del concreto celular:

1. Preparación de Materias Primas:

- Las materias primas como el cemento, el agua y la arena se pesan y preparan en las proporciones adecuadas.

2. Mezclado:

- Se mezcla el cemento con agua para formar una pasta.
- Si se utiliza arena, esta se añade a la pasta y se mezcla hasta obtener una consistencia uniforme.

3. **Producción de Espuma:**

- Por separado, se prepara la espuma usando el agente espumante y agua. Se bate la mezcla hasta obtener una espuma consistente o se fabrica con máquinas especializadas.
- Esta espuma se añade a la mezcla anterior y se incorpora de manera uniforme.

4. **Vertido y Moldeo:**

- La mezcla espumosa se vierte en moldes predefinidos. Dependiendo del tipo de producto final, estos moldes pueden ser de diferentes tamaños y formas.
- Es crucial permitir un breve periodo de reposo para que la mezcla comience el proceso de fraguado inicial.

5. **Curado:**

- **Curado al aire:** Los bloques o paneles se dejan curar a temperatura ambiente, cubriéndolos para mantener la humedad y garantizar un buen curado.

6. **Desmolde y Almacenamiento:**

- Una vez que el concreto ha alcanzado la resistencia deseada, se desmolda y se traslada a un área de almacenamiento.
- Se permite que el concreto celular continúe endureciéndose y ganando resistencia antes de su uso o envío.

Este es un proceso general, y puede haber variaciones según el tipo específico de concreto celular, las prácticas del fabricante y las características deseadas del producto final.

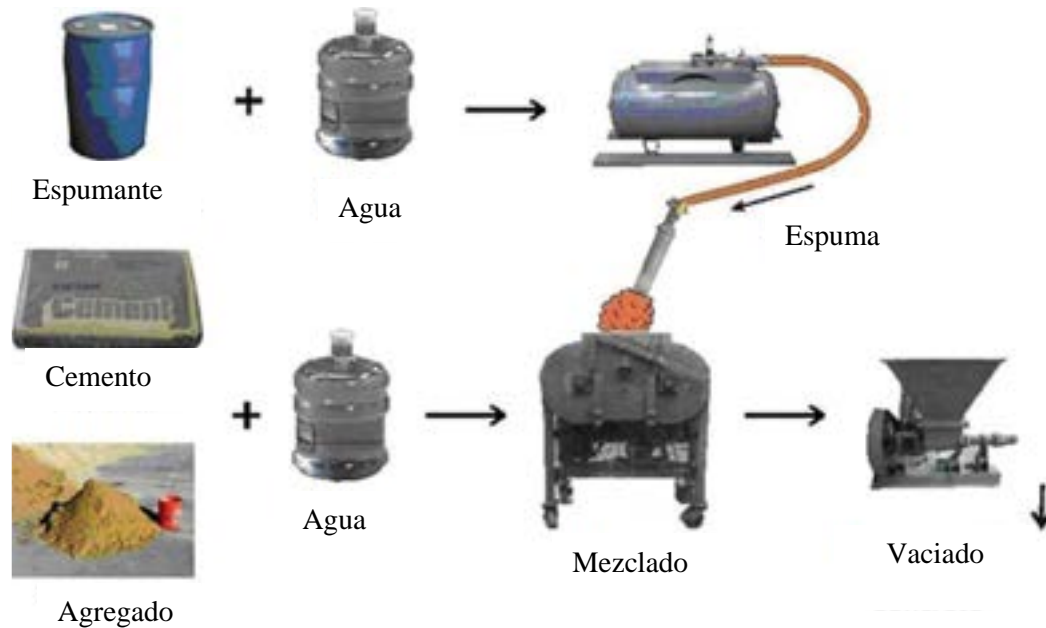


Figura 5: Secuencia general de mezclado para producir concreto celular (ACI 523.3R-14, 2014).

2.7 Normativa de concreto celular

El concreto celular es una mezcla de cemento, agregado fino, agua y aditivo espumante, el cual es agregado directamente a la mezcla para que reaccione con el agua; o de manera preformada, cuya espuma se agrega a los demás componentes hasta formar una mezcla homogénea, observando finalmente los poros incluidos por el aditivo (Huertas, 2021b). Aunque no existe un método específico para diseñar hormigones celulares, este debe ser tratado como un hormigón elaborado con materiales pétreos según la norma ACI 523.3R-14 (2014) ya que algunas de sus características estructurales son las mismas. (Huertas, 2021c).

Algunas normas internacionales que caracterizan este material son “Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft³ (800 kg/ m³)” (ACI 523.3R-14, 2014) que define el concreto celular como “una mezcla de cemento, agua y espuma preformada”. Esta guía aplica a concretos con densidades de vaciado superiores a 50 lb/ft³ (800 kg/m³) cuyas resistencias a la compresión pueden variar ampliamente y se especifican en función de una aplicación particular. Se facilita aquí una metodología de cálculo para obtener la dosificación deseada partiendo de la densidad o resistencia requerida.

Según la ACI 213R-14 (ACI 213, 2014) el concreto ligero se clasifica de la siguiente manera:

- Concreto de baja densidad, presenta una densidad entre 300 kg/m³ hasta 1.000 kg/m³. La resistencia a la compresión es menor a 7 MPa.
- Concreto de densidad media, esta varía de 1.000 kg/m³ hasta 1.600 kg/m³. La resistencia mínima es alrededor de 17 MPa.
- Concreto de densidad media alta, su densidad va desde 1.600 kg/m³ hasta 2.200 kg/m³.

Además, los concretos celulares también se clasifican en función de sus componentes:

- Concreto celular puro, aquel que emplea solo cemento portland, agua, gas o espuma preparada, no contienen agregados sólidos y presentan densidades entre 200 a 700 kg/m³.
- Concreto celular arenado, que contiene cemento, arena, agua y un agente escogido para desarrollar células. Tiene una densidad entre 850 a 1.900 kg/m³.
- Concreto celular con agregados ligeros, reemplazan parte de la arena con agregados con baja gravedad específica como piedra pómez. Logran densidades de 1.600 kg/m³.
- Concreto celular con agregados expansivos, se realizan con adición de vermiculita y perlita. Son perfectos cuando se usan como protección a las estructuras metálicas contra el fuego.

Las normas ASTM C796/C796M (2019): “Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam” y ASTM C869 (2016): “Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete” brindan metodologías para determinar las siguientes propiedades del concreto celular: resistencia a la compresión, resistencia al agrietamiento por tracción, densidad y absorción de agua.

2.8 Aplicaciones

2.8.1 Utilidades del concreto celular

Debido a las características únicas del concreto celular, como la ya mencionada baja densidad, entre otros, se presta para distintos usos, como lo son los bloques de mampostería los cuales son fáciles de manejar debido a su peso ligero y se utilizan en muros exteriores e interiores.

Igualmente, este material resulta beneficioso en la confección de paneles prefabricados, aplicados tanto en paredes internas como externas. Este tipo de prefabricado se emplea como panel divisorio en el interior de edificaciones. La instalación debe seguir pautas que protegen contra la aparición de cargas concentradas que pueden ocasionar agrietamiento (Silva, 2009b). Por esta razón, estos paneles son particularmente valiosos en construcciones prefabricadas y modulares.

Además, se usan las losas de concreto celular que se emplean en techos y pisos para aprovechar su ligereza y propiedades aislantes (densidades mayores a 1.600 kg/cm^3); de igual manera paredes huecas de aislamiento para almacenes refrigerados, aislamiento de tuberías subterráneas, entre otros (Izquierdo & Ortega, 2017b).

Otra de las utilidades del concreto celular, es que sirve como elementos prefabricados de construcción, como lo son escaleras, alféizares de ventanas, vigas, entre otros. Así también, teniendo en cuenta sus propiedades en su estructura porosa, el concreto celular es un excelente aislante térmico y acústico, por lo que, se puede utilizar en paredes, techos y suelos para mejorar el confort interior de un edificio. De otro modo y teniendo en cuenta sus propiedades que lo hacen resistente al fuego, el concreto celular es una opción ideal para la construcción de paredes y barreras cortafuegos.

Este material también encuentra aplicación en la construcción de carreteras y terraplenes, especialmente en zonas con condiciones de suelo desfavorables donde es necesario disminuir la carga sobre el terreno. En este contexto, en vías y carreteras se puede emplear como estabilizador de la base, para mejorar el diseño de la berma o para estabilizar bancos o taludes cercanos a la vía.

Entre otros usos, se puede considerar al concreto celular un material útil en las renovaciones y trabajos de rehabilitación, pues resulta útil debido a su ligereza, lo que reduce parte de las cargas estructuras existentes. También tiene aplicaciones marítimas, dado que es resistente a la salinidad y tiene una baja absorción de agua, el concreto celular se puede utilizar en aplicaciones marítimas, como muelles y diques.

De esta forma y teniendo en cuenta lo anterior, las ventajas del concreto celular, como su fácil manejo, rapidez de construcción, y propiedades aislantes, hacen que sea una opción atractiva en muchos escenarios de construcción. Sin embargo, es esencial considerar las especificaciones y necesidades particulares de cada proyecto al seleccionar el tipo de concreto a utilizar.

2.8.2 Bloques de concreto celular

Las Normas Técnicas Nacionales NTC 4076 (2017) “Mampostería no estructural interior y chapas de concreto” y NTC 4026 (1997) “Mampostería estructural” establecen los requisitos para unidades de mampostería, perforadas o macizas (bloques o ladrillos) de concreto, elaboradas con cemento hidráulico, agua, agregados minerales y aditivos, con la inclusión o no de otros materiales, aptas para elaborar mampostería estructural o no estructural, interior o exterior y para las chapas de concreto. En la Tabla 3 se especifica la resistencia a compresión mínima de los elementos dependiendo de la norma y su clasificación como bloque estructural o no estructural:

Tabla 3: Clasificación de mampostería según la resistencia a compresión de los bloques (NTC 4026, 1997; NTC 4076, 2017).

Resistencia mínima (MPa) a la compresión a los 28 días, evaluada sobre el área neta promedio				
Norma	Tipo	Clase	Promedio 3 unidades	Individual
NTC 4076 (2017)	Mampostería no estructural	-----	6	5
NTC 4026 (1997)	Mampostería estructural	Baja	8	7
		Alta	13	11

En la literatura se encuentran diferentes trabajos de grado enfocados en la utilización del concreto celular en bloques de mampostería. Izquierdo & Ortega (2017) en su trabajo analizaron las propiedades físicas y mecánicas de diferentes diseños de mezcla de concreto celular con un aditivo espumante específico, y concluyeron que el material es un buen aislante acústico, que la utilización de concreto celular en muros divisorios no estructurales puede reducir el peso de la estructura con densidades de 800 kg/m³ a 1.100 kg/m³ (obteniendo una resistencia promedio a la compresión a los 28 días de 42 kg/cm² (4,1 MPa), y que, además, la producción es costosa, pero el procedimiento constructivo elegido equilibra los costos de la implementación de este material en Perú. Aunque el estudio presenta un solo aditivo y este posee muy buenas características físicas para ser usado en el mortero celular, se restringe el uso de otras alternativas de agentes espumantes.

Luzardo & Arraga (2004), desarrollaron mezclas con este tipo de concreto destinadas a la elaboración de bloques de mampostería portantes y no portantes, con dimensiones de 14.5 cm x 80 cm x 30 cm, dentro del rango de resultados se encuentran densidades desde 1.570 kg/m³ hasta

1.740 kg/m³ alcanzando resistencia entre 23 kg/cm² (2,3 MPa) y 141 kg/cm² (13,8 MPa) respectivamente.

A nivel nacional, investigaciones como la de Medina & Yañez (2014), se han enfocado en el análisis de la viabilidad económica del uso del concreto celular en Colombia sin un factor experimental. Por su parte, los autores Chica & Alzate (2019) presentaron una revisión del estado del arte del concreto celular enfocada en los materiales, propiedades y posibles dificultades encontradas para lograr una producción a gran escala sin hablar del mercado colombiano. Recientemente, (Huertas, 2021) demostró en su tesis de pregrado la viabilidad de utilizar concreto celular con agregados reciclados de cantera como relleno en obras de infraestructura vial mediante un análisis experimental.

2.9 Déficit de vivienda

El mundo enfrenta un gran problema de déficit de vivienda que aún está lejos de llegar a su solución definitiva. En Latinoamérica y el Caribe (LAC), un tercio de las familias (59 millones de personas), no tienen una vivienda adecuada para ser habitable o es construida con materiales pobres y carece de servicios básicos. Dos millones de hogares que surgen anualmente en LAC se ven forzados a instalarse en viviendas informales, a causa de oferta inasequible, cifra que corresponde a 2/3 del total (BID, 2017).

En la Figura 6, se encuentra un diagrama elaborado con la información del déficit de vivienda, con respecto al total de familias por país de 18 países de LAC según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en donde se puede observar que Costa Rica es el país con menor déficit de vivienda con 18%, y Nicaragua el más alto con 78%. Colombia se encuentra en el puesto 8 de los países de LAC con menor déficit de vivienda, con 37%, siendo este último un puesto en un rango intermedio.

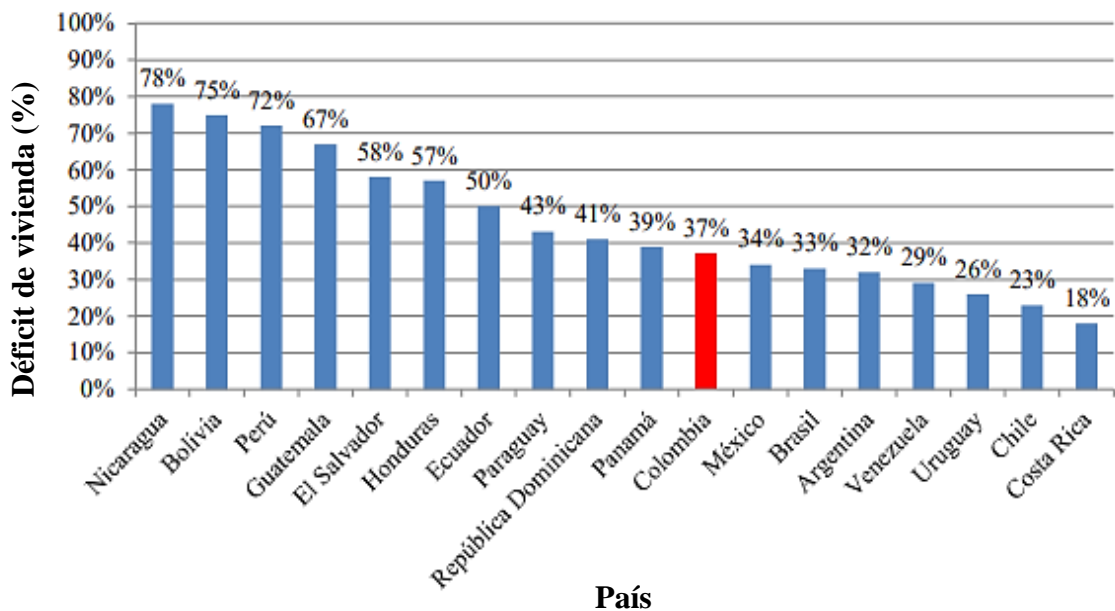


Figura 6: Diagrama de países de LAC con déficit de vivienda en porcentaje con respecto al total de familias por país, según datos del BID (2021).

La vivienda de interés social (VIS) ha surgido como una oportunidad para que la clase trabajadora y menos favorecida tenga acceso a una vivienda adecuada. En Colombia, se ha venido trabajando en el establecimiento de viviendas tipo VIS desde la creación del Instituto de Crédito Territorial (ICT) en 1939 (Chiappe de Villa & ECLAC, 1999) pero, fue en 1966 cuando se sancionó la vivienda digna como un derecho en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (Muñoz Cruz et al., 2020). Aunque ha pasado más de medio siglo desde el establecimiento del pacto internacional, aún la vivienda digna es un reto en Colombia y esto se ve reflejado en las elevadas cifras del déficit habitacional a nivel nacional, que serán presentadas a continuación.

En general, el déficit habitacional resulta de sumar el déficit cuantitativo y el déficit cualitativo, los cuales son excluyentes entre sí. El primero se refiere a la cantidad de viviendas necesarias para que haya una vivienda adecuada por cada hogar que la necesita, mientras que el segundo expresa las deficiencias físicas y de disponibilidad de servicios públicos (CAMACOL, 2021). Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2021a) para el 2019, año previo a la pandemia del COVID 19, se estipuló un déficit habitacional nacional del 32,8% (déficit cuantitativo del 8,2% y cualitativo del 24,6%). Ya en el 2021, año de reactivación económica en Colombia, se estableció el déficit habitacional a nivel nacional del 31%

(déficit cuantitativo del 7,5% y cualitativo de 23,5%). Estas cifras indican que en promedio 1,26 millones de hogares necesitan una vivienda propia y 3,98 millones de hogares necesitan mejorar las condiciones habitacionales de su vivienda para tener mejor calidad de vida.

Si se analiza el mercado de vivienda en el Suroccidente de Colombia, se puede identificar una amplia demanda de vivienda de interés social. El Departamento de Estudios Económicos de CAMACOL Valle presentó un informe con los datos de la oferta y ventas de vivienda con base en recolección de información realizada por COORDENADA URBANA (CAMACOL & URBANA, 2021), según estos datos, los proyectos VIS aumentaron en un 26% las ventas en los últimos 12 meses comparado con el mismo periodo de 2020. Además, el segmento VIS es el líder en la venta de vivienda en Cali con un 74%, seguido del segmento alto con un 18% y finalmente el segmento medio con un 8% de las ventas. En cuanto a la política de vivienda, el mismo informe demuestra que el Valle del Cauca lidera el número de subsidios otorgados por el programa Mi Casa Ya en 2021 a nivel nacional con una participación del 18,87%, lo cual explica la alta demanda de vivienda VIS en Cali. Lo anterior es fundamental para entender la dinámica del sector de la construcción en el Suroccidente colombiano. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el déficit habitacional a nivel nacional fue de 35,5% en 2020, mientras que a nivel del Valle del Cauca fue de 16,8%, cifras aún significativas (CAMACOL, 2021).

Los fenómenos de déficit habitacional y escasez alarmante de materiales de arcilla en nuestra región ameritan prontas vías de solución para disminuir el impacto en el sector de la construcción y obtención de vivienda. Una de estas alternativas que promete ser viable es la fabricación de elementos estructurales a través de mezclas de concreto celular, pues este tipo de compuesto puede llegar a generar propiedades físico-mecánicas similares a la mampostería en arcilla o concreto, pero con la ventaja de ser menos densos, disminuyendo la cantidad de cemento y agregados finos por metro cúbico y aumentando microburbujas internas responsables de mejorar la propiedades aislantes térmicas y acústicas.

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se expone las diferentes fases que componen el proyecto: se esquematiza el proceso general de la metodología a través de un mapa conceptual (Figura 7), después se describe cada etapa, iniciando desde la caracterización de materiales piloto hasta la producción de bloques y muretes en la etapa final.

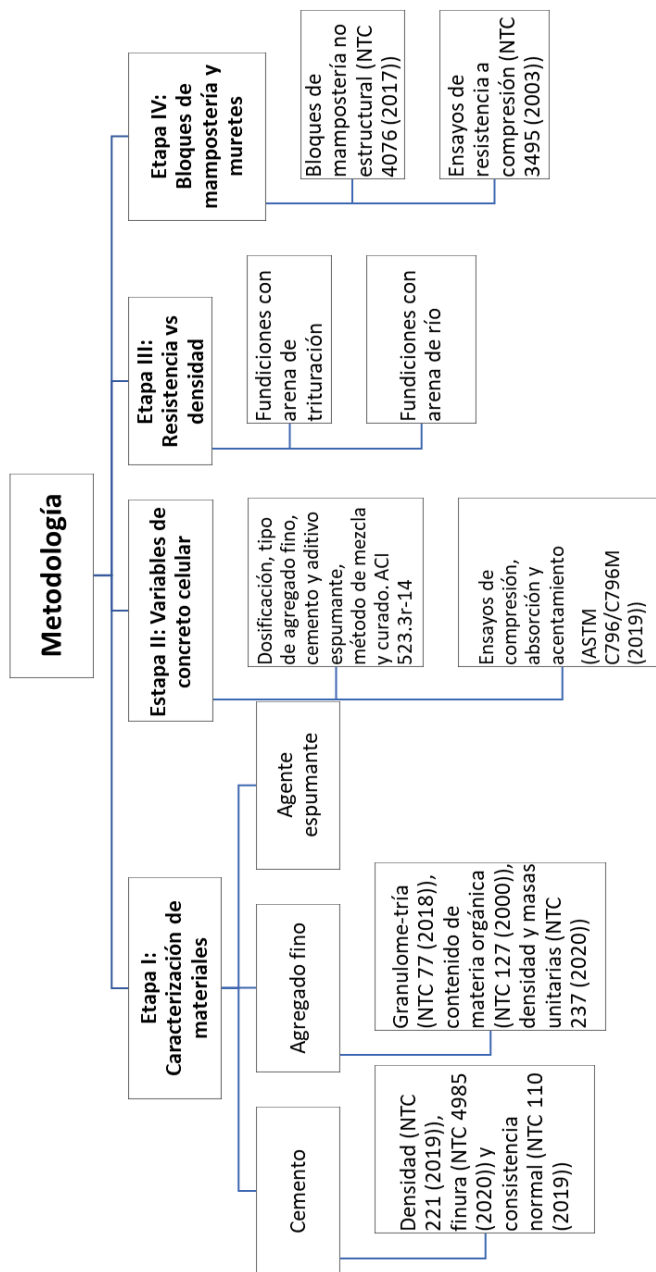


Figura 7: Esquema metodológico por etapas

El proceso experimental para este trabajo de grado se inicia con la caracterización de materiales como la arena, el cemento y, principalmente, la espuma. Este paso, que implicó ajustar la relación del aditivo espumante y el agua con la ayuda de diferentes máquinas, estableció las bases para las variables del concreto celular. Estas fueron cruciales para iniciar con el proceso de fabricación del concreto celular, un material innovador y hasta entonces no utilizado en proyectos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, y permitieron definir la metodología para las mezclas futuras y formular las dosificaciones correspondientes.

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización y las pruebas piloto, se alimentaron dos programas de fundiciones. En estos, se varió la densidad de la mezcla y se evaluó la resistencia a la compresión. Cada programa empleó un aditivo espumante y un proceso de formación de espuma distintos, y se llevaron a cabo ensayos paralelos para estudiar variables adicionales como el tipo de curado, cemento y agregado fino.

Posteriormente, se realizó una prueba piloto de fundición de bloques macizos, un paso que permitió practicar la fundición a una escala mayor y abordar desafíos relacionados con la cantidad de mezcla, el vaciado, encofrado y curado de los bloques. Finalmente, en base a todos los ensayos realizados, se seleccionaron las condiciones más favorables para una fundición final de bloques de mampostería, con el objetivo de evaluar su resistencia a la compresión en bloques individuales y muretes para su potencial uso como mampostería no estructural en edificaciones.

3.1 Caracterización de materiales

Este trabajo se enfoca en la elaboración de concreto ligero, particularmente el concreto celular utilizando espuma preformada, una de las múltiples variantes ilustradas en la Figura 2. El proceso consiste en la premezcla de un mortero que integra cemento, agregado fino, agua y, en ciertos casos, aditivos. En paralelo, se genera la espuma mediante una máquina especializada, la cual, gracias a su presión de aire controlada, garantiza una densidad uniforme de la espuma. Posteriormente, estos dos componentes se combinan para concretar la producción de concreto celular.

Dada la naturaleza de este proceso, es esencial entender que la caracterización de los materiales involucrados es un elemento crucial en cualquier investigación de ingeniería civil que

aborde la mezcla y diseño de concretos. En este estudio específico, se enfatiza la importancia de analizar los componentes del concreto celular. La relevancia de esta caracterización radica en su habilidad para arrojar información valiosa sobre las propiedades físicas y químicas de los materiales, lo cual, a su vez, ayuda a optimizar su incorporación en la mezcla de este tipo de concreto.

3.1.1 Origen de materiales

Se trabaja con materiales que son accesibles al centro de estudios, para ello se emplea y caracteriza:

3.1.1.1 Cemento

- Cemento de Uso General (UG) marca “Argos”, en Cali, Valle del Cauca Colombia.
- Cemento de Alta Resistencia Temprana (ART) marca “Argos”, en Cali, Valle del Cauca Colombia.

3.1.1.2 Agregado fino

- Arena de cantera de trituración, adquiridos a la empresa “AGREGADOS & MEZCLAS CACHIBÍ S.A.”, Acopi, Yumbo, Valle del Cauca
- Arena proveniente del río Guengue en el corregimiento Las Brisas del municipio de Puerto Tejada, Valle del Cauca

3.1.1.3 Aditivo espumante

Existen diversos aditivos espumantes que se pueden obtener comercialmente en el país. Para este proyecto se trabajó con tres de ellos:

- MasterCell 10 ®. Fabricante: MÁSTER BUILDERS SOLUTION (Anexo 1)
- Concrecell 33 ®. Fabricante: DARQUIMICOS SAS (Anexo 2)
- Eucocell 1000 ®. Fabricante: EUCLID CHEMICAL TOXEMENT (Anexo 3)

3.1.2 Cemento

En este estudio experimental, se optó por emplear un cemento de Alta Resistencia Temprana (ART) debido a su amplia aplicabilidad y uso común en la fabricación de concretos de alta resistencia de igual manera con cemento de uso General (UG). La elección de este cemento se fundamentó en su rápida capacidad de fraguado y su eficacia para aumentar la resistencia, lo cual resulta beneficioso al reducir la necesidad de incluir aditivos espumantes para evitar la inclusión de aire. Esto es crucial para preservar la capacidad portante del concreto. Un resumen de los resultados obtenidos en las propiedades físicas y mecánicas del cemento se presenta en la Tabla 5

Tabla 4: Propiedades físicas y mecánicas del cemento ART

Ensayo	Unidad	Resultado ART	Resultados UG	Rango de aceptación	Norma	
Finura-Área específica	cm ² /g	4.795	4.876	3.000-4.000	(NTC 33-2019)	
Peso específico	g/cm ³	3,07	2,97	3,0 - 3,25	(NTC 221-2019)	
Consistencia normal relación a/c	%	26,9	26	24% - 31%	(NTC 110,2019)	
Tiempo de fraguado	Inicial	min	90	100	>45	(NTC 118-2020)
	Final	min	150	205	<420	
Resistencia a compresión	1 día	MPa	12,5		11 y N/A	(NTC 220-2022)
	3 días	MPa	20,8		22-8	
	7 días	MPa	27,7		N/A y 15	

3.1.2.1 Finura

El método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico fue el del aparato Blaine de permeabilidad al aire. Este resultado se expresa en términos de la superficie específica, como el área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento o metros cuadrados por kilogramo de cemento (NTC 33, 2019), como se muestra en la Figura 8, el Anexo 4 y Anexo 5.



Figura 8: Aparato de Blaine, Ensayo de finura del cemento.

3.1.2.2 Peso específico

Para medir la densidad del cemento se ejecutó el ensayo según las recomendaciones de la norma NTC 221 (2019). La principal utilidad de esta propiedad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto. Detalles del ensayo se observan en la Figura 9, el Anexo 6 y Anexo 7.



a.



b.

Figura 9: Ensayos para determinar el peso específico del cemento.

3.1.2.3 Consistencia normal

Para precisar la consistencia normal del cemento hidráulico se determinó de acuerdo con la norma NTC 110 (2019), ver Anexo 8, Anexo 9 y Figura 10. El resultado de este ensayo se utiliza para determinar los tiempos de fraguado del cemento.



a.



b.

Figura 10: a) Preparación de la muestra. b) Ensayo para determinar la consistencia normal del cemento.

3.1.2.4 Tiempo de fraguado

Con el fin de determinar el tiempo de fraguado del cemento por medio de la aguja de Vicat, se preparó una pasta de consistencia normal y se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 118 (2020), ver Anexo 10 y Figura 11.



a.



b.



c.

Figura 11: a) Pasta de consistencia normal. b) Equipo de Vicat. c) Ensayo de tiempo de fraguado del cemento.

3.1.2.5 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico utilizando prismas de 50 mm o 2 pulgadas de lado se ejecutó el ensayo según las recomendaciones de la norma NTC 220 (2022). Más detalles se presentan en el Anexo 12, Anexo 13 y la Figura 12.

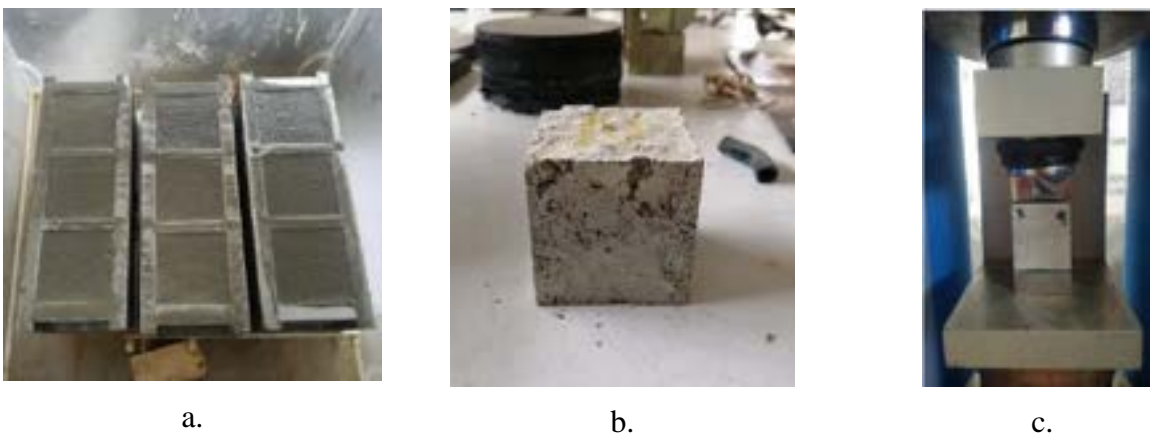


Figura 12: a) Elaboración cubos 50mm. b) Desencofrado de especímenes. c) Ensayo de resistencia a la compresión del cemento.

3.1.3 Agregado fino

El agregado fino utilizado en el proyecto fue una arena triturada y conjuntamente una arena de río, en cumplimiento con las normas colombianas

para su uso en concretos y morteros. El resumen de las propiedades físicas del agregado fino se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Características físicas de la arena de trituración y río.

Ensayo		Unidad	Resultados arena de trituración	Resultados arena de río	Rangos de aceptación	Norma
Granulometría	MF	-	3,6	2,2	2,3-3,1	(NTC 77, 2018)
	TMN	mm	4,75	4,75	≤ 4,75	
Masa unitaria	Suelta	kg/m ³	1.547	1.508	1.200-1.600	(NTC 92, 2019)
	Compacta	kg/m ³	1.705	1.650	1.400-1.800	
Materia Orgánica		Rango	2	3	≤ 3	(NTC 127, 2000)
Peso específico y Absorción		kg/m ³	2.810	2.675	2.500-2.800	(NTC 92, 2019)
		%	2,52	1,23	<3,0	

3.1.3.1 Granulometría

Con el fin de determinar la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos, a través de un proceso de tamizado. Se siguió las recomendaciones de la norma NTC 77 (2018), ver Anexo 14, Anexo 15, y Figura 13.

La Figura 14 muestra que la arena de trituración no exhibe una gradación óptima, dado que contiene una proporción mayor de partículas finas de lo recomendado para un agregado fino. Por otro lado, en el caso de la arena de río, se observa una mejor gradación, respetando los límites recomendados por la norma NTC 174 (2018).



Figura 13: a) Tamices para ensayo de granulometría en agregados finos. b) Equipo de tamizado.

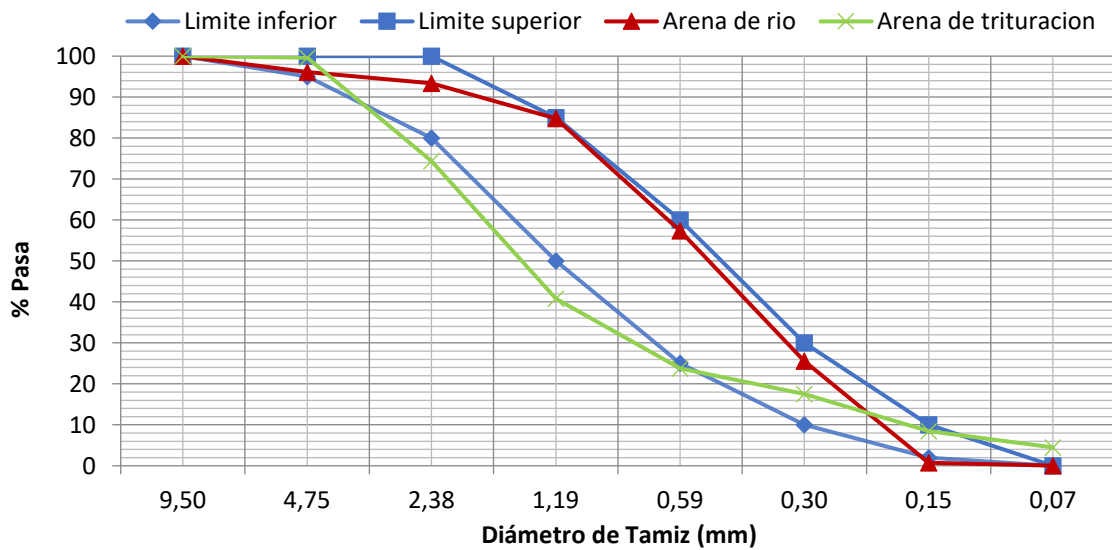


Figura 14: Granulometría de arena de trituración y arena de río, límites según NTC 77 (2018).

3.1.3.1 Masa unitaria

Para determinar la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 92 (2019), que se aplica a agregados que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal. La Figura 15 presenta el procedimiento de ensayo. Los resultados están disponibles en el Anexo 16, y en el Anexo 17.



a.



b.

Figura 15: a) Arena seca al aire para masas unitarias. b) Proceso de tarado.

3.1.3.2 Materia orgánica

El método de ensayo que determina la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales para el agregado fino usado en mortero de cemento hidráulico o en concreto (ver Anexo 18, Anexo 19 y Figura 16), se realizó de acuerdo con la norma NTC 127 (2000).



a.



b.

Figura 16: a) Ensayo de materia orgánica en área de trituración. b) Rango de colorímetro después de 24horas en arena de río.

Como se observa en la Figura 16 la arena de trituración como la de río obtuvieron un valor de 2 en la escala de colores, cumpliendo con los requisitos de calidad de los agregados para su uso en concretos de la norma (NTC 174, 2018b).

3.1.3.3 Peso específico y absorción

Para la determinación del peso específico y la absorción del agregado fino, se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 237 (2020), a una condición de temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver Anexo 20, Anexo 21 y Figura 17).



Figura 17: Ensayo de gravedad específica y absorción en arena de trituración, matraz de ensayo.

3.1.4 Aditivo Espumante

En el presente estudio experimental se utilizaron distintos aditivos generadores de espuma utilizados en la industria para diferentes fines de carácter productivo, entre ellos la construcción. Densidad método picnómetro de Bingham

La norma ASTM D1217-20 (2020) proporciona un método estandarizado para determinar la densidad de líquidos, obteniendo los resultados por producto en la Tabla 6 (Anexo 22).

Tabla 6: Resultados de densidad de aditivos espumantes norma ASTM D1217-20 (2020)

Producto	Densidad método picnómetro de Bingham
Concrecell 33	0,998 g/ml
Euocell	1,021 g/ml
Mastercell 10	1,042 g/ml

3.1.4.1 Contenido de sólidos

La cantidad de sólidos disueltos y no disueltos en los aditivos espumantes utilizados en la producción de concreto celular afecta directamente la densidad y las propiedades del concreto final. Con el objetivo de determinar el contenido de sólidos presentes en el aditivo utilizado, se empleó el procedimiento estipulado por la norma ABNT NBR 10908 (2008). Detalles sobre este ensayo se presentan en la Tabla 7, en la Figura 18 y en el Anexo 23.

Tabla 7: Resultados de sólidos suspendidos a través de la norma ASTM D5907

Producto	Sólidos suspendidos (%)
Concrecell 33	24,1%
Euco cell	31,8%
Mastercell 10	24,2%



a.



b.

Figura 18: a) Muestra de Concrecell 33 y b) Estado seco al horno.

3.2 Estudio de variables del concreto celular

3.2.1 Generación de espuma

La generación de espuma es uno de los parámetros más significativos para la producción del concreto celular, ya que la consistencia y calidad de esta desempeñan un papel determinante en las

propiedades mecánicas del concreto resultante. Por este motivo, se prioriza abordar esta variable en primer lugar.

Dentro de las metodologías exploradas para obtener espuma, se destacan dos enfoques fundamentales. El primero consiste en la formación de espuma mediante la inclusión directa del aditivo espumante al mortero durante la fase de mezclado, la segunda vía implica la preformación de espuma, un proceso mecánico que se realiza mediante diversos métodos y equipos especializados. Cada uno de estos métodos presenta sus propias consideraciones y efectos sobre las propiedades finales del concreto celular.

3.2.1.1 Formación de espuma por incorporación en mezclado

La formación de espuma mediante la incorporación de aditivo directamente a la mezcla es otro de los métodos ampliamente empleados para la formación de concreto ligero. Este proceso se lleva a cabo durante el mezclado del mortero, una vez que se ha obtenido la mezcla base. La agitación mecánica generada por la mezcladora, en conjunto con el mortero, induce la formación de burbujas gracias al aditivo espumante. Estas burbujas quedan atrapadas dentro del mortero, dando lugar al concreto celular. Para explorar esta forma de obtener concreto celular, se realizaron dos fundiciones utilizando dos tipos de aditivos: Mastercell 10 y Eucofel 1000.

- Fundición empleando aditivo Mastercell 10

La prueba consiste en la fabricación y ensayo de seis prismas de 5cm de lado (NTC 220, 2022) de concreto celular usando la dosificación propuesta por Acosta & González (2003b) quienes exponen el proceso gravimétrico para la cuantificación de materiales por volumen y pesos para 1 m³ de concreto celular. Se establece una densidad de fundición de 1.500 kg/m³ (Tabla 8) empleando arena de trituración, cemento ART y el aditivo espumante MasterCell 10. Previamente se selecciona este tipo de arena proveniente de cantera dado a los buenos resultados obtenidos por Lazo (2017b); Raj et al. (2019); Rengifo & Yupangui (2013b), así mismo, se quiere aprovechar las bondades del cemento estructural para obtener altas resistencias tempranas a esfuerzos de compresión y reducir los tiempos para ensayos, en cuanto a la cantidad de aditivo espumante, se adiciona el 7,5% de peso en cemento, que para los seis prismas es de 23g.

Tabla 8: Dosificación de concreto ligero propuesta por (Acosta & González, 2003b) variando la densidad.

Densidad	Cemento	Agua	Arena (seca)	Espuma
(kg/m ³)	(kg)	(lts)	(kg)	(kg)
800	400	94	311	58
1.200	400	144	667	42
1.500	400	182	933	30
1.800	400	219	1.200	18
2.200	400	269	1.556	2

En la Tabla 9 se presentan los parámetros de fundición.

Tabla 9: Parámetros de fundición: generación de espuma

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.500 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Triturado	$G_A = 2,81 \text{ g/cm}^3$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Sin diluir
Agua/cemento		0,46

El procedimiento de mezclado se inicia con la incorporación del agua y el cemento en la mezcladora de eje vertical pequeña, formando la pasta; esta combinación se mezcla durante aproximadamente un minuto para asegurar su integración. A continuación, se añade la arena a la mezcla y se continúa agitando por otro minuto para garantizar una distribución homogénea del mortero (ASTM C305-06, 2011; NTC 112, 2021). Finalmente, se incorpora el aditivo espumante en su forma concentrada, es decir, sin diluirlo en agua (Figura 19.a), mezclándose durante un minuto adicional. Este último paso promueve la generación de burbujas durante el batido, lo que provoca un incremento en el volumen de la mezcla. La Tabla 10 expone el proceso detallado de mezclado según norma.

Tabla 10: Proceso estándar de mezclado de concreto celular (ASTM C305-06, 2011; NTC 112, 2021)

Proceso	Descripción	Tiempo acumulado
Agregar agua	Inicio	0
Agregar cemento	Mezclar en velocidad 1 por 30 segundos	30 segundos
Agregar arena	Mezclar por 30 segundos	1:00 minuto
Pausa	Espera de 30 segundos	1:30 minutos
Continua mezcla	Mezclar en velocidad 2 por 30 segundos	2:00 minutos
Pausa	Raspar paredes con mezcla adherida durante 30 segundos	2:30 minutos
Pausa	Espera de 1 minuto	3:30 minutos
Continúa mezcla	Mezclar en velocidad 2 por 2 minutos	5:30 minutos
Adicionar espuma	Eespuma (aditivo espumante) y continuar en velocidad 1 durante 1 minutos	6:30 minutos

Una vez completada la mezcla, se procede a verterla en la formaleta (Figura 19.b). Para obtener la densidad de fundición de esta, se pesa la formaleta llena de mezcla y se le resta el peso original de la formaleta vacía, al dividir esta diferencia de peso por el volumen conocido de la formaleta, se obtiene la densidad de fundición de la mezcla (NTC 1926, 2013). Es importante tener en cuenta que la mezcla debe enrasarse adecuadamente dentro de la formaleta y se deben evitar residuos en las paredes de esta para prevenir cualquier peso adicional que pueda alterar el cálculo de la densidad de fundición.



a.



b.

Figura 19: a) Adición de aditivo espumante durante el mezclado en mezcladora de eje vertical pequeña. b) Vaciado de mezcla en formaletas

Completada la etapa de fundición, se procede a llevar a cabo una serie de evaluaciones en las muestras endurecidas para determinar sus propiedades entre las que destacan la resistencia a compresión y la absorción de agua. Dos días después de la fundición de cada mezcla, se realiza el desencofrado e inicia el proceso de curado. Transcurridos 11 días desde la fundición, se retiran tres muestras (de las seis fundidas) del proceso de curado para calcular la tasa de absorción, las otras tres muestras restantes se retiran del curado y se someten a pruebas de resistencia a los 14 días desde su fundición (ASTM C796, 2019a).

Los resultados obtenidos revelaron una densidad de fundición, en estado fresco, de 1.703 kg/m³. Esta cifra supera el objetivo inicial de 1.500 kg/m³, calculado a partir de la dosificación propuesta por Acosta & González (2003b). Tal desviación se atribuye a la pérdida de volumen de espuma formada por el aditivo "Mastercell 10" durante el proceso de mezclado. En lo que respecta a las propiedades del concreto celular, la resistencia promedio a la compresión a los 14 días fue de 8,80 MPa, mientras que la absorción de agua promedio alcanzó el 17,31% (Figura 20). Estos resultados pueden ser consultados en el Anexo 24.



Figura 20: Prisma de primera fundición de concreto celular

Las resistencias promedio obtenidas son elevadas considerando que existe una relación directa entre la densidad y resistencia. Este hallazgo indica que, al buscar aumentar la resistencia, se debe hacer un esfuerzo adicional en el control de la densidad en estado fresco. La dificultad para controlar la densidad fresca con el método de adición de aditivo seleccionado resalta la necesidad de una mejor caracterización de este material y una revisión del proceso de mezclado para optimizar la retención de la espuma y, por ende, la densidad final del concreto celular.

- Fundición empleando aditivo Eucozell 1000

Para esta fundición se emplea el aditivo espumante Eucozell 1000. Este aditivo destaca por su versatilidad, ya que puede ser utilizado tanto para la preformación de espuma como aditivo inclusor de aire durante el proceso de mezclado.

Siguiendo las recomendaciones de la ficha técnica, la dosis a incorporar de este aditivo se establece entre el 3% y el 5% del peso del cemento. Además, se propone mantener una relación agua/cemento en el rango de 0,5 a 0,55. Siguiendo estas pautas, las densidades típicamente obtenidas para el mortero después de la inclusión del aditivo se sitúan en un rango de 1.200 a 1.600 kg/m³ (Anexo 25). Es así como en este ensayo se plantean dos fundiciones variando la cantidad de aditivo abarcando ambos límites, el de 3 y 5%.

La dosificación empleada en este caso difiere de la anterior fundición, pues se desconoce la densidad resultante tras el mezclado, en consecuencia, se emplea el método volumétrico basado en las propiedades de los materiales. Para ello, se parte de una densidad inicial estimada de un mortero convencional de $\gamma_f = 2.450 \text{ kg/m}^3$, con una relación agua/cemento (a/C) de 0,5 y una relación arena/cemento (A/C) de 4/1. En esta fundición se opta por emplear arena de río, que ha sido previamente tamizada mediante la malla #4 (4,75 mm). Los demás parámetros de la fundición se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros de segunda fundición: generación de espuma

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.200 – 1.600 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Río	$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$
Aditivo espumante	Eucozell 1000	Sin diluir
Agua/cemento	0,46	

Las cantidades de cemento, agua y arena para 1 m³ de mortero de mortero se determinan con las siguientes fórmulas:

$$C = \frac{\gamma_f}{1 + a/C + A/C} [kg/m^3]$$

$$a = C * a/C [kg]$$

$$A = C * A/C [kg]$$

Sustituyendo valores:

$$C = \frac{2.450}{1 + 0,5 + 4} = 445,45 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 445,45 * 0,5 = 222,73 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 445,45 * 4 = 1.781,82 \text{ kg/m}^3$$

La suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua y agregados (V_A) resultan en el metro cubico de mortero:

$$V_A = \frac{C}{G_c * \gamma_a} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{A}{G_A * \gamma_a} [m^3]$$

Resultando:

$$V_A = \frac{445,45}{3,07 * 1.000} + \frac{222,73}{1.000} + \frac{1.781,82}{2,74 * 1.000} = 0,15 + 0,22 + 0,65 = 1,02 \text{ m}^3$$

La cantidad de aditivo a aplicar varía entre 3 y 5%, por lo tanto, se realizará dos fundiciones con ambos valores para abarcar los resultados en estos extremos, es así como la cantidad de Eucocell 1000 por metro cúbico para cada ensayo es:

$$E_{3\%} = 3\% * C [kg]$$

$$E_{5\%} = 5\% * C [kg]$$

Obteniendo:

$$E_{3\%} = 3\% * 445,45 = 13,36 \text{ kg}$$

$$E_{5\%} = 5\% * 445,45 = 22,27 \text{ kg}$$

Ambos ensayos también constan de la fundición de 6 cubos de 5cm por cada lado más un desperdicio del 10% resultando un volumen total para cada fundición de 825 cm³; así, las cantidades para estos ensayos Se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Cantidades en peso para fundiciones de concreto celular empleando Eucozell 1000 kg/m³

Material	Cantidades para 1m³ (kg)	Cantidades para 825cm³ al 3% (g)	Cantidades para 825cm³ al 5% (g)
Cemento	445,45	367,50	367,50
Agua	185,20	152,79	152,79
Arena	1.849,64	1.525,95	1.525,95
Espumante		33,72	18,37
3%	13,36	11,03	
5%	22,27		18,37
Peso total	2.498,11	2.057,27	2.064,62

Inicialmente se produce el mortero según NTC 112 (2021) siguiendo el procedimiento de la Tabla 10. Una vez obtenido, se agrega la cantidad calculada del aditivo Eucozell 1000.

Con este aditivo incluido en la mezcla, el fabricante sugiere un tiempo mínimo de mezclado de 20 minutos, o hasta que se alcance una densidad requerida. En cada ensayo realizado, se sigue un procedimiento uniforme: después de añadir el aditivo al mortero, se toman mediciones de densidad cada 5 minutos para monitorear su variación utiliza un recipiente de volumen conocido y previamente pesado. Este seguimiento se realiza hasta alcanzar un tiempo total de mezclado de 25 minutos.

Los valores de densidad en estado fresco, registrados cada cinco minutos durante el proceso de mezclado, se representan en la Figura 21.

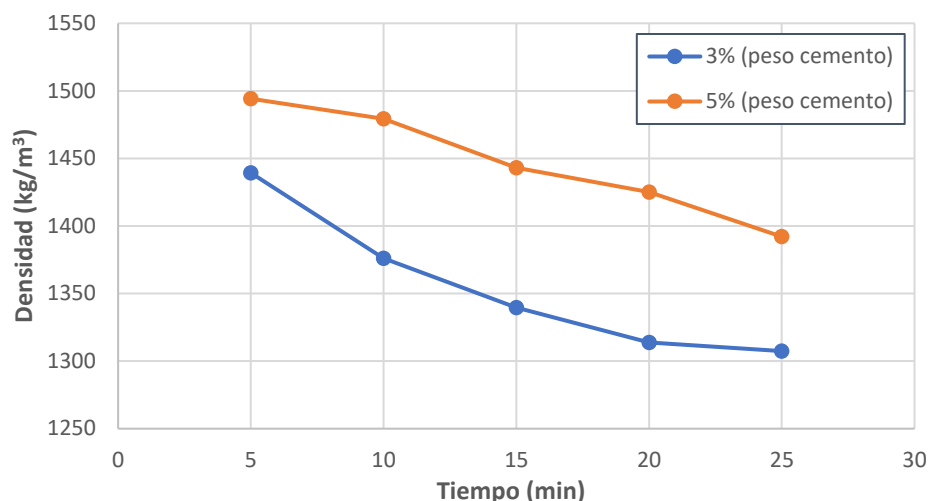


Figura 21: Tiempo de mezclado vs densidad en estado fresco empleando aditivo Eucozell 1000

Las curvas muestran que las densidades obtenidas con el 3% de aditivo son consistentemente inferiores a las que se obtienen con un 5% de aditivo. Esto demuestra que aplicar una mayor cantidad de aditivo a la mezcla no necesariamente garantiza la obtención de menores densidades. Además, se puede observar que, después de aproximadamente 20 minutos de mezclado, ambas líneas comienzan a estabilizarse, lo cual concuerda con los 20 minutos mínimos que el fabricante sugiere para el proceso de mezclado.

Transcurridos este tiempo, el concreto celular se vacía en las formaletas. Pasadas 24 horas, se desencofran las muestras y, acto seguido, se inicia el proceso de curado. De las dos fundiciones realizadas, se obtuvieron un total de 12 especímenes para los ensayos a compresión. De este conjunto, 6 cubos se dejaron curar en aire y 6 en inmersión.

Los especímenes se pesaron y ensayaron tras 7 días de haber sido fundidos, lo que equivale a 6 días de curado. Los resultados de resistencia se muestran Tabla 13.

Tabla 13: Resultados de densidad y resistencia a 7 días de fundiciones empleando Eucozell 1000

Mezcla	Tipo Curado	Promedio densidad 7 días (kg/m ³)	Promedio resistencia 7 días (MPa)
3%	Aire	1.319,93	3,77
	Inmersión	1.422,39	3,56
5%	Aire	1.329,80	3,54
	Inmersión	1.457,96	3,42

Estos datos revelan dos aspectos clave. El primero es que las densidades registradas tras los 6 días de curado son consistentes con las densidades en estado fresco; es decir, los cubos con un 5% de aditivo son más densos que los de 3%, y, además, estos últimos exhibieron una mayor resistencia pese a ser más livianos.

El segundo hallazgo es que los cubos curados en aire presentaron una leve mejoría de resistencia en comparación con aquellos curados en inmersión. Esto se observó tanto para la prueba del 3% como para la del 5%. En el caso del 3%, se registró una resistencia promedio de 3,77 MPa para los cubos curados en aire, y de 3,56 MPa para los curados en inmersión (diferencia del 5,6%). Para el 5%, los cubos curados en aire mostraron una resistencia promedio de 3,54 MPa, mientras que en inmersión se obtuvo una resistencia promedio de 3,41 MPa (diferencia del 3,4%). Así, se reafirma que el curado en aire de los especímenes resulta en una mayor resistencia en comparación con el curado en inmersión, no obstante, esta variable de curado se retoma más adelante con mayor rigor.

El uso de Euocell 1000 como aditivo inclusor de aire resulta efectivo en la generación de concreto celular, pero estos ensayos revelaron dos inconvenientes significativos que ameritan consideración; el primero de ellos radica en el costo asociado al uso del aditivo. Cuando se adiciona el 3% de este aditivo a una mezcla, por ejemplo, de un saco de cemento de 50 kg, equivale a 1,5 litros de producto. Al compararlo con la espuma preformada, que requiere una solución de 1/40 de aditivo/agua (según dosificación del fabricante), se usaría únicamente alrededor de 100 ml de aditivo. Esta diferencia es considerable y, por lo tanto, tiene un impacto directo en el costo de producción del concreto celular, haciendo que la inclusión directa del aditivo en la mezcla sea una opción menos económica que la utilización de espuma preformada.

El segundo factor crítico es el tiempo de mezclado necesario para obtener el concreto celular. Con la espuma preformada, se logra concreto celular con tan solo 6 minutos de mezclado. En contraste, cuando se incorpora el aditivo directamente en la mezcla, el fabricante recomienda un tiempo mínimo de mezclado de 20 minutos. Esta diferencia en los tiempos representa no solo un uso más intensivo de recursos laborales, sino también una menor eficiencia en el proceso de producción.

En resumen, aunque la adición directa del aditivo Euocell 1000 a la mezcladora ha demostrado ser una alternativa viable para la producción de concreto celular, los desafíos asociados al costo del aditivo y al tiempo de mezclado prolongado hacen que esta metodología no resulte óptima en comparación con el uso de espuma preformada.

3.2.1.2 Preformación de espuma con taladro y aditamento

Dentro de los procesos menos complejos de preformación de espuma, está el de agitación mecánica, para ello se emplea un taladro equipado con un aditamento especial como agitador. El taladro seleccionado para este fin es de 650W, con una capacidad de broca de hasta 1/2" y con velocidad adaptable para garantizar un control más preciso (Figura 22, a).

El aditamento o extensión de elaboración propia, es una varilla lisa de acero inoxidable de 50 cm de longitud, con una terminación circular de 20 cm de diámetro cubierta por un resorte (Figura 22, b). Es importante que la varilla longitudinal esté bien centrada respecto a la circunferencia para evitar vibraciones no deseadas en el taladro durante el proceso de agitación. Los resortes en la circunferencia de la varilla son los principales elementos que forman la espuma.



Figura 22: Elementos para agitador mecánico: a) Taladro percutor de velocidad variable y b) varilla lisa con terminación circular rodeada de resortes

La preformación de espuma mediante taladro y aditamento destaca por su simplicidad y versatilidad en la aplicación. Este método ofrece una opción práctica para la generación de espuma,

pero es importante tener en cuenta que su falta de estandarización puede resultar en cierta variabilidad en los resultados obtenidos durante el proceso.

3.2.1.3 Preformación de espuma con tanque espumante

Otro método para obtener la espuma es por medio de máquinas especializadas para tal fin. Dentro de las diversas opciones, fue posible para este proyecto contar un tanque generador de espuma empleado principalmente para el lavado de vehículos. Este equipo consta de un depósito de acero inoxidable de 50 litros de volumen donde se introduce la solución de agua y aditivo, junto con aire a presión proveniente de un compresor externo.

El sistema incluye una manguera para la aplicación de la espuma y un mecanismo para regular la presión del aire. Este aire a presión dentro del depósito forma la espuma, la cual es impulsada a través de la manguera por medio de válvulas reguladoras como se observa en la Figura 24.



Figura 23: Tanque generador de espuma

El tanque generador de espuma demuestra eficiencia, proporcionando resultados consistentes y predecibles. Aunque su desempeño es destacable, es esencial considerar que la adquisición de este equipo puede resultar costosa, factor relevante al evaluar su viabilidad en proyectos similares.

3.2.1.4 Preformación de espuma con máquina espumante

Si bien los tanques espumantes son equipos especializados, su elevado costo no resulta factible para su adquisición en este proyecto. Por lo tanto, se obtuvo en préstamo un equipo de una empresa dedicada al lavado de autos. Otro elemento que se ensayó fue la pistola generadora de espuma

utilizada también en el lavado de vehículos (Figura 24), pero no se obtuvieron resultados satisfactorios en la formación de espuma. Esto se debió a que la pistola expulsa una cantidad mayor de agua que de concentrado, lo que impide la formación completa de la espuma y resulta en un desperdicio significativo del aditivo espumante.



Figura 24: Pistola a presión de agua y formadora de espuma con depósito de 1 litro

No obstante, se ha desarrollado una alternativa asequible: una máquina generadora de espuma de fabricación manual. Esta máquina se construyó mediante un arreglo de tubos a presión, válvulas y mangueras, cuyo costo en materiales y fabricación es significativamente más bajo que las máquinas mencionadas anteriormente. El diseño de esta máquina manual sigue el mismo principio que los tanques espumantes: cuenta con un depósito que contiene la solución y el aire a presión proveniente de un compresor de aire (Figura 25). Este depósito se conecta por mangueras a un cañón que incorpora internamente una serie de esponjas de acero inoxidable, encargadas de generar la espuma debido al flujo de aire y líquido que pasa a través de ella (Figura 26).

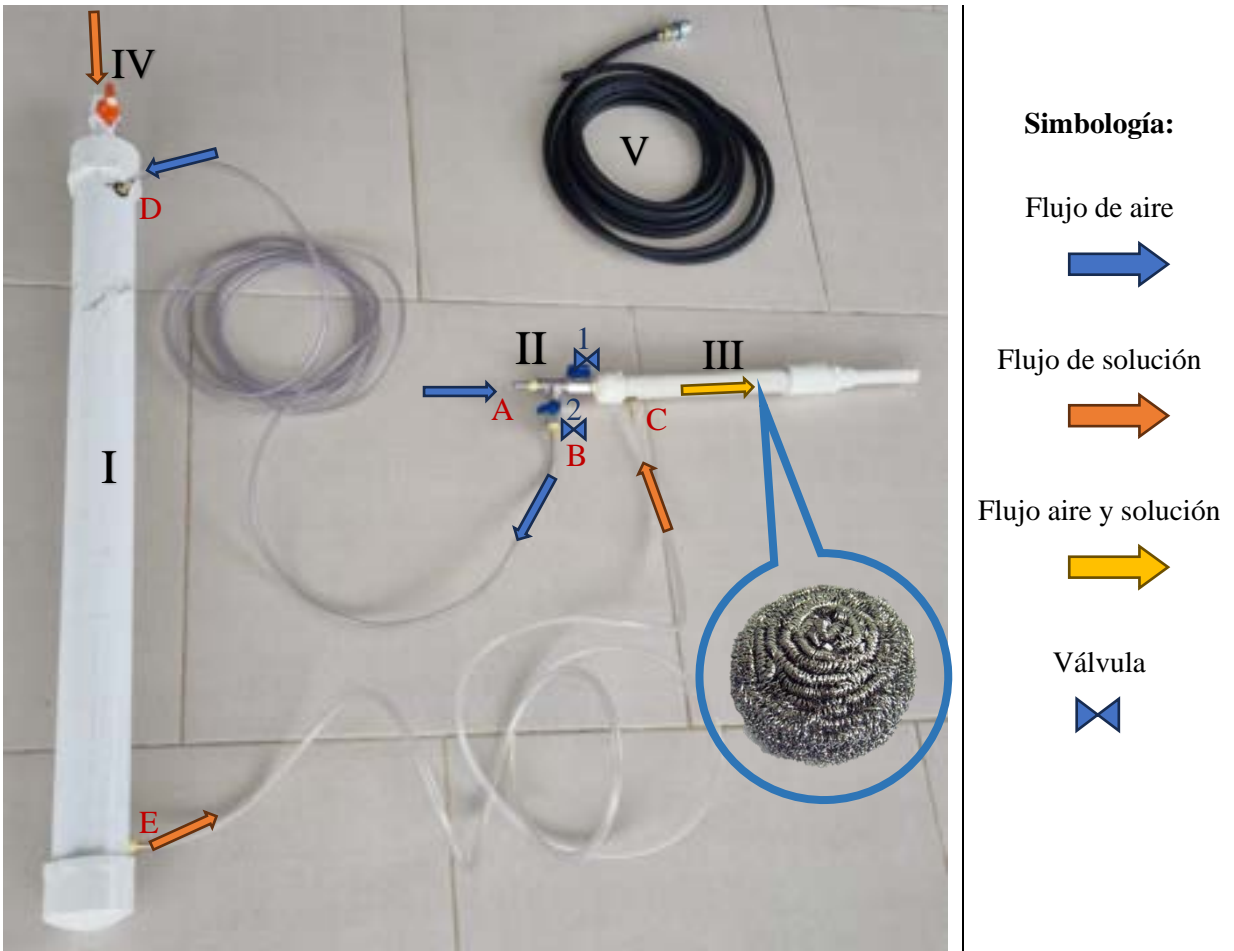


Figura 25: Componentes del cañón de espuma de fabricación manual

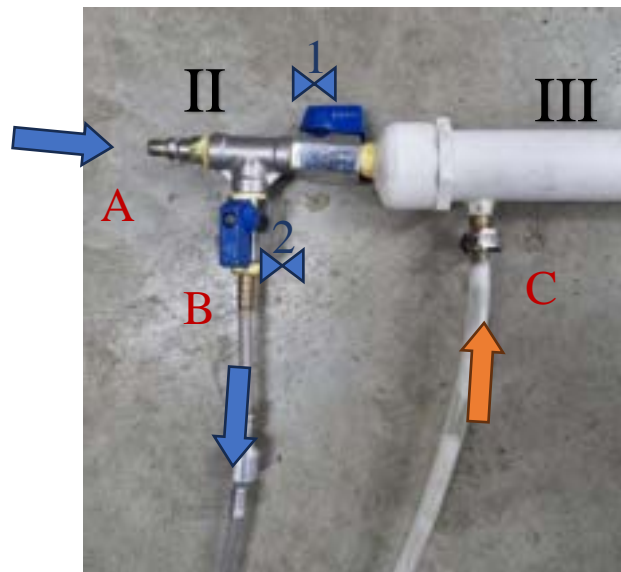


Figura 26: Detalle de T donde se conecta la entrada de aire y las válvulas de control

La máquina manual de formación de espuma consta de tres elementos clave: I) un depósito compuesto por un tubo de presión de 3 pulgadas, II) un arreglo de válvulas que integra la entrada de aire y la entrada de la solución líquida, y III) el cañón de espuma con un diámetro de 1 pulgada que alberga las esponjas de acero inoxidable en su interior (Figura 25).

El proceso operativo de la máquina es el siguiente:

1. Preparación del depósito:

- Se agrega la solución al depósito, sin exceder la mitad de su capacidad, mediante una válvula en la parte superior (color naranja - IV).
- La válvula se cierra, y se conecta la manguera de inyección de aire a presión (V) en la T de distribución de aire (II).

2. Configuración inicial de válvulas:

- Las válvulas de control 1 y 2 deben estar cerradas.

3. Apertura de flujo de aire

- Se conecta la manguera V proveniente del compresor a la T de distribución en II
- Se inicia el flujo de aire con una presión de entre 30 y 35 Psi

4. Apertura de válvula 1:

- La válvula 1 se abre completamente, permitiendo el flujo de aire a través del cañón de 1".
- Se genera una presión en el depósito mediante un flujo de aire más reducido desde C hasta E, evitando que la solución salga momentáneamente por esta manguera.

5. Apertura de válvula 2:

- La válvula 2 se abre completamente.
- Se genera una presión de aire dentro del depósito con la intención de expulsar la solución desde E hasta C, contrarrestando la presión de aire previamente existente en esa manguera.

6. Ajuste de válvula 1:

- Se cierra gradualmente la válvula 1 hasta la mitad o hasta que la solución comienza a salir de E hacia C.

7. Generación de espuma:

- El aire a presión proveniente de A entra en contacto con la solución obtenida de C combinándose en este punto
- La combinación de aire a presión y solución pasan a través de las esponjas de acero inoxidable del tubo de 1".
- Este proceso culmina en la generación de espuma al final del cañón.

La máquina manual generadora de espuma, o cañón de espuma, se presenta como una opción práctica. No obstante, su falta de estandarización debido a su naturaleza de prototipo manual introduce variabilidad en los resultados obtenidos durante el proceso de generación de espuma. Esta variabilidad podría afectar la uniformidad en los resultados y su aplicabilidad en proyectos específicos.

3.2.2 Estabilidad y selección de aditivo espumante

Se llevaron a cabo una serie de ensayos analizando la consistencia y estabilidad de la espuma generada por los tres métodos mecánicos previamente discutidos. Un aspecto clave de estos ensayos fue la variación de la relación aditivo/agua, con el objetivo de identificar la proporción más eficiente que garantice la densidad y estabilidad deseadas de la espuma.

Una vez determinado el valor óptimo, se procedió a realizar dos fundiciones de concreto celular. Sin embargo, en este caso, el enfoque se centró en la inclusión de la espuma en el mortero durante el proceso de mezclado. Este análisis permitió evaluar cómo la densidad y estabilidad de la espuma influye en las propiedades finales del concreto celular

3.2.2.1 Preformación de espuma

Se evalúa la densidad y estabilidad a lo largo del tiempo de la espuma generada por las tres máquinas manteniendo uniforme para los tres casos el procedimiento para la obtención de los datos. El ensayo se realiza para diferentes concentraciones de aditivos espumantes disueltos en el agua que según autores como Amran et al. (2015b); Raj et al. (2019); Zamora Terrones (2015), y los fabricantes, varía entre 1/20 hasta 1/60 (en peso) en la preformación de espuma.

En la fase inicial, se prepara una cantidad suficiente de espuma para obtener de ahí diferentes muestras a pesar, a partir de este momento se llena un recipiente de volumen (500 ml) y peso conocido con esta muestra de espuma, se enraza cuidadosamente, se retira cualquier exceso de material en las paredes y se pesa nuevamente. La densidad se calcula al conocer la diferencia de pesos, es decir, restando el peso del recipiente al peso total con la espuma. Este valor se divide por el volumen del recipiente para obtener la densidad específica.

Este proceso se repitió en intervalos determinados, en este caso, cada minuto, empezando en el minuto cero con la primera medición inmediatamente obtenida la espuma; la muestra final se toma a los 10 minutos, excepto para el método con taladro y aditamento, cuya muestra final fue al minuto 6.

- Espuma con taladro y aditamento

En el método de preformación de espuma utilizando un taladro, se realizaron tres series de mediciones de densidad, variando la relación aditivo/agua con valores de 1/20, 1/40 y 1/60 y empleando únicamente el aditivo Mastercell 10 (Figura 27).



Figura 27: Espuma generada con taladro y aditamento

Los resultados de estas mediciones se presentan en la Figura 28.

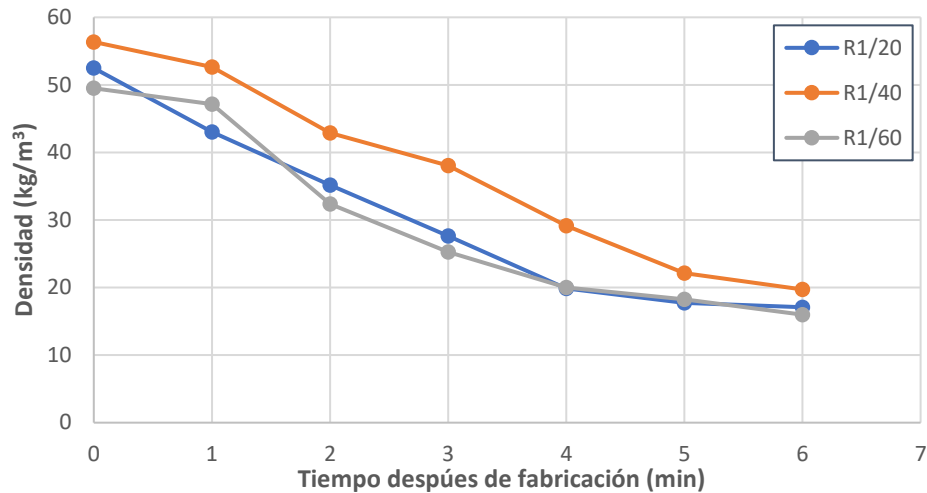


Figura 28: Densidad de espuma en el tiempo empleando aditivo Mastercell y generada con taladro y aditamento, variando la concentración aditivo/agua

La estabilidad de la espuma se refiere a su capacidad para mantener su densidad a lo largo del tiempo. En este contexto, la eficiencia, denotada como ϕ_A representa el porcentaje de densidad de la espuma después de un período de tiempo en comparación con su densidad inicial. Por lo tanto, para el caso del aditivo Mastercell 10 utilizando un taladro con aditamento y una relación aditivo/agua de 1/40, la eficiencia ϕ_A después de un minuto de generada la espuma es del 93%, indicando que ha perdido un 7% de densidad en este período, que coincide con el momento en que se agrega la espuma en la producción del concreto celular.

Por otro lado, se destaca un comportamiento consistente en las tres curvas analizadas. La estabilidad de la espuma muestra una disminución significativa desde el primer minuto de formación, revelando una tendencia común en la pérdida de densidad a lo largo del tiempo, empezando con un promedio de densidad de 55 kg/m^3 hasta estar por debajo de los 20 kg/m^3 .

Además, se observa que la razón de pérdida de densidad es similar en los tres casos estudiados, evidenciando un patrón uniforme en la evolución de la espuma. En particular, se destaca que más de la mitad de la densidad se pierde transcurridos los 6 minutos en todos los grupos de mediciones.

Entre las relaciones aditivo/agua evaluadas (1/20, 1/40 y 1/60), empleando este método y con el aditivo MasterCell 10, se concluye que la relación de 1/40 sobresale al obtener las mayores densidades en comparación con las otras concentraciones.

- Espuma con tanque espumante

En la fase de evaluación del método de preformación de espuma mediante el tanque espumante, se llevaron a cabo mediciones utilizando los tres tipos de espumantes: MasterCell 10, Eucofel 1000 y Concrecell 33, con el objetivo de identificar el que ofrece el mejor rendimiento. Es relevante señalar que se mantuvo constante la relación aditivo/agua en 1/40 en los tres casos estudiados.

En estas mediciones se destaca una marcada diferencia en las densidades obtenidas, siendo el aditivo Concrecell 33, el más destacado al alcanzar casi los 70 kg/m³. A pesar de experimentar una pérdida cercana a 35% de su densidad transcurridos los 10 minutos, mantiene una ventaja considerable en términos de densidad en comparación con los otros dos aditivos.

Por otro lado, las densidades de espuma alcanzadas por los aditivos MasterCell 10 y Eucofel 1000 son muy similares, aproximándose a los 35 kg/m³. Sin embargo, ambas muestran una pérdida sustancial de estabilidad, llegando casi a los 5 kg/m³ a los 10 minutos como lo muestra la Figura 29.

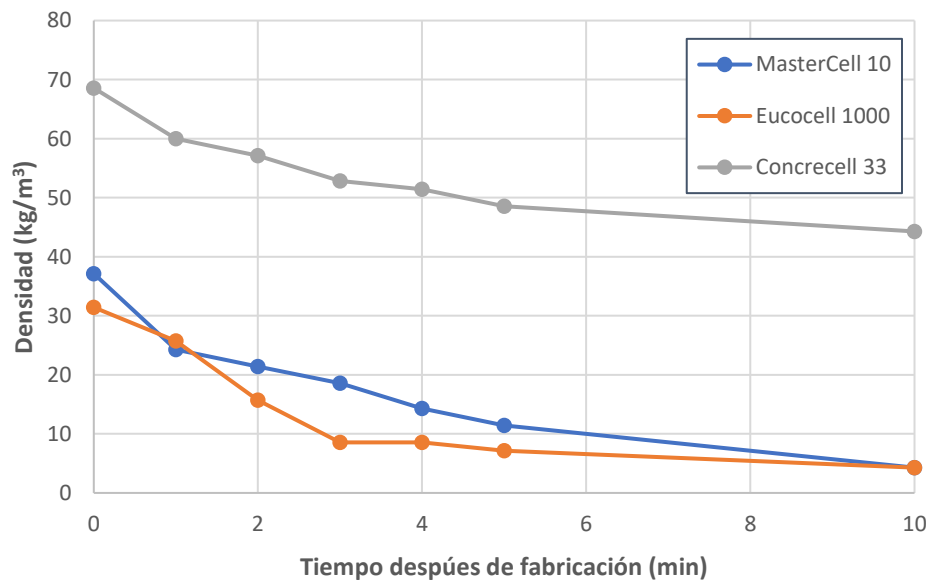


Figura 29: Densidad de espuma en el tiempo generada con tanque espumante, para los tres aditivos con una relación 1/40

En resumen, tanto la estabilidad como la densidad del aditivo Concrecell 33 son superiores en comparación con los otros dos aditivos evaluados, resaltando su eficacia en el proceso de preformación de espuma para este método y con la relación 1/40

- Espuma con máquina espumante

Se efectúa la comparación del rendimiento de los tres aditivos en términos de densidad y estabilidad, al igual que se hizo con el tanque espumante. No obstante, antes de abordar esta comparación, es necesario analizar otra variable asociada al prototipo de esta máquina.

En la salida de espuma, específicamente en el cañón (Figura 30, b), se incorpora una serie de esponjas que desempeñan un papel significativo al generar obstrucciones en la salida tanto del aire como de la solución. La cantidad de esponjas instaladas en el cañón afecta directamente la presión del sistema y la obstrucción, siendo proporcional al número de esponjas.

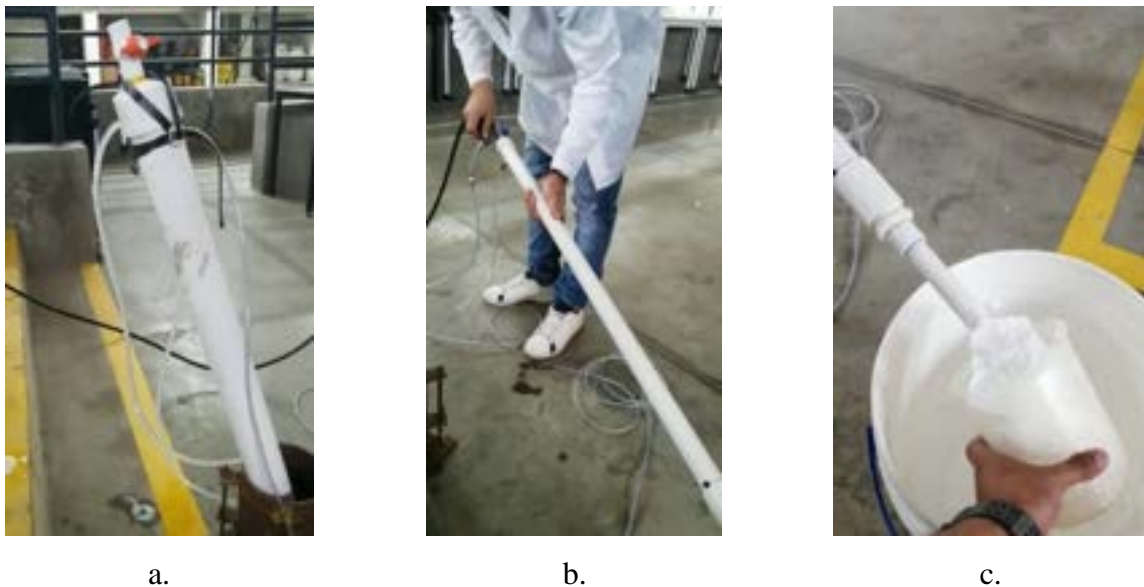


Figura 30: Generación de espuma con máquina espumante: a) Preparación de depósito con válvula cerrada. b) Calibración de válvulas de control C) Salida de espuma desde cañón

Para evaluar esta variable, se realiza un análisis de la densidad con la que la espuma es expulsada, variando el número de esponjas dentro del cañón. Se llevan a cabo mediciones con 2, 3 y 5 esponjas instaladas. En estas mediciones, se emplea el aditivo Concrecell 33, que demostró ser el más efectivo en las pruebas anteriores, con una relación aditivo/agua de 1/40. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Figura 31.

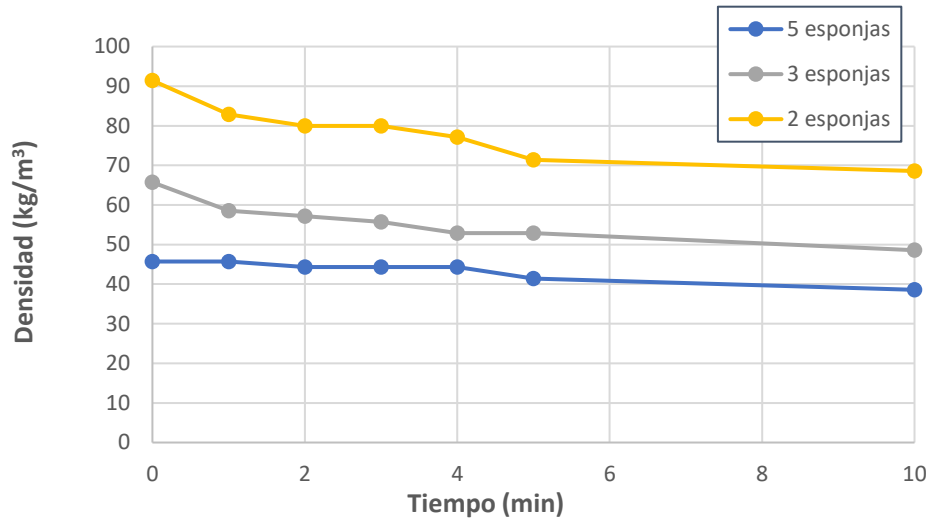


Figura 31: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, variando el número de esponjas, usando Concrecell 33 con relación 1/40

Todas las mediciones muestran una pérdida de densidad similar, con un promedio de disminución del 20% a los 10 minutos desde su generación. Este resultado coincide con las mediciones anteriores realizadas con el tanque espumante, consolidando la consistencia en los patrones de pérdida de densidad en estos dos métodos de generación de espuma y para este aditivo.

Además, se observa que la configuración con 2 esponjas dentro del cañón, lo que implica una menor obstrucción, logra las densidades más altas, alcanzando alrededor de 90 kg/m^3 . Por otro lado, la configuración con 5 esponjas conlleva a la menor densidad. Con base en estas observaciones, se establece que el funcionamiento óptimo se logra con 2 esponjas dentro del cañón, decisión que se implementará en los ensayos subsiguientes.

Después de fijar el número óptimo de esponjas en dos, se procede a medir la densidad de la espuma al variar la concentración de los aditivos en agua. Se utilizan los tres aditivos MasterCell 10 (Figura 32), Eucocel 1000 (Figura 33) y Concrecell 33 (Figura 34) con concentraciones de 1/20, 1/40 y 1/60.

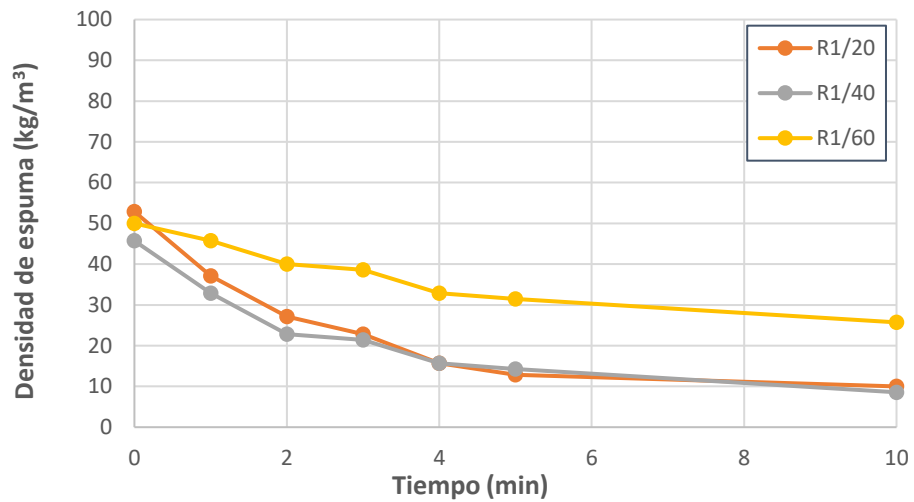


Figura 32: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo MasterCell 10, variando la relación aditivo/agua

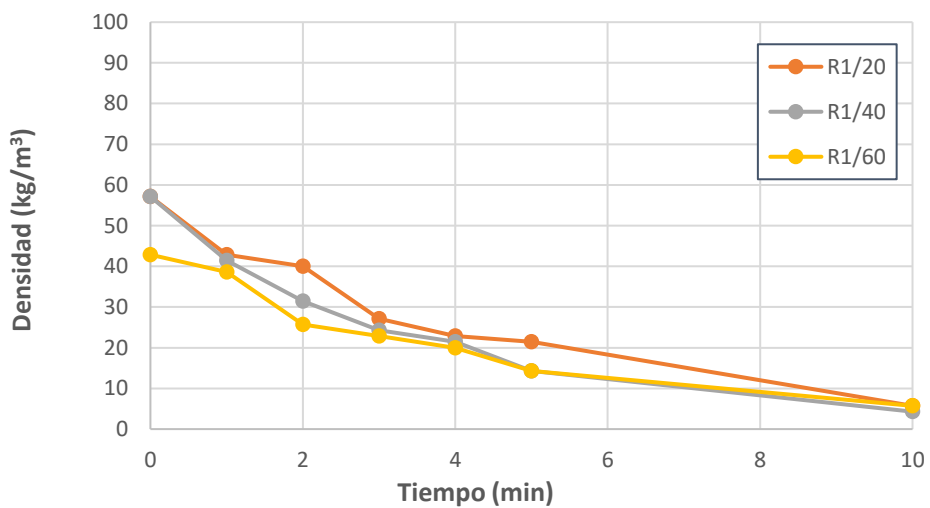


Figura 33: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo Euocell 1000, variando la relación aditivo/agua

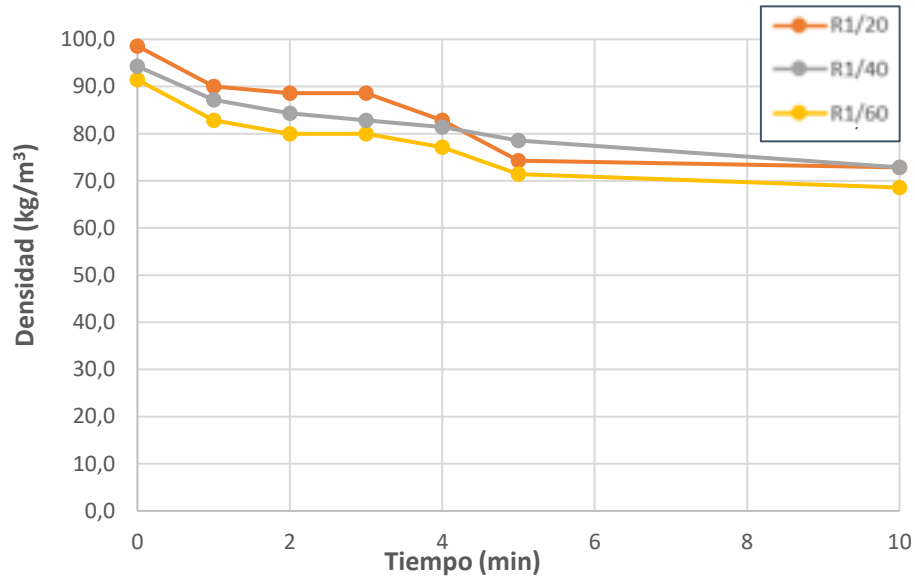


Figura 34.: Densidad de espuma en el tiempo generada con máquina espumante, con aditivo Concrecell 33, variando la relación aditivo/agua

De las gráficas anteriores se destaca que los aditivos MasterCell 10 y Eucocell 1000 muestran un rendimiento inferior tanto en densidad como en consistencia, con un promedio de densidad en el momento de su generación de 50 kg/m^3 . Sin embargo, la consistencia de Eucocell 1000 se desvanece casi por completo, llegando a casi 0 kg/m^3 tras 10 minutos de generación, indicando una descomposición significativa de la espuma hacia su estado líquido original.

Para los tres casos, la relación aditivo/espumante no tuvo un impacto significativo, ya que las líneas correspondientes a las diferentes relaciones son muy similares en los tres grupos de gráficas. Como resultado de estas observaciones, se ratifica la selección de una relación de 1/40 para los ensayos siguientes.

El aditivo Concrecell 33 demuestra ser el de mejor rendimiento, alcanzando casi una densidad de espuma de 100 kg/m^3 y sufriendo una pérdida no superior al 30% tras 10 minutos de generación. Este desempeño superior destaca la eficacia de Concrecell 33 en comparación con los otros aditivos evaluados. Así mismo, la eficiencia ϕ_A tras un minuto de su generación y con una relación aditivo/agua de 1/40 es del 91%.

Es importante señalar que, al utilizar el mismo aditivo y la misma relación, la máquina fabricada produjo mayores densidades de espuma en comparación con los otros dos métodos

anteriores, taladro con aditamento y tanque espumante. Por lo tanto, este mecanismo, la máquina espumante, se posiciona como el método preferente para la formación de espuma,

En ensayos posteriores, se aborda la incidencia de la relación aditivo/agua ya no en la densidad de espuma, sino en las propiedades mecánicas del concreto celular, proporcionando una comprensión más completa y detallada de la influencia de estos parámetros en el material final.

3.2.2.2 Fundición de concreto celular con espuma preformada – aditivo sin diluir

Previamente se obtuvo la caracterización de la espuma generada para los tres aditivos, usando los tres diferentes mecanismos o equipos de fabricación variando su concentración en el agua. La siguiente fundición se realizó con el fin de analizar el impacto en la resistencia mecánica a compresión del concreto celular con espuma preformada, pero sin diluirla en agua, es decir, la espuma generada directamente a partir del líquido concentrado del aditivo, empleando el taladro con aditamento.

Las características de este ensayo son muy similares a la primera fundición realizada en 3.2.1, pues se homologa los materiales y dosificación (Tabla 8), pero se varía la forma en la generación de espuma, ya que esta se preforma con los 30 g de aditivo sin diluir. Los demás parámetros se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Parámetros con preformación de espuma sin diluir

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.500 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Triturado	$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Taladro y aditamento Sin diluir
Agua/cemento		0,46

Con la etapa de fundición concluida, se almacenan las formaletas con las 6 muestras en el lugar destinado para el proceso de fraguado. Dos días después se desencofra e inicia el curado donde se ensayan a resistencia transcurrido 14 días desde su fundición (ASTM C796, 2019a).

Se obtuvo una densidad de fundición de 1.181 kg/m^3 , notablemente inferior a los 1.500 kg/m^3 previstos. Este ensayo evidenció una considerable contracción en el volumen de las muestras, debido a la desintegración de las burbujas a los pocos minutos de vaciar la mezcla en las formaletas, resultando en una superficie curva en las caras expuestas de cada espécimen. No obstante, a pesar de los contratiempos en la densidad y forma de las muestras, estas no se desintegraron en el proceso de desencofrado, obteniendo datos de resistencia a la compresión de $1,71 \text{ MPa}$ y absorción de agua de $18,51\%$ (Figura 35). Los resultados de estos ensayos se encuentran en el Anexo 26.



Figura 35: Cubos deformados de fundición con espuma preformada sin diluir

3.2.2.3 Fundición de concreto celular con espuma preformada – aditivo diluido

En esta fundición se modifica el objetivo de la densidad de fundición, se pasa de un valor de 1.500 kg/m^3 a uno considerablemente menor, incursionando en el límite de los 800 kg/m^3 . Esta cifra indica un concreto extremadamente liviano, con una densidad incluso inferior a la del agua. Para lograr este valor se recurre nuevamente a la dosificación de Acosta & González (2003a) de la Tabla 8. Sin embargo, los cálculos de los materiales necesarios para producir 900 cm^3 de concreto se basan ahora en la nueva densidad objetivo de 800 kg/m^3 .

Otro cambio que se introdujo en esta prueba piloto fue el método de formación de la espuma. En lugar de preformar la espuma con el aditivo sin diluir, se genera con una proporción de $1/40$ en agua, tal como se realizó en la caracterización de espuma. El agua de la espuma hace parte de la relación A/C. Los parámetros se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Parámetros con preformación de espuma sin diluir

	Tipo	Propiedades
Densidad	800 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Triturado	$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/40
Agua/cemento		0,24

Igualmente, como en la prueba anterior, los ensayos se ejecutan a los 14 días desde la fundición (ASTM C796, 2019). Se logró una densidad de fundición cercana al objetivo, registrando 788 kg/m³ en comparación con los 800 kg/m³ esperados. Aunque la espuma fue preparada con un taladro, no hubo contracción aparente y la estructura de los bloques se mantuvo durante el proceso de fraguado. Sin embargo, se enfrentaron dificultades en el proceso de desencofrado, ya que todas las muestras tuvieron casi nula resistencia mecánica a tal punto que se todas se desintegraron (Figura 36), como consecuencia, no fue posible obtener resultados para la resistencia a la compresión y la absorción de agua.



Figura 36: Cubos frágiles y desintegrados en fundición con aditivo diluido a 1/40

De los ensayos previos, focalizados en la generación de espuma preformada, se destaca que el aditivo espumante Concrecell 33 presenta un rendimiento superior en términos de densidad y estabilidad, en comparación con los aditivos Mastercell 10 y Eucocell 1000. Este análisis se sustenta en las gráficas que representan la evolución de la densidad a lo largo del tiempo, específicamente generadas mediante el método de la máquina espumante.

Adicionalmente, estos resultados respaldan la conclusión de que la máquina espumante emerge como el método más eficaz para la preformación de espuma. Independientemente del tipo de aditivo y la relación aditivo/agua utilizada, este método logra obtener densidades de espuma superiores en comparación con el taladro con aditamento y el tanque espumante.

Este hallazgo se refuerza aún más al observar mejoras leves pero significativas en la densidad de la espuma al emplear una relación aditivo/agua de 1/40 para los tres aditivos evaluados. Esta relación se destaca por ser menos costosa en términos de consumo de aditivo, en comparación con la relación 1/20, representando así una opción más eficiente y un poco más económica para la producción de concreto celular.

3.2.3 Metodología de dosificación por ACI 523.3R-14

Anteriormente, se llevaron a cabo fundiciones utilizando aditivos espumantes como EucoCell 1000 y principalmente MasterCell 10 siguiendo el método de dosificación propuesto por Acosta & González (2003b). Sin embargo, se encontró que estas dosificaciones presentan un problema significativo: a medida que se reduce la densidad de fundición de la mezcla, la relación A/C también disminuye, lo que genera dificultades en la consistencia de las mezclas más livianas. Con el objetivo de abordar este inconveniente, se tomó la decisión de implementar la metodología de generación de concreto celular establecida por la norma ACI 523.3R-14 (2014). Esta norma se centra en concretos celulares con densidades en estado fresco que oscilan entre 800 y 1.760 kg/m³.

Esta norma proporciona directrices y recomendaciones específicas para la producción de concreto celular en diversas densidades, permitiendo un enfoque más preciso y confiable para lograr mezclas consistentes y homogéneas. En esta sección, se explora detalladamente el proceso de dosificación y generación de espuma según la normativa de la ACI, lo que permitirá avanzar hacia la formulación y caracterización óptima del concreto celular.

Se procede entonces con una nueva fundición basándose en la metodología de dosificación estipulada por esta norma buscando evaluar la efectividad y precisión del método de producción en comparación con las pruebas anteriores. Los parámetros de fundición se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Parámetros de fundición: Metodología ACI 523

	Tipo	Propiedades
Densidad	800 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_c = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Rio	$G_A = 2,82 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ $Ab = 2,52 \%$ $H = 3,91\%$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/40
Agua/cemento		0,6

La dosificación del concreto celular comienza por definir una densidad en estado fresco deseada, la cual debe superar los 800 kg/m³. Paralelamente, es esencial determinar la relación agua/cemento (a/C), que debe oscilar entre 0,4 y 0,6. Es importante entender que varios factores, como la densidad, el contenido de cemento, la relación a/C, el tipo y las propiedades de los agregados, junto con las condiciones de curado, influyen directamente en la resistencia a la compresión del concreto celular. Estas conclusiones se basan en los hallazgos de McCormick (1967), referenciados en esta norma. Aunque la metodología permite calcular la dosificación basándose en la densidad o la resistencia deseadas, en este trabajo se enfocará en la primera opción.

Notación:

$$\begin{array}{ll}
 A = \text{masa seca de arena} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) & Ab = \text{Absorción de arena (porcentaje)} \\
 C = \text{masa del cemento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) & H = \text{contenido de humedad (porcentaje)} \\
 a = \text{agua (kg)} & \gamma_f = \text{densidad concreto, fresco} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\
 G_A = \text{gravedad específica de la arena} & \gamma_h = \text{densidad concreto, seco al horno} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\
 G_c = \text{gravedad específica del cemento} & \gamma = \text{densidad concreto, seco al aire} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\
 \rho_e = \text{densidad de espuma} &
 \end{array}$$

Para la siguiente etapa de fundición, se establece una dosificación con el objetivo de alcanzar una densidad en estado fresco de 800 kg/m³, junto con una relación agua/cemento (a/C) fijada en 0,6. Una vez definidos estos parámetros, se procede a determinar la relación arena/cemento (A/C) utilizando la siguiente ecuación:

$$A/C = \frac{\gamma_f - 673}{345}$$

$\gamma_f = 800 \text{ kg/m}^3$, entonces:

$$A/C = \frac{800 - 673}{345} = 0,37$$

La densidad seca al horno, denominada γ_h , implica un proceso donde las muestras se mantienen en un horno a 100°C durante al menos 24 horas o hasta que no presenten pérdida de peso (ASTM C796, 2019b). Esto indica que han alcanzado un contenido de humedad nulo. A continuación, se presenta una fórmula que proporciona una aproximación a este valor:

$$\gamma_h = \gamma_f - 122 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Dónde:

$$\gamma_h = 800 - 122 = 678 \text{ kg/m}^3$$

Utilizando la densidad γ_f del concreto en estado fresco, junto con las relaciones a/C y A/C, es posible dosificar la mezcla de concreto celular. Este proceso se basa tanto en el peso estimado del concreto como en el método de volúmenes absolutos. De esta forma, las cantidades de cemento C, agua a y arena A para 1 m^3 de concreto celular se determinan a partir de:

$$C = \frac{\gamma_f}{1 + a/C + A/C} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$a = C * a/C \text{ [kg]}$$

$$A = C * A/C \text{ [kg]}$$

Ahora, para los valores obtenidos:

$$C = \frac{800}{1 + 0,6 + 0,37} = 406,5 \text{ kg/m}^3$$

$$a = 406,5 * 0,6 = 243,9 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 406,5 * 0,37 = 149,6 \text{ kg/m}^3$$

La suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua y agregados V_A restados de 1 m^3 da el volumen de aire A_v requerido por metro de concreto:

$$A_v = 1 - V_A [m^3]$$

$$V_A = \frac{C}{G_c * \gamma_a} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{A}{G_A * \gamma_a} [m^3]$$

Donde γ_a es la densidad del agua igual a 1.000 kg/m³, G_c es la gravedad específica del cemento y G_A la gravedad específica de la arena con valores de 3,07 g/cm³ y 2,82 g/cm³ respectivamente, por lo tanto, se obtiene:

$$V_A = \frac{406,5}{3,07 * 1000} + \frac{234,9}{1000} + \frac{149,6}{2,82 * 1000} = 0,24 + 0,13 + 0,05 = 0,43 m^3$$

Y el volumen de aire requerido por unidad de volumen de concreto es:

$$A_v = 1 - 0,43 = 0,57 m^3$$

El aire incorporado en la mezcla proviene del volumen ocupado por la espuma previamente formada. La eficiencia de esta espuma, es decir, el rendimiento de aire por volumen de espuma utilizada (\emptyset_A), se determina mediante una caracterización previa. En el capítulo anterior 3.2.2 Estabilidad y selección de aditivo, \emptyset_A tiene un valor de 0,93. Esta disminución en volumen se atribuye a la pérdida de densidad de la espuma desde su generación hasta su incorporación al mortero. La espuma utilizada para esta fundición, preformada con taladro, presenta una densidad inicial de $\rho_E = 56,64 kg/m^3$ y se produce utilizando una relación del aditivo espumante MasterCell 10 al agua de 1/40. Así, el volumen de espuma necesario se calcula de la siguiente manera:

$$V_E = \frac{A_v}{\emptyset_A} [m^3]$$

Sustituyendo valores:

$$V_E = \frac{0,56}{0,93} = 0,61 m^3$$

Finalmente, el peso de espuma preformada o cantidad de solución aditivo + agua requerida para un metro cubico de concreto celular es de:

$$E = V_E * \rho_E [kg]$$

$$E = 0,61 * 56,36 = 34,58 \text{ kg}$$

Este peso contempla la cantidad de aditivo espumante y agua, que para una relación de 1/40 se tiene las siguientes cantidades:

$$a_{\text{solución}} = \frac{E}{1 + \frac{1}{40}} \text{ [kg]}$$

$$\text{espumante}_{\text{solución}} = \frac{a_{\text{solución}}}{40} \text{ [kg]}$$

Obteniendo:

$$a_{\text{solución}} = \frac{34,58}{1 + \frac{1}{40}} = 33,74 \text{ kg}$$

$$\text{espumante}_{\text{solución}} = \frac{33,74}{40} = 0,84 \text{ kg}$$

Ya se cuenta con los pesos y densidades de los materiales necesarios para producir un metro cúbico de concreto celular, pero antes, es esencial realizar ajustes en la cantidad de agua. Para ello se debe descontar del total de agua, tanto el volumen empleado en la generación de espuma como el contenido de humedad presente en la arena al momento de la fundición.

El agua en la espuma es:

$$a_e = E \text{ [kg]}$$

Sustituyendo:

$$a_e = 34,58 \text{ kg}$$

Previo a la fundición, es esencial ajustar también el contenido de humedad de los agregados, de acuerdo con la metodología establecida en la norma NTC 1776 (2019). Este valor de humedad debe compararse con la capacidad de absorción de la arena. Si la humedad detectada supera la capacidad de absorción de la arena, se deberá ajustar la mezcla, reduciendo así la cantidad de agua, si la humedad es menor que la absorción, se deberá entonces incrementar la cantidad de agua.

Tras realizar las mediciones pertinentes, se determinó que la humedad presente en la arena es de 3,91%. De acuerdo con la caracterización previa de los materiales, la absorción de la arena de

trituration se establece en $A_b=2,52\%$. Al contrastar ambos valores, se obtiene una diferencia negativa de $H_{correctada} = -1,39\%$. Esta diferencia implica disminuir la cantidad de agua en la mezcla y, como compensación, incrementar la cantidad de arena.

El agua corregida es:

$$a_H = \frac{A * H_{correctada}}{100} [kg]$$

Y la arena a aumentar es:

$$A_H = \frac{A * H}{100} [kg]$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$a_H = \frac{149,6 * (-1,39)}{100} = -2,08 [kg]$$

$$A_H = \frac{149,63 * 3,91}{100} = 5,85 kg$$

De esta manera, el agua y arena corregidas para $1 m^3$ de concreto celular respectivamente son:

$$a_{correctada} = a - a_e + a_H [kg]$$

$$A_{correctada} = A + A_H [kg]$$

Obteniendo:

$$a_{correctada} = 243,89 - 34,58 + (-2,08) = 207,23 kg$$

$$A_{correctada} = 243,89 + 5,85 = 155,48 kg$$

Una vez determinadas las cantidades de materiales necesarias para producir un metro cúbico de concreto celular, es esencial ajustar estas proporciones al volumen específico requerido para la fundición. A continuación, se muestra en Tabla 17 las cantidades de materiales en peso (kg):

Tabla 17: Cantidades en peso para fundición de concreto celular de 800 kg/m³

Material	Cantidades para 1m ³ (kg)	Cantidades para 975 cm ³ (g)
Cemento	406,48	396,32
Agua	207,23	202,05
Arena	155,48	151,59
Espuma	34,58	33,72
Agua	33,74	32,90
Espumante	0,84	0,82
Peso total	803,49	783,4

El procedimiento de mezclado es el mismo de las anteriores fundiciones, tal como indica la Tabla 10, utilizando la mezcladora de eje vertical pequeña.

Una vez lograda la mezcla homogénea, se vierte en las formaletas, las cuales han sido pesadas previamente. Luego de enrasar y eliminar el exceso de mezcla, se pesan nuevamente las formaletas con el contenido para determinar la densidad en estado fresco del concreto. Tras un período de 48 horas, se procede al desencofrado (Figura 37, a) y se da inicio al proceso de curado (Figura 37, b). En esta fundición, el curado se realizó por 14 días, aprovechando las ventajas del rápido desarrollo de resistencia proporcionado por el cemento tipo ART.



a)



b)

Figura 37: Fundición de cubos de 800 kg/m³. a) Cubos desencofrados tras 24 horas. b) Cubos flotando en agua en proceso de curado

Los resultados mostraron una mejora significativa en comparación con la fundición del capítulo 3.2.2.3. En esta ocasión, fue posible desencofrar los cubos, que, a pesar de ser algo frágiles, no se desintegraron. Esto sugiere que al incrementar la relación a/c a 0,6 en esta

dosificación, vs la relación de 0,24 con la misma densidad, se logró aumentar la trabajabilidad mejorando proceso de vaciado y compactación.

La densidad en estado fresco obtenida fue de 791 kg/m^3 , muy cercana al objetivo, mientras que la densidad tras el desencofrado (24 horas) fue de $640,01 \text{ kg/m}^3$. Por otro lado, se obtuvo una resistencia de compresión y absorción promedio de 0,18 MPa y 27,99%, respectivamente a 14 días. Los resultados de estos ensayos se encuentran en el Anexo 27.

Para las siguientes fundiciones de este estudio, se adopta esta dosificación propuesta por la ACI 523.3R-14 (2014) por sus mejores resultados comparados con la dosificación propuesta por Acosta & González (2003a).

3.2.4 Relación aditivo espumante/agua

En los numerales anteriores se analizó el comportamiento de densidad y consistencia de la espuma mediante diversos mecanismos de generación. A pesar de la variación en los niveles de concentración aditivo/agua, que abarcó desde 1/20 hasta 1/60 para cada aditivo, los resultados no revelaron diferencias sustanciales entre cada grupo de mediciones.

El siguiente paso consiste en determinar la relación del nivel de concentración del aditivo en el agua en las propiedades mecánicas del concreto celular. Para ello, se llevaron a cabo tres fundiciones distintas, utilizando cada una de las tres concentraciones: 1/20, 1/40 y 1/60. En cada concentración, se funden seis cubos; tres de ellos se ensayan a compresión, y los tres restantes a absorción, lo que suma un total de 18 ensayos.

Todos los ensayos subsiguientes siguen la metodología establecida por la normativa ACI 523.3R-14 (2014) en cuanto a dosificación, mezclado y curado. Debido a la cantidad reducida de espuma necesaria para estas pruebas, se optará por su preformación mediante el taladro y aditamento, además de utilizar el aditivo espumante Mastercell 10 cuya espuma está caracterizada con este método de formación (Figura 28). Los demás parámetros se expresan en la Tabla 18.

Tabla 18: Parámetros de fundición: relación aditivo/agua

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.500 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Trituración	$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
		$Ab = 2,52 \%$ $H = 3,73\%$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/20, 1/40 y 1/60
Agua/cemento		0,6

A partir de las cantidades para 1 m³ de mezcla, se calcula las cantidades para el volumen específico requerido en cada fundición. Estas son:

Tabla 19: Cantidades en peso para las tres fundiciones de concreto celular de 1500 kg/m³ variando relación aditivo/agua

Material	Mezcla 1/20		Mezcla 1/40		Mezcla 1/60	
	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 938 cm ³ (g)	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 938 cm ³ (g)	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 938 cm ³ (g)
Cemento	375,27	351,82	375,27	351,82	375,27	351,82
Agua	192,89	180,83	194,02	181,90	196,86	184,55
Arena	933,16	874,84	933,16	874,84	933,16	874,84
Espuma	21,35	20,02	20,22	18,95	17,38	16,30
Agua	20,34	19,07	19,72	18,49	17,10	16,03
Espumante	1,02	0,95	0,49	0,46	0,28	0,27
Peso total	1.520,96	1.425,90	1.520,96	1.425,90	1.520,96	1.425,90

El proceso de mezcla para estas fundiciones se llevó a cabo en la máquina de eje vertical pequeña, dada la cantidad reducida de material involucrado que es de aproximadamente 1 litro por cada fundición y siguiendo el procedimiento detallado en la Tabla 10.

A las 24 horas de haberse realizado las fundiciones, se procedió al desencofrado de los cubos (Figura 38) y posterior curado de todos ellos. Dos días después de iniciada la inmersión, los cubos destinados a determinar la absorción se extrajeron y se ingresaron colocaron en el horno, con el fin de eliminar su contenido de humedad.



Figura 38: Cubos desencofrados tras 24 horas de fundición de mezcla a)1/20 y b)1/40

Al cumplirse 7 días desde la fundición, se llevó a cabo el ensayo de compresión en 3 cubos; simultáneamente, los 3 cubos restantes se retiraron del horno para calcular su tasa de absorción. Este protocolo se replicó para los especímenes de cada una de las tres fundiciones. La Tabla 20 resume los resultados obtenidos, consignados en el Anexo 28.

Tabla 20: Resultados de densidad y resistencia de fundiciones variando relación aditivo/agua

Mezcla	Densidad fundición (kg/m ³)	Resistencia (MPa)	Absorción (%)
1/20	1.616,8	5,46	14,9%
1/40	1.524,5	7,30	15,7%
1/60	1.751,9	4,56	14,6%

A pesar de las expectativas teóricas que proyectaban una densidad promedio de 1.500 kg/m³, ninguna de las mezclas logró alcanzar dicha cifra con precisión. La mezcla que más se acercó a este valor fue la que tenía una proporción Ad/Ag de 1/40, alcanzando una densidad de 1.524,5

kg/m³. Se prevé que la inconsistencia en las densidades puede atribuirse a la manipulación de la espuma durante el proceso de mezclado. Dada la naturaleza delicada de la espuma en comparación con otros componentes de la mezcla, es posible que una parte de esta se haya deformado antes de lograr un concreto homogéneo.

En cuanto a la resistencia a compresión, la mezcla con proporción aditivo/agua de 1/40 demostró ser la más eficiente, logrando una resistencia promedio de 7,30 MPa. Por otro lado, la mezcla de 1/60, a pesar de usar menos aditivo espumante y por ende tener un menor costo material, registró las densidades promedio más altas, tanto en estado fresco como húmedo, pero en contraste, tuvo la resistencia promedio más baja. Esta observación lleva a descartar esta relación 1/60 para ensayos futuros. La mezcla de 1/40, al emplear menos aditivo que la mezcla de 1/20, logró superarla en eficiencia al alcanzar una menor densidad y una mayor resistencia promedio (Figura 39), por lo tanto, la variable de aditivo/agua se establece en **1/40** para los siguientes ensayos.

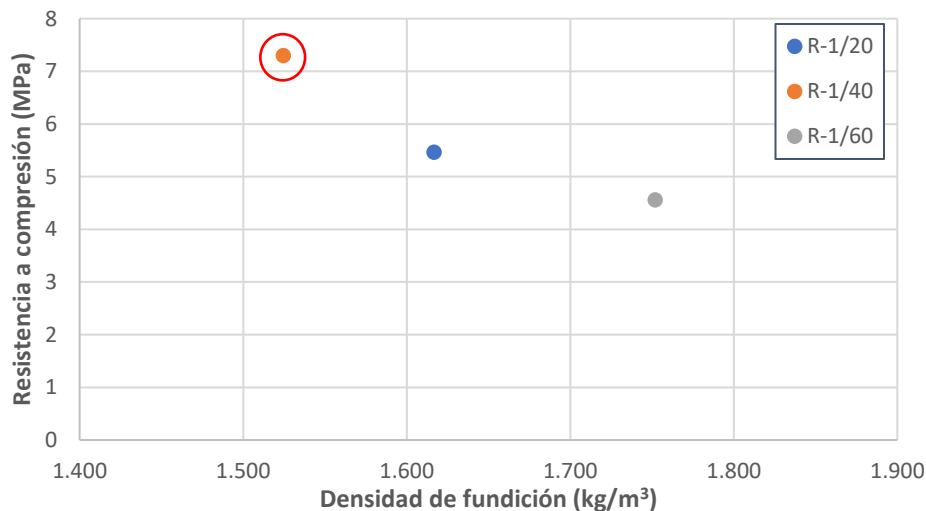


Figura 39: Densidad fresca vs resistencia promedios para las tres mezclas variando aditivo/agua

3.2.5 Tipo de curado

El curado del concreto es un proceso esencial que desempeña un papel vital en asegurar la calidad, resistencia y durabilidad del concreto. Es la práctica de mantener un contenido de humedad adecuado en el concreto durante un período determinado inmediatamente después del mezclado y colocación, permitiendo así que el cemento hidrate completamente. Para el concreto convencional, el curado adecuado puede prevenir la contracción prematura, aumentar la

resistencia, mejorar la durabilidad y reducir la permeabilidad, entre otros beneficios. Un concreto que no ha sido curado adecuadamente puede presentar problemas tales como fisuras superficiales, disminución de la resistencia a compresión y una vida útil reducida de la estructura (Acosta & González, 2003a; Zamora Terrones, 2015).

En el caso del concreto celular, existen algunas particularidades a considerar; debido a su estructura porosa, tiende a perder agua más rápidamente que el concreto convencional, lo que puede afectar su capacidad de hidratación (Amran et al., 2015; Raj et al., 2019). Por lo tanto, es esencial asegurar que el concreto celular mantenga un ambiente húmedo durante el proceso de curado para evitar la evaporación prematura del agua, que es crucial para la reacción de hidratación del cemento.

Tanto la norma nacional NTC 1377 (2021), aplicable al concreto convencional, como la norma ASTM C495/C495M – 12 (2019), destinada al concreto celular, establecen directrices similares respecto al proceso de curado de las muestras. Ambas normas especifican que el curado debe ser húmedo, manteniendo una temperatura promedio de 23 °C desde el instante del moldeado hasta el ensayo. Una vez desmoldadas, las muestras deben seguir en curado húmedo. Esto implica que la superficie de las muestras debe estar constantemente cubierta por agua libre, es decir, deberían presentar agua no absorbida visiblemente en todo momento. Esta condición se puede lograr empleando tanques de almacenamiento de agua o manteniendo las muestras en un cuarto húmedo.

La evaluación de los diferentes tipos de curado del concreto celular se llevó a cabo a través de la fundición de 6 cubos. Estos se dividieron en tres grupos, con distintos métodos de curado para cada uno: inmersión en agua, exposición al aire libre y en una cámara de curado. El objetivo para esta fundición fue alcanzar una densidad de 1.200 kg/m³.

Dado que el laboratorio no cuenta con un cuarto húmedo específico para el curado, se usó un recipiente sellado que contenía agua en el fondo para crear un ambiente húmedo (NTC 3512, 2022). Para evitar que las muestras entren en contacto directo con el agua, se colocaron en soportes que las mantenían elevadas desde la base del recipiente (Figura 40, a). Por otro lado, los cubos destinados al curado en aire se ubicaron en una sala con mínimas variaciones de humedad (Figura 40, b), y que, además, no se ve afectada por cambios climáticos. Finalmente, el curado en inmersión se llevó a cabo en tanques contenedores de agua (Figura 40, c). Estos recipientes se

mantuvieron en lugares resguardados, evitando así los cambios bruscos de temperatura dadas las variaciones climáticas de la intemperie.

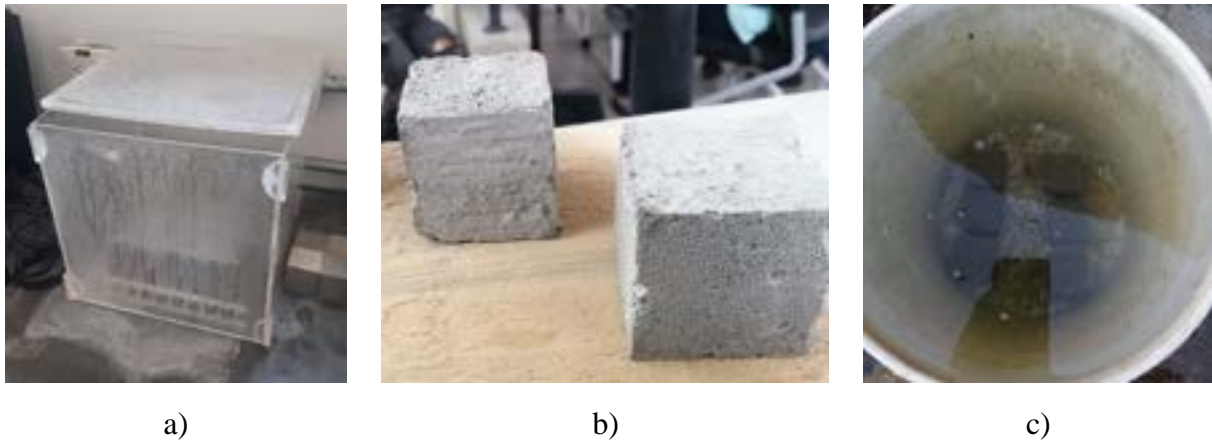


Figura 40: Cubos sometidos a diferentes tipos de curado: a) Curado en cámara, b) Curado al aire, c) Curado en inmersión de agua

Los materiales y características para este conjunto de fundiciones se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Parámetros de fundición: tipo de curado

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.200 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Rio	$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$ $Ab = 1,70 \%$ $H = 3,71\%$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,93$
Agua/cemento		0,5

A partir de las cantidades para 1 m³ de mezcla, se calcula las proporciones para el volumen específico de mezcla que se requiere en la fundición, estos materiales se presentan en la Tabla 22:

Tabla 22: Cantidades en peso para la fundición de 9 cubos de 1.200 kg/m³

Material	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 1294 cm ³ (g)
Cemento	396,36	512,79
Agua	158,62	205,21
Arena	627,94	812,39
Espuma	21,35	35,42
Agua	26,71	34,55
Espumante	0,67	0,86
Peso total	1.210,29	1.565,82

A las 24 horas posteriores a la fundición, se procedió al desencofrado de los cubos de concreto celular. Seguidamente, se llevó a cabo el proceso de curado designado para cada conjunto de dos cubos. Aprovechando las propiedades rápidas del cemento estructural, los ensayos de compresión se realizaron al séptimo día desde la fundición, es decir, tras seis días de curado. Los datos de estos resultados se encuentran en el Anexo 29 y se resumen en la Tabla 23.

Tabla 23: Resultados de densidad y resistencia de fundiciones variando el tipo de curado

Tipo de curado	Densidad fundición (kg/m ³)	Densidad tras curado (kg/m ³)	Resistencia (MPa)
Inmersión		1.262,8	0,14
Cámara	1.159,3	1.100,4	0,21
Aire		1.114,1	0,19

La precisión en la obtención de la densidad del concreto en estado fresco fue notablemente cercana a la calculada teóricamente, registrándose un margen cercano al 3,4%. En cuanto a la variación de densidad después del proceso de curado, se observó una disminución promedio del 4.5% para los cubos curados tanto en cámara como al aire libre. En contraste, los cubos curados mediante inmersión mostraron un incremento en densidad, con un promedio de 8,9%, lo que se le atribuye al aumento de humedad que estos adquieren al estar sumergidos en agua.

La Figura 41 muestra la eficiencia de los procesos de curado en cámara y al aire, mostrando que ambos métodos tienen resultados similares tanto en densidad posterior al curado como en resistencia a compresión. Sin embargo, los cubos curados por inmersión registraron una resistencia a compresión inferior en comparación con los otros dos métodos. A partir de estos hallazgos, se puede concluir que los métodos óptimos para el curado son al aire libre y en cámara. Por ende, resulta viable optar por el curado al aire en ensayos subsecuentes, evitando la necesidad de establecer protocolos logísticos para la creación de cámaras de curado. Sin embargo, es fundamental resaltar que los resultados de resistencia a compresión de este ensayo resultaron ser extremadamente bajos, no superando el umbral de 1 MPa. Por lo tanto, la influencia del método de curado se reconsiderará y será reevaluada en siguientes ensayos.

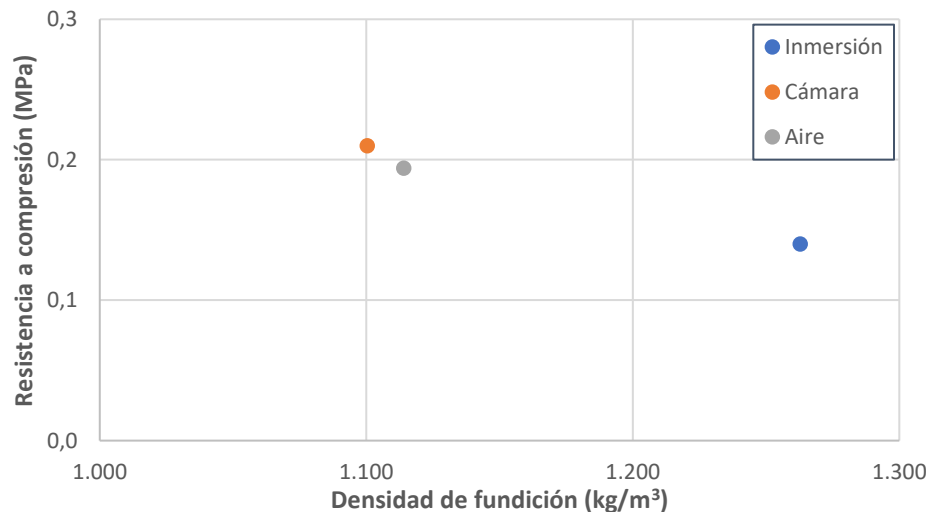


Figura 41: Densidad después de curado vs resistencia promedio para las tres mezclas variando el tipo de curado

3.2.6 Método de mezclado en volumen – tipos de mezcladoras

En la determinación de las variables anteriores, se llevaron a cabo ensayos utilizando cubos de concreto celular con dimensiones de 5 cm por cada arista, lo cual fue un punto de partida fundamental para obtener las primeras propiedades y comportamientos de este material. Sin embargo, conforme a las directrices establecidas por la norma ACI 523.3R-14 (2014) y ASTM C796/C796m-19 (2019), que categorizan al concreto celular como concreto, los especímenes de ensayo deben ser de forma cilíndrica. En particular, para nuestro contexto, se deben emplear

cilindros con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, lo que equivale a un volumen aproximado de 1.571 cm³. El reto subsiguiente radica en la necesidad de escalar el proceso de fundición, dada la mayor cantidad de volumen requerido, lo que conlleva a emplear mezcladoras de mayores capacidades, pues hasta este punto se ha empleado la mezcladora de eje vertical pequeña.

En este subcapítulo, se investiga y evalúa la eficiencia de dos tipos de mezcladoras que se presentan como candidatas para satisfacer este requerimiento de volumen. La primera es una mezcladora convencional de concreto (trompo) o basculante, con la capacidad de mezclar medio bulto de cemento (25 kg) o aproximadamente 70 litros de concreto; por otro lado, se cuenta con una mezcladora de eje vertical grande, con capacidad de hasta 30 litros y equipada con tres velocidades. Ambas mezclas tienen como objetivo alcanzar una densidad en estado fresco de 1.500 kg/m³. Para esta fase, se opta por utilizar Mastercell 10 como aditivo espumante, generado mediante taladro y aditamento. Adicionalmente, se inicia con el uso de cemento tipo UG, en lugar del ART, buscando una opción más económica, así mismo, como agregado, se emplea arena de trituración, los demás datos de la fundición se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24: Parámetros de fundición: método de mezclado en volumen – tipos de mezcladoras

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.500 kg/m ³	Fresca
Cemento	UG	$G_C = 2,97 \text{ g/cm}^3$
		$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
Arena	Trituración	$Ab = 2,52 \%$ $H = 3,71\%$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,93$
Agua/cemento		0,5

El propósito central de este subcapítulo es determinar cuál de las dos mezcladoras es más adecuada para la producción de concreto celular, considerando no sólo su capacidad sino también

la homogeneidad y calidad de la mezcla resultante. Se espera que estos ensayos proporcionen directrices claras para los futuros esfuerzos de producción y fundición de concreto celular a escala.

Para cada fundición, se preparan seis cilindros de concreto celular con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, destinando tres para ensayos de resistencia y los otros tres para determinar la absorción. En la Tabla 25 se resume la dosificación para tal volumen y densidad fresca.

Tabla 25: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1.500 kg/m³ variando la maquina mezcladora

Material	Cantidad para 1m³ (kg)	Cantidad para 13.838 cm³ (kg)
Cemento	384,96	5,33
Agua	134,73	1,86
Arena	982,38	13,59
Espuma	21,26	35,42
Agua	20,74	286,99 g
Espumante	0,52	7,17 g
Peso total	1.523,27	21,08

El proceso de mezclado de concreto celular en la mezcladora de eje vertical grande (Figura 42, a) es igual al de la mezcladora de eje vertical pequeña como lo indica la Tabla 10, por otro lado, la metodología de mezclado en la mezcladora convencional (Figura 42, b) presenta algunas variaciones. Dada su construcción, no se puede iniciar el proceso vertiendo agua, ya que existen riesgos de fugas a través de pequeñas rendijas u orificios en el equipo. El procedimiento se inicia añadiendo la mitad de la cantidad total de arena, posteriormente, se incorpora el agua y se mezcla durante un minuto, luego, se agrega la mitad del cemento y se continúa el mezclado por un minuto adicional. Una vez hecho esto, se procede a añadir el resto de los materiales: primero la arena restante, luego el cemento y, finalmente, el agua. Esta mezcla se agita durante un minuto y medio. Se pausa el proceso momentáneamente para raspar las paredes del equipo y garantizar la homogeneidad. Después de mezclar durante otro minuto, se introduce la espuma preformada y se deja que la mezcla se integre durante un minuto adicional.



a)



b)

Figura 42: Vaciado de espuma preformada en a) mezcladora de eje vertical grande y b) mezcladora basculante

Una vez que la mezcla está preparada, se procede a verterla en las formaletas cilíndricas. Inicialmente, se llena la mitad de la formaleta, que ha sido previamente engrasada, y se le dan alrededor de 5 golpes externos con un martillo de goma. Este procedimiento asegura una distribución adecuada del concreto y evita la formación de espacios sin llenar o burbujas de aire atrapadas. Luego, se repite este mismo proceso para llenar la segunda mitad de la formaleta. Una vez llenas, las formaletas se trasladan al espacio designado donde iniciarán su proceso de fraguado.

Tras completar la fase de fundición, los cilindros se desencofraron al cabo de dos días para iniciar su proceso de curado. Sin embargo, surgieron algunos contratiempos en esta etapa. Se evidenció un problema en el proceso de mezclado con la máquina basculante, pues la espuma no se integró adecuadamente a la mezcla, lo que impidió que cumpliera su función principal de reducir la densidad. Esta inadecuada integración resultó en un aumento significativo de la densidad de los cilindros, debido a este inconveniente, sólo fue posible fabricar cuatro especímenes.

Por otro lado, con respecto a los cilindros fundidos en la máquina de eje vertical grande, al momento de desencofrarlos, dos de ellos se dañaron por mala manipulación, dejando sólo cuatro cilindros en buen estado. De este conjunto de cilindros, dos de ellos se destinaron para ensayos de resistencia y los otros dos para determinar su absorción.

El período de curado de los cilindros fue de 26 días en total. Sin embargo, aquellos destinados para los ensayos de absorción se curaron en agua durante 23 días y luego se colocaron en un horno durante 3 días adicionales. Todos los cilindros se sometieron a los respectivos ensayos al alcanzar los 28 días desde su fundición. Los datos de estos ensayos se encuentran en el Anexo 30 y se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26: Resultados de densidad, resistencia y absorción de fundiciones variando la maquina mezcladora

Mezcladora	Densidad fundición (kg/m³)	Resistencia 28d (MPa)	Absorción (%)
Basculante	2.221,14	18,55	10,3%
Eje vertical grande	1.612,84	1,98	16,0%

La decisión de fundir solamente seis cilindros proviene por norma (ACI 523.3R-14, 2014), sin embargo, se consideró una holgura o porcentaje de desperdicio para garantizar suficiente material al momento de fundir estos cilindros, evitando así posibles deficiencias. A su vez, la elección de no exceder la cantidad de cilindros necesarios se fundamenta en la eficiencia, buscando conservar materiales y optimizar el tiempo destinado a los procesos de mezclado, encofrado, desencofrado, curado y ensayo.

A pesar de estas precauciones, se presentó un problema considerable con la mezcladora basculante, pues el volumen de catorce litros resultó insuficiente, ocupando menos del 50% de su capacidad máxima. Esto condujo a que la mezcla de concreto celular no se realizara adecuadamente. Entre los problemas detectados destaca una cantidad significativa de cemento permaneció adherida a las aspas alargando el proceso de raspado. A la hora de añadir la espuma, esta no se integró de manera óptima a la mezcla; gran parte de ella se acumuló en la punta de las aspas hasta que finalmente se desintegró (Figura 43, a.). Estas complicaciones derivaron en la producción no de un concreto ligero, sino de un mortero tradicional con una densidad cercana a los 2.200 kg/m³, dando como resultado resistencias elevadas. Debido a la alta densidad y a la ineficacia de la espuma, el volumen final fue menor al proyectado, lo que limitó la fundición a solo cuatro cilindros.



Figura 43: a) Espuma adherida en aspas de mezcladora convencional. b) Mezcla homogénea de concreto celular en mezcladora pastelera grande

Por otro lado, la mezcladora de eje vertical grande mostró un desempeño superior (Figura 43, b.). Si bien se observó una densidad ligeramente superior a los 1.600 kg/m^3 previstos, la disminución de volumen, en comparación con los 1.500 kg/m^3 teóricamente calculados, se vio compensada por el alto margen de desperdicio considerado. Sin embargo, esta máquina tampoco estuvo exenta de desafíos. Una porción de mortero tendió a acumularse en el fondo del recipiente, lo que obligó a interrumpir el proceso de mezclado para intervenir manualmente. Aunque la pastelera tiene una capacidad de 30 litros, solo se pueden emplear efectivamente alrededor de 20 litros para prevenir desbordamientos a altas velocidades. Esto implicó el uso de aproximadamente el 70% del volumen recomendado de la máquina, lo que la hace considerablemente más eficiente que la primera opción.

Dadas las observaciones y resultados mencionados, se concluye que la mezcladora de eje vertical grande es la opción más adecuada para las futuras fundiciones de especímenes cilíndricos.

3.2.7 Agregados finos

En un esfuerzo por determinar la arena más adecuada para la elaboración del concreto celular, se llevaron a cabo dos fundiciones distintas, diferenciándose únicamente por el tipo de arena utilizada. Mientras una mezcla se preparó utilizando arena de trituración, la otra se elaboró con arena proveniente de río.

Para garantizar la consistencia y comparabilidad entre ambas fundiciones, se establecieron parámetros específicos. Se optó por el aditivo espumante Concrecell 33 debido a su capacidad para generar una densidad de espuma superior comparada con Mastercell 10. A diferencia de ensayos anteriores, en esta ocasión, la espuma se produce utilizando el generador de espuma, en lugar del método del taladro. Además, se empleó la mezcladora de eje vertical grande para asegurar la homogeneidad en la mezcla y se seleccionó el cemento estructural ART. La densidad fresca que se busca alcanzar en estas mezclas es de 1.600 kg/m^3 como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Parámetros de fundición: agregados finos

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.600 kg/m^3	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
		$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
	Trituración	$Ab = 2,52 \%$
		$H = 7,27\%$
Arena		$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$
	Rio	$Ab = 1,70 \%$
		$H = 5,06\%$
Aditivo espumante	Concrecell 33	Espuma preformada – máquina espumante aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\phi_A = 0,91$
Agua/cemento		0,5

Uno de los ensayos clave realizados fue la prueba de slump, destinada a evaluar la trabajabilidad de cada una de las mezclas. Esta prueba es esencial para entender cómo se comportaría el concreto en situaciones reales de vertido y manipulación. Aunque el objetivo principal era fundir cuatro cilindros de cada mezcla para someterlos a pruebas de compresión a los siete días, se preparó intencionadamente una cantidad doble de mezcla. Esta decisión se tomó ya que la porción de la mezcla utilizada para el slump, al haber sido manipulada, no es recomendable para la fundición de cilindros. Por ende, dicha porción se descarta para la producción de especímenes, asegurando que los cilindros provengan de una mezcla en mejores condiciones.

Para cada mezcla se funden cuatro cilindros destinados a ser sometidos únicamente a pruebas de compresión, y la cantidad de mezcla excedente, para la prueba de asentamiento o slump.

Siguiendo las pautas de dosificación establecidas por la ACI 523.3R-14 y las propiedades de los materiales se determinan las cantidades exactas de estos para obtener el volumen de mezcla deseado, como se presenta en la Tabla 28.

Tabla 28: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1600 kg/m³ variando el tipo de arena

Material	Mezcla con arena de trituración		Mezcla con arena de río	
	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 14.497 cm ³ (kg)	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 14.497 cm ³ (kg)
Cemento	382,14	5,54	382,14	5,54
Agua	110,08	1,60	125,41	1,82
Arena	1101,47	15,97	1078,79	15,64
Espuma	32,19	466,60 g	31,12	451,12 g
Agua	31,40	455,22 g	30,36	440,11 g
Espumante	0,79	11,38 g	0,76	11,00 g
Peso total	1625,88	23,57	1617,46	23,49

En la fase final del proceso de mezclado, se observa una acumulación de mortero en el fondo del recipiente. Este fenómeno se debe al diseño del aspa de la máquina, que no permite alcanzar y mezclar eficientemente esta porción de material. Ante esta situación, se procede a reincorporar manualmente dicho remanente al conjunto de la mezcla, y posteriormente se continúa con el mezclado mecánico para asegurar su completa integración.

Tras finalizar el proceso de mezclado, se procede a verter el material en las cuatro formaletas destinadas para ello, y gracias a la fluidez de la mezcla, no se aplicó compactación en las formaletas. El material sobrante se emplea para la realización de la prueba de asentamiento o "slump", conforme al procedimiento estipulado por la norma NTC 396 (2021). Una vez realizada, se miden y registran los valores de asentamiento obtenidos para ambas mezclas. Seguidamente, el conjunto total de ocho cilindros, distribuidos en cuatro para la mezcla con arena de trituración y cuatro para la de río, se sitúan en el área designada, dando inicio al proceso de fraguado.

Finalizado el proceso de mezclado, se efectuaron las evaluaciones pertinentes para determinar las propiedades de las mezclas. Las pruebas de asentamiento mostraron diferencias notables entre las mezclas: 22,8 cm para la que contenía arena de trituración (Figura 44, a) y 20,4 cm para la de arena de río (Figura 44, b). En términos de densidad de fundición, se registró 1.453,8 kg/m³ para la mezcla con arena de trituración y 1.565,69 kg/m³ para la de arena de río.



a.



b.

Figura 44: Prueba de asentamiento de concreto celular usando a) arena de trituración y b) arena de río

Después de un periodo de curado, los cilindros fueron sometidos a ensayos al cabo de siete días desde su fundición. Las resistencias promedio observadas fueron de 1,11 MPa para los cilindros con arena de trituración y 1,81 MPa para los de arena de río. Estos resultados se presentan en el Anexo 31 y se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29: Resultados de resistencia y asentamiento para mezclas empleando arena de río y trituración

Tipo de arena	Densidad fundición (kg/m³)	Promedio resistencia 7d (MPa)	Asentamiento (cm)
Trituración	1.453,80	1,11	22,8
Río	1.565,69	1,81	20,4

A pesar del empeño en mantener constante la densidad objetivo teóricamente calculada, las mezclas mostraron una variación en los valores finales, registrando una densidad inferior a la

propuesta. Esto podría atribuirse a una combinación de factores: una integración no uniforme entre el mortero y la espuma, o incluso un exceso en la adición de esta. Es importante entender que dosificar adecuadamente la espuma es un desafío, dada su naturaleza y la precisión que demanda.

Por otro lado, el aditivo espumante Concrecell 33 que se empleó en estas mezclas demostró una notable estabilidad en su espuma, superior a los otros aditivos considerados en este estudio. Esta característica resulta en una facilidad significativa durante el proceso de mezclado y garantiza una consistencia en volumen cuando se integra al mortero. Durante las pruebas, se observó una coherencia entre la resistencia y el asentamiento en relación con la densidad de fundición. Específicamente, la mezcla que incorporó arena de río destacó por su resistencia superior, atribuible a su mayor densidad en comparación con la mezcla que empleó arena de trituración. A pesar de que el asentamiento fue menor en la fundición con arena de río en comparación con la de arena de trituración, esta diferencia se originó principalmente debido a la mayor densidad de la mezcla con arena de río, además, este aumento de la trabajabilidad en el concreto con la arena de trituración se debe a que es de mayor tamaño comparada con la de río (Anexo 14 y Anexo 15). Es importante destacar que, si ambas mezclas hubieran tenido densidades equivalentes, la arena de río podría haber exhibido un mejor asentamiento, además de conservar su resistencia superior.

Finalmente, un aspecto notable visualmente durante la fase de mezclado fue la facilidad con la que se integró la espuma al mortero en la mezcla con arena de río, en contraste con la mezcla que empleó arena de trituración. Esta diferencia se puede atribuir a la naturaleza de los agregados: mientras que la arena de río, por su forma redondeada, facilita el proceso y lo hace más manejable, la arena de trituración presenta una forma angular que puede complicar la integración homogénea. Estas diferencias morfológicas de los agregados sin duda tienen un impacto directo en el comportamiento y las propiedades del concreto celular resultante. Por todas las características y resultados expuestos anteriormente, se selecciona la arena de río como mejor alternativa a ser usada en las demás fundiciones.

3.2.8 Tipo de cemento

En esta última fase de experimentación con el concreto celular, se puso en juego la efectividad del cemento ART frente al cemento UG. La elección del cemento ART no es arbitraria; su principal

beneficio radica en la posibilidad de alcanzar resistencias a edades más tempranas, lo cual es una ventaja considerable al optimizar el tiempo en los ensayos y fundiciones posteriores. Dado esto, el ensayo se centró en determinar si existen diferencias notables en resistencia entre estos dos tipos de cemento empleados en el concreto celular.

Con este objetivo en mente, se llevaron a cabo dos fundiciones específicas para medir la resistencia. Se estableció una densidad objetivo de 1.400 kg/m^3 y, para asegurar la consistencia en las variables, se mantuvo el curado por aire, se eligió el aditivo espumante Concrecell 33 y se utilizó arena de río como agregado fino. Es importante mencionar que, debido a la capacidad mínima de la mezcladora de eje vertical grande, en cada fundición se preparó un volumen suficiente para ocho cilindros. Sin embargo, sólo se moldearon cuatro cilindros por mezcla, para ensayos únicamente de resistencia, asegurando así que los especímenes fueran representativos.

En la preparación de las mezclas para este ensayo, se mantuvo una constante en la selección de los materiales, variando solamente el tipo de cemento utilizado: uno se basó en el cemento UG y el otro en el ART. El objetivo establecido para la densidad en estado fresco de estas mezclas fue de 1.400 kg/m^3 . Las demás propiedades de materiales se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30: Parámetros de fundición: tipo de cemento

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.400 kg/m^3	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
	UG	$G_C = 2,97 \text{ g/cm}^3$
Arena	Rio	$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$
		$Ab = 1,70 \%$
		$H = 5,06\%$
Aditivo espumante	Concrecell 33	Espuma preformada – máquina espumante aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,91$
Agua/cemento		0,5

Las proporciones específicas de cada componente en las mezclas están resumidas en la Tabla 31.

Tabla 31: Cantidades en peso para cada fundición de concreto celular de 1.400 kg/m³ variando el tipo de cemento

Mezcla con cemento UG y ART		
Material	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 13.179 cm ³ (kg)
Cemento	388,11	5,12
Agua	119,01	1,57
Arena	868,93	11,45
Espuma	37,86	498,93 g
Agua	36,93	486,76 g
Espumante	0,92	12,17 g
Peso total	1.413,90	18,63

Después de haber completado un periodo de fraguado de dos días, los cilindros se desencofran y se procede a un proceso de curado por aire durante 12 días adicionales. Una vez transcurridos 14 días desde su fundición, se procede al ensayo de los ocho cilindros para determinar su resistencia.

La mezcla que empleó el cemento UG registró una densidad fresca de 1.416,16 kg/m³, y su resistencia promedio fue de 1,44 MPa. Por otro lado, la mezcla con cemento ART presentó una densidad fresca ligeramente inferior, de 1.396,13 kg/m³; sin embargo, mostró una resistencia notablemente mayor, alcanzando un promedio de 2,58 MPa (Anexo 32). Estos resultados ponen de manifiesto las diferencias significativas en el rendimiento entre los dos tipos de cemento cuando se integran al concreto celular.

El cemento ART no solo ha probado ser más eficiente en cuanto a tiempos de curado, sino que también ha mostrado una resistencia destacada a los 14 días, comparativamente superior a la del cemento UG. Aunque las diferencias en densidades frescas entre ambos ensayos no resultaron ser significativas, el contraste en resistencia afirma la decisión de continuar empleando cemento ART para los siguientes ensayos.

A medida que se realizaron estos ensayos de fundición de concreto celular, se ha observado una tendencia alentadora: la diferencia entre la densidad teórica planeada y la densidad real tras el mezclado va decreciendo. Esta mejora en la precisión del proceso sugiere un refinamiento en la

comprensión sobre la dosificación y el comportamiento intrínseco de los materiales en juego. Además, se resalta cómo el cemento ART parece interactuar de forma óptima con otros componentes, como el aditivo espumante Concrecell 33.

3.3 Definición de curva resistencia vs densidad

En los estudios llevados a cabo sobre las variables del concreto celular, se han recopilado una serie de hallazgos claves que definen la producción óptima de este material para este estudio. A partir del análisis de cada variable, se extrajeron conclusiones fundamentales que se aplican en el siguiente programa de fundiciones.

Para comenzar, la adaptación de la norma ACI 523.3r-14 resultó esencial en la dosificación del concreto celular. Al seguir sus pautas, se facilitó significativamente la fabricación de este concreto, evitando las problemáticas presentadas en dosificaciones anteriores, como la propuesta por Acosta & González (2003b). Este ajuste asegura que la proporción de materiales, y en particular la relación agua/cemento, permanezca constante incluso al variar la densidad de fundición.

La proporción aditivo espumante/agua de 1/40 demostró ser la más equilibrada, otorgando una resistencia óptima, a la vez que conserva una eficiencia económica. Asimismo, los resultados obtenidos favorecen al curado por aire sobre la inmersión en agua. Mientras que el aditivo espumante Euocell 1000 ofreció buenos resultados en cuanto a compresión, el proceso de mezclado y la proporción de aditivo resultaron ser poco prácticos, debido a esto se estableció el aditivo Concrecell 33 como la mejor alternativa, ya que se obtuvo una espuma con densidad y desempeño superiores respecto a los otros dos, todo esto empleando la máquina espumante.

En cuanto al método de mezclado, la selección de la mezcladora de eje vertical grande para fundir los cilindros se fundamentó en la necesidad de escalabilidad para obtener volúmenes mayores. En el análisis de agregados finos, la arena de río mostró ventajas tanto en resistencia como en trabajabilidad en comparación con la arena de trituración. Y finalmente, el cemento ART emergió como la opción preferida debido a su superior resistencia a corto plazo en comparación con el cemento UG acortando así el tiempo para ensayo de especímenes.

Con estos datos en mano, se procede a la ejecución de dos programas de fundiciones que varían la densidad fresca, abarcando un rango desde los 800 kg/m³ hasta los 1.800 kg/m³. Por un lado, se propone fundir cilindros utilizando arena de trituración y aditivo espumante Mastercell 10. A estos cilindros se les realizarán pruebas de compresión y absorción, mientras que a la mezcla fresca se le realizará la prueba de asentamiento. Por otro lado, las fundiciones con arena de río y aditivo espumante Concrecell 33 serán ensayadas bajo dos métodos de curado: aire e inmersión. El propósito de la elaboración de estas curvas es facilitar la selección de dosificaciones en función de parámetros como densidad y resistencia a la compresión para la siguiente etapa experimental sobre el estudio y fabricación de los bloques de concreto celular.

A lo largo de este proceso, ciertas variables se mantendrán constantes: el uso del cemento ART, una relación agua/cemento de 0,5 y una proporción aditivo espumante/agua de 1/40. La elección de estas constantes se fundamenta en los resultados concluyentes de los ensayos anteriores, buscando la producción óptima de concreto celular.

3.3.1 Curva con arena de trituración y Mastercell 10

Se llevaron a cabo fundiciones de concreto celular orientadas a cubrir rangos de densidad de fundición entre 1.200 y 1.800 kg/m³. Se estableció un programa piloto inicial de cuatro fundiciones, distribuidas en incrementos de 200 kg/m³, comenzando desde 1.200 kg/m³ y culminando en 1.800 kg/m³.

La finalidad de estas fundiciones es desarrollar y analizar una curva que relacione la densidad en estado fresco con la resistencia del concreto. A pesar de que el tipo de cemento seleccionado para estas mezclas es ART, se optó por fundir tres distintos grupos de cilindros, con el objetivo de someterlos a ensayos en diferentes edades.

El primer grupo consiste en dos cilindros, diseñados para ser ensayados en resistencia a los 7 días desde su fundición. Esta elección se basa en la intención de evaluar el comportamiento a corto plazo de las mezclas. El segundo grupo, conformado por tres cilindros, sigue los lineamientos normativos y será sometido al ensayo de resistencia a compresión a los 28 días. Esta evaluación busca determinar la resistencia promedio en un tiempo más extendido de curado. Finalmente, el

tercer grupo, también compuesto por tres cilindros, tiene como finalidad el cálculo de su absorción. Estos cilindros serán evaluados igualmente a los 28 días desde la fundición.

Con esta distribución se busca observar las ganancias en resistencia que los cilindros puedan presentar con un adicional de 21 días de curado en comparación con los ensayos a 7 días. Para este conjunto de fundiciones, se ha elegido el curado al aire como método principal.

Finalmente, con el propósito de evaluar la trabajabilidad y consistencia de las mezclas frescas, se aplicará la prueba de asentamiento o slump. Esta evaluación es relevante para determinar la adecuada proporción y mezcla de los componentes, garantizando una correcta colocación y compactación del concreto en los moldes.

A continuación, en la Tabla 32, se detallan los materiales empleados y las proporciones respectivas para realizar los ensayos de estas pruebas piloto que origina la curva de resistencia vs densidad fresca empleando arena de trituración:

Tabla 32: Parámetros de fundición: Curva resistencia vs densidad con arena de trituración (prueba piloto)

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.200 – 1.800 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
		$G_A = 2,82 \text{ g/cm}^3$
Arena	Trituración	$Ab = 2,52 \%$
		$H_1 = 7,95\%, \quad H_2 = 5,06\%$
		$H_3 = 4,95\%, \quad H_4 = 3,33\%$
Aditivo espumante	Mastercell 10	Espuma preformada – taladro aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,93$
Agua/cemento		0,5

Las proporciones exactas de los materiales para cada densidad se basan en la corrección de la humedad de la arena ($H_1 - H_4$). Estas proporciones, detalladas para 1 m³, se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33: Cantidades de materiales en peso para 1 m³ de concreto celular con densidades desde 1.200 hasta 1.800 kg/m³

Cantidades para 1m³ de concreto celular				
Material	Densidad de 1.200 kg/m ³	Densidad de 1.400 kg/m ³	Densidad de 1.600 kg/m ³	Densidad de 1.800 kg/m ³
Cemento	396,36	388,11	382,14	377,62
Agua	137,57	149,70	146,74	163,74
Arena (trituración)	653,61	859,25	1.077,66	1.274,61
Humedad	7,95%	5,06%	4,95%	3,33%
Espuma (Mastercell 10)	27,73	23,57	19,36	15,14
Agua	27,05	22,99	18,89	14,77
Espumante	0,68	0,57	0,47	0,37
Peso total	1.215,27	1.420,63	1.625,90	1.831,11

Para determinar las cantidades exactas de cada material requerido para un volumen específico, en este caso, los 21,75 litros necesarios para los ocho cilindros y la prueba de asentamiento, basta con escalar las proporciones presentadas para 1 m³ de acuerdo con este volumen deseado.

Para garantizar un proceso adecuado de fundición y ensayo de concreto celular, se elaboró un calendario detallado que permitió organizar de manera efectiva las fechas de fundición, desencofrado, curado, ingreso de muestras al horno y las respectivas pruebas de resistencia.

La preparación previa a la fundición es de suma importancia. Esta implica adecuar los materiales, considerando las correcciones por humedad, de manera que las proporciones estén listas para ser escaladas al volumen requerido de 21,75 litros por cada fundición.

Adicionalmente, se procedió a la preparación de las herramientas y equipos indispensables para el proceso. Esto incluyó la adecuación de formaletas cilíndricas previamente engrasadas para evitar adherencias, básculas precisas para determinar la densidad, todos los componentes del cono de Abrahms para la prueba de asentamiento, y demás herramienta menor que facilitó las operaciones.

La metodología de mezclado empleada sigue el protocolo con el que se ha trabajado previamente, y que se detalla en la Tabla 10. Se utilizó la mezcladora de eje vertical grande. Una vez que la mezcla está lista, se llena cada una de las 7 formaletas. Estas se enrasan cuidadosamente y se limpian de cualquier exceso. Con el volumen conocido de las formaletas, los cilindros se pesan posteriormente para determinar la densidad de la mezcla.

La porción adicional de mezcla se reserva para la prueba de asentamiento, permitiendo evaluar la trabajabilidad y cohesión del concreto celular. Al concluir este proceso, los cilindros se colocan en el área designada para iniciar el curado al aire, mientras que la mezcla utilizada en la prueba de asentamiento se desecha. Finalmente, después de 28 días desde su fundición, los cilindros se someten a ensayos de humedad y resistencia a compresión.

3.3.2 Curva con arena de río y Concrecell 33

Basándose en experiencia adquirida con las fundiciones piloto que emplearon arena de trituración, se emprendió una nueva serie de fundiciones utilizando arena de río. Un factor diferencial es el uso del aditivo espumante Concrecell 33 y la máquina espumante. Esta combinación presenta desafíos singulares, especialmente al intentar alcanzar densidades más bajas que, por su naturaleza, son más difíciles de lograr. En esta etapa, el rango de densidad de fundición se establece entre 800 y 1.600 kg/m³, concretándose en cinco fundiciones incrementales de 200 kg/m³.

Con estas fundiciones, se busca construir una segunda curva que relacione la densidad en estado fresco con la resistencia del concreto celular. Aprovechando las propiedades del cemento ART, se fundieron dos grupos distintos de cilindros, todos destinados a ensayos de resistencia a los 7 días después de la fundición. Además, por cada fundición se fabricaron 6 cubos de 5cm por arista. Tanto cilindros como cubos se dividen para curado en aire y en inmersión, tres de cada uno respectivamente. El propósito de incluir estos cubos es comparar la escalabilidad de los especímenes de ensayo y garantizar que no exista variación en los resultados debido al tamaño o forma de estas dos modalidades de muestra.

La estrategia detrás de este diseño es evaluar la resistencia de las mezclas bajo dos escenarios de curado: un grupo es expuesto a un curado al aire, mientras que el otro experimenta un curado

en inmersión. Al contrastar los resultados de ambos grupos, se busca corroborar las diferencias en resistencia en función del método de curado seleccionado.

Cabe señalar que, para esta serie de fundiciones con arena de río, se decidió omitir pruebas adicionales como asentamiento o absorción, poniendo el foco exclusivamente en la resistencia según densidad y tipo de curado.

La selección y proporción de materiales para este grupo de fundiciones se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34: Parámetros de fundición: Curva resistencia vs densidad con arena de río

	Tipo	Propiedades
Densidad	800 – 1.600 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
		$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$
		$Ab = 1,70 \%$
Arena	Río	$H_1 = 5,26\%$, $H_2 = 5,32\%$, $H_3 = 5,24\%$, $H_4 = 5,33\%$ $H_5 = 0,84\%$
Aditivo espumante	Concrecell 33	Espuma preformada – máquina espumante aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,91$
Agua/cemento		0,5

Se presenta las cantidades de materiales necesarios por 1 m³, ajustándose según la humedad de la arena. Para establecer las cantidades para el volumen específico de 11,37 litros, se realiza un escalado a partir de los valores dados para 1 m³, como se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35: Cantidades de materiales en peso para 1 m³ de concreto celular con densidades desde 800 hasta 1.600 kg/m³

Cantidades para 1m³ de concreto celular					
Material	Densidad de 800 kg/m ³	Densidad de 1.000 kg/m ³	Densidad de 1.200 kg/m ³	Densidad de 1.400 kg/m ³	Densidad de 1.600 kg/m ³
Cemento	428,24	408,53	396,36	388,11	382,14
Agua	149,34	137,87	131,22	126,18	168,78
Arena (río)	165,94	407,81	637,32	861,34	1.035,42
Humedad	5,26%	5,32%	5,26%	5,32%	0,84%
Espuma (Concrecell 33)	59,16	52,38	45,39	38,28	31,12
Agua	57,72	51,10	44,28	37,35	30,36
Espumante	1,44	1,28	1,11	0,93	0,76
Peso total	802,68	1.006,58	1.210,29	1.413,90	1.617,46

Para las fundiciones con arena de río para concreto celular, fue primordial la coordinación efectiva de las distintas etapas, para lo cual se creó otro calendario específico. Esta estructuración temporal se ajustó considerando que los ensayos, en este caso, se llevarían a cabo únicamente a 7 días. Así, se estipularon de manera anticipada los momentos adecuados para la fundición, el desencofrado, el curado y, por último, las pruebas de resistencia.

El proceso de mezclado respetó las directrices de la Tabla 10 empleando la mezcladora de eje vertical grande. Sin embargo, una diferencia crucial se presenta en la etapa de adición de la espuma: esta se prepara un minuto antes de su integración. El volumen de espuma requerido se calcula previamente y, de este, se vierte aproximadamente el 90% a la mezcla. Una vez hecho esto, se evalúa la densidad obtenida. Si la mezcla resulta ser más densa de lo previsto, se va añadiendo espuma de manera paulatina hasta lograr la densidad deseada, teniendo siempre en cuenta que no debe superar la cantidad de espuma inicialmente determinada para evitar comprometer la densidad final del concreto.

Con la mezcla debidamente preparada, se procede a vaciar el material en las 6 formaleas cilíndricas y las 6 cúbicas. Una vez llenadas, se trasladan al espacio designado para comenzar su

fraguado, posteriormente el desencofrado y curado (Figura 45). Finalmente se ensayaron a compresión transcurridos 7 días desde su fundición (ASTM C796, 2019b; NTC 673, 2021).

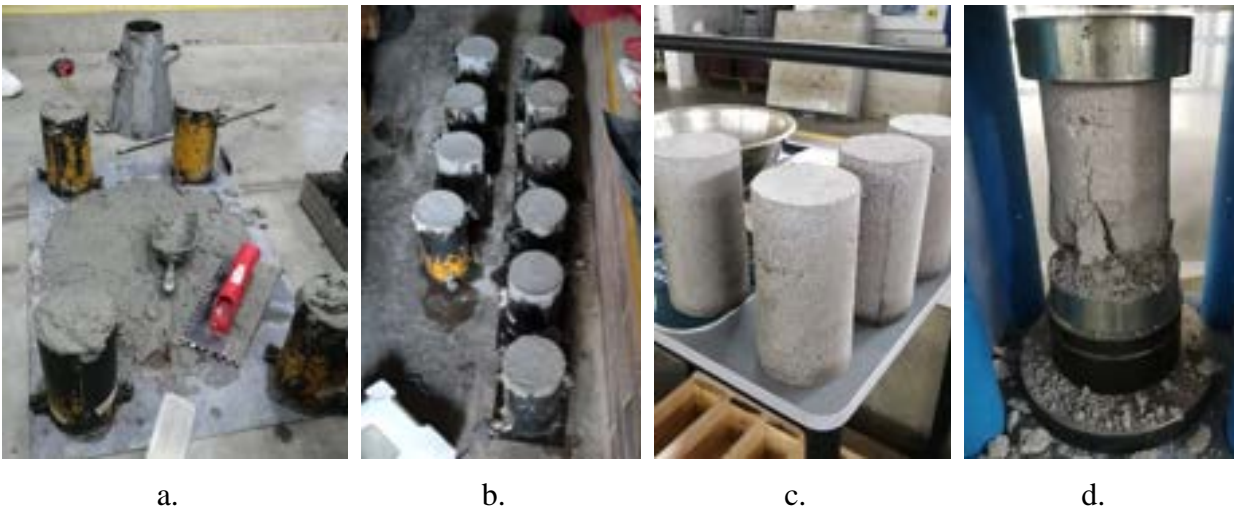


Figura 45: Proceso de fabricación y ensayo de cilindros: a) vaciado de mezcla en formaletas previo a enrasar, b) fraguado de muestras, c) desencofrado de cilindros e inicio de curado, d) ensayo a compresión

3.4 Ensayos en bloques y muretes

En este último subcapítulo se detalla el proceso de fabricación y ensayo del prototipo de bloque de concreto celular, así como su integración en muretes. Estos procedimientos son el resultado de las investigaciones y pruebas llevadas a cabo en las etapas previas. Las propiedades de los materiales, las distintas variables que influyen en el comportamiento del concreto celular y las curvas que relacionan resistencia y densidad, convergen como pilares fundamentales para la creación de este prototipo.

Dentro de este marco, se desarrolla una prueba piloto de bloques de concreto, para abordar desafíos durante el proceso como la magnitud de la mezcla a fundir, la obtención de una densidad y consistencia uniformes entre diferentes fundiciones y la elección apropiada del tipo y diseño de las formaletas. En el siguiente paso, se define la forma del bloque de concreto celular. Esta elección se basa en las normas nacionales y también toma como referencia los bloques de arcilla que se encuentran en el mercado.

El capítulo culmina con la fabricación de una serie de bloques. Estos no sólo se someten a ensayos de compresión y absorción para evaluar sus propiedades individuales, sino que también

se integran en muretes. Estas estructuras ofrecen la posibilidad de analizar el comportamiento del concreto celular en escenarios que replican condiciones de uso reales, aportando una visión completa y contextualizada sobre su desempeño y potencial.

3.4.1 Prueba piloto de fabricación de bloques

La realización de esta prueba piloto resulta esencial antes de la producción definitiva de cualquier producto. En el caso de los bloques de mampostería de concreto celular, esta etapa permitió afrontar ciertos desafíos en el proceso de fundición y ajustar diversos parámetros para garantizar el producto final esperado.

Hasta el momento, las experiencias de fundición se habían limitado a muestras cúbicas y cilíndricas utilizando formaletas metálicas ya estandarizadas. Esta práctica, aunque esencial para pruebas preliminares, simplifica el proceso de vaciado al tratarse de un método ya conocido y controlado. Sin embargo, la transición hacia la producción de bloques requiere enfrentar desafíos adicionales.

Uno de los retos más importantes radica en la cantidad de mezcla necesaria para el llenado óptimo de la formaleta del bloque. La mezcladora de eje vertical grande que se ha utilizado previamente tiene una capacidad de 20 litros de mezcla. No obstante, la producción de bloques de mampostería demanda un volumen mayor al que esta herramienta puede proporcionar. Esto plantea la necesidad de reevaluar las herramientas y técnicas utilizadas hasta el momento, para garantizar un vaciado uniforme y eficiente.

Con respecto a la formaleta para los bloques, se propone su fabricación en madera. Esta decisión se basa en la flexibilidad de este material para ser adaptada a medidas estándar, así como en su capacidad para soportar las presiones y condiciones asociadas con el proceso de fundición del concreto celular.

Para la prueba piloto se procedió a fundir un total de 8 bloques de mampostería. Estos bloques fueron sometidos a dos tipos de curado diferentes, permitiendo comparar y analizar los efectos de cada método en las propiedades finales del bloque. Adicionalmente, se programaron dos fechas diferentes para el ensayo de resistencia, a 7 y 28 días, buscando identificar variaciones en el comportamiento del bloque con el tiempo.

La elaboración de bloques de mampostería de concreto celular requiere una serie de decisiones fundamentales en cuanto a diseño y preparación. El primer paso esencial previo a la fundición y fabricación de la formaleta es determinar la geometría exacta del bloque. Tomando como punto de referencia los bloques macizos de arcilla, que son ampliamente utilizados regionalmente (usados en la construcción como bloque no estructural en viviendas de uno y dos niveles) y que poseen dimensiones estándar de 8x11x24 cm, se decide adaptar estas medidas para obtener un bloque de 10x12,5x22 cm.

Con las dimensiones definidas, se procede a la fabricación de la formaleta. Para ello, se utiliza madera de pino, conocida por su resistencia y durabilidad. Esta formaleta se diseña con ocho secciones, cada una reflejando las dimensiones propuestas, lo que facilita la producción simultánea de varios bloques y optimiza la eficiencia del proceso, como se observa en la Figura 46.



Figura 46: Juego de tres formaletas fabricadas en madera de pino con 8 secciones de 10x12,5x22cm.

En cuanto a los materiales para la fundición, se selecciona arena de río debido a su capacidad para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, el cemento, se opta por el UG, principalmente por ser una opción más económica y adecuada para esta etapa piloto. Adicionalmente, se utiliza el aditivo espumante Concrecell 33 empleando la máquina espumante. Las propiedades para el día de la fundición se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36: Parámetros de fundición: Prueba piloto de fabricación de bloques con arena de río

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.600 kg/m ³	Fresca
Cemento	UG	$G_C = 2,97 \text{ g/cm}^3$
Arena	Rio	$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$
		$Ab = 1,70 \%$
		$H = 5,26\%$
Aditivo espumante	Concrecell 33	Espuma preformada – máquina espumante aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,91$
Agua/cemento		0,5

Para los 8 bloques de mampostería, se requiere un volumen inicial estimado 25,3 litros (incluyendo desperdicio). En la Tabla 37 se presenta las cantidades de materiales necesarios por 1 m³ y para la cantidad de mezcla requerida ajustándose según la humedad de la arena.

Tabla 37: Cantidades de materiales en peso para 1 m³ de concreto celular para prueba piloto de fabricación de bloques con arena de río

Material	Cantidad para 1m ³ (kg)	Cantidad para 25.300 cm ³ (kg)
Cemento	382,14	9,67
Agua	123,79	3,13
Arena	1.080,83	27,35
Espuma	30,70	776,62 g
Agua	29,95	757,68 g
Espumante	0,75	18,94 g
Peso total	1617,46	40,92

Dado el volumen requerido de 25,3 litros para la mezcla, y considerando que la mezcladora de eje vertical grande tiene una capacidad máxima de 20 litros, se ha optado por utilizar la mezcladora planetaria de concreto del laboratorio de mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana – Cali, con una capacidad de hasta 40 litros (Figura 47).



Figura 47: Mezcladora planetaria de 40 litros.

Aunque el proceso de mezclado se asemeja en gran medida al de fundiciones anteriores, como se detalla en la Tabla 10, la nueva máquina presenta desafíos específicos. Su diseño incluye piezas móviles en el fondo, en consecuencia, orificios, complicando la contención del agua agregada inicialmente. A pesar de ello, se ha adaptado un nuevo procedimiento de mezcla que se expone en la Tabla 38.

Tabla 38: Proceso de mezclado en maquina planetaria.

Proceso	Descripción	Tiempo acumulado
Agregar ½ de arena	Inicio	0
Agregar ½ de agua	Mezclar por 60 segundos	1:00 minuto
Agregar ½ de cemento	Mezclar por 60 segundos	2:00 minutos
Agregar ½ de arena, cemento y agua	Mezcla por 60 segundos	3:00 minutos
Pausa	Espera de 30 segundos	3:30 minutos
Continúa mezcla	Mezclar por 30 segundos	4:00 minutos
Pausa	Raspar paredes con mezcla adherida durante 30 segundos	4:30 minutos
Continúa mezcla	Mezclar por 1 minuto	5:30 minutos
Adicionar espuma	Pausar mezcla para adicionar espuma y mezclar durante 1 minuto	6:30 minutos

Respecto a la incorporación de espuma, se sigue el protocolo de las fundiciones "Curvas con arena de trituración y río", comenzando con el 90% del contenido previsto y aumentando el según la densidad observada. Tras lograr la mezcla deseada de concreto celular, esta se vierte en la formaleta de madera, produciendo los ocho bloques. Cabe destacar que todos serán sometidos a ensayos de compresión (NTC 4024, 2023) bajo dos condiciones distintas: diferentes edades (7 y 28 días) y métodos de curado (aire e inmersión).

El tratamiento de los bloques, posterior al proceso de curado, se presenta en la Figura 48.

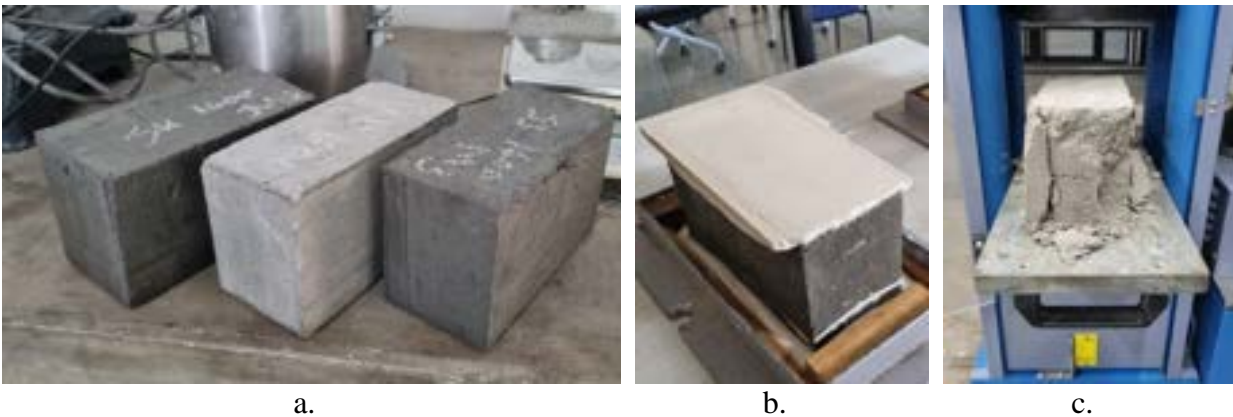


Figura 48: Bloques obtenidos de la prueba piloto a) una vez finalizado el proceso de curado, b) en proceso de refrentado con yeso y c) ensayado a compresión

3.4.2 Definición de geometría y dosificación de bloques

El primer paso en el proceso de fabricación de bloques de mampostería utilizando concreto celular es la selección de las dimensiones del bloque. Para asegurar que el bloque no resulte pesado, se opta por una densidad de 1.400 kg/m^3 . Sin embargo, debido a esta densidad, es altamente probable que la resistencia del concreto celular, y, en consecuencia, la del bloque, no alcance la categoría de mampostería estructural. En lugar de ello, se ajusta a la norma técnica colombiana NTC 4076 (2017) de unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural.

Para la elección de la geometría, se tomó como referencia el bloque de arcilla no estructural comúnmente empleados en esta región y distribuido por varias ladrilleras como Ladrillera Meléndez SA, Ladrillera La Sultana, Ladrillera San Benito, entre otras. Los bloques de arcilla suelen tener perforaciones horizontales, lo que contribuye a su peso reducido (Figura 49). Por lo

tanto, la geometría seleccionada para el bloque de concreto celular será de 10x20x30 cm, lo que garantiza su compatibilidad con estos bloques de arcilla.



Figura 49: Bloque perforado de mampostería no estructural con dimensiones de 10x20x30 cm y peso promedio de 4,5 kg. Fuente: www.ladrillerasanbenito.com

Es importante destacar que, debido a la densidad seleccionada y las dimensiones del bloque, el bloque de concreto celular tendrá un peso de aproximadamente 8.4 kg, lo cual es significativamente mayor que el peso promedio de los bloques de arcilla, que suele ser alrededor de 4.5 kg. Esta diferencia en el peso debe ser considerada en aplicaciones constructivas, ya que puede tener implicaciones en el manejo y la instalación de estas unidades.

3.4.3 Fabricación de bloques y muretes

La prueba piloto previa sirvió como experiencia para la fabricación de los bloques de concreto celular. Se ajustaron variables como la preparación de las formaletas, el vaciado de la mezcla y el proceso de desencofrado, lo que ha permitido mejorar la eficiencia y la calidad en el proceso de producción.

Ahora que se ha definido la geometría de los bloques de mampostería, se decidió proceder con las fundiciones correspondientes. Para realizar los ensayos necesarios, se requerirá la producción de un mínimo de 12 bloques utilizando la misma mezcla. De estos bloques, 3 serán destinados a pruebas de resistencia, otros 3 a pruebas de absorción y los 6 restantes se utilizarán para la fabricación de 3 muretes, cada uno compuesto por dos bloques. La etapa de ensayos se llevará a cabo a los 28 días después de la fundición, empleando el método de curado por aire.

Para la fundición de los bloques de concreto celular, se ha requerido la fabricación de un nuevo juego de formaletas debido a las dimensiones específicas de los bloques. Las formaletas utilizadas

en la prueba piloto no son adecuadas debido a que sus medidas no coinciden con las de los bloques definitivos. Para ello, se han fabricado nuevas formaletas a partir de paneles de MDF laminados. La elección de este material se basa en su superficie lisa, que mejora el acabado de los bloques y facilita el proceso de desmolde (Figura 50). Además, el MDF laminado elimina los inconvenientes de imperfecciones que a menudo se encuentran en la madera de pino utilizada en las formaletas de la prueba piloto.



Figura 50: Formaletas en panel MDF laminado con capacidad para 6 bloques cada una.

Estas nuevas formaletas se han diseñado para acomodar un total de 6 bloques cada una, lo que optimiza el proceso de fundición y permite una producción más eficiente. En términos de materiales utilizados en la mezcla de concreto celular, se ha optado por la arena de río debido a su buena trabajabilidad, cemento ART y el aditivo espumante Concrecell 33 por su consistencia en el tiempo y su capacidad para generar espuma de manera eficaz a través del cañón de espuma. Las propiedades completas de los materiales se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39: Parámetros de fundición: fabricación de bloques con arena de río

	Tipo	Propiedades
Densidad	1.400 kg/m ³	Fresca
Cemento	ART	$G_C = 3,07 \text{ g/cm}^3$
Arena	Río	$G_A = 2,74 \text{ g/cm}^3$ $Ab = 1,70 \%$ $H = 4,60\%$
Aditivo espumante	Concrecell 33	Espuma preformada – máquina espumante aditivo/agua = 1/40 Eficiencia: $\emptyset_A = 0,91$
Agua/cemento		0,5

Para los 12 bloques de mampostería, se requiere un volumen de 82,8 litros (incluido desperdicio). En la Tabla 40 se presenta las cantidades de materiales necesarios por 1 m³ y para la cantidad de mezcla ajustada según la humedad de la arena.

Tabla 40: Cantidades de materiales en peso para 1 m³ de concreto celular fabricación de bloques de mampostería con arena de río

Material	Cantidad para 1m³ (kg)	Cantidad para 82.800 cm³ (kg)
Cemento	388,11	32,14
Agua	132,03	10,93
Arena	855,48	70,83
Espuma	38,28	3.169,97 g
Agua	37,35	3.092,65 g
Espumante	0,93	77,32 g
Peso total	1.413,90	117,07

El proceso de preparación y mezclado de estos bloques es esencialmente idéntico al que se utilizó en la prueba piloto, manteniendo las mismas características y procedimientos. Sin embargo, la principal diferencia radica en el volumen requerido, que asciende a aproximadamente 83 litros. Para ello, se emplea la mezcladora planetaria con capacidad máxima de 40 litros realizando dos fundiciones por separado, tratando de homogeneizar el procedimiento para obtener las mezclas iguales. Los 12 bloques obtenidos de las dos fundiciones se exponen en la Figura 51.



Figura 51: 12 bloques fundidos de 10x20x30 cm de concreto celular

3.4.4 Ensayos en bloques

Una vez fabricados los bloques, se preparan para obtener las propiedades físico-mecánicas como la resistencia a compresión y absorción de humedad. La norma técnica que rige estos ensayos es la NTC 4076 (2017) de unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto. Los valores mínimos que deben tener las unidades, para cumplir con la norma, se expresan en la Tabla 41.

Tabla 41: Resistencia mínima y Absorción permitida según densidad de unidades de mampostería (NTC 4076, 2017)

Resistencia a la compresión a los 28 d (Rc₂₈)^A, evaluada sobre el área neta promedia (Anp) Mínimo, MPa			
Promedio de 3 unidades		Individual	
6,0		5,0	
Absorción de agua, % según densidad del concreto secado en horno, promedio de 3 unidades, máximo, %			
	Densidad liviana menos de 1.680 kg/m³	Densidad mediana de 1.680 kg/m³ hasta menos de 2.000 kg/m³	Densidad normal, 2.000 kg/m³ o mas
Unidades	18%	15%	12%
^A La resistencia a la compresión se ha especificado a los 28 d. Sin embargo, las unidades se pueden utilizar a edades más tempranas, cuando exista un historial sobre evolución de la resistencia de unidades de iguales características, y éste indique que las primeras alcanzan dicha resistencia. Esto no exime de la verificación directa de la calidad de las unidades			

Los bloques fabricados son sometidos a un proceso de curado que se extiende durante 28 días en el caso de los bloques destinados a ensayos de compresión y los muretes. Para los bloques sujetos a pruebas de absorción de agua, el periodo de curado es de 25 días. Al culminar estos periodos, se procede a la realización de los distintos ensayos. Los bloques designados para pruebas de absorción son sometidos a un mínimo de 3 días en horno (Figura 52, a). Los destinados a ensayos de compresión son preparados (Figura 52, b) y ensayados (Figura 52, c) en la máquina universal de ensayos a una razón de 1,8 kN/s y siguiendo las pautas establecidas en la norma NTC 4024 (2023). Por último, las últimas 6 unidades se reservan para la formación de los 3 muretes.

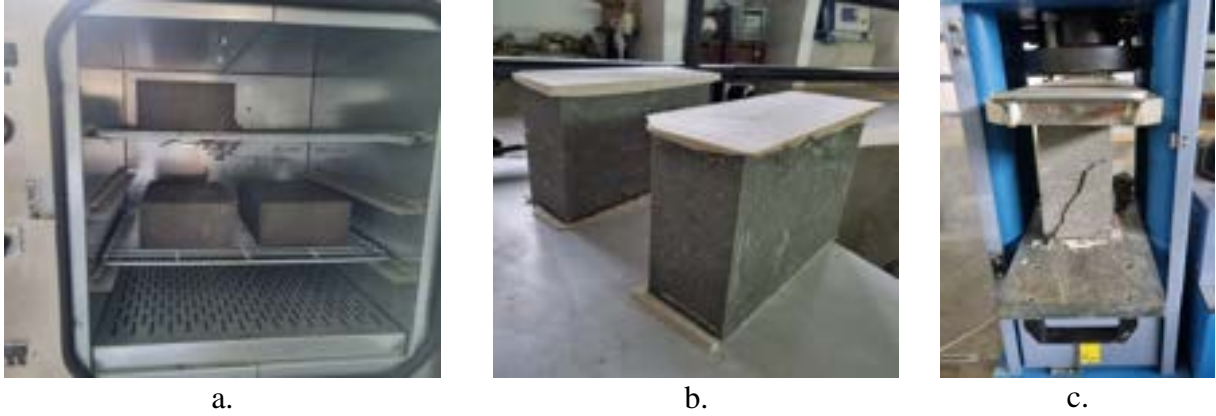


Figura 52: Preparación de bloques para ensayos: a) bloques en horno para absorción b) refrentado y c) ensayo a compresión

3.4.5 Ensayos en muretes

Dentro de los bloques fabricados, se destinan 6 de ellos ya curados para la creación de muretes. El ensayo, así como características geométricas de los muretes se rigen por la norma técnica NTC 3495 (2023) que define el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería. La fabricación de los muretes involucra la preparación del mortero de pega, el cual debe cumplir con características particulares en función de la resistencia de los bloques. Este mortero de pega se ajusta a la norma técnica NTC 3329 (2004) que dicta las especificaciones del mortero para unidades de mampostería.

Siendo elaborado con una relación típica de 1 parte de cemento por 4 partes de arena, y una relación agua-cemento de 0,6.

Una vez fabricados estos elementos (Figura 53, a), se los somete a un periodo adicional de curado de 28 días con el fin de permitir que el mortero de pega alcance la resistencia necesaria. Al concluir este período de curado, se preparan las unidades para los ensayos correspondientes, lo que implica el proceso de refrentado con yeso en las superficies de contacto con la máquina universal de ensayos, asegurando una distribución uniforme de las cargas durante las pruebas, donde finalmente se ensayan a compresión a una razón no superior de 1,8 kN/s (Figura 53, b).



a.



b.

Figura 53: a) Fabricación de los 3 muretes con mortero de pega y b) ensayo a compresión

4 RESULTADOS

En el capítulo anterior, se llevó a cabo el análisis de las variables que inciden en el desempeño del concreto celular. Se inició con la caracterización de los materiales en el capítulo 3.1 y continuó explorando las variables específicas del concreto celular en el capítulo 3.2. Estas variables se evaluaron a través de distintas fundiciones, con el objetivo de obtener resultados que permitieran identificar la alternativa más efectiva en términos de materiales y procesos para la producción de concreto celular.

En este capítulo se presenta los resultados derivados de los diferentes programas de fundiciones discutidos en los capítulos 3.3, centrado en las curvas de densidad versus resistencia, y 3.4, que abordó el proceso de fabricación de bloques y muretes.

4.1 Curva resistencia vs densidad

4.1.1 Curva con arena de trituración (*Mastercell 10*)

En el desarrollo de las cuatro fundiciones piloto programadas, se varió la densidad de manera constante, abarcando desde 1.200 hasta 1.800 kg/m³ en intervalos de 200 kg/m³. Sin embargo, debido a la falta de coincidencia entre las densidades calculadas y las obtenidas, se repitieron tres fundiciones adicionales. Estas discrepancias pueden atribuirse a la falta de equipos especializados en concreto celular y la ausencia de entrenamiento específico en la elaboración de estas mezclas. La limitada tecnología disponible en el laboratorio y la falta de capacitación podrían haber contribuido a los resultados divergentes.

La Figura 54 presenta la curva de resistencia correspondiente a las diferentes densidades, evaluadas tanto a los 7 como a los 28 días desde las fundiciones y curadas en aire. Además, los cilindros utilizados para medir la absorción se sometieron también a ensayos de compresión antes de ser descartados.

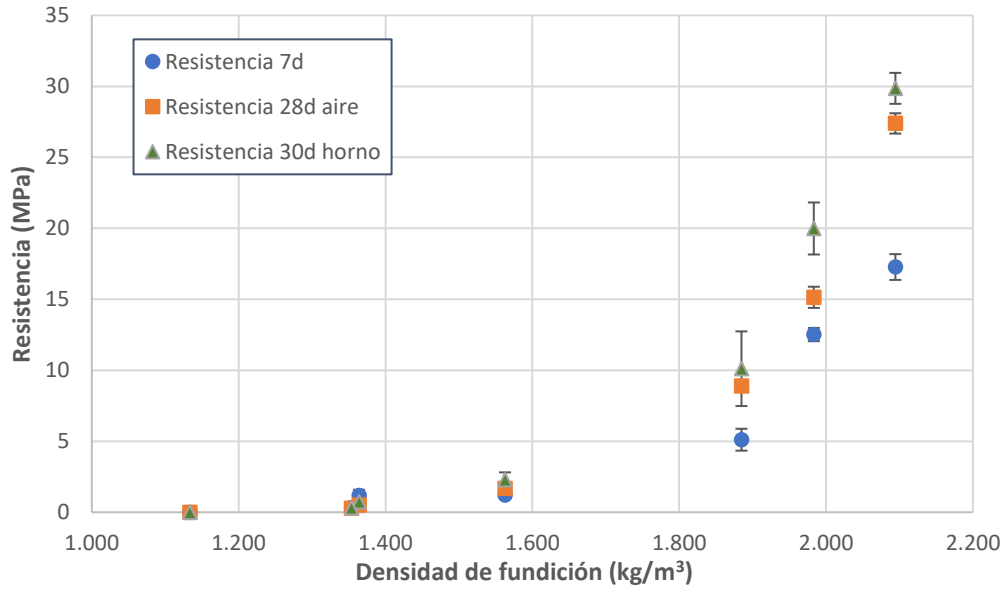


Figura 54: Curva de densidad vs resistencia para fundiciones piloto con arena de trituración y aditivo Mastercell 10.

La Figura 55 presenta los resultados de absorción en el eje vertical izquierdo, así como los datos de la prueba de asentamiento, exhibidos en el eje vertical derecho, en relación con las diversas densidades frescas obtenidas.

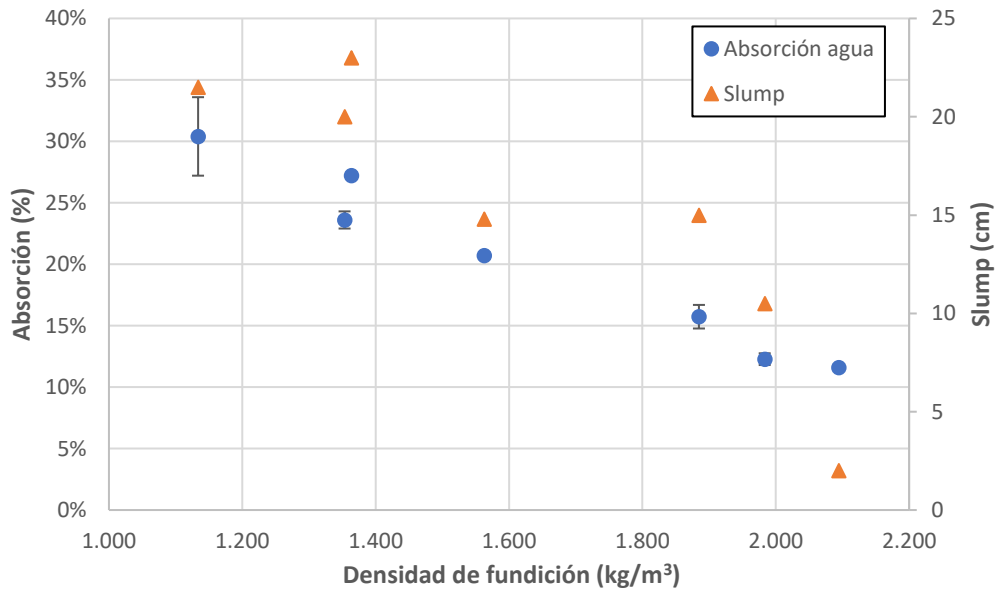


Figura 55: Resultados de absorción y asentamiento para fundiciones piloto con arena de trituración y aditivo Mastercell 10

Los resultados de las gráficas anteriores, tanto de compresión como de absorción y asentamiento se presentan en el Anexo 33 y se resumen en la Tabla 42, así como las fundiciones repetidas subrayadas en la fila correspondiente.

Tabla 42: Resultados de compresión, absorción y asentamiento para curva con fundiciones piloto

#	Densidad fundición kg/m ³	Densidad objetivo kg/m ³	Error %	Resistencia 7d MPa	Resistencia 28d aire MPa	Resistencia 30d horno MPa	Absorción %	Slump cm
1	1.364	1400	2,6	1,2 ± 0,4	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	27 ± 0,1	23,0
2	1.353	1.400	3,3	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,1	24 ± 0,7	20,0
3	1.885	1.800	4,7	5,1 ± 0,8	8,9 ± 0,7	10,1 ± 2,6	16 ± 1,0	15,0
4	1.563	1.600	2,3	1,2 ± 0,2	1,7 ± 0,3	2,3 ± 0,5	21 ± 0,3	14,8
5	1.983	1.800	10,2	12,5 ± 0,5	15,1 ± 0,9	20,0 ± 1,8	12 ± 0,5	10,5
6	1.134	1.200	5,5	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,0 ± 0,0	30 ± 3,2	21,5
7	2.094	1.800	16,3	17,3 ± 0,9	27,4 ± 0,9	29,9 ± 1,1	12 ± 0,1	2,0

En la serie de fundiciones realizadas, se destaca una baja resistencia a compresión en los cilindros obtenidos a densidades más bajas, especialmente por debajo de los 1.600 kg/m³, ya que estas muestras no alcanzan siquiera los 3 MPa, como se evidencia en la Figura 54. Los resultados más satisfactorios se observan después de alcanzar densidades superiores a 1.800 kg/m³, donde las resistencias superan los 8 MPa, siempre y cuando las muestras se curen durante 28 días, indicando que a medida que aumenta el tiempo de curado, se mejoran las resistencias a compresión.

La Figura 55 revela que a medida que aumenta la densidad de fundición, disminuyen los valores tanto de absorción de agua como de asentamiento. Esta consistencia se explica por la relación entre la densidad de la muestra y sus propiedades de trabajabilidad. A densidades más bajas, la fundición se vuelve más trabajable, lo que resulta en un mayor asentamiento. Además, a menor densidad, se observa un mayor contenido de aire, lo que se traduce en una mayor capacidad de absorción de agua.

Sin embargo, las fundiciones con densidades superiores a 1.800 kg/m³ presentaron valores bajos de asentamiento, lo que dificulta el vaciado de las formas requiriendo una compactación adicional, pues a menor trabajabilidad se incrementa la inclusión de aire atrapado (vacíos de gran tamaño) que afectan las propiedades mecánicas. Es importante destacar que la autocompactación del concreto celular debe ser una de las propiedades a alcanzar, ya que los procesos tradicionales

de vibrado o compactación podrían resultar perjudiciales al eliminar las burbujas de aire deseadas que se forman al interior durante la generación de espuma. Esto podría comprometer la densidad y, en consecuencia, afectar sus propiedades mecánicas.

Debido a estas densidades más altas, fue necesario repetir las fundiciones para reducir la discrepancia entre la densidad calculada y la obtenida, contribuyendo así a minimizar errores experimentales.

4.1.2 Curva con arena de río (Concrecell 33)

Gracias a la experiencia acumulada en las fundiciones piloto previas, en esta ocasión se llevaron a cabo seis fundiciones. Ante la discrepancia en la densidad obtenida y calculada para los 1.200 kg/m^3 , se realizó una fundición adicional, repitiéndola hasta lograr un resultado más preciso. Los cilindros resultantes se sometieron a ensayos de compresión a los 7 días, destinando muestras tanto a curado en aire como en inmersión. Además, se fundieron probetas de 5 cm por lado, cuyos resultados de resistencia a compresión fueron comparables a los obtenidos con los cilindros. Los resultados obtenidos tanto para los primas y cilindros se presentan en el Anexo 34, resaltando que no hubo diferencias significativas de resistencias entre estos dos tipos de muestras. La curva correspondiente a las mezclas con arena de río y aditivo espumante Concrecell 33, para muestras cilíndricas, se presenta en la Figura 56.

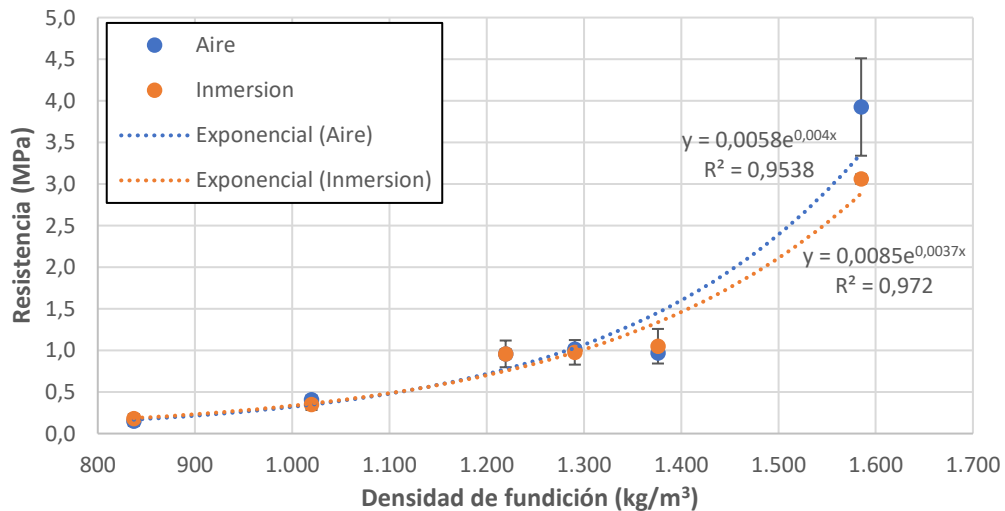


Figura 56: Curva de densidad vs resistencia en cilindros para fundiciones con arena de río y aditivo Concrecell 33

Los resultados de resistencia promedio a compresión, para cilindros, curados tanto en aire como en inmersión se resumen en la Tabla 43.

Tabla 43: Resultados de compresión para muestras curadas en aire e inmersión

#	Densidad fundición kg/m ³	Densidad teórica kg/m ³	Error %	Resistencia 7d aire MPa	Resistencia 7d inmersión MPa
1	1.585	1.600	0,9	3,9 ± 0,6	3,1 ± 0,1
2	1.376	1.400	1,7	1,0 ± 0,0	1,1 ± 0,2
3	1.219	1.200	1,6	1,0 ± 0,2	1,0 ± 0,1
4	1.020	1.000	2,0	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1
5	837	800	4,6	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1
6	1.291	1.400	7,8	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,1

En esta nueva serie de fundiciones, se lograron mejoras leves en la resistencia a compresión. Específicamente, para una densidad de fundición de 1.600 kg/m³, se alcanzó un valor de más de 3 MPa en muestras curadas en inmersión y casi 4 MPa en muestras curadas al aire. Estos resultados representan una mejora significativa con respecto a la fundición de prueba piloto, donde para la misma densidad no se logró alcanzar ni siquiera los 3 MPa, incluso después de un curado de 28 días.

A pesar de estas mejoras con respecto a las pruebas piloto anteriores, los resultados continúan siendo moderados en términos de resistencia a compresión, ya que no superan los 5 MPa, incluso para densidades de hasta 1.600 kg/m³. Se confirma la tendencia de que el curado en aire proporciona ligeramente mayores resistencias en comparación con el curado en inmersión. Este método de curado se selecciona para su aplicación en las fundiciones de bloques, al igual que la utilización de arena de río y el aditivo espumante Concrecell 33.

La reducción en la densidad del concreto celular tuvo un impacto significativo en la resistencia a la compresión, y este efecto puede atribuirse a dos factores fundamentales. En primer lugar, la baja trabajabilidad del material resultó en la falta de autocompactación, lo que llevó a un aumento en la retención de aire atrapado, y, en segundo lugar, las elevadas relaciones agua/cemento contribuyeron a esta disminución en la resistencia.

Ante este escenario, es necesario explorar estrategias para mejorar la resistencia a la compresión de este concreto. Una medida efectiva puede ser la reducción de la relación agua/cemento mediante la incorporación de aditivos plastificantes. Estos aditivos no solo mejorarán la trabajabilidad del concreto, facilitando su colocación y compactación, sino que también contribuirán a optimizar la resistencia final. Asimismo, se puede considerar el enriquecimiento de la matriz con la adición de fibras.

4.2 Ensayos en bloques y muretes

4.2.1 Prueba Piloto

En la prueba piloto de fundición de bloques de mampostería, se enfrentaron desafíos al determinar la densidad de la mezcla fresca. A pesar de ello, el promedio de densidad de los bloques, después de 7 días de curado en aire, fue de $1.482 \pm 21,4 \text{ kg/m}^3$. Basándose en fundiciones anteriores, la densidad del material curado en aire después de 7 días es aproximadamente 80 kg/m^3 menor que la densidad fresca. Por ende, se estima que la densidad fresca rondó los 1.537 kg/m^3 , un valor cercano a la densidad teórica calculada de 1.600 kg/m^3 . Esta cifra es aceptable, considerando la fundición realizada con la máquina planetaria, que, hasta el momento, no se había empleado.

Los resultados de resistencia a compresión para los ocho bloques se encuentran detallados en el Anexo 35 y se resumen en la Tabla 44.

Tabla 44: Resistencia a compresión para fundición piloto de bloques

Tiempo ensayo (días)	Resistencia a compresión (MPa)	
	Curado en aire	Curado en inmersión
7	$2,8 \pm 0,0$	$2,9 \pm 0,4$
28	$3,1 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,2$

En este ensayo, se observa una ventaja en la resistencia para los bloques curados en inmersión. Se presenta una leve mejora en la resistencia a los 7 días y una diferencia significativa de más de 1 MPa a los 28 días respecto a la resistencia obtenida en los bloques curados en aire. Este resultado contrasta con las conclusiones obtenidas en la curva con arena de trituración, y puede deberse a la interacción del curado por inmersión, que favoreció más al cemento UG.

4.2.2 Ensayos en bloques

Dada la capacidad de 40 litros de la mezcladora planetaria, se llevaron a cabo dos fundiciones para la fabricación de los 12 bloques de mampostería. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos por estandarizar el procedimiento, las densidades frescas variaron ligeramente entre las dos, con la primera registrando 1.332 kg/m^3 y la segunda 1.369 kg/m^3 , frente a una densidad objetivo de 1.400 kg/m^3 .

De los 12 bloques fabricados, se seleccionaron tres para someterse a pruebas de compresión, obteniendo una resistencia promedio de $1,46 \text{ MPa}$, con una desviación estándar de $0,5 \text{ MPa}$, lo que representa un coeficiente de variación del $34,25\%$. En cuanto a la absorción, los tres bloques destinados a las pruebas presentaron un promedio del $18,1\%$, con una desviación estándar de $0,6\%$, lo que equivale a un coeficiente de variación del $3,31\%$. Estos coeficientes de variación sugieren una variabilidad relativamente alta en las mediciones de resistencia a la compresión, lo que podría indicar una falta de uniformidad en la calidad de los bloques. Sin embargo, en el caso de la absorción, la variabilidad es mucho menor, lo que sugiere una mayor consistencia en los resultados. Estos resultados se detallan en el Anexo 36 y se resumen en la Tabla 45 y Anexo 36.

Tabla 45: Resultados de compresión y absorción de bloques de mampostería

Resultados a 3 días		Resultados a 28 días	
Densidad desencofrado kg/m^3	Peso kg	Resistencia a compresión MPa	Absorción $\%$
$1.305,4 \pm 58,3$	$7,9 \pm 0,36$	$1,46 \pm 0,5$	$18,1 \pm 0,6$

Es importante destacar que los resultados de compresión de los bloques están por debajo de los valores mínimos recomendados por la norma NTC 4076 (2017) para su uso en mampostería no estructural. Según la Tabla 41, la resistencia promedio de 3 unidades debería ser de al menos 6 MPa . Por otro lado, a pesar de estar cerca del límite permitido, la absorción de los bloques supera el 18% para densidades inferiores a 1.680 kg/m^3 , según esta misma tabla. Estos hallazgos plantean consideraciones importantes sobre la capacidad de estos bloques para aplicaciones específicas en construcción, pues no clasifican para su uso en mampostería no estructural. Cabe destacar, especialmente en el contexto de los bajos resultados de compresión observados en la curva de resistencia con arena de río y aditivo Concrecell 33, que se deben implementar estrategias

adicionales para mejorar la resistencia de los bloques sin comprometer la densidad del material. Se sugiere la exploración de medidas como la reducción de la relación agua/cemento o la incorporación de fibras.

4.2.3 Ensayos en muretes

Los muretes se fabricaron con los seis bloques restante provenientes de las fundiciones en la mezcladora planetaria. Estos se componen de dos bloques en cada uno, generando un total de tres muretes. Para garantizar la cohesión adecuada, se empleó mortero de pega fabricado bajo la norma NTC 3329 (2004), exhibiendo una resistencia promedio de $12,5 \pm 0,8$ MPa a los 28 días. Los ensayos de resistencia en los muretes se llevaron a cabo después de 28 días desde su fabricación, o más específicamente, 56 días desde la fundición de los bloques que los componen.

La resistencia promedio registrada para los tres muretes fue de $1,52 \pm 0,2$ MPa. Esta desviación estándar del 13.2% sugiere una consistencia relativamente baja entre las muestras ensayadas. Este valor, aunque dentro de los rangos aceptables, indica una variabilidad significativa en las resistencias individuales de los muretes. Estos resultados, junto con los datos de los bloques, se detallan en el Anexo 37.

Estos resultados a compresión son consistentes con los obtenidos de los bloques individuales, mostrando similitudes notables en los promedios de resistencia. Mientras que los bloques individuales presentaron una resistencia promedio de $1,46 \pm 0,5$ MPa, los muretes exhibieron una resistencia ligeramente superior de $1,52 \pm 0,2$ MPa. Esta diferencia se atribuye al tiempo adicional de curado que experimentaron los muretes por la adquisición de resistencia del mortero de pega.

Es imperativo resaltar que tanto los bloques como los muretes no cumplieron con las especificaciones técnicas establecidas por las normas NTC 3495 (2023) y NTC 4026 (1997) para mampostería no estructural de concreto. En consecuencia, si se considera utilizar el concreto celular como materia prima para bloques en el futuro, será necesario implementar estrategias para mejorar sus propiedades mecánicas.

5 CONCLUSIONES

- El proceso experimental inició con la caracterización de los materiales, adquiridos en las proximidades de Cali, Colombia. Esta fase, llevada a cabo conforme a las normas técnicas colombianas, fue esencial, ya que los valores obtenidos orientaron todas las dosificaciones de las mezclas subsiguientes. Se destaca el rápido proceso de fraguado del cemento ART frente al UG, permitiendo reducir significativamente los tiempos de curado y, por consiguiente, agilizando la realización de los diferentes ensayos, así como una posible aplicación en la industria de los prefabricados de concreto.
- Existe diversidad de aditivos espumantes disponibles en el mercado los cuales revelaron notables diferencias en su desempeño. Aditivos como Mastercell 10 y Eucozell 33 demostraron eficacia al incorporarse directamente a la mezcla de mortero, mientras que el aditivo Concrecell 33 exhibió su mayor rendimiento en la formación de espuma. Este patrón también se reflejó en los métodos de producción de espuma, donde la máquina espumante destacó al generar densidades superiores en comparación con el tanque espumante y el taladro con aditamento.
- El análisis de variables como la generación de espuma, la metodología de mezclado, el tipo de curado y la relación agua/cemento revelaron su impacto directo en las propiedades mecánicas del concreto celular. Se observó que las dosificaciones iniciales propuestas por Acosta & González (2003a) presentaban relaciones a/c notablemente más bajas en comparación con la metodología de la norma ACI 523.3R-14 (2014). La transición a esta última no solo corrigió este aspecto, sino que también condujo a mejoras sustanciales en consistencia y resistencia.
- Durante el proceso experimental, se llevaron a cabo fundiciones y ensayos en probetas cilíndricas, requiriendo volúmenes de mezclado mayores, siendo necesario el empleo de mezcladores con mayor capacidad. Los resultados de estos ensayos contribuyeron a la formación de la curva de densidad versus resistencia, destacando resistencias relativamente bajas para las densidades menores, en especial, las que están por debajo de los 1.400 kg/m^3 . El diseño del prototipo de bloque de mampostería se basó en estos resultados, con la particularidad de que se optó por densidades más bajas para los bloques, ya que densidades mayores resultaban en unidades más pesadas y, por ende, menos prácticas.

- A pesar de los esfuerzos destinados a lograr resistencias significativas en el contexto de este concreto liviano, la superación del umbral mínimo de resistencia establecido por la norma nacional NTC 4076 (2017) se mostró como un desafío considerable. Esta dificultad puede atribuirse a factores como la trabajabilidad del concreto (autocompactante) y la alta relación agua/cemento. En consecuencia, los bloques obtenidos en este estudio no cumplen con los requisitos necesarios para ser considerados aptos en aplicaciones de mampostería no estructural.
- Es importante destacar que todas las mezclas y ensayos realizados durante este estudio se llevaron a cabo utilizando equipos estándar del laboratorio, diseñados para concretos convencionales. No contar con equipos especializados para fabricar concreto celular pudo haber influido en el desempeño inferior de las mezclas y de los resultados obtenidos. Además, la sensibilidad del equipo de compresión ante las bajas resistencias encontradas en las muestras de concreto celular también pudo inducir un margen de error en los resultados.
- La normativa existente para bloques de concreto convencionales no es directamente aplicable a los bloques de concreto celular desarrollados en este estudio. Las propiedades y características únicas del concreto celular, como su menor densidad y composición específica, hacen que los estándares de la normativa actual no sean adecuados para evaluar o guiar la calidad de estos nuevos bloques. Por lo tanto, se necesita pensar en la elaboración de nuevas normativas nacionales que se ajusten a las propiedades del concreto celular, reconociendo las diferencias fundamentales que existen entre este y el concreto convencional. Esta necesidad se justifica plenamente al considerar las ventajas sobresalientes del concreto celular, que incluyen un rendimiento térmico y acústico superior, sostenibilidad, baja densidad, entre otros aspectos. Estas características únicas subrayan la importancia de desarrollar estándares específicos que reflejen y promuevan las cualidades positivas del concreto celular en comparación con sus contrapartes convencionales.

5.1 Recomendaciones para trabajos futuros

Estas recomendaciones pueden guiar futuras investigaciones hacia el refinamiento y la expansión del conocimiento en el campo del concreto celular, facilitando su integración exitosa en la industria de la construcción:

- **Estudio de propiedades térmicas y acústicas:** Aunque el presente trabajo se centró en propiedades mecánicas, sería valioso realizar investigaciones adicionales sobre las características termoacústicas del concreto celular. Evaluar su capacidad para aislar el calor y el sonido podría ampliar su aplicabilidad en diferentes contextos constructivos.
- **Optimización de aditivos y métodos de producción de espuma:** Dada la influencia significativa de los aditivos espumantes y los métodos de generación de espuma en las propiedades del concreto celular, se recomienda una exploración más detallada. Investigar nuevas formulaciones y técnicas podría mejorar aún más la consistencia y desempeño del material, especialmente la integración de la espuma con el mortero
- **Variación en la relación agua/cemento:** La relación a/c demostró ser una variable crucial en el desarrollo del concreto celular. Futuros estudios podrían explorar una gama más amplia de relaciones para comprender mejor sus efectos y encontrar un equilibrio óptimo entre trabajabilidad y resistencia.
- **Incorporación de fibras y aditivos plastificantes:** Para mejorar la resistencia a la compresión del concreto celular, se sugiere investigar el impacto de la incorporación de fibras y aditivos plastificantes. Estos elementos podrían contribuir a fortalecer el material sin comprometer su densidad.
- **Desarrollo de Normativa Específica:** Dada la falta de normativas específicas para bloques de concreto celular en el ámbito nacional, se insta a futuros trabajos a abogar por el establecimiento de estándares que se adapten a las características únicas de este material. Esto facilitaría su aplicación en proyectos de construcción y garantizaría la seguridad y eficacia de las estructuras construidas con este tipo de concreto.
- **Evaluación en escala real:** Aunque se realizaron pruebas en bloques y muretes, estudios futuros podrían abordar la evaluación del concreto celular en proyectos a mayor escala. La implementación en estructuras reales proporcionaría información valiosa sobre su comportamiento en condiciones de aplicación práctica.
 - **Análisis de costos y sostenibilidad:** Considerar el análisis de costos y la evaluación de la sostenibilidad del concreto celular en comparación con materiales convencionales sería esencial para comprender su viabilidad económica y ambiental en proyectos de construcción a gran escala.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd elaty, M. abd allah. (2014). Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. *HBRC Journal*, 10(2), 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.09.005>
- ABNT NBR 10908. (2008). *Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização*.
- Acevedo Agudelo, H., Vásquez Hernández, A., & Alejandro Ramírez Cardona, D. (2012). *Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia* (Issue 1).
- ACI 213. (2014). *Guide for structural lightweight concrete (ACI 213R-14)*.
- ACI 523.3R-14. (2014). Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft³ (800 kg/m³) (ACI 523.3R-14). *ACI Manual of Concrete Practice*, 3.
- Acosta, L., & González, T. (2003a). *Evaluación de propiedades del Concreto Celular*. Universidad de Sonora.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; A review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- ASTM C305-06. (2011). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*.
- ASTM C495/C495M – 12. (2019). *Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0495_C0495M-12R19
- ASTM C796/C796m-19. (2019). *Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam I*. https://doi.org/10.1520/C0796_C0796M-19
- ASTM D1217-20. (2020). *Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer*.
- CAMACOL, C. C. de la C. (2021). *Déficit habitacional 2020: medición con base en la Encuesta de Calidad de Vida*. 16.

- CAMACOL, & URBANA. (2022). *Estudio de oferta y ventas de vivienda 2021 - Cali, Jamundí, Palmira y Candelaria*.
- Cervantes Abarca, A. (2008). Nuevas Tecnologías en Concretos: Concreto Celular - Concreto Reforzado con Fibra - Concreto Ligero Estructural. In *Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño*.
- Chen, Z. M., & Chen, G. Q. (2011). An overview of energy consumption of the globalized world economy. *Energy Policy*, 39(10), 5920–5928. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.046>
- Chiappe de Villa, M. L., & ECLAC, UN. (1999). *La política de vivienda de interés social en Colombia en los noventa /*.
- Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>
- DANE. (2021a). Boletín técnico Vivienda VIS y No VIS. *Información IV Trimestre 2021*, 1–39.
- DANE. (2021b). *Vivienda VIS y No VIS*. Boletín de Prensa DANE. <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/vivienda-vis-y-no-vis>
- Dimoudi, A., & Tompa, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1–2), 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.008>
- Doniec, A. (2008). A cellular concrete material used for thorough cleaning of wastewater generated in electroplating process. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 10(3), 263–268. <https://doi.org/10.1007/s10098-007-0105-8>
- Fouad, F. (2008). Chapter 47: Cellular Concrete. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, 561–561–569. <https://doi.org/10.1520/stp37765s>
- García, J., Stand, F., Gómez, A., & Nuñez, F. (2016). *Comparación de los principales sistemas constructivos de VIS en Colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso estudio en Soacha*.
- Guzmán, D. S. De. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (L. EDITORES, Ed.; 5th ed.).

- Huertas, N. (2021). *DISEÑO DE MEZCLA DE UN CONCRETO CELULAR DE BAJA DENSIDAD UTILIZANDO RESIDUOS DE CANTERA*. UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA.
- Izquierdo, M., & Ortega, O. (2017a). *Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones*.
- Lazo, J. (2017). Diseño de concreto celular para diferentes densidades, análisis de sus propiedades y sus aplicaciones. In *Universidad Nacional de San Agustín*.
- Luzardo, J., & Arraga, R. (2004). *Análisis del concreto celular y sus aplicaciones en la fabricación de paneles livianos*. Rafael Urdaneta.
- McCormick, F. C. (1967). Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete. *ACI*, 64(2), 104–110.
- Medina, D. L., & Yañez, S. P. (2014a). Análisis de viabilidad para el uso del mortero celular en Colombia a partir de la revisión del estado del arte. In *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Mejía Martino, M. E. (2011). *COMPONENTES ALTERNATIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA AMBIENTALMENTE SOSTENIBLE*.
- Muñoz Cruz, L. M., Arcila Bastidas, J. P., López Meneses, I. S., Delgado Echeverri, J. J., Aparicio Rengifo, R., & Pérez Velásquez, J. A. (2020). Una estética de la vivienda de interés social: desarrollos progresivos en Palmira, Colombia (2000-2017). *Revista INVI*, 35(98), 75–100. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582020000100075>
- NTC 77. (2018). *CONCRETOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS*.
- NTC 92. (2019). *Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados*.
- NTC 110. (2019). *CEMENTOS. CANTIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA LA CONSISTENCIA NORMAL DE UNA PASTA DE CEMENTO HIDRÁULICO*.
- NTC 112. (2021). *Cementos. Mezcla mecánica de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica*.

- NTC 118. (2020). *Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat.*
- NTC 127. (2000). *Concretos. Metodo de ensayo para determinar las impurezas organicas en agregado fino para concreto.*
- NTC 174. (2018). *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.*
- NTC 220. (2022). *Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado.*
- NTC 221. (2019). **CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO.**
- NTC 237. (2020). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.*
- NTC 396. (2021). *Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.*
- NTC 673. (2021). *Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.*
- NTC 1377. (2021). *Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio.*
- NTC 1776. (2019). *Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados.*
- NTC 1926. (2013). **CONCRETOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD (MASA UNITARIA), EL RENDIMIENTO Y EL CONTENIDO DE AIRE POR GRAVIMETRÍA DEL CONCRETO.**
- NTC 3329. (2004). *Concretos. Especificaciones del mortero para unidades de mampostería.*
- NTC 3495. (2023). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería.*
- NTC 3512. (2022). *Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.*

- NTC 4024. (2023). *Muestreo y métodos de ensayo de unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas.*
- NTC 4026. (1997). *Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.*
- NTC 4076. (2017). *Ingeniería civil y arquitectura. unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto.*
- Prieto, R. G., Guatame, C. L., Cárdenas, S. C., Eduardo, B. J., Rodolfo, G. G., Humberto, G., F., L. P. R., Adrián, P. Á., Orlando, P. G., A., T. I. N., Soleny, V. S., & J., Z. O. F. (2019). Recursos minerales de Colombia. In *Servicio Geológico Colombiano* (Vol. 1).
- Raj, A., Sathyan, D., & Mini, K. M. (2019). Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 787–799. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.06.052>
- Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- Rengifo, M. C., & Yupanguí, R. V. (2013). *Estudio del Hormigón Celular.*
- Shon, C. S., Mukangali, I., Zhang, D., Ulykbanov, A., & Kim, J. (2021). Evaluation of non-autoclaved aerated concrete for energy behaviors of a residential house in Nur-Sultan, Kazakhstan. *Buildings*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/buildings11120610>
- Silva, S. R. (2009). *Albañilería De Bloques De Hormigón Celular Autoclavado (HCA): Estabilidad Dimensional Y Control De Fisuración.* Universidad de Chile.
- Sutmoller, N. (2018). *AN INTRODUCTION TO LOW DENSITY CELLULAR CONCRETE AND ADVANCED FOAM TECHNOLOGIES.*
- Tarasov, A. S., Kearsley, E. P., Kolomatskiy, A. S., & Mostert, H. F. (2010). Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 62(12), 895–906. <https://doi.org/10.1680/mac.2010.62.12.895>

Wee, T.-H., Babu, D. S., Tamilselvan, T., & Lim, H.-S. (2006). Air-Void System of Foamed Concrete and its Effect on Mechanical Properties. *ACI Materials Journal*, 103(1). <https://doi.org/10.14359/15126>

Zamora Terrones, L. P. (2015). *DISEÑO DE UN BLOQUE DE CONCRETO CELULAR Y SU APLICACIÓN COMO UNIDAD DE ALBAÑILERIA NO ESTRUCTURAL*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.

7 GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES

Aditivo espumante: Es una sustancia química con propiedades surfactantes (tensoactivo) que cuando se encuentra presente en pequeñas dosis en una disolución facilita la generación de espuma.

Agregados finos: Material granular que pasa el tamiz de 3/8" (9,51 mm), casi totalmente el tamiz # 4 (4,76 mm), es retenido predominante en el tamiz # 200 (74 μ) y que resulta de la desintegración y abrasión natural de rocas o del procesamiento de areniscas desmenuzables.

Bloque de mampostería: Unidad prefabricada de concreto, cerámica u otros materiales de construcción, diseñada para ser colocada con mortero en una estructura de mampostería. Los bloques de mampostería son elementos fundamentales en la construcción de paredes y otros elementos estructurales o decorativos.

Concreto liviano: Es el concreto de peso específico menor a 2.000 kg/m³

Concreto celular: También conocido como concreto celular ligero (CCL) o concreto celular de baja densidad (CCBD). Es una suspensión a base de cemento, con un mínimo de 20% (por volumen) de espuma integrada al mortero. La densidad de este concreto generalmente varía de 400 kg/m³ a 1.600 kg/m³.

Curado: Es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor.

Espuma: Es una mezcla de aire y un agente espumante que se incorpora al mortero de cemento. Esta espuma contribuye a la ligereza y aislamiento térmico del concreto celular. El agente espumante crea burbujas de aire estables en la mezcla, proporcionando propiedades específicas al concreto final.

8 ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica, aditivo espumante MasterCell 10



MasterCell 10

Aditivo inclusor de aire para concreto

DESCRIPCIÓN

MasterCell® 10 es un agente espumante altamente concentrado, listo para usarse en la producción de materiales controlados de baja resistencia (MCBR) y materiales controlados de baja resistencia y baja densidad.

USOS RECOMENDADOS

- Relleno de zanjas de tuberías de agua, de electricidad, muros de contención.
- Relleno estructural: Sub-base de cimentaciones, base de losas, alrededor de tuberías.
- Tanques subterráneos abandonados, bóvedas de servicios, minas, alcantarillas, espacios debajo de pavimentos y losas, aislante para techos, muros contra fuego, muros de contención de carreteras, paneles prefabricados.

CARACTERÍSTICAS

- Óptima trabajabilidad ya que puede producirse en consistencia plástica o fluida.
- Faviilidad de colocación por bombeo o gravedad.

BENEFICIOS

- Valores preseleccionados de densidad y resistencia.
- Buen aislante térmico.

RECOMENDACIONES DE USO

MasterCell® 10 es una solución lista para su uso para producir concreto celular. No está indicado para uso en concreto convencional. No diluya o mezcle MasterCell® 10 con ningún otro aditivo. En caso necesario, se puede utilizar un aditivo reductor de agua que cumpla con los requisitos del ASTM C 494, sin embargo, el aditivo reductor de agua debe añadirse a la mezcla por separado.

Cumple con la especificación ASTM C 869, *Especificación estándar para agentes espumantes usados en la

producción de espuma preformada para concreto celular.

Dosificación: No existe una dosificación estándar para MasterCell® 10. La dosificación depende de la densidad requerida y del uso final. Se debe hacer una evaluación de prueba para determinar el tiempo necesario para obtener la densidad requerida.

Mezclado: MasterCell® 10 se introduce a la mezcla del MCBR utilizando una pistola MasterCell® o cualquier otro equipo similar generador de espuma.

ALMACENAMIENTO Y MANEJO

Temperatura de almacenamiento: MasterCell® 10 puede almacenarse a una temperatura mínima de 1°C. Temperaturas menores pueden causar aglutinamiento del material. Si ocurre, deje que el producto se descongele a una temperatura de 21 a 23°C. Homogenice con una leve agitación. **No use aire a presión para agitar el producto.**

Vida útil: La vida útil de MasterCell® 10 es de 12 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

Seguridad: Se recomienda el uso de lentes de protección y guantes cuando maneje el producto.

PRESENTACIÓN

MasterCell® 10 se suministra en cubetas de 19L y tambores de 200 L (53 gal).

SEGURIDAD

Lea, entienda y siga la información contenida en la Hoja de Datos de Seguridad (HDS) y de la etiqueta del producto antes de usar. La HDS puede obtenerse solicitando a su representante de ventas de MBS. Derrame, Fuga, Fuego, Exposición o Accidente LLAMAR AL GET-IT! DÍA Y NOCHE 800-00-214-00 / 55-59-15-88 (CDMX) MANTENER FUERA DEL ALCANCE DE LOS NIÑOS! PARA USO PROFESIONAL. NO PARA LA VENTA O USO POR EL PÚBLICO EN GENERAL.

Master® Builders Solutions es una marca registrada por las compañías de MBCC Group en diferentes países del mundo.

Octubre 2020

Página 1 de 2

A brand of
MBCC GROUP

MasterCell 10

Aditivo inclusor de aire para concreto

NOTIFICACIÓN DE GARANTÍA LIMITADA

Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V. garantiza que este producto está exento de defectos de fabricación y cumple con todas las propiedades técnicas contenidas en la Hoja Técnica vigente, si el mismo se usa como se instruye dentro de su vida útil. Resultados satisfactorios dependen no solamente de la calidad del producto sino también de muchos factores fuera del control de Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V.; MBS NO EXTIENDE NINGUNA OTRA GARANTÍA, O AVAL, EXPRESA O IMPLÍCITA, INCLUYENDO GARANTÍAS DE COMERCIALIZACIÓN O ADECUACIÓN PARA UN FIN PARTICULAR CON RESPECTO A SUS PRODUCTOS. La única y exclusiva compensación del Comprador por cualquier reclamo relacionado a este producto, incluyendo pero sin limitarse a, reclamos relacionados con incumplimiento de garantía, negligencia, responsabilidad objetiva u otra causa, es el envío al comprador de un producto equivalente a la cantidad de producto que no cumple esta garantía o el reembolso de el precio original de compra del producto que no cumple esta garantía, a decisión exclusiva de Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V. Cualquier reclamo relacionado a este producto debe recibirse por escrito dentro de un (1) año de la fecha del envío y cualquier reclamo que no sea presentado dentro de ese periodo constituirá una renuncia por parte del Comprador a realizar algún reclamo y la aceptación expresa de la calidad del producto. MASTER B SOLUTIONS MEXICANA S.A. DE C.V. NO SERÁ RESPONSABLE POR NINGÚN DAÑO ESPECIAL, INCIDENTAL, CONSECUENTE (INCLUYENDO LUCRO CEBANTE) O PUNIBLE DE NINGÚN TIPO. El Comprador debe determinar la idoneidad de los productos para el uso previsto y asume todo riesgo y responsabilidad asociada con ello. Esta información y toda recomendación técnica adicional están basadas en el conocimiento y experiencia actuales de Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V. Sin embargo,

Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V. no asume ninguna responsabilidad por proporcionar tal información y recomendación, incluida la medida en que tal información y recomendación pueda estar relacionada a derechos intelectuales existentes de terceros, derechos de patente, tampoco se establecerá ninguna relación legal por o surgirá de, proporcionar tal información y recomendación. Master B Solutions Mexicana S.A. de C.V. se reserva el derecho de hacer cualquier cambio debido a progreso tecnológico o desarrollos futuros. El Comprador de este Producto(s) debe realizar una prueba de este producto(s) para determinar la idoneidad para la aplicación prevista del producto(s). El desempeño del producto descrito aquí debe verificarse por medio de prueba que debe realizarse por profesionales calificados.

DARQUIMICOS SAS

CONCRECELL®33

Agente espumante para concretos de baja resistencia y concreto celular

USOS RECOMENDADOS

- Grouting de anillos de túneles
- Relleno de pisos
- Aislamiento térmico
- Sótanos abandonados
- Reemplazo de pisos inestables
- Gateamiento de losas
- Tanques de almacenamiento tuberías abandonadas
- Pisos de techos
- Camas para tuberías
- Base de carreteras relleno de pilares
- Relleno reductor de carga
- Relleno de huecos
- Minas abandonadas
- Grouteo de deslizamientos
- Relleno de estructuras, trincheras y minas
- Muros de contención en carreteras
- Paneles prefabricados ligeros

DESCRIPCION

CONCRECELL 33 es un agente espumante altamente concentrado, listo para usarse en la producción de concretos de Baja Resistencia y en mezclas de cemento celular (mortero, concreto o grout) para diversas aplicaciones. Se puede usar en combinación con varios tipos de equipos generadores de espuma, especialmente aquellos que trabajan con aire a presión. Cumple con la especificación ASTM C 869, "Especificación Estándar para Agentes Espumantes Usados en la Producción de Espuma Preformada para Concreto Celular"

CARACTERISTICAS

- Líquido fácil de aplicar
- Produce aire y densidad estables (peso unitario)
- Valores preseleccionados de resistencia y densidad

Producto Final de Concreto con CONCRECELL 33

- Buen aislamiento térmico
- Menor exudación y en consecuencia menor segregación
- Manejabilidad óptima
- Colocación fácil por bombeo o gravedad o cubetas
- Material estructural ligero

FORMAS DE APLICACION

Sistema de aire a presión

CONCRECELL 33 agente espumante es una solución lista para usarse para la producción de concreto celular ligero.

ADITIVOS PARA LA INDUSTRIA DEL CONCRETO
CALLE 163 A 16 C 19 BOGOTA

DARQUIMICOS SAS

Método de pre-espumado

1. Diluya CONCRECELL 33 en 20 a 40 veces su volumen en agua dependiendo de la aplicación.
2. Controle la cantidad de aire comprimido y flujo del CONCRECELL 33 con el fin de obtener un volumen de espuma óptimo y apropiado. CONCRECELL 33 tiene un índice de expansión de aproximadamente 20 a 25 veces el volumen de la solución diluida.
3. Introduzca la espuma en un mezclador continuo o en el camión mezclador directamente y mezcle bien con mortero y concreto.

Sistema de agua a presión

CONCRECELL 33 es adicionado a la mezcla de CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA usando una pistola para generar espuma

1. No diluya o mezcle CONCRECELL 33 con agua o con cualquier otro aditivo.
2. Conecte la pistola para generar espuma al suministro de agua del camión de premezclado u otra fuente principal de suministro de agua. Se requiere de una fuente de agua con una presión de 30 psi (207 kPa).
3. Introduzca la espuma directamente en el camión de Premezclado o en un mezclador continuo en una medida 0,5 a 3 lts /m³ y mezcle bien con mezcla de mortero o grout.

Dosificación

No hay una dosificación estándar para el agente espumante CONCRECELL 33. La dosificación depende de la densidad requerida y del uso final. Deberá realizarse una evaluación de prueba para determinar el tiempo necesario de espumado para obtener la densidad requerida. Contacte a su representante local DARQUIMICOS si necesita ayuda para diseñar su mezcla.

Nota: Cuando lo requiera, pueden usarse aditivos para controlar el fraguado (por ejemplo,

acelerantes o retardantes) que cumplan con los requerimientos de la ASTM C 494. Sin embargo, el aditivo controlador del fraguado debe adicionarse en forma separada a la mezcla.

RECOMENDACIONES

Temperatura CONCRECELL 33 puede almacenarse a una temperatura superior a 5 grados centígrados. Las temperaturas bajas pueden causar floculación (aglutamiento) del material. Si ocurre floculación, deje que el producto se caliente a temperatura ambiente, 21-23oC (70-73oF) y reconstitúyalo con agitación ligera. No use aire presurizado para agitar.

ALMACENAMIENTO

CONCRECELL 33 tiene una vida útil de 12 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

EMPAQUE

CONCRECELL 33 se suministra en envases 3.5 kg y envases de 5 gal

SEGURIDAD

Cualquier contacto prolongado con CONCRECELL 33 agente espumante debe evitarse ya que puede causar irritación. Si se presenta contacto, lave el área afectada perfectamente con agua. Si hay contacto con los ojos, busque inmediatamente ayuda médica. Se recomienda usar guantes de laboratorio y lentes protectores durante la aplicación del producto.


Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto. Para información adicional sobre este producto o para su uso en el desarrollo de mezclas de concreto o mortero con características especiales de desempeño, consulte a su representante local de Darquimicos.

VERSION 2 FECHA 11/03/2017 FICHA TECNICA CONCRECELL 33 DOCUMENTO 16C2512

ADITIVOS PARA LA INDUSTRIA DEL CONCRETO
CALLE 163 A 16 C 19 BOGOTA
CEL. 314 415 7329

<h1>EUKOCELL 1000</h1> <p>Aditivo Líquido para Rellenos Fluidos en Inyección</p>		ADITIVOS	
Descripción	<p>EUKOCELL 1000 es un aditivo líquido diseñado para la fabricación de morteros fluidos, con altos contenidos de aire, baja densidad y resistencia a compresión. Si se va a utilizar en concretos convencionales solicite Información al Departamento Técnico de EUKLID CHEMICAL TOXEMENT.</p>		EUKOCELL 1000
Información Técnica	<p>Apariencia : Líquido Color : Transparente Densidad : 1.04 kg/l +/- 0.01 kg/l Contenido de cloruros: Ninguno</p> <p>La adición del EUKOCELL 1000 sobre un mortero para lograr morteros celulares, cumple los parámetros establecidos para las siguientes mediciones:</p> <p>Fluidez: Se establece según norma ASTM C-939 (Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method) que el tiempo en el cono de Marsh es superior a 35 segundos.</p> <p>De acuerdo a la norma ASTM C-109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Item 3.1), el porcentaje de fluidez es mayor al 125% en menos de 25 golpes.</p> <p>Segregación: Medida indirectamente a través de la norma NTC 1294 (Método de ensayo para determinar la exudación del hormigón) después de 40 minutos el mortero no presenta exudación. Por consiguiente se deduce que no hay segregación.</p> <p>Contraacción: Medido como un cambio en volumen a través de la norma ASTM C-1090 (Standard Test Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimens from Hydraulic Cement Grout) se determinó una contraacción inferior al 3%.</p> <p>Tiempo de Fraguado: Conforme a la norma NTC 890 (Determinación de tiempo de Fraguado de Mezclas por Medio de su Resistencia a la Penetración) el Tiempo de fraguado inicial es de 30 horas y el Tiempo de fraguado final es de 40 horas.</p> <p>Resistencia a la Compresión: Según norma ASTM C-109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) se puede obtener resistencias por encima de 435 psi (30 N/m²) en un mortero diseñado con 600 kg/m³.</p> <p>Contenido de Aire: De acuerdo a la norma NTC 1032 (Método para determinar el contenido de aire. Método de presión) los contenidos de aire sobrepasan el 35%.</p> <p>Los anteriores ensayos fueron realizados utilizando una mezcla de 500 kg a 650 kg de cemento y una relación a/c de 0.5 a 0.55. Para diseños diferentes deben realizarse nuevos ensayos. Consulte el Departamento Técnico de EUKLID CHEMICAL TOXEMENT.</p>		
Usos	<p>El EUKOCELL 1000 es un aditivo para fabricación de morteros fluidos utilizados en inyección empleado en:</p> <ul style="list-style-type: none">• Dar apoyo bajo y detrás de estructuras y revestimientos de túneles.• Rellenos provisionales.• Rellenos de tuberías y tanques de almacenamiento enterrados evitando el deslizamiento de la roca que inicia las fallas en estos revestimientos.• Inyección bajo pavimentos.• Concretos convencionales. Con las debidas precauciones puede ser usado como incluso de aire de alto rango para controlar la segregación en mezclas muy ásperas; su uso baja las resistencias en todas las edades. Solicite asesoría al Departamento Técnico de EUKLID CHEMICAL TOXEMENT.		

OFICINA PRINCIPAL:
Parque Industrial Gran Sabana, M3 - M2, Tocandá,
P.R.C. | 869 87 87
WWW.TOXEMENT.COM.CO



EUKLID CHEMICAL
TOXEMENT

EUCOCELL 1000

Aditivo Líquido para Rellenos Fluidos en Inyección

Ventajas

Los rellenos fluidos para inyección y los morteros celulares son materiales más ligeros que los concretos convencionales y son una alternativa económica en donde se requiere un relleno cementicio.

- Aditivo líquido listo para usar.
- El relleno tiene alta fluidez y trabajabilidad.
- Reduce la contracción y aumenta el asentamiento.
- Es autonivelante, no requiere vibrado.
- No requiere alta mano de obra y sin segregación.

Dosificación

Dosis: 3% al 5% del peso del cemento (1.5 kg a 2.5 kg por bulto de cemento), dependiendo de la cantidad de aire requerido, y si el aditivo es colocado directamente en la mixer.

Para Concretos Convencionales las dosis utilizadas deben ser menores a 0.08% del peso del cemento y el tiempo mezclado debe ser controlado. La inclusión de aire es del 12% al 15%.

Aplicación

EUCOCELL 1000 puede ser aplicado según norma ASTM C 796 (Standar Test Method for Foaming Agents for use in Producing Cellular Concrete using Preformed Foam). Donde se establece que el producto puede ser adicionado mediante el uso de máquina espumadora directamente al mortero previamente preparado, hasta obtener el peso específico deseado.

Existe otra forma de aplicación del aditivo para producción de morteros celulares sin utilización de máquina espumadora, así:

La mezcla debe tener un asentamiento de 25 mm a 50 mm antes de la adición de EUCOCELL 1000.

EUCOCELL 1000 se aplica directamente en la mixer inmediatamente después de cargado. La mezcla óptima se obtiene cuando la consistencia es fluida. El material debe ser adicionado en la concretora.

Después de adicionado el EUCOCELL 1000 es necesario dar como mínimo 20 minutos de mezcla (dependiendo de la cantidad de aire que se requiere incorporar).

Debido a que el material puede incorporar del 35% - 45% de aire, la densidad de la masa puede variar de 1200 kg/m³ - 1600 kg/m³ mientras un mortero convencional normal puede tener de 2100 kg/m³ - 2300 kg/m³.

Se pueden obtener variaciones en la resistencia a la compresión entre 10 kg/cm² y 100 kg/cm² haciendo variación en la dosificación del cemento.

El diseño de las mezclas puede variar en función de las necesidades y de las aplicaciones específicas requeridas.

Adicionalmente los resultados anteriores pueden tener variación respecto a las condiciones industriales ya que estas características se han determinado en laboratorio.

ADITIVOS

EUCOCELL 1000

TX40T139

OFICINA PRINCIPAL:
Parque Industrial Gran Sabana, M3 - M2, Tocandá
Fón: (1) 869 87 87
WWW.TOXEMENT.COM.CO



EUCOCELL 1000

Aditivo Líquido para Rellenos Fluidos en Inyección

Recomendaciones Especiales

- EUCOCELL 1000 se puede utilizar con cemento Portland normal.
- El producto es compatible con otros aditivos siempre y cuando se dosifique separadamente, previa elaboración de ensayos.
- Es necesario hacer ensayos previos para ajustar la dosis adecuada de aditivo, según el diseño de mezcla y los requerimientos del concreto endurecido.
- En todos los casos consultar la Ficha de Datos de Seguridad del Producto antes de su uso.

Manejo y Almacenamiento

EUCOCELL 1000 debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado y bajo techo.

Vida útil en almacenamiento:

- 1 año en condiciones óptimas de almacenamiento.
- 6 meses a granel en condiciones óptimas de almacenamiento.

Presentación

Tambor: 200 kg.
Granel

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID CHEMICAL TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web www.toxement.com.co para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala. EUCLID CHEMICAL TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Febrero 24 de 2021

ADITIVOS


EUCOCELL 1000

TX40T139


OFICINA PRINCIPAL:
Parque Industrial Gran Sabana, M1 - M2, Tocandá,
P.B.C. (1) 869.87.87
WWW.TOXEMENT.COM.CO



Anexo 4: Finura del cemento ART, NTC 33 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES FINURA DEL CEMENTO NTC 33-1997 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL													
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1												
DESCRIPCION DEL MATERIAL	CEMENTO ART	MUESTRA	1												
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/08/2023	HOJA No.	1 DE 1										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 80%;">ENSAYO</th> <th style="width: 20%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S_s SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA PATRON</td> <td style="text-align: right;">cm²/g</td> </tr> <tr> <td>T_s TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON</td> <td style="text-align: right;">seg</td> </tr> <tr> <td>T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA</td> <td style="text-align: right;">seg</td> </tr> <tr> <td>S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA</td> <td style="text-align: right;">cm²/g</td> </tr> </tbody> </table>						ENSAYO		S _s SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA PATRON	cm ² /g	T _s TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON	seg	T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA	seg	S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA	cm ² /g
ENSAYO															
S _s SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA PATRON	cm ² /g														
T _s TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON	seg														
T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA	seg														
S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA	cm ² /g														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="width: 80%;">SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">4795,08 cm²/g</td> </tr> </tbody> </table>						SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO	4795,08 cm²/g								
SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO	4795,08 cm²/g														


Anexo 5: Finura del cemento UG, NTC 33 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES FINURA DEL CEMENTO NTC 33-1997 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERI	CEMENTO UG	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/08/2023	HOJA No.	1 DE 1
Página 1					
ENSAYO					1
S _c SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA PATRON	cm ² /g	3819			
T _s TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON	seg	82.54			
T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA	seg	133			
S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA	cm ² /g	4876.09			
SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO					4876.09 cm²/g


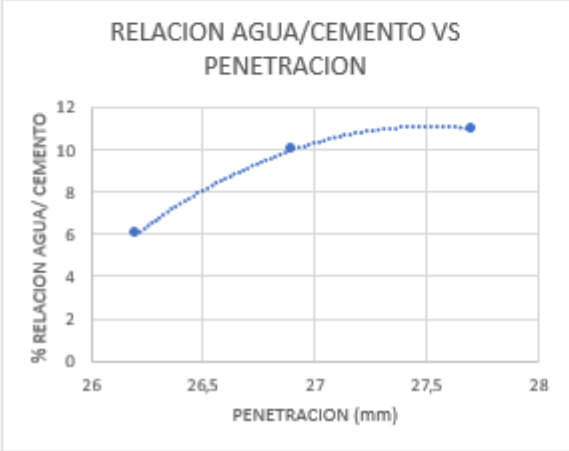
Anexo 6: Peso específico del cemento ART, NTC 221 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO NTC 221-2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL		
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	CEMENTO ART	MUESTRA	1	
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/07/2023	HOJA No. 1 DE 1
Página 1				
ENSAYO		1	2	3
PESO DE CEMENTO	g	64	64	64
LECTURA INICIAL ml	cm ³	0.8	0.9	0.8
LECTURA FINAL ml	cm ³	21	22	20.8
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO	g/cm ³	3.01	3.08	3
PESO ESPECIFICO PROMEDIO		3.07 g/cm³		



Anexo 7: Peso específico del cemento UG, NTC 221 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO NTC 221-2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	CEMENTO UG	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/07/2023	HOJA No. 1 DE 1	
Página 1					
ENSAYO		1	2	3	
PESO DE CEMENTO	g	64	64	64	
LECTURA INICIAL ml	cm ³	0.5	0	0.1	
LECTURA FINAL ml	cm ³	22.3	21.8	22	
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO	g/cm ³	2.95	2.98	2.97	
PESO ESPECIFICO PROMEDIO		2.97 g/cm³			



Anexo 8: Consistencia normal de cemento ART, NTC 110 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO NTC 110-2019 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
		PROYECTO PROYECTO DE GRADO MAESTRIA		LOTE 1	
DESCRIPCION DEL MATERIAL CEMENTO ART		MUESTRA 1			
CLASIFICACION ARENA		FECHA 11/07/2023		HOJA No. 1 DE 1	
ENSAYO					
PESO DE CEMENTO		g	650	650	650
VOLUMENES DE AGUA		cm³	170	175	180
RELACION AGUA/CEMENTO		%	26,2	26,9	27,7
PENETRACION CON SONDA VICAT 10mm			6	10	11
PESO ESPECIFICO PROMEDIO			3,14 g/cm ³		
			RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)		
			26,92		



Anexo 9: Consistencia normal de cemento UG, NTC 110 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO NTC 110-2019 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1			
DESCRIPCION DEL MATERIA	CEMENTO UG	MUESTRA	1			
CLASIFICACION	FECHA	11.07.2023	HOJA No.	1 DE 1		
ENSAYO		1	2	3		
PESO DE CEMENTO	g	650	650	650		
VOLUMENES DE AGUA	cm ³	162	171	174		
RELACION AGUA/CEMENTO	%	24.92%	26.31%	26.77%		
PENETRACION CON SONDA VICAT 10mm		6	10	11		
PESO ESPECIFICO PROMEDIO		3.14 g/cm ³				
RELACION AGUA/CEMENTO VS PENETRACION		<table border="1" style="background-color: yellow;"> <tr> <td style="text-align: center;">RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)</td> <td style="text-align: center;">26.00%</td> </tr> </table>			RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)	26.00%
RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL (%)	26.00%					
						

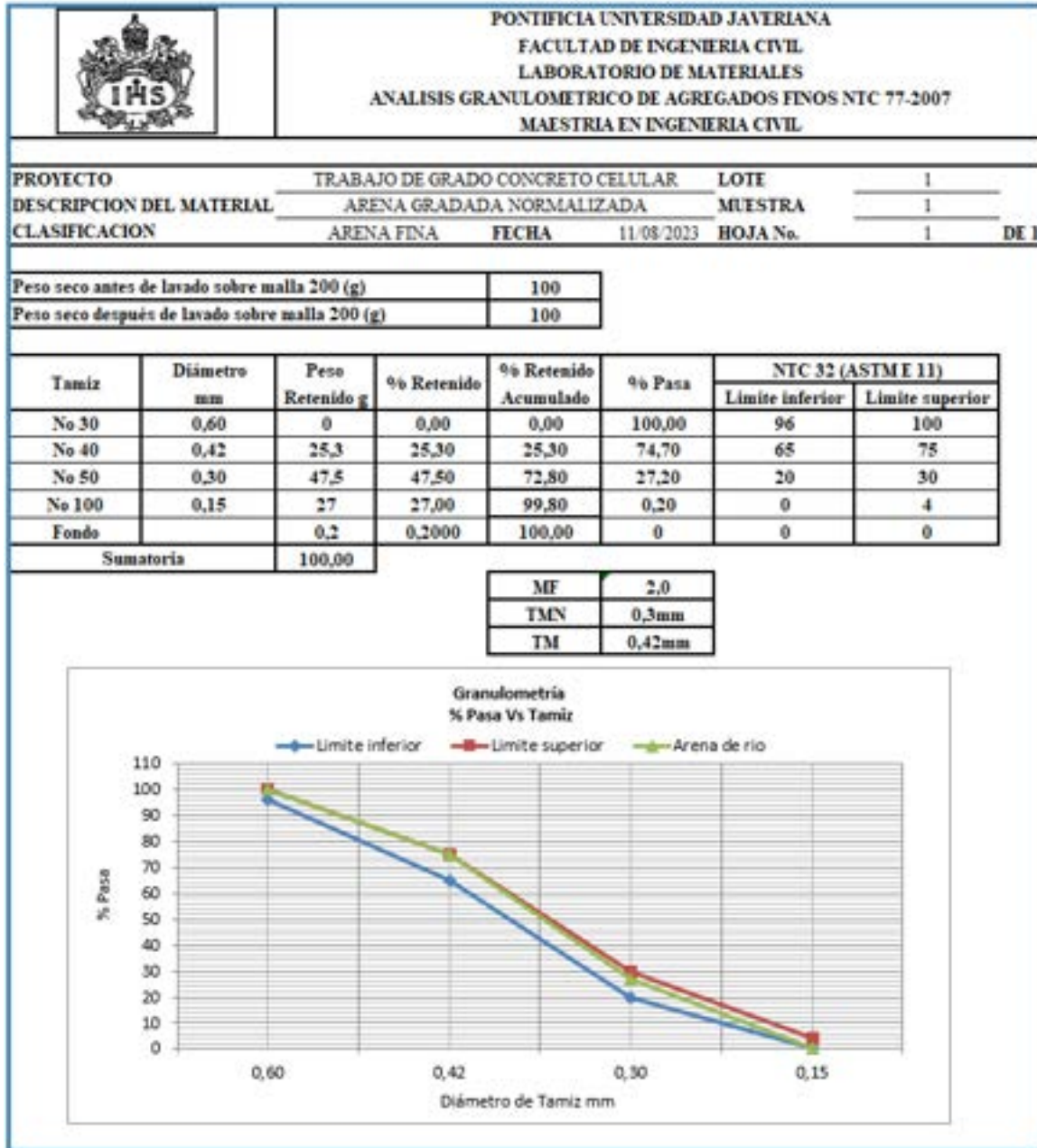
Anexo 10: Tiempo de fraguado del cemento ART, NTC 118 (2022)

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAULICO APARO DE VICAT, NTC 118-2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL																										
PROYECTO	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA	LOTE	1																								
DESCRIPCION DEL MATERI	CEMENTO ART	MUESTRA	1																								
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/07/2023																								
		HOJA No.	1 DE 1																								
RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL		26,92																									
RELACION AGUA/CEMENTO VS PENETRACION																											
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">ENSAYO 1</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">TIEMPO DE FRAGUADO</th> <th style="text-align: center;">PENETRACION</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">Min</th> <th style="text-align: center;">mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">30</td><td style="text-align: center;">40</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">45</td><td style="text-align: center;">40</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">60</td><td style="text-align: center;">40</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">75</td><td style="text-align: center;">40</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">90,00</td><td style="text-align: center;">39,00</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">105,00</td><td style="text-align: center;">34,00</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">120,00</td><td style="text-align: center;">23,00</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">135,00</td><td style="text-align: center;">5,00</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">150,00</td><td style="text-align: center;">0,00</td></tr> </tbody> </table>		ENSAYO 1		TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION	Min	mm	30	40	45	40	60	40	75	40	90,00	39,00	105,00	34,00	120,00	23,00	135,00	5,00	150,00	0,00
ENSAYO 1																											
TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION																										
Min	mm																										
30	40																										
45	40																										
60	40																										
75	40																										
90,00	39,00																										
105,00	34,00																										
120,00	23,00																										
135,00	5,00																										
150,00	0,00																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: yellow;"> TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25mm </td> <td style="text-align: center;"> 90,00 </td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;"> TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0mm </td> <td style="text-align: center;"> 150,00 </td> </tr> </table>		TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25mm	90,00	TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0mm	150,00																						
TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25mm	90,00																										
TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0mm	150,00																										


Anexo 11: Tiempo de fraguado del cemento UG, NTC 118 (2022)

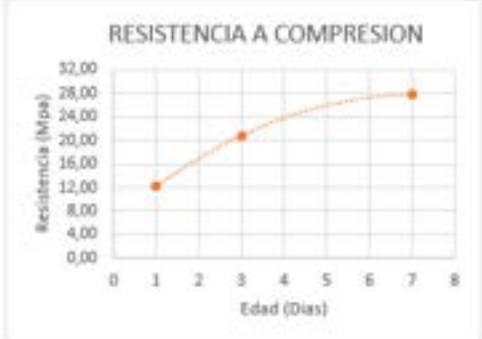
	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAULICO APARO DE VICAT, NTC 118-2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL																														
PROYECTO <u>PROYECTO DE GRADO MAESTRIA</u>	LOTE <u>1</u>																														
DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>CEMENTO UG</u>	MUESTRA <u>1</u>																														
CLASIFICACION <u>ARENA</u>	FECHA <u>11/07/2023</u>																														
	HOJA No. <u>1</u> DE <u>1</u>																														
RELACION AGUA/CEMENTO PARA EL ESTADO DE CONSISTENCIA NORMAL 26.92																															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">ENSAYO 1</th> </tr> <tr> <th>TIEMPO DE FRAGUADO</th> <th>PENETRACION</th> </tr> <tr> <th>Min</th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>30</td><td>40</td></tr> <tr><td>45</td><td>39</td></tr> <tr><td>60</td><td>39</td></tr> <tr><td>75</td><td>37</td></tr> <tr><td>90</td><td>37</td></tr> <tr><td>112</td><td>36</td></tr> <tr><td>120</td><td>30</td></tr> <tr><td>135</td><td>20</td></tr> <tr><td>150</td><td>3</td></tr> <tr><td>165</td><td>2</td></tr> <tr><td>180</td><td>1</td></tr> <tr><td>195</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	ENSAYO 1		TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION	Min	mm	30	40	45	39	60	39	75	37	90	37	112	36	120	30	135	20	150	3	165	2	180	1	195	0
ENSAYO 1																															
TIEMPO DE FRAGUADO	PENETRACION																														
Min	mm																														
30	40																														
45	39																														
60	39																														
75	37																														
90	37																														
112	36																														
120	30																														
135	20																														
150	3																														
165	2																														
180	1																														
195	0																														
TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25mm	100.00																														
TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0mm	195.00																														

Anexo 12: Análisis granulométrico de agregados finos para prueba de resistencia del cemento, NTC 77 (2018)



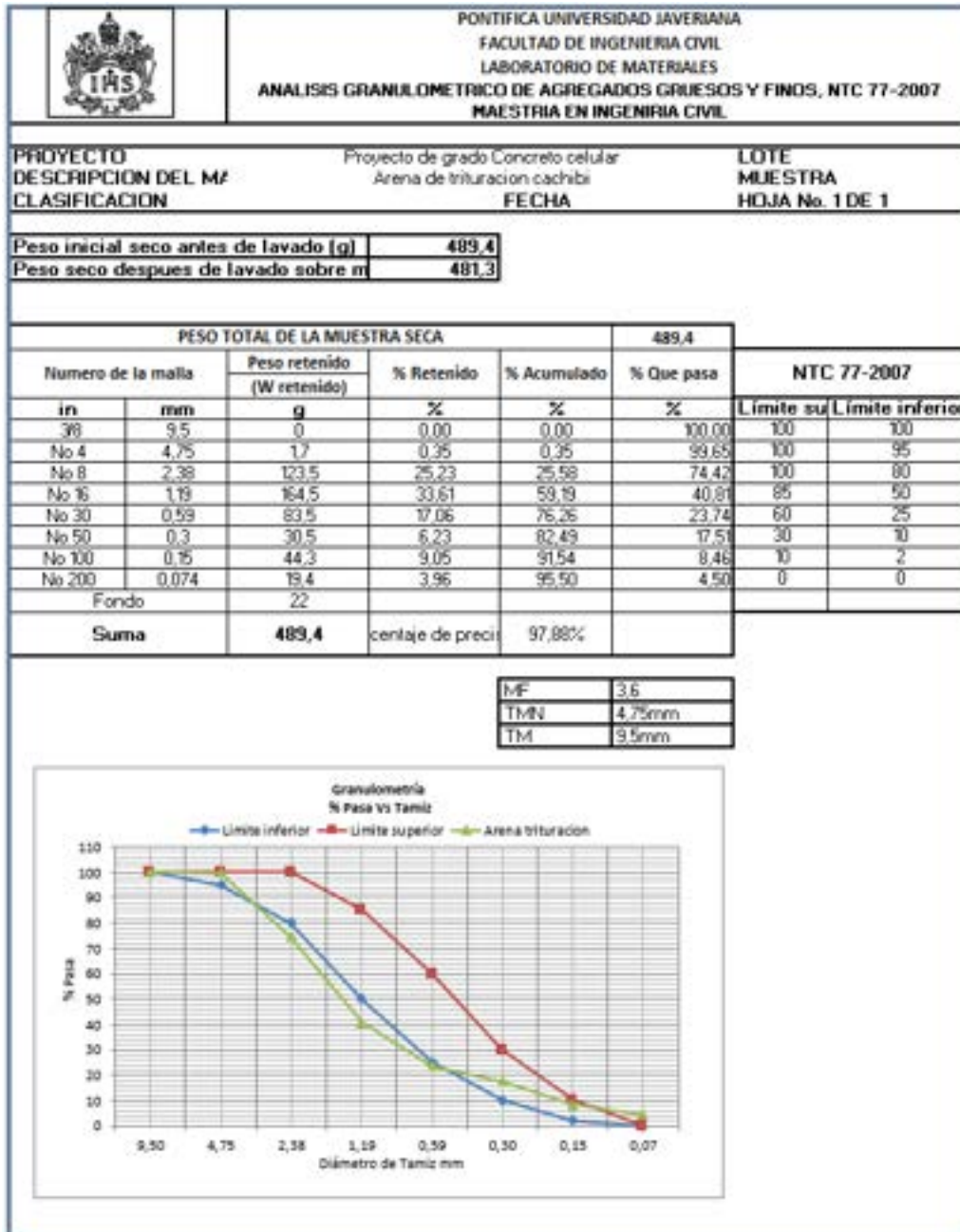
Anexo 13: Resistencia a la compresión de cubos de mortero para resistencia de cemento ART, NTC 220 (2022)

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CUBOS DE MORTERO, NTC 220-2017 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL		
PROYECTO DESCRIPCION DEL MATERIAL CLASIFICACION	PROYECTO DE GRADO MAESTRIA CEMENTO ART ARENA	LOTE MUESTRA BOJA No.	1 1 1 DE 1 FECHA 11/07/2023
Según la norma (ASTM C109) se realiza la mezcla de mortero con la siguiente dosificación para realizar 9 cubos			
Cemento (g)	740	Relacion a:c	0,483
Arena (g)	2035		
Agua(g)	359		
Ajuste de fluencia		ASTM C 230 Fluidez de morteros	
Lec	27,25	Diametro promedio en ensayo de fluencia	
Fluencia	109	Debe estar en 110 ± 5	
Se encontro la fluencia con una relacion de agua cemento diferente a la norma por tanto hay que hacer un ajuste			
Relacion a:c	0,583		
Luego de hacer el ajuste se deben preparar los 9 cubos			
Cemento (g)	740		
Arena (g)	2035		
Agua(g)	431,42		
Resistencia compresion (Mpa)			
No \ EDAD	1	3	7
1	11,92	20,32	27,19
2	11,53	20,32	28,79
3	13,09	21,61	27,25
Promedio	12,18	20,75	27,74

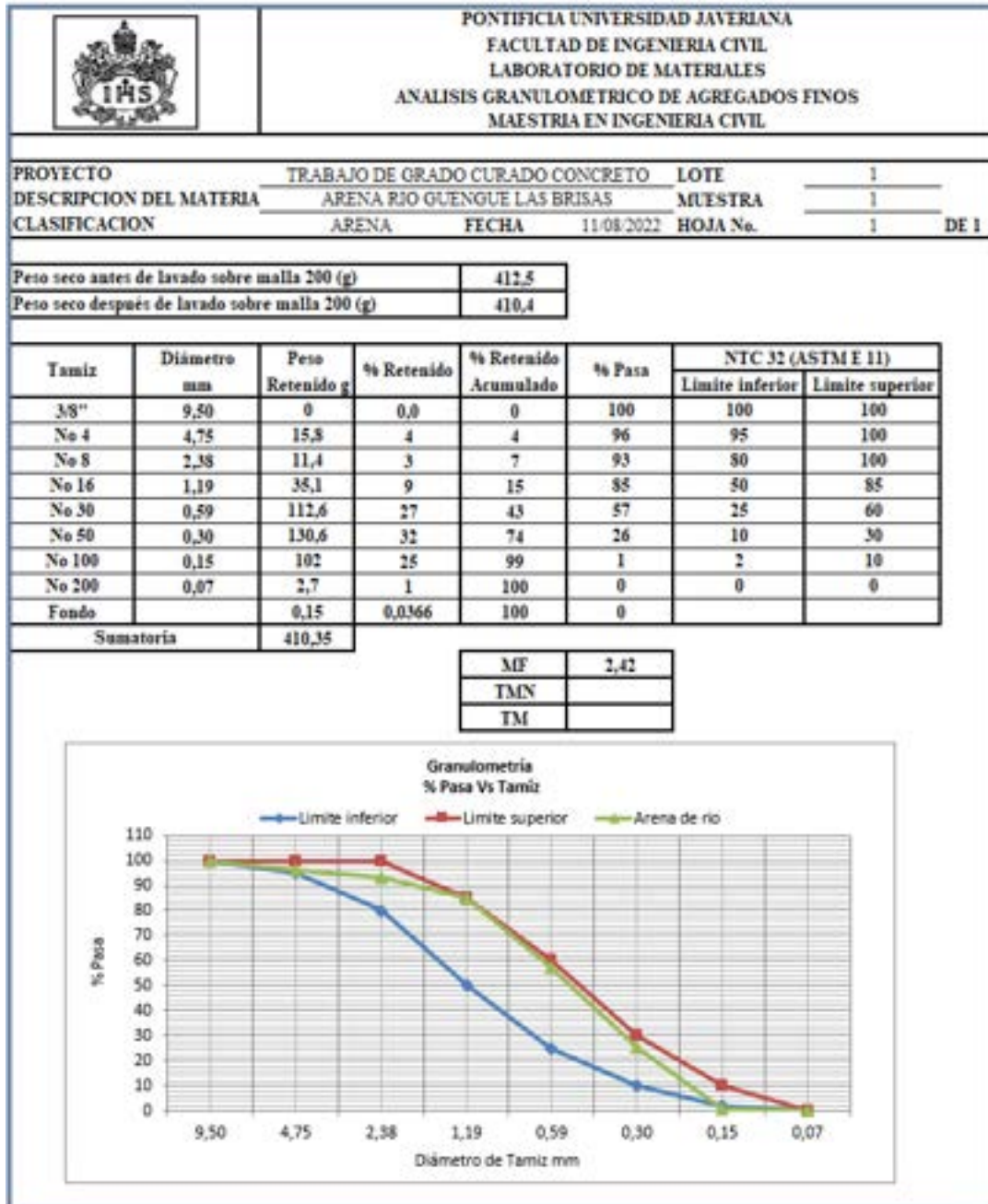


RESISTENCIA A COMPRESION


Anexo 14: Granulometría de agregados finos, arena de trituración NTC 77 (2018)




Anexo 15: Granulometría de agregados finos, arena de río, NTC 77 (2018)




Anexo 16: Masa unitaria de agregados finos, arena de trituración NTC 92 (2019)



		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES MASAS UNITARIAS AGREGADO FINO NTC 92-1995 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	TRABAJO DE GRADO CURADO CONCRETO	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARENA DE TRITURACION CACHIBI	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	HOJA No.	1	DE 1
AGREGADOS COMPACTADOS					
Método de compactación					
Ensayo No.		1	2	3	
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		4,725	4,740	4,755	
Masa del recipiente de medida, (kg)	(T)	0	0	0	
Volumen del recipiente de medida, L	(V)	2,78	2,78	2,78	
Densidad bulk del agregado, kg/L	M	1,700	1,705	1,710	
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L		1,705			
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L		1,705			
AGREGADOS SUELTOS					
Ensayo No.		1	2	3	
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	4,300	4,315	4,288	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	0	0	0	
Volumen del recipiente de medida, L	(V)	2,78	2,78	2,78	
Densidad bulk del agregado, kg/L	M	1,547	1,552	1,542	
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L		1,547			
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L		1,547			
Humedad (%)					
3%					

Anexo 17: Masa unitaria de agregados finos, arena de rio, NTC 92 (2019)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES MASAS UNITARIAS AGREGADO FINO MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	TRABAJO DE GRADO CURADO CONCRETO	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARENA RIO GUENGUE LAS BRISAS	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	HOJA No.	1	DE 1
AGREGADOS COMPACTADOS					
Método de compactación					
Ensayo No.		1	2	3	
Masa del agregado más la del recipiente de medida, (kg)		4,596	4,610	4,626	
Masa del recipiente de medida, (kg)	(T)	0	0	0	
Volumen del recipiente de medida, L	(V)	2,78	2,78	2,78	
Densidad bulk del agregado, kg/L	M	1,653	1,658	1,664	
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L		1,659			
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L		1,653			
AGREGADOS SUELTOS					
Ensayo No.		1	2	3	
Masa del agregado más la del recipiente de medida, kg	(G)	4,210	4,222	4,188	
Masa del recipiente de medida, kg	(T)	0	0	0	
Volumen del recipiente de medida, L	(V)	2,78	2,78	2,78	
Densidad bulk del agregado, kg/L	M	1,514	1,519	1,506	
Promedio densidad bulk agregado sss, kg/L		1,513			
Promedio densidad bulk agregado seco, kg/L		1,508			
Humedad (%)					
		0,35			


Anexo 18: Contenido de materia orgánica en agregado finos, arena de trituración, NTC 127 (2000)



	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA EN EL AGREGADO FINO MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL		
	PROYECTO	TRABAJO DE GRADO CONCRETO CELULAR	LOTE
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARENA DE TRITURACION CACHIBI	MUESTRA	1
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	HOJA No. 1 DE 1

ANALISIS COLORIMETRO CON ESCALA DE COLORES NORMALIZADA	
ANTES	DESPUES DE 24 HR
	

OBSERVACIÓN: Se observa que el nivel alcanzado despues de 24 horas con la solución utilizada, la arena se encuentra en el rango No 2. La cual es aceptable para usar en mezclas de concreto

Anexo 19: Contenido de materia orgánica en agregado finos, arena de rio, NTC 127 (2000)

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA EN EL AGREGADO FINO MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL		
PROYECTO	TRABAJO DE GRADO CONCRETO CELULAR	LOTE	1
DESCRIPCION DEL MATERIAL	ARENA RIO GUENGUE LAS BRISAS	MUESTRA	1
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	HOJA No. 1 DE 1


ANALISIS COLORIMETRO CON ESCALA DE COLORES NORMALIZADA	
ANTES	DESPUS DE 24 HR
	

OBSERVACIÓN: Se observa que el nivel alcanzado despues de 24 horas con la solución utilizada, la arena se encuentra en el rango No3.

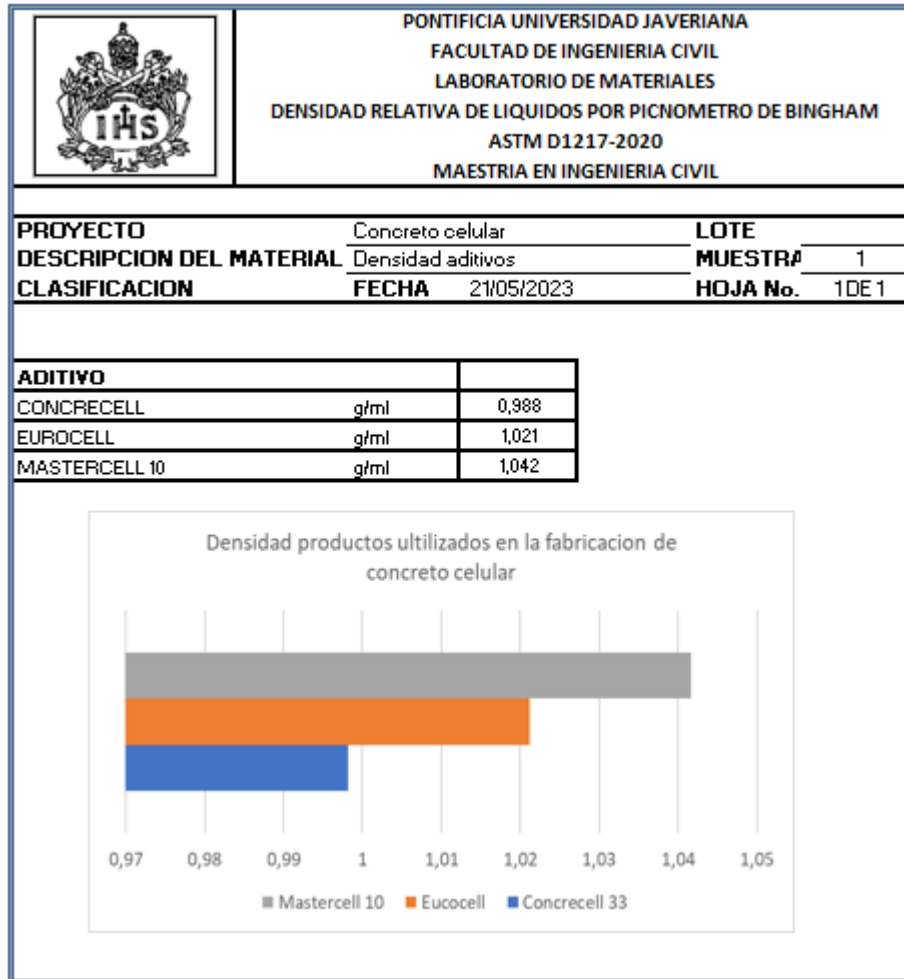
Anexo 20: Peso específico y absorción de agregados finos, arena de trituración, NTC 237 (2020)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS, NTC 237-1995 MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	CONCRETO CELULAR	LOTE	_____		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	FINO TRITURADO CACHIBI	MUESTRA	_____		
CLASIFICACION	FECHA	20/04/2023	HOJA No.	DE	
Ensayo No.		1	2	3	
Picnómetro No.		D	E	F	
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g	(S)	500	500	500	
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	(C)	975,9	975,4	971,9	
Temperatura de ensayo (°C)		28	27	27	
Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	(B)	653,2	653,1	650	
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g	(A)	487,7	487,9	487,5	
CALCULOS					
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,751	2,746	2,737	Promedio
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,	Gsb sss	2,820	2,814	2,807	2,814
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,956	2,946	2,944	
Absorción	%Abs	2,522	2,480	2,564	2,522
Gsb = $A/(B+S-C)$ Gsb sss = $S/(B+S-C)$ Gsa = $A/(B+A-C)$ %Absorción = $(S-A)/A * 100$					

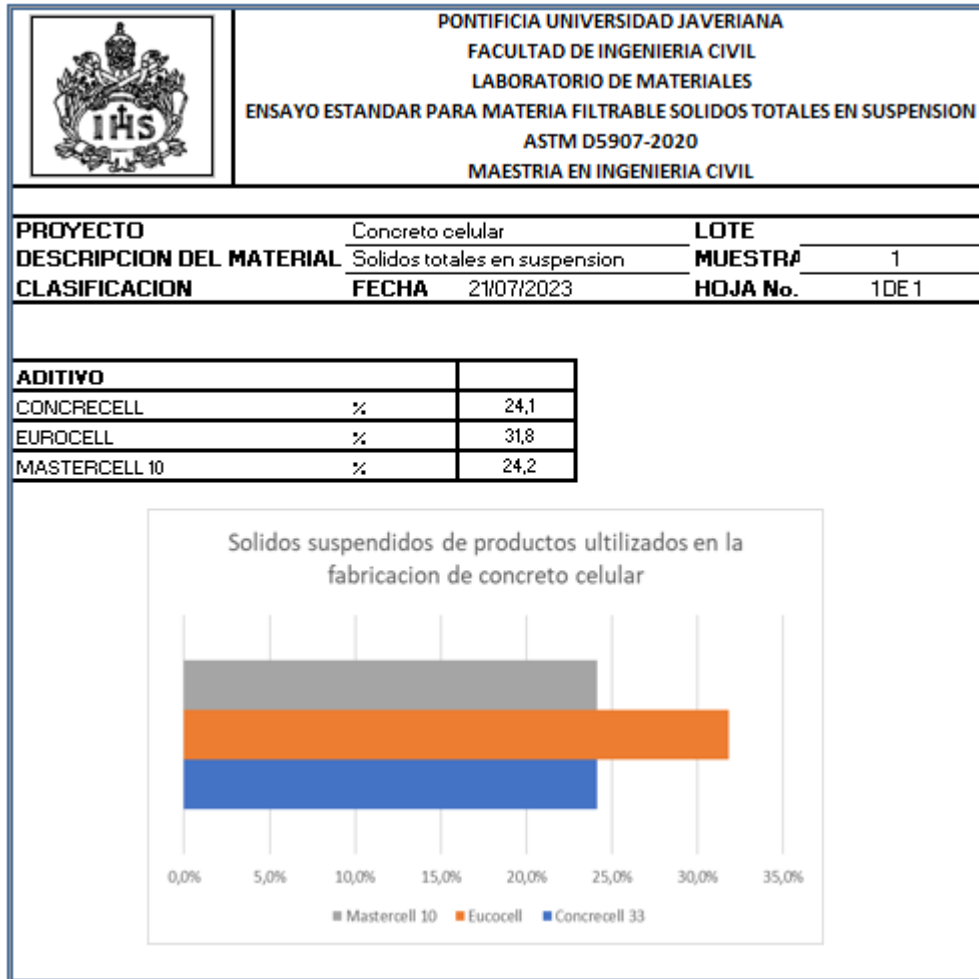
Anexo 21: Peso específico y absorción de agregados finos, arena de rio, NTC 237 (2020)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL			
PROYECTO	TRABAJO DE GRADO CURADO COCNETO	LOTE	1		
DESCRIPCION DEL MATERI	ARENA RIO GUENGUE LAS BRISAS	MUESTRA	1		
CLASIFICACION	ARENA	FECHA	11/08/2022	HOJA No.	1 DE 1
Ensayo No.		1	2	3	
Picnómetro No.		D	3	6	
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g	(S)	500	500	500	
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	(C)	968	959,8	959	
Temperatura de ensayo (°C)		29	29	29	
Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	(B)	653,0	644,4	643,8	
Masa al aire de la muestra seca al horno, g	(A)	493,9	494,5	494,2	
CALCULOS					2,674
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,670	2,679	2,674	Promedio
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,	Gsb sss	2,795	2,792	2,793	2,793
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,761	2,761	2,761	2,761
Absorción	%Abs	1,235	1,112	1,174	1,174
Gsb = A/(B+S-C) Gsb sss = S/(B+S-C) Gsa = A/(B+A-C) %Absorción = (S-A)/A * 100					

Anexo 22: Densidad de aditivos espumantes, ASTM D1217 (2020)



Anexo 23: Ensayo estándar para materia filtrable solidos totales en suspensión, ASTM D5907-2020




Anexo 24: Resultados de fundición empleando aditivo Mastercell 10

Valores		Unidades	Muestra						Promedio
			M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Lado 1	cm	5,07	5,08	5,01	5,10	5,04	5,05		
Lado 2	cm	5,01	5,07	5,04	5,04	5,07	5,14		
Lado 3	cm	5,01	5,10	5,04	5,04	5,03	5,00		
Volumen	cm3	127,31	131,17	127,06	129,50	128,35	129,76	128,86	
Peso sss	g	233,90	240,40	232,80	240,50	241,40	241,50		
Densidad sss	kg/m3	1837,27	1832,70	1832,20	1857,17	1880,76	1861,11	1850,20	
Peso seco horno	g	198,00	206,30	198,50					
Densidad seco horno	kg/m3	1555,28	1572,74	1562,25				1563,42	
Absorción	%	0,18	0,17	0,17				0,17	
Resistencia compresión	Mpa	8,12	7,93	8,30	9,45	10,24	8,79	8,80	

COMPILADO			
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)
M1	1837,27	8,12	0,18
M2	1832,70	7,93	0,17
M3	1832,20	8,30	0,17
M4	1857,17	9,45	
M5	1880,76	10,24	
M6	1861,11	8,79	
Promedio	1850,20	8,80	0,17

Anexo 25: Resultados de fundición empleando aditivo EucoCell 1000

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL																										
		PROYECTO	Concreto celular - Maestria			NORMA	NTC 220 (2022)																					
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Prismas de CC			HOJA	1 DE 2																							
CLASIFICACION	Cemento ART, arena río																											
MEZCLA AL 3%																												
EN ESTADO FRESCO																												
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 20%;">Aditivo</td> <td style="width: 10%;">en g</td> </tr> <tr> <td>3%</td> <td>11,0</td> </tr> </table>	Aditivo	en g	3%	11,0	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">Densidad de mezcla</td> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 15%;">vol recipiente</td> <td style="width: 15%;">580</td> <td style="width: 15%;">ml</td> <td style="width: 15%;"></td> </tr> <tr> <td>Minuto</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Densidad 3% kg/m3</td> <td>1439,30</td> <td>1376,00</td> <td>1339,70</td> <td>1313,80</td> <td>1307,40</td> </tr> </table>						Densidad de mezcla		vol recipiente	580	ml		Minuto	5	10	15	20	25	Densidad 3% kg/m3	1439,30	1376,00	1339,70	1313,80	1307,40
Aditivo	en g																											
3%	11,0																											
Densidad de mezcla		vol recipiente	580	ml																								
Minuto	5	10	15	20	25																							
Densidad 3% kg/m3	1439,30	1376,00	1339,70	1313,80	1307,40																							
ESTADO ENDURECIDO																												
Valores	Unidades	Muestra						Promedio																				
		31	32	33	34	35	36																					
Lado 1	cm	50,21	50,75	50,30	50,48	50,48	50,18																					
Lado 2	cm	50,80	50,45	50,60	50,24	50,24	50,49																					
Lado 3	cm	50,20	50,15	50,24	50,48	50,48	50,62																					
Volumen	cm3	128195,60	128462,74	127719,49	128329,13	128329,13	128730,25		128294,39																			
Curado	tipo	Inmersión	Inmersión	Inmersión	Aire	Aire	Aire																					
Peso curado 7 d	g	183,20	176,30	187,20	166,90	166,90	174,90	1422,39																				
Densidad curado	kg/m3	1429,07	1372,38	1465,71																								
		kg/m3			1300,56	1300,56	1358,65	1319,93																				
Resistencia compresión	Mpa	3,71	3,52	3,45				3,56																				
					3,60	3,60	4,10	3,77																				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestría	NORMA	NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Prismas de CC	HOJA	2 DE 2
CLASIFICACION	Cemento ART, arena río		

MEZCLA AL 5%

EN ESTADO FRESCO

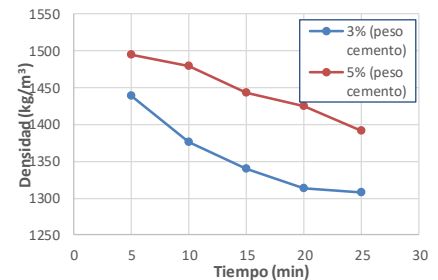
Aditivo	en g	Densidad de mezcla	vol recipiente	580	ml
5%	18,4	Minuto	5	10	15
		Densidad 5% kg/m3	1494,20	1479,30	1443,10
				20	25
				1425,00	1392,10

ESTADO ENDURECIDO


Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		51	52	53	54	55	56	
Lado 1	mm	50,49	50,15	50,33	50,12	50,34	50,22	
Lado 2	mm	50,11	51,10	50,57	50,71	50,89	51,10	
Lado 3	mm	50,47	50,02	50,07	50,03	50,13	50,24	
Volumen	mm3	127928,83	127396,40	126998,05	127396,40	128845,01	129132,22	127949,49
Curado	tipo	Inmersión	Inmersión	Inmersión	Aire	Aire	Aire	
Peso curado 7 d	g	184,80	185,30	187,30	167,20	171,40	173,90	
Densidad curado	kg/m3	1444,55	1454,52	1474,83				1457,96
	kg/m3				1312,44	1330,28	1346,68	1329,80
Resistencia compresión	Mpa	3,71	3,52	3,45				3,56
					3,60	3,60	4,10	3,77

COMPILADO


No	% Aditivo	Curado	Densidad fundición	Densidad curado 7 d	Resistencia 7d
			kg/m3	kg/m3	Mpa
1	3%	Agua	1307,40	1422,39	3,56
2	3%	Aire	1307,40	1319,93	3,77
3	5%	Agua	1392,10	1457,96	3,42
4	5%	Aire	1392,10	1329,80	3,54




Anexo 26: Resultados de fundición de concreto celular con espuma preformada – aditivo sin diluir

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
		PROYECTO <u>Concreto celular - Maestria</u>		NORMA NTC 220 (2022)				
DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>Cubos de CC</u>		HOJA 1 DE 1						
CLASIFICACION <u>Cemento ART, arena trituración</u>								
EN ESTADO FRESCO								
Densidad en fundición (kg/m3)	1181							
ESTADO ENDURECIDO								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Lado 1	mm	50,71	50,05	50,60	50,66	50,58	50,83	
Lado 2	mm	50,60	49,82	50,76	49,54	50,37	50,49	
Lado 3	mm	50,32	50,40	50,15	50,54	50,07	50,18	
Volumen	mm3	117073,70	117667,01	119795,82	105137,34	106859,13	113476,56	113334,93
Peso sss	g	160,70	162,90	158,00	131,70	149,50	137,30	
Densidad sss	kg/m3	1372,64	1384,42	1318,91	1252,65	1399,04	1209,94	1322,93
Peso seco horno	g				110,90	126,70	115,60	
Densidad seco horno	kg/m3				1054,81	1185,67	1018,71	1086,40
Absorción	%				18,76%	18,00%	18,77%	18,51%
Resistencia compresión	Mpa	1,67	1,86	1,60				1,71
COMPILADO								
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)					
M1	1372,64	1,67						
M2	1384,42	1,86						
M3	1318,91	1,60						
M4	1252,65		18,76%					
M5	1399,04		18,00%					
M6	1209,94		18,77%					
Promedio	1322,93	1,71	18,51%					

Anexo 27: Resultados de metodología de dosificación por ACI 523.3R-14

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
		PROYECTO <u>Concreto celular - Maestria</u> DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>Cubos de CC</u> CLASIFICACION <u>Cemento ART, arena DE RÍO</u>	NORMA NTC 220 (2022) HOJA 1 DE 1					
EN ESTADO FRESCO								
Densidad en fundicion (kg/m3)	791,07							
ESTADO ENDURECIDO								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Volumen	cm3	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00
Peso sss	g	87,90	91,60	96,40	116,60	83,80	95,40	
Densidad sss	kg/m3	703,20	732,80	771,20	932,80	670,40	763,20	762,27
Peso seco horno	g					64,40	75,80	
Densidad seco horno	kg/m3					515,20	606,40	560,80
Absorción	%					30,12%	25,86%	27,99%
Resistencia compresión	Mpa	0,18	0,16	0,21	0,16			0,18
COMPILADO								
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)					
M1	703,20	0,18						
M2	732,80	0,16						
M3	771,20	0,21						
M4	932,80	0,16						
M5	670,40		30,12%					
M6	763,20		25,86%					
Promedio	762,27	0,18	27,99%					

Anexo 28: Resultados de relación aditivo espumante/agua

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
		PROYECTO	Concreto celular - Maestria			NORMA	NTC 220 (2022)	
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cubos de CC			HOJA	1 DE 3		
CLASIFICACION		Cemento ART, arena trituración						
RELACIÓN 1/20								
EN ESTADO FRESCO								
Densidad en fundición (kg/m3)	1616,8							
ESTADO ENDURECIDO								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		21	22	23	24	25	26	
Lado 1	mm	50,28	50,17	49,99	50,26	50,13	50,49	127274,07
Lado 2	mm	50,12	50,36	50,26	49,99	50,47	49,99	
Lado 3	mm	50,41	51,12	51,03	49,91	50,27	50,18	
Volumen	mm3	127034,89	129157,81	128212,74	125398,75	127186,17	126654,07	
Peso sss	g	245,80	219,60	191,70	234,50	145,00	179,10	
Densidad sss	kg/m3	1934,90	1700,25	1495,17	1870,03	1140,06	1414,09	
Peso seco horno	g				203,90	126,15	156,00	1283,18
Densidad seco horno	kg/m3				1626,01	991,81	1231,70	
Absorción	%				15,01%	14,95%	14,81%	14,92%
Resistencia compresión	Mpa	9,39	2,17	4,83				5,46
COMPILADO								
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)					
21	1934,90	9,39						
22	1700,25	2,17						
23	1495,17	4,83						
24	1870,03		15,01%					
25	1140,06		14,95%					
26	1414,09		14,81%					
Promedio	1592,42	5,46	14,92%					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestría	NORMA	NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cubos de CC	HOJA	2 DE 3
CLASIFICACION	Cemento ART, arena trituración		

RELACIÓN 1/40

EN ESTADO FRESCO

Densidad en fundicion (kg/m3)	1616,8
--------------------------------------	--------

ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		41	42	43	44	45	46	
Lado 1	mm	50,64	50,40	50,65	50,40	50,36	50,11	
Lado 2	mm	50,18	50,03	50,00	50,04	49,98	50,50	
Lado 3	mm	50,99	50,50	50,80	50,69	50,38	50,42	
Volumen	mm3	129571,46	127336,36	128651,00	127840,99	126806,10	127590,58	127966,08
Peso sss	g	199,50	152,80	175,50	171,70	136,40	198,00	
Densidad sss	kg/m3	1539,69	1199,97	1364,16	1343,07	1075,66	1551,84	1345,73
Peso seco horno	g				149,80	116,90	171,21	
Densidad seco horno	kg/m3				1171,77	921,88	1341,87	1145,17
Absorción	%				14,62%	16,68%	15,65%	15,65%
Resistencia compresión	Mpa	7,38	6,75	7,78				7,30

COMPILADO

Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)
41	1539,69	7,38	
42	1199,97	6,75	
43	1364,16	7,78	
44	1343,07		14,62%
45	1075,66		16,68%
46	1551,84		15,65%
Promedio	1345,73	7,30	15,65%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestría	NORMA	NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cubos de CC	HOJA	3 DE 3
CLASIFICACION	Cemento ART, arena trituración		

RELACIÓN 1/60

EN ESTADO FRESCO

Densidad en fundicion (kg/m3)	1616,8
-------------------------------	--------


ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		61	62	63	64	65	66	
Lado 1	mm	50,30	50,20	50,65	50,40	50,36	50,11	
Lado 2	mm	50,17	50,37	50,00	50,04	49,98	50,25	
Lado 3	mm	50,69	50,43	50,80	50,69	50,38	50,64	
Volumen	mm3	127918,80	127515,99	128651,00	127840,99	126806,10	127512,91	127707,63
Peso sss	g	203,90	210,60	231,90	211,50	224,20	238,30	
Densidad sss	kg/m3	1593,98	1651,56	1802,55	1654,40	1768,05	1868,83	1723,23
Peso seco horno	g				184,40	195,95	207,60	
Densidad seco horno	kg/m3				1442,42	1545,27	1628,07	1538,59
Absorción	%				14,70%	14,42%	14,79%	14,63%
Resistencia compresión	Mpa	8,32	4,12	7,30				6,58


COMPILADO

Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)
61	1593,98	8,32	
62	1651,56	4,12	
63	1802,55	7,30	
64	1654,40		14,70%
65	1768,05		14,42%
66	1868,83		14,79%
Promedio	1723,23	6,58	14,63%

Anexo 29: Resultados de tipo de curado

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
		PROYECTO <u>Concreto celular - Maestria</u> DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>Cubos de CC</u> CLASIFICACION <u>Cemento ART, arena río</u>		NORMA <u>NTC 220 (2022)</u> HOJA <u>1 DE 1</u>				
EN ESTADO FRESCO								
Densidad en fundicion (kg/m3)	1159,4							
ESTADO ENDURECIDO								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		61	62	63	64	65	66	
Lado 1	cm	5,04	5,07	5,07	5,04	5,03	5,07	
Lado 2	cm	5,02	5,10	5,01	5,05	5,08	5,09	
Lado 3	cm	5,03	5,08	5,04	5,04	5,06	5,08	
Volumen	cm3	127,07	131,33	127,68	128,25	129,36	131,02	
Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Cámara	Cámara	
Peso curado	g	143,70	144,10	160,40	162,80	142,90	143,60	
Densidad curado	kg/m3	1130,84	1097,26				1114,05	
Densidad curado	kg/m3			1256,29	1269,37		1262,83	
Densidad curado	kg/m3					1104,68	1100,35	
Resistencia compresión	Mpa	0,19	0,20				0,19	
Resistencia compresión	Mpa			0,08	0,20		0,14	
Resistencia compresión	Mpa					0,19	0,23	
COMPILADO								
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Curado					
61	1130,84	0,19	Aire					
62	1097,26	0,20						
63	1256,29	0,08	Inmersión					
64	1269,37	0,20						
65	1104,68	0,19	Cámara					
66	1096,03	0,23						
Promedio	1114,05	0,21						

Anexo 30: Resultados de método de mezclado en volumen – tipos de mezcladoras

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
		PROYECTO <u>Concreto celular - Maestria</u>		NORMA <u>ASTM C796 (2019)</u>		
DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>Cilindros de CC</u>		HOJA <u>1 DE 2</u>				
CLASIFICACION <u>Cemento UG, arena trituración</u>						
MEZCLADORA EJE VERTICAL GRANDE						
EN ESTADO FRESCO						
Densidad en fundición (kg/m3)	1.612,84					
ESTADO ENDURECIDO						
Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,20	10,11	10,15	10,12	
Diametro 2	cm	10,12	10,16	10,18	10,16	
Altura 1	cm	10,19	10,14	10,20	10,13	
Altura 2	cm	20,37	20,31	20,34	20,44	
Volumen	cm3	1661,22	1640,93	1656,26	1645,04	1650,86
Peso sss	g	2888,00	2852,00	2846,00	2854,00	
Densidad sss	kg/m3	1738,48	1738,04	1718,33	1734,91	1732,44
Peso seco horno	g			2480,00	2434,00	
Densidad seco horno	kg/m3			1497,35	1479,60	1488,47
Absorción	%			14,76%	17,26%	16,01%
Resistencia compresión	Mpa	1,98	1,87	2,03	2,05	1,98
COMPILADO						
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)			
M1	1738,48	1,98				
M2	1738,04	1,87				
M3	1718,33	2,03	14,76%			
M4	1734,91	2,05	17,26%			
Promedio	1732,44	1,98	16,01%			



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestría	NORMA	ASTM C796 (2019)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC	HOJA	2 DE 2
CLASIFICACION	Cemento UG, arena trituración		

MEZCLADORA BASCULANTE

EN ESTADO FRESCO

Densidad en fundicion (kg/m3)	2.221,14
--------------------------------------	----------


ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,13	10,11	10,00	10,18	
Diametro 2	cm	10,12	10,20	10,20	10,19	
Altura 1	cm	10,11	10,13	10,20	10,12	
Altura 2	cm	20,35	20,49	20,31	20,35	
Volumen	cm3	1636,64	1656,79	1640,68	1654,55	1647,16
Peso sss	g	3618,00	3666,00	3628,00	3684,00	
Densidad sss	kg/m3	2210,63	2212,71	2211,28	2226,58	2215,30
Peso seco horno	g			3288,00	3340,00	
Densidad seco horno	kg/m3			2004,05	2018,67	2011,36
Absorción	%			10,34%	10,30%	10,32%
Resistencia compresión	Mpa	20,06	18,74	17,13	18,27	18,55

COMPILADO

Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)	Absorción (%)
M1	2210,63	20,06	
M2	2212,71	18,74	
M3	2211,28	17,13	10,34%
M4	2226,58	18,27	10,30%
Promedio	2215,30	18,55	10,32%

Anexo 31: Resultados de agregados finos

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR				
		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
PROYECTO	Concreto celular - Maestria		NORMA	ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC		HOJA	1 DE 2		
CLASIFICACION	Cemento ART, arena trituración					
ARENA DE TRITURACIÓN						
EN ESTADO FRESCO						
Densidad en fundicion (kg/m3)	1.453,80	Asentamiento (cm)		22,80		
ESTADO ENDURECIDO						
Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3 (dañado)	M4	
Diametro 1	cm	10,12	10,16		10,17	
Diametro 2	cm	10,10	10,15		10,18	
Altura 1	cm	20,35	20,42		20,43	
Altura 2	cm	20,33	20,34		20,43	
Volumen	cm3	1632,60	1650,36		1660,89	
Peso sss	g	2634,00	2626,00		2630,00	
Densidad sss	kg/m3	1613,38	1591,17		1583,48	
Resistencia compresión	Mpa	1,13	1,02		1,17	1,11
COMPILADO						
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)				
M1	1613,38	1,13				
M2	1591,17	1,02				
M3 (dañado)						
M4	1583,48	1,17				
Promedio	1596,01	1,11				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC	HOJA	2 DE 2
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río		

ARENA DE RÍO

EN ESTADO FRESCO

Densidad en fundicion (kg/m3)	1.565,69	Asentamiento (cm)	20,40
--------------------------------------	----------	--------------------------	-------


ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,11	10,37	10,10	10,51	
Diametro 2	cm	10,23	10,41	10,20	10,42	
Altura 1	cm	10,18	10,41	10,21	10,46	
Altura 2	cm	20,38	20,39	20,50	20,30	
Volumen	cm3	1652,27	1734,99	1653,48	1739,41	1695,04
Peso sss	g	3006,00	2860,00	2824,00	2902,00	
Densidad sss	kg/m3	1819,31	1648,42	1707,91	1668,38	1711,01
Resistencia compresión	Mpa	1,63	2,10	1,55	1,96	1,81

COMPILADO

Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)
M1	1819,31	1,63
M2	1648,42	2,10
M3	1707,91	1,55
M4	1668,38	1,96
Promedio	1711,01	1,81

Anexo 32: Resultados de tipo de cemento

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL				
		PROYECTO <u>Concreto celular - Maestria</u>		NORMA <u>ASTM C796 (2019)</u>		
DESCRIPCION DEL MATERIAL <u>Cilindros de CC</u>		HOJA <u>1 DE 2</u>				
CLASIFICACION <u>Cemento UG, arena río</u>						
CEMENTO UG						
EN ESTADO FRESCO						
Densidad en fundición (kg/m3)	1.416,16					
ESTADO ENDURECIDO						
Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,25	10,16	10,12	10,19	
Diametro 2	cm	10,18	10,13	10,24	10,16	
Altura 1	cm	20,32	20,34	20,30	20,37	
Altura 2	cm	20,31	20,37	20,37	20,46	
Volumen	cm3	1665,00	1646,51	1650,69	1661,47	1655,92
Peso aire	g	2544,00	2463,00	2468,00	2510,00	
Densidad aire	kg/m3	1527,92	1495,89	1495,13	1510,71	1507,41
Resistencia compresión	Mpa	1,41	1,35	1,53	1,46	1,44
COMPILADO						
Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)				
M1	1527,92	1,41				
M2	1495,89	1,35				
M3	1495,13	1,53				
M4	1510,71	1,46				
Promedio	1507,41	1,44				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC	HOJA	2 DE 2
CLASIFICACION	Cemento ART, arena río		

CEMENTO ART

EN ESTADO FRESCO

Densidad en fundicion (kg/m3)	1.396,13
--------------------------------------	----------


ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,23	10,12	10,18	10,14	
Diametro 2	cm	10,20	10,18	10,14	10,15	
Altura 1	cm	20,35	20,37	20,43	20,38	
Altura 2	cm	20,38	20,53	20,51	20,43	
Volumen	cm3	1671,51	1651,87	1662,63	1653,93	1659,99
Peso aire	g	2384,00	2356,00	2322,00	2360,00	
Densidad aire	kg/m3	1426,25	1426,26	1396,58	1426,90	1419,00
Resistencia compresión	Mpa	2,64	2,71	2,44	2,51	2,58

COMPILADO

Muestra	Densidad (kg/m3)	Resistencia (Mpa)
M1	1426,25	2,64
M2	1426,26	2,71
M3	1396,58	2,44
M4	1426,90	2,51
Promedio	1419,00	2,58

Anexo 33: Resultados de curva con arena de trituración (Mastercell 10)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL									
		PROYECTO	Concreto celular - Maestría Cilindros de CC					NORMA	ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10					HOJA	1 DE 7				
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10										
DENSIDAD 1400											
EN ESTADO FRESCO											
Densidad objetivo (kg/m3)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.363,81	Error (%)	2,6%	Slump (cm)	23,00				
ESTADO ENDURECIDO											
Valores	Unidades	Muestra								Promedio	
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
Diametro 1	cm	10,49	10,36	10,44	10,40	10,41	10,03	10,45	10,43	1718,15	
Diametro 2	cm	10,52	10,48	10,59	10,42	10,32	10,00	10,42	10,37		
Altura 1	cm	20,16	20,28	20,49	20,27	20,32	20,31	20,24	20,64		
Altura 2	cm	20,27	20,11	20,53	20,27	20,24	20,31	20,27	20,35		
Volumen	cm3	1743,82	1715,35	1779,19	1721,78	1726,54	1601,32	1721,31	1735,87		
Peso sss	g							2734,00	2636,00		
Densidad sss	kg/m3							1588,33	1518,55		1553,44
Peso seco horno	g							2164,00	2084,00		
Densidad seco horno	kg/m3							1257,19	1200,55	1228,87	
Absorción	%							26,34%	26,49%	26,41%	
Resistencia compresión 7d	Mpa	1,63	0,83	1,07						1,17	
Resistencia compresión 28d	Mpa				0,61	0,53	0,37			0,50	
Resistencia compresión 30d	Mpa							0,80	0,68	0,74	
COMPILADO											
Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)						
M1		1,63									
M2		0,83									
M3		1,07									
M4			0,61								
M5			0,53								
M6			0,37								
M7	1588,33			0,80	26,34%						
M8	1518,55			0,68	26,49%						
Promedio	1553,44	1,17	0,50	0,74	26,41%						



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO		Concreto celular - Maestria				NORMA		ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cilindros de CC				HOJA		2 DE 7		
CLASIFICACION		Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10								
DENSIDAD 1400										
EN ESTADO FRESCO										
Densidad objetivo (kg/m3)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.353,34	Error (%)	3,3%	Slump (cm)	20,00			
ESTADO ENDURECIDO										
Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	10,22	10,12	10,43	10,15	10,22	10,13	10,15	10,15	
Diametro 2	cm	10,04	10,21	10,48	10,11	10,16	10,10	10,14	10,10	
Altura 1	cm	20,27	20,39	20,25	20,35	20,44	20,46	20,29	20,28	
Altura 2	cm	20,33	20,38	20,32	20,36	20,42	20,48	20,35	20,23	
Volumen	cm3	1641,47	1648,45	1736,80	1647,35	1661,91	1645,67	1643,40	1631,77	1657,10
Peso sss	g						2644,00	2520,00	2578,00	
Densidad sss	kg/m3						1606,64	1533,41	1579,88	1573,31
Peso seco horno	g						2176,00	2016,00	2074,00	
Densidad seco horno	kg/m3						1322,26	1226,73	1271,01	1273,33
Absorción	%						21,51%	25,00%	24,30%	23,60%
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,41	0,27							0,34
Resistencia compresión 28d	Mpa			0,54	0,14	0,25				0,31
Resistencia compresión 30d	Mpa						0,27	0,19	0,46	0,31
COMPILADO										
Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)					
M1		0,41								
M2		0,27								
M3			0,54							
M4			0,14							
M5			0,25							
M6	1606,64			0,27						
M7	1533,41			0,19	25,00%					
M8	1579,88			0,46	24,30%					
Promedio	1273,33	0,34	0,31	0,31	23,60%					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO		Concreto celular - Maestria				NORMA		ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cilindros de CC				HOJA		3 DE 7		
CLASIFICACION		Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10								
DENSIDAD 1800										
EN ESTADO FRESCO										
Densidad objetivo (kg/m3)	1.800,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.884,78	Error (%)	4,7%	Slump (cm)	15,00			
ESTADO ENDURECIDO										
Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	10,22	10,43	10,43	10,15	10,22	10,13	10,15	10,15	
Diametro 2	cm	10,12	10,21	10,48	10,14	10,16	10,10	10,14	10,10	
Altura 1	cm	20,27	20,39	20,25	20,35	20,36	20,35	20,29	20,28	
Altura 2	cm	20,33	20,38	20,32	20,36	20,42	20,48	20,35	20,23	
Volumen	cm3	1675,94	1682,20	1736,80	1650,71	1657,79	1648,88	1643,40	1633,27	1666,12
Peso sss	g						3178,00	3094,00	3126,00	
Densidad sss	kg/m3						1927,36	1882,69	1913,95	1908,00
Peso seco horno	g						2723,00	2708,00	2693,00	
Densidad seco horno	kg/m3						1651,42	1647,81	1648,84	1649,35
Absorción	%						16,71%	14,25%	16,08%	15,68%
Resistencia compresión 7d	Mpa	5,65	4,56							5,11
Resistencia compresión 28d	Mpa			9,12	9,54	8,11				8,92
Resistencia compresión 30d	Mpa						8,12	9,12	13,09	10,11
COMPILADO										
Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)					
M1		5,65								
M2		4,56								
M3			9,12							
M4			9,54							
M5			8,11							
M6	1927,36			8,12						
M7	1882,69			9,12	14,25%					
M8	1913,95			13,09	16,08%					
Promedio	1649,35	5,11	8,92	10,11	15,68%					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC	HOJA	4 DE 7
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10		

DENSIDAD 1600

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m3)	1.600,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.562,76	Error (%)	2,3%	Slump (cm)	14,80
---------------------------	----------	-------------------------------	----------	-----------	------	------------	-------

ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	10,15	10,14	10,54	10,36	10,19	10,19	10,18	10,24	
Diametro 2	cm	10,24	10,18	10,58	10,17	10,17	10,35	10,19	10,23	
Altura 1	cm	20,41	20,36	20,34	20,41	20,46	20,36	20,44	20,33	
Altura 2	cm	20,43	20,38	20,53	20,43	20,51	20,49	20,35	20,49	
Volumen	cm3	1667,49	1646,39	1788,98	1689,91	1666,47	1690,78	1661,72	1678,40	1686,27
Peso sss	g						2928,00	2870,00	2888,00	
Densidad sss	kg/m3						1731,75	1727,13	1720,68	1726,52
Peso seco horno	g						2422,00	2374,00	2400,00	
Densidad seco homo	kg/m3						1432,48	1428,64	1429,93	1430,35
Absorción	%						20,89%	20,89%	20,33%	20,71%
Resistencia compresión 7d	Mpa	1,38	1,04							1,21
Resistencia compresión 28d	Mpa			1,99	1,63	1,43				1,68
Resistencia compresión 30d	Mpa						2,68	1,70	2,50	2,29

COMPILADO

Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)
M1		1,38			
M2		1,04			
M3			1,99		
M4			1,63		
M5			1,43		
M6	1731,75			2,68	
M7	1727,13			1,70	20,89%
M8	1720,68			2,50	20,33%
Promedio	1430,35	1,21	1,68	2,29	20,71%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros de CC	HOJA	5 DE 7
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10		

DENSIDAD 1800

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m3)	1.800,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.983,42	Error (%)	10,2%	Slump (cm)	10,50
---------------------------	----------	-------------------------------	----------	-----------	-------	------------	-------

ESTADO ENDURECIDO

Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	10,19	10,23	10,24	10,15	10,32	10,45	10,17	10,26	
Diametro 2	cm	10,24	10,21	10,20	10,29	10,17	10,46	10,34	10,13	
Altura 1	cm	20,35	20,36	20,41	20,41	20,51	20,41	20,42	20,37	
Altura 2	cm	20,36	20,42	20,49	20,40	20,46	20,38	20,31	20,45	
Volumen	cm3	1667,36	1668,15	1678,04	1672,83	1689,02	1750,57	1682,20	1666,70	1684,36
Peso sss	g						3510,00	3284,00	3338,00	
Densidad sss	kg/m3						2005,07	1952,21	2002,76	1986,68
Peso seco horno	g						3154,00	2922,00	2950,00	
Densidad seco homo	kg/m3						1801,70	1737,01	1769,97	1769,56
Absorción	%						11,29%	12,39%	13,15%	12,28%
Resistencia compresión 7d	Mpa	12,85	12,19							12,52
Resistencia compresión 28d	Mpa			14,11	15,46	15,85				15,14
Resistencia compresión 30d	Mpa						20,26	18,03	21,67	19,99

COMPILADO

Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)
M1		12,85			
M2		12,19			
M3			14,11		
M4			15,46		
M5			15,85		
M6	2005,07			20,26	
M7	1952,21			18,03	12,39%
M8	2002,76			21,67	13,15%
Promedio	1769,56	12,52	15,14	19,99	12,28%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO		Concreto celular - Maestria				NORMA		ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cilindros de CC				HOJA		6 DE 7		
CLASIFICACION		Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10								
DENSIDAD 1200										
EN ESTADO FRESCO										
Densidad objetivo (kg/m3)	1.200,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.133,60	Error (%)	5,5%	Slump (cm)	21,50			
ESTADO ENDURECIDO										
Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	10,49	10,36	10,03	10,38	10,48	10,18	10,39	10,36	
Diametro 2	cm	10,52	10,48	10,05	10,35	10,36	10,20	10,45	10,43	
Altura 1	cm	20,16	20,28	20,29	20,22	20,21	20,21	20,26	20,28	
Altura 2	cm	20,27	20,11	20,30	20,36	20,21	20,21	20,16	20,30	
Volumen	cm3	1743,82	1715,35	1606,02	1711,65	1724,63	1649,03	1723,50	1721,66	1699,46
Peso sss	g						2350,00	2270,00	2308,00	
Densidad sss	kg/m3						1425,08	1317,09	1340,57	1360,91
Peso seco horno	g						1954,00	1660,00	1720,00	
Densidad seco horno	kg/m3						1184,94	963,16	999,04	1049,04
Absorción	%						20,27%	36,75%	34,19%	30,40%
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,00	0,00							0,00
Resistencia compresión 28d	Mpa			0,10	0,08	0,07				0,08
Resistencia compresión 30d	Mpa						0,00	0,00	0,00	0,00
COMPILADO										
Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)					
M1		0,00								
M2		0,00								
M3			0,10							
M4			0,08							
M5			0,07							
M6	1425,08			0,00						
M7	1317,09			0,00	36,75%					
M8	1340,57			0,00	34,19%					
Promedio	1049,04	0,00	0,08	0,00	30,40%					




PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO		Concreto celular - Maestria				NORMA		ASTM C796 (2019)		
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Cilindros de CC				HOJA		7 DE 7		
CLASIFICACION		Cemento ART, arena de trituración, aditivo Mastercell 10								
DENSIDAD 1800										
EN ESTADO FRESCO										
Densidad objetivo (kg/m3)	1.800,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	2.094,35	Error (%)	16,4%	Slump (cm)	2,00			
ESTADO ENDURECIDO										
Valores	Unidades	Muestra								Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
Diametro 1	cm	9,97	9,98	10,03	10,38	10,48	10,18	10,39	10,36	
Diametro 2	cm	9,99	9,96	10,05	10,35	10,36	10,20	10,45	10,43	
Altura 1	cm	20,22	20,57	20,29	20,22	20,21	20,21	20,26	20,28	
Altura 2	cm	20,22	20,67	20,30	20,36	20,21	20,21	20,16	20,30	
Volumen	cm3	1575,70	1605,00	1606,02	1711,65	1724,63	1649,03	1723,50	1721,66	1664,65
Peso sss	g						3272,00	3306,00	3222,00	
Densidad sss	kg/m3						1984,20	1918,19	1871,45	1924,61
Peso seco horno	g						2932,00	2964,00	2886,00	
Densidad seco homo	kg/m3						1778,01	1719,75	1676,29	1724,69
Absorción	%						11,60%	11,54%	11,64%	11,59%
Resistencia compresión 7d	Mpa	17,91	16,63							17,27
Resistencia compresión 28d	Mpa			26,96	26,80	28,39				27,39
Resistencia compresión 30d	Mpa						30,33	28,61	30,63	29,86
COMPILADO										
Muestra	Densidad SSS (kg/m3)	Resistencia 7d (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)	Resistencia 30d (Mpa)	Absorción (%)					
M1		17,91								
M2		16,63								
M3			26,96							
M4			26,80							
M5			28,39							
M6	1984,20			30,33						
M7	1918,19			28,61	11,54%					
M8	1871,45			30,63	11,64%					
Promedio	1724,69	17,27	27,39	29,86	11,59%					

Anexo 34: Resultados de curva con arena de río (Concrecell 33)

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR						
		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)					
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	1 DE 6					
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33							
DENSIDAD 1600								
EN ESTADO FRESCO								
Densidad objetivo (kg/m3)	1.600,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.584,91	Error (%)	0,9%			
ESTADO ENDURECIDO CILINDROS								
Valores	Unidades	Muestra				Promedio		
		M1	M2	M3	M4			
Diametro 1	cm	10,11	10,19	10,18	10,22			
Diametro 2	cm	10,24	10,16	10,18	10,26			
Altura 1	cm	20,41	20,35	20,38	20,40			
Altura 2	cm	20,42	20,36	20,42	20,40			
Volumen	cm3	1659,27	1654,31	1660,82	1679,10		1663,37	
Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión			
Resistencia compresión 7d	Mpa	3,91	3,94			3,93		
Resistencia compresión 7d	Mpa			3,56	2,56	3,06		
ESTADO ENDURECIDO CUBOS								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	4,39	3,22	3,77				3,79
Resistencia compresión 7d	Mpa				3,11	3,21	3,12	3,15
COMPILADO								
Muestra	Resistencia 7d (Mpa)							
	Aire	Inmersión						
Cilindros	3,93	3,06						
Cubos	3,79	3,15						
Diferencia (%)	3,4%	2,8%						



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	2 DE 6
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		

DENSIDAD 1400

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m ³)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m ³)	1.376,10	Error (%)	1,7%
--	----------	--	----------	-----------	------

ESTADO ENDURECIDO CILINDROS

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,19	10,13	10,10	10,20	
Diametro 2	cm	10,18	10,12	10,14	10,12	
Altura 1	cm	20,41	20,34	20,32	20,41	
Altura 2	cm	20,49	20,33	20,34	20,32	
Volumen	cm ³	1666,65	1635,95	1634,62	1650,93	1647,04

Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión
--------	--	------	------	-----------	-----------

Resistencia compresión 7d	Mpa	0,94	1,00			0,97
Resistencia compresión 7d	Mpa			1,03	1,07	1,05

ESTADO ENDURECIDO CUBOS

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,94	1,00	1,03				0,99
Resistencia compresión 7d	Mpa				1,07	1,14	0,75	0,99

COMPILADO

Muestra	Resistencia 7d (Mpa)	
	Aire	Inmersión
Cilindros	0,97	1,05
Cubos	0,99	0,99
Diferencia (%)	2,1%	6,0%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	3 DE 6
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		

DENSIDAD 1200

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m3)	1.200,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.219,49	Error (%)	1,6%
---------------------------	----------	-------------------------------	----------	-----------	------

ESTADO ENDURECIDO CILINDROS

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,15	10,18	10,21	10,21	
Diametro 2	cm	10,13	10,17	10,20	10,35	
Altura 1	cm	20,22	20,22	20,19	20,25	
Altura 2	cm	20,26	20,32	20,30	20,26	
Volumen	cm3	1634,27	1648,62	1655,66	1679,89	1654,61

Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión
--------	--	------	------	-----------	-----------

Resistencia compresión 7d	Mpa	1,00	0,97			0,99
Resistencia compresión 7d	Mpa			0,95	0,97	0,96

ESTADO ENDURECIDO CUBOS

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,92	1,10	0,78				0,93
Resistencia compresión 7d	Mpa				0,98	1,08	0,99	1,02

COMPILADO

Muestra	Resistencia 7d (Mpa)	
	Aire	Inmersión
Cilindros	0,99	0,96
Cubos	0,93	1,02
Diferencia (%)	5,2%	6,1%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	4 DE 6
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		

DENSIDAD 1000

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m3)	1.000,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.019,78	Error (%)	2,0%
---------------------------	----------	-------------------------------	----------	-----------	------

ESTADO ENDURECIDO CILINDROS

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,19	10,08	10,23	10,22	
Diametro 2	cm	10,21	10,17	10,21	10,17	
Altura 1	cm	20,31	20,33	20,53	20,27	
Altura 2	cm	20,22	20,34	20,44	20,36	
Volumen	cm3	1655,14	1638,25	1680,21	1656,86	1657,62

Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión
--------	--	------	------	-----------	-----------

Resistencia compresión 7d	Mpa	0,49	0,33			0,41
Resistencia compresión 7d	Mpa			0,32	0,38	0,35

ESTADO ENDURECIDO CUBOS

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,41	0,37	0,31				0,36
Resistencia compresión 7d	Mpa				0,38	0,31	0,44	0,38

COMPILADO

Muestra	Resistencia 7d (Mpa)	
	Aire	Inmersión
Cilindros	0,41	0,35
Cubos	0,36	0,38
Diferencia (%)	11,0%	8,1%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	5 DE 6
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		

DENSIDAD 800

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m3)	800,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	837,07	Error (%)	4,6%
---------------------------	--------	-------------------------------	--------	-----------	------

ESTADO ENDURECIDO CILINDROS

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,19	10,17	10,10	10,13	
Diametro 2	cm	10,13	10,19	10,09	10,09	
Altura 1	cm	20,31	20,44	20,34	20,27	
Altura 2	cm	20,33	20,34	20,27	20,23	
Volumen	cm3	1646,84	1659,56	1625,16	1624,69	1639,06

Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión
--------	--	------	------	-----------	-----------

Resistencia compresión 7d	Mpa	0,14	0,18			0,16
Resistencia compresión 7d	Mpa			0,21	0,19	0,20

ESTADO ENDURECIDO CUBOS

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,17	0,09	0,20				0,15
Resistencia compresión 7d	Mpa				0,08	0,10	0,18	0,12

COMPILADO

Muestra	Resistencia 7d (Mpa)	
	Aire	Inmersión
Cilindros	0,16	0,20
Cubos	0,15	0,12
Diferencia (%)	4,2%	39,2%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES
ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR

MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

PROYECTO	Concreto celular - Maestria	NORMA	ASTM C796 (2019), NTC 220 (2022)
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cilindros y cubos de CC	HOJA	6 DE 6
CLASIFICACION	Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		

DENSIDAD 1400

EN ESTADO FRESCO

Densidad objetivo (kg/m ³)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m ³)	1.290,63	Error (%)	7,8%
--	----------	--	----------	-----------	------

ESTADO ENDURECIDO CILINDROS

Valores	Unidades	Muestra				Promedio
		M1	M2	M3	M4	
Diametro 1	cm	10,14	10,22	10,20	10,14	
Diametro 2	cm	10,20	10,22	10,09	10,23	
Altura 1	cm	20,13	20,20	20,21	20,21	
Altura 2	cm	20,12	20,21	20,19	20,25	
Volumen	cm ³	1636,06	1656,76	1633,49	1647,34	1643,41

Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión
--------	--	------	------	-----------	-----------

Resistencia compresión 7d	Mpa	1,08	0,99			1,03
Resistencia compresión 7d	Mpa			1,00	1,04	1,02


ESTADO ENDURECIDO CUBOS

Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Curado		Aire	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Inmersión	
Resistencia compresión 7d	Mpa	0,93	0,96	1,02				0,97
Resistencia compresión 7d	Mpa				0,78	1,01	0,73	0,84


COMPILADO

Muestra	Resistencia 7d (Mpa)	
	Aire	Inmersión
Cilindros	1,03	1,02
Cubos	0,97	0,84
Diferencia (%)	6,4%	17,5%


Anexo 35: Resultados de ensayos en bloques y muretes – prueba piloto

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL									
		PROYECTO DESCRIPCION DEL MATERIAL CLASIFICACION	Concreto celular - Maestria Bloques de CC Cemento UG, arena de río, aditivo Concrecell 33					NORMA HOJA	NTC 4024 (2023) 1 DE 1		
DENSIDAD 1600											
EN ESTADO FRESCO											
Densidad objetivo (kg/m3)	1.600,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.537,00	Error (%)	3,9%						
ESTADO ENDURECIDO											
Valores	Unidades	Muestra								Promedio	
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
Lado a1	cm	21,21	21,07	21,09	21,12	21,12	21,29	21,27	21,41		
Lado a2	cm	21,19	21,08	21,11	21,16	21,05	21,31	21,40	21,54		
Lado b1	cm	9,83	9,70	9,67	9,76	9,76	10,17	9,89	10,26		
Lado b2	cm	9,82	9,69	9,67	9,81	9,71	9,82	9,86	10,70		
Lado c1	cm	12,45	12,54	12,37	12,35	12,59	12,38	12,51	12,71		
Lado c2	cm	12,45	12,43	12,39	12,43	12,48	12,24	12,57	12,70		
Volumen	cm3	2593,61	2550,96	2525,19	2563,46	2572,97	2620,72	2641,97	2859,36		2616,03
Curado		Aire	Aire	Inmersión	Inmersión	Aire	Aire	Inmersión	Inmersión		
Peso aire	g	3879,00	3854,00			3764,00	3828,00				
Densidad aire	kg/m3	1495,60	1510,80			1462,90	1460,67		1482,49		
Resistencia compresión 7d	Mpa	2,87	2,81						2,84		
Resistencia compresión 7d	Mpa			2,47	3,28				2,88		
Resistencia compresión 28d	Mpa					2,95	3,16		3,06		
Resistencia compresión 28d	Mpa							4,00	4,30	4,15	
COMPILADO											
Resistencia 7d (Mpa)											
Tiempo ensayo (d)	Aire	Inmersión									
7	2,84	2,88									
28	3,06	4,15									

Anexo 36: Resultados de ensayos en bloques

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR						
		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
PROYECTO DESCRIPCION DEL MATERIAL CLASIFICACION	Concreto celular - Maestria Bloques de CC Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33				NORMA HOJA	NTC 4024 (2023) 1 DE 1		
DENSIDAD 1400								
EN ESTADO FRESCO								
Densidad objetivo (kg/m3)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.332,00	Error (%)	4,9%			
ESTADO ENDURECIDO								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Lado a1	cm	29,98	29,94	30,11	29,97	29,93	29,93	
Lado a2	cm	30,04	29,94	30,14	30,01	29,92	29,92	
Lado b1	cm	10,05	10,05	10,03	10,02	10,04	10,06	
Lado b2	cm	10,01	10,07	10,02	10,03	10,07	10,09	
Lado c1	cm	20,21	20,10	20,08	20,09	20,06	20,08	
Lado c2	cm	20,14	20,15	20,14	20,13	20,03	20,06	
Volumen	cm3	6072,68	6061,58	6073,28	6046,07	6031,46	6050,99	
Peso 3d	g	7684,00	8464,00	8364,00	7622,00	7714,00	7586,00	
Densidad 3d	kg/m3	1265,34	1396,34	1377,18	1260,65	1278,96	1253,68	
Peso sss	g				8680,00	8796,00	8524,00	
Densidad sss	kg/m3				1435,64	1458,35	1408,69	
Peso seco horno	g				7084,00	7158,00	7058,00	
Densidad seco horno	kg/m3				1171,67	1186,78	1166,42	
Absorción	%				18,39%	18,62%	17,20%	
Resistencia compresión 28d	Mpa	0,84	2,08	1,46			1,46	
COMPILADO								
7 días		28 días						
Densidad desencofrado	Peso (kg)	Resistencia a compresión (Mpa)	Absorción					
1305,36	7,91	1,46	18,07%					

Anexo 37: Resultados de ensayos en muretes

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES ANALISIS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA CONCRETO CELULAR						
		MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL						
PROYECTO DESCRIPCION DEL MATERIAL CLASIFICACION	Concreto celular - Maestria Muretes de CC Cemento ART, arena de río, aditivo Concrecell 33		NORMA HOJA	NTC 4024 (2023) 1 DE 1				
DENSIDAD 1400								
EN ESTADO FRESCO								
Densidad objetivo (kg/m3)	1.400,00	Densidad en fundicion (kg/m3)	1.369,00	Error (%)	2,2%			
ESTADO ENDURECIDO MORTERO DE PEGA								
Valores	Unidades	Muestra			Promedio			
		M1	M2	M3				
Volumen	cm3	125,00	125,00	125,00				
Peso 28d	g	257,10	252,20	257,40	255,57			
Densidad 28d	kg/m3	2056,80	2017,60	2059,20	2044,53			
Resistencia compresión 28d	Mpa	13,70	12,35	11,40	12,48			
ESTADO ENDURECIDO MURETES								
Valores	Unidades	Muestra						Promedio
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
Lado a1	cm	29,93	29,93	30,00	30,07	30,01	30,11	
Lado a2	cm	29,92	29,92	29,97	30,07	30,13	30,11	
Lado b1	cm	10,04	10,06	10,05	10,02	10,02	10,03	
Lado b2	cm	10,07	10,09	10,07	10,03	10,03	10,03	
Lado c1	cm	20,06	20,08	20,02	20,00	20,00	20,10	
Lado c2	cm	20,03	20,06	19,97	20,15	20,15	20,01	
Volumen	cm3	6031,46	6050,99	6031,47	6051,64	6051,64	6056,68	6045,65
Peso 3d	g	7714,00	7586,00	8358,00	8384,00	8330,00	8340,00	8118,67
Densidad 3d	kg/m3	1278,96	1253,68	1385,73	1385,41	1376,49	1376,99	1342,88
Murete id		MT1		MT2		MT3		
Resistencia compresión 56d	Mpa	1,45		1,77		1,35		1,52
COMPILADO								
Mortero de pega 28 días	Muretes 56 días							
Resistencia a compresión (Mpa)	Resistencia a compresión (Mpa)							
12,48	1,52							