

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Determinación de las propiedades mecánicas y físicas del  
concreto celular utilizando distintas dosis de agente  
espumante.**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Manuel Vasquez Orellana  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2019







**Determinación de las propiedades mecánicas y físicas del  
concreto celular utilizando distintas dosis de agente  
espumante.**



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Determinación de las propiedades mecánicas y físicas del  
concreto celular utilizando distintas dosis de agente  
espumante.**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Manuel Vasquez Orellana  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2019




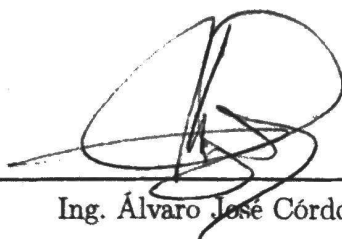
Vo.Bo.:

(f)   
MBA. Plinio Estuardo Herrera Rodas

Tribunal Examinador:

(f)   
MBA. Plinio Estuardo Herrera Rodas

(f)   
MSc. Roberto Godo Levensen

(f)   
Ing. Álvaro José Córdova Guirola

Fecha de aprobación: Guatemala, 03 de diciembre de 2019.



En primer lugar, agradezco a Dios a quien doy la honra por mi trabajo y estudios. Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala, en especial al departamento de Ingeniería Civil dirigido por el Ing. Robert Godo Levensen por facilitarme la educación y el conocimiento para desarrollar el presente estudio. Agradezco a mi asesor, el Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas jefe del departamento de investigación y desarrollo de Cementos Progreso por su asesoría y apoyo constante en la elaboración del presente estudio. Agradezco al personal del laboratorio CETEC de Cementos Progreso en especial a los ingenieros Ariel Osorio, Wilson Aifan y Gerardo Nochez por su apoyo en la elaboración de los ensayos de laboratorio. Agradezco al equipo de laboratorio de Mixto Listo Planta Sur encabezado por los ingenieros Hans Calel, Diego Camajá y Fredy Ruano por su apoyo en la elaboración de las mezclas y ensayos en estado fresco. Agradezco a la empresa Sound Check, en especial a su fundador el Ing. Jorge Castillo por su apoyo en asesoría y suministro de equipo de medición acústica.

Quiero agradecer a mis padres Héctor y Claudia por su amor, gran ejemplo y esfuerzo para permitirme alcanzar mis sueños y metas. Sin su amor y esfuerzo, no lo hubiese podido lograr. Agradezco a mi hermana Marisabel, por su amor y apoyo en cada etapa de mi vida. Un abrazo al cielo a mi abuelo Héctor Q.D.E.P. que fue el primer ingeniero de la familia. También agradezco a mis abuelos Ana María, Julio y Ana María por sus invaluable consejos y amor. Gracias a Susy por su incondicional amor y apoyo. A todos mis tíos y primos que siempre me han apoyado y creído en mí. A todos les estaré siempre infinitamente agradecido...



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xiv</b>
<b>Resumen</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>11</b>
6.1. Particularidades del concreto . . . . .	11
6.1.1. Definición del concreto . . . . .	11
6.1.2. Componentes del concreto . . . . .	11
6.1.3. Curado del concreto . . . . .	16
6.1.4. Concreto en estado fresco . . . . .	16
6.1.5. Concreto en estado endurecido . . . . .	17
6.2. Propiedades del concreto . . . . .	18
6.2.1. Propiedades mecánicas del concreto . . . . .	18
6.2.2. Propiedades físicas del concreto . . . . .	20
6.2.3. Porosidad . . . . .	21
6.2.4. Conductividad térmica . . . . .	23

6.2.5.	Aislamiento acústico . . . . .	27
6.3.	Concreto celular . . . . .	34
6.3.1.	Definición . . . . .	34
6.3.2.	Componentes del concreto celular . . . . .	36
6.3.3.	Tipos de concreto celular . . . . .	37
6.3.4.	Mezclado y manejo . . . . .	37
6.3.5.	Propiedades mecánicas . . . . .	38
6.3.6.	Propiedades físicas . . . . .	40
6.3.7.	Aplicaciones típicas del concreto celular . . . . .	43
6.3.8.	Sostenibilidad del concreto celular . . . . .	44
6.3.9.	Eficiencia energética . . . . .	44
<b>7.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>45</b>
7.1.	Generalidades . . . . .	45
7.2.	Diseño de mezclas . . . . .	45
7.3.	Materiales . . . . .	50
7.3.1.	Cemento . . . . .	50
7.3.2.	Agregados . . . . .	50
7.3.3.	Aditivos . . . . .	51
7.4.	Equipo de laboratorio . . . . .	51
7.5.	Elaboración de espuma . . . . .	53
7.6.	Elaboración de mezclas . . . . .	54
7.7.	Elaboración especímenes . . . . .	55
7.8.	Curado . . . . .	56
7.9.	Ensayos en estado fresco . . . . .	56
7.10.	Ensayos en estado endurecido . . . . .	60
7.10.1.	Propiedades mecánicas . . . . .	60
7.10.2.	Propiedades físicas . . . . .	62
<b>8.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>73</b>
8.1.	Resultados en estado fresco . . . . .	73
8.1.1.	Densidad . . . . .	73
8.1.2.	Temperatura . . . . .	74
8.1.3.	Consistencia . . . . .	74
8.1.4.	Volumen de vacíos . . . . .	75
8.2.	Resultados en estado endurecido . . . . .	76
8.2.1.	Propiedades mecánicas . . . . .	76
8.2.2.	Propiedades físicas . . . . .	82
<b>9.</b>	<b>Análisis de costos</b>	<b>101</b>
<b>10.</b>	<b>Discusión de resultados</b>	<b>107</b>
10.1.	Propiedades en estado fresco . . . . .	108
10.2.	Propiedades mecánicas . . . . .	108
10.3.	Propiedades físicas . . . . .	109
10.4.	Costo . . . . .	110
10.5.	Aplicaciones . . . . .	110
<b>11.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>111</b>

<b>12.Recomendaciones</b>	<b>113</b>
<b>13.Bibliografía</b>	<b>115</b>
<b>14.Anexos</b>	<b>117</b>
14.0.1. Resistencia a la compresión mezcla A . . . . .	117
14.0.2. Resistencia a la compresión mezcla B . . . . .	118
14.0.3. Resistencia a la compresión mezcla C . . . . .	119
14.0.4. Resistencia a la compresión mezcla D . . . . .	120
14.0.5. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla A . . . . .	121
14.0.6. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla B . . . . .	122
14.0.7. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla C . . . . .	123
14.0.8. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla D . . . . .	124
14.0.9. Ensayo de permeabilidad . . . . .	125
14.0.10.Ficha técnica aditivo Polyheed 789 . . . . .	126
14.0.11.Ficha técnica aditivo Euocell 1000 . . . . .	127
14.0.12.Plano de caja térmica . . . . .	129
14.0.13.Plano de caja acústica . . . . .	129
<b>15.Glosario</b>	<b>131</b>



---

## Lista de figuras

---

1.	Requisitos físicos para aditivos incorporadores de aire . . . . .	15
2.	Tipos de fallas en cilindros de concreto . . . . .	18
3.	Relación entre permeabilidad y resistividad eléctrica . . . . .	21
4.	Coefficiente k típico de algunos materiales . . . . .	24
5.	Emisividad de algunos materiales . . . . .	25
6.	Absorción de radiación incidente sobre una superficie opaca . . . . .	26
7.	Espectro de frecuencias del ruido blanco . . . . .	28
8.	Energía por octava en ruido blanco . . . . .	28
9.	Espectro de frecuencias del ruido rosa . . . . .	29
10.	Energía por octava en ruido rosa . . . . .	29
11.	Propiedades de las ondas sonoras . . . . .	30
12.	Intensidades de sonidos . . . . .	32
13.	dBFS vs DBu . . . . .	34
14.	Métodos de elaboración de concreto celular . . . . .	35
15.	Procedimiento de elaboración de concreto celular . . . . .	38
16.	Porcentaje de encogimiento según densidad a 56 días . . . . .	41
17.	Concreto celular utilizado como relleno fluido . . . . .	44
18.	Proporción de materiales Mezcla A . . . . .	47
19.	Proporción de materiales Mezcla B . . . . .	48
20.	Proporción de materiales Mezcla C . . . . .	49
21.	Proporción de materiales Mezcla D . . . . .	50
22.	Equipo de laboratorio Mixto Listo Planta Sur . . . . .	52
23.	Composición de espuma . . . . .	53
24.	Adición de aditivo espumante al compresor neumático . . . . .	53
25.	Espuma preformada para concreto celular . . . . .	54
26.	Mezclado de concreto celular . . . . .	55
27.	Medición de temperatura de concreto fresco . . . . .	56
28.	Medición de densidad en estado fresco . . . . .	57
29.	Ensayo de cono de Abrams invertido . . . . .	58
30.	Medidor tipo B . . . . .	59
31.	Medición de volumen de vacíos . . . . .	59
32.	Ensayo de resistencia a la compresión . . . . .	61

33.	Ensayo de módulo de elasticidad . . . . .	62
34.	Muros para ensayos de conductividad térmica y acústica . . . . .	63
35.	Medición de resistividad eléctrica . . . . .	64
36.	Medición de permeabilidad por método de presión hidrostática . . . . .	65
37.	Medición de permeabilidad por método de Torrent . . . . .	65
38.	Pruebas de aislamiento térmico . . . . .	67
39.	Medición de temperatura en caras externas . . . . .	68
40.	Equipo de medición de aislamiento acústico . . . . .	70
41.	Pruebas de aislamiento acústico sin muro . . . . .	71
42.	Pruebas de aislamiento acústico con muro . . . . .	71
43.	Cemento vs temperatura en estado fresco . . . . .	74
44.	Densidad vs volumen de vacíos . . . . .	76
45.	Cilindros de las cuatro mezclas . . . . .	76
46.	Resistencia a la compresión . . . . .	78
47.	Densidad vs resistencia a la compresión . . . . .	78
48.	Densidad vs relación de Poisson . . . . .	80
49.	Presión vs deformación unitaria Mezcla A . . . . .	80
50.	Presión vs deformación unitaria Mezcla B . . . . .	81
51.	Presión vs deformación unitaria Mezcla C . . . . .	81
52.	Presión vs deformación unitaria Mezcla D . . . . .	82
53.	Encogimiento en mezclas . . . . .	83
54.	Densidad seca vs densidad húmeda . . . . .	84
55.	Agua penetrando cilindros en prueba de presión hidrostática . . . . .	85
56.	Resistividad vs volumen de vacíos . . . . .	86
57.	Calorimetría interna de muros . . . . .	87
58.	Temperatura en caras externas de muros . . . . .	88
59.	Coefficiente de conductividad térmica vs densidad . . . . .	91
60.	Exposición de mezclas a ruido rosa . . . . .	92
61.	Aislamiento acústico de Mezcla A . . . . .	94
62.	Aislamiento acústico de Mezcla B . . . . .	95
63.	Aislamiento acústico de Mezcla C . . . . .	96
64.	Aislamiento acústico de Mezcla D . . . . .	97
65.	Reducción acústica de cada mezcla por frecuencia . . . . .	98
66.	Índice de reducción acústica ponderado . . . . .	99
67.	Registros pico en mezclas . . . . .	100
68.	Aforo de espuma . . . . .	102
69.	Costo unitario de mezclas . . . . .	103
70.	Costo unitario de mezclas vs coeficiente de conductividad térmica . . . . .	104
71.	Costo unitario de mezclas vs índice de reducción acústica ponderado . . . . .	105

---

## Lista de cuadros

---

1.	Clasificación de concreto según su consistencia . . . . .	23
2.	Clasificación de concreto autocompactable según su diámetro de flujo . . . . .	23
3.	Resistencia a la compresión típica de concreto celular . . . . .	39
4.	Módulo de elasticidad para distintas densidades de concreto celular . . . . .	40
5.	Coefficientes de conductividad térmica típicos del concreto celular . . . . .	42
6.	Resistencia al fuego típica del concreto celular . . . . .	43
7.	Diseño de mezcla A . . . . .	46
8.	Diseño de mezcla B . . . . .	47
9.	Diseño de Mezcla C . . . . .	48
10.	Diseño de Mezcla D . . . . .	49
11.	Densidad en estado fresco . . . . .	73
12.	Temperatura en estado fresco . . . . .	74
13.	Asentamiento de mezclas . . . . .	75
14.	Diámetro de flujo de mezclas . . . . .	75
15.	Volumen de vacíos en estado fresco . . . . .	75
16.	Resistencia a la compresión a los 7 días . . . . .	77
17.	Resistencia a la compresión a los 28 días . . . . .	77
18.	Módulo de elasticidad y relación de Poisson . . . . .	79
19.	Encogimiento de mezclas . . . . .	82
20.	Densidad seca de mezclas . . . . .	83
21.	Medición de permeabilidad de mezclas . . . . .	85
22.	Temperatura en caras externas de muros . . . . .	87
23.	Coefficiente de conductividad térmica de mezclas . . . . .	91
24.	índice de reducción acústica ponderado . . . . .	93
25.	Índice de reducción acústica diferenciado . . . . .	98
26.	Registros pico en mezclas . . . . .	99
27.	Costos de materiales . . . . .	101
28.	Costos de mezclas . . . . .	102
29.	Costo unitario de mezclas vs coeficiente de conductividad térmica . . . . .	103
30.	Costo unitario de mezclas vs índice de reducción acústica ponderado . . . . .	104

31. Propiedades mecánicas y físicas de las mezclas . . . . . 108

Esta investigación tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas y físicas del concreto celular elaborado con aditivo espumante preformado. Se define al concreto celular como cualquier concreto con densidades inferiores a  $1920 \text{ kg/m}^3$ . El concreto celular puede ser elaborado por métodos químicos o bien por la inclusión de espuma en la mezcla. Esta puede ser preformada o generada durante el proceso de mezclado. Estos concretos de baja densidad pueden incluir o excluir agregados en su composición.

Se diseñaron tres mezclas de concreto celular con densidades de  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $800 \text{ kg/m}^3$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$  y volúmenes de vacíos de 69 %, 58 % y 37 % respectivamente. Con fines comparativos, se elaboró una mezcla control de concreto convencional con densidad de  $2400 \text{ kg/m}^3$  y volumen de vacíos de 1.6 %. Las mezclas de concreto celular fueron elaboradas sin presencia de agregados mientras que la mezcla de concreto convencional incluyó en su diseño agregados finos y gruesos.

Se llevaron a cabo los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de las mezclas en estado fresco y en estado endurecido. Se efectuaron ensayos de densidad, consistencia, temperatura, contenido de aire, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, permeabilidad, volumen de vacíos, resistividad eléctrica, conductividad térmica y conductividad acústica. Adicionalmente, se elaboró un análisis comparativo de costos entre el concreto celular y el concreto convencional. Finalmente, se generaron conclusiones y se propusieron usos no estructurales para las mezclas de concreto celular evaluadas en este estudio.



The purpose of this research is to determine the mechanical and physical properties of cellular concrete made with preformed foaming additive. Cellular concrete is defined as any concrete with densities below  $1920 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Cellular concrete can be made by chemical methods or by the inclusion of foam in the mixture. This foam can be preformed or generated during the mixing process. Low density concrete can include or exclude aggregates in its composition.

Three mixtures of cellular concrete were designed, with densities of  $400 \text{ kg} / \text{m}^3$ ,  $800 \text{ kg} / \text{m}^3$  and  $1200 \text{ kg} / \text{m}^3$  with void volumes of 69%, 58 % and 37 % respectively. For comparative purposes, a conventional concrete control mix with a density of  $2400 \text{ kg} / \text{m}^3$  and void volume of 1.6 % was produced. The cellular concrete mixes were made without the presence of aggregates while the conventional concrete mixture included fine and coarse aggregates in its design.

The physical and mechanical properties tests of each concrete mix, in the fresh and hardened state were carried out. Density, consistency, temperature, air content, compressive strength, modulus of elasticity, permeability, void volume, electrical resistivity, thermal conductivity and acoustic conductivity tests, among others were evaluated. Additionally, a comparative analysis of costs between cellular concrete and conventional concrete was developed. Finally, conclusions were generated and non-structural uses were proposed for the cellular concrete mixes evaluated in this study.



El concreto celular se define como cualquier concreto de densidad inferior a  $1920 \text{ kg}/m^3$ . Este puede ser elaborado por medio de métodos químicos o espumados de manera que quede retenido un mayor volumen de vacíos en la mezcla. En este trabajo de graduación se estudió el concreto celular elaborado con aditivo espumante preformado. En Guatemala, el concreto celular es poco conocido pues no se encuentra en el mercado nacional ni se han llevado a cabo investigaciones importantes sobre el mismo. Sin embargo, es un material altamente utilizado en países desarrollados con climas extremos gracias a sus propiedades físicas de aislamiento térmico y acústico, que se logran debido al alto contenido de aire en la mezcla y que redundan en un ahorro energético en calentadores o aires acondicionados al ser utilizado en muros estructurales o tabiquería.

Este tipo de concreto ayuda a reducir las cargas muertas en edificaciones gracias a su baja densidad. Esta característica lo hace atractivo en regiones sísmicas como la mayor parte de Guatemala y el resto de Latinoamérica. Es necesario invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías de construcción para asegurar construcciones más eficientes con respecto a las demandas de los usuarios y que al mismo tiempo sean amigables con el medio ambiente. Finalmente, este material supone una solución geotécnica a los rellenos de tuberías enterradas en donde se necesita reducir las cargas laterales circundantes.



El concreto celular nace en Europa en 1929 con el objeto de elaborar un concreto ligero y con mejores propiedades de aislamiento térmico. Este concreto se usa ampliamente para usos estructurales y no estructurales en países de Norte América, Europa y Asia. Recientemente el concreto celular ha comenzado a ser una alternativa a la mampostería tradicional en países de América del Sur, como Argentina y Chile. Esto se debe a sus beneficios de disminución de cargas muertas, menores costos de transporte, aislamiento térmico, resistencia al fuego y aumento en la rapidez de construcción.

En Guatemala, y el resto de Centro América, el concreto celular es relativamente desconocido y no se encuentra a la venta aún por lo que no se utiliza regularmente en construcciones. En 2015, el Capítulo Estudiantil ACI USAC-Quetzaltenango desarrolló una de las primeras investigaciones sobre concreto celular en Guatemala. Dicho informe se titula *Fundamentos, especificaciones, usos y futuro del concreto celular en Guatemala*, y recomienda el uso de este material como alternativa a la mampostería tradicional por medio de la elaboración y comercialización de bloques prefabricados de concreto celular aireado en autoclave.[1]. Este documento es la primera investigación experimental de concreto celular elaborado con espuma preformada en Guatemala.



En un mundo que cada vez demanda mejores propiedades mecánicas y físicas en los materiales de construcción, la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en dichos materiales se ha convertido en una parte fundamental de la industria de la construcción en el desarrollo de obras civiles. Comúnmente se investiga sobre concretos de alta resistencia; sin embargo, este trabajo de graduación aborda quizá el extremo menos estudiado del concreto: los concretos de baja resistencia y densidad. Estos concretos, aunque no poseen propiedades mecánicas tan atractivas como los concretos convencionales, poseen múltiples propiedades físicas superiores. Tal es el caso del aislamiento térmico y acústico que, aunado a una baja densidad, convierten a este material en ideal para tabiquería y capa aislante en losas de entrepiso. En países desarrollados con climas extremos como Alemania, Chile, Argentina, Francia y Suiza, el concreto celular se vende en bloques para construcciones de mampostería como una alternativa térmica a las construcciones de mampostería tradicional.

Los beneficios de aislamiento térmico y acústico se deben a un mayor contenido de aire en la mezcla y redundan en beneficios económicos y ambientales pues se consume menos energía eléctrica en calefacciones o aires acondicionados. Adicionalmente, la tendencia global de ciudades grandes y sobrepobladas favorece la construcción de apartamentos residenciales cuyo mayor problema suele ser el aislamiento acústico. Asimismo, su uso como tabiquería reduce las cargas muertas del edificio gracias a la baja densidad de este tipo de concreto lo cual es especialmente útil en regiones sísmicas. Guatemala es un país sísmico en donde el concreto celular aún no se ha introducido a la industria de la construcción de manera continuada. Bajo esta premisa, se decidió emprender este estudio que abarca el marco teórico de lo que es el concreto celular y adicionalmente se efectúan pruebas mecánicas, físicas y análisis de costos para determinar las posibles aplicaciones de este en el mercado guatemalteco.



### 4.1. Objetivo general

Determinar las propiedades mecánicas y físicas del concreto celular utilizando distintas dosis de agente espumante.

### 4.2. Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades físicas de densidad, consistencia, temperatura y contenido de aire del concreto celular en estado fresco con distintas dosificaciones de agente espumante.
- Evaluar las propiedades físicas de permeabilidad, volumen de vacíos, conductividad térmica y conductividad acústica de concreto celular en estado endurecido con distintas dosificaciones de agente espumante.
- Verificar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de concreto celular con distintas dosificaciones de agente espumante.
- Comparar el costo del concreto celular con distintas dosificaciones de agente espumante con el costo del concreto convencional.



Esta investigación aplica para el estudio y elaboración de concretos celulares elaborados con espuma preformada para densidades de entre  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Se estudian las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson para estas mezclas. Se estudian las propiedades físicas de densidad, consistencia, temperatura permeabilidad, volumen de vacíos, conductividad térmica y conductividad acústica de concreto celular con distintas dosificaciones de agente espumante.

Este estudio es vinculante para el desarrollo de tecnologías de materiales de construcción. En especial, sus aplicaciones como aislante térmico y acústico en tabiquería y sobre losas de entepiso son útiles en la industria de la construcción. Finalmente, este material ofrece aplicaciones geotécnicas como rellenos fluidos para tuberías subterráneas en donde se desea reducir las cargas laterales circundantes.



## 6.1. Particularidades del concreto

### 6.1.1. Definición del concreto

El concreto es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio ligante dentro del cual hay partículas o fragmentos de agregado, generalmente una combinación de agregado fino y agregado grueso; en el concreto, el ligante es una mezcla de cemento hidráulico y agua. Este puede ser elaborado con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementicios.

El cemento hidráulico es un cemento que se endurece por la reacción química con agua. El cemento hidráulico más utilizado es el cemento portland. En Guatemala, son utilizados otros tipos de cemento hidráulico, como lo son cementos mezclados con adiciones puzolánicas. Las puzolanas, tanto naturales como artificiales, se usan a menudo como un ingrediente cementicio del concreto. [2]

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción por su alta resistencia a la compresión. Sin embargo, su resistencia a la tracción es de aproximadamente 10 % de su resistencia a la compresión. Por lo tanto, en la mayoría de los casos donde la estructura está expuesta a esfuerzos de tracción, es necesario reforzar el concreto con acero. [2]

### 6.1.2. Componentes del concreto

El concreto es una mezcla de agregados, cemento y agua. Por lo general, los agregados están compuestos de arena y grava. El concreto puede tener otras adiciones cementicias como las puzolanas naturales y artificiales, así como aditivos químicos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. La proporción de los ingredientes en la mezcla otorga al

concreto sus propiedades físicas y mecánicas.

## **Cemento Portland y cementos mezclados**

El cemento Portland se fabrica mediante un proceso que comienza combinando una fuente de calcio, como la piedra caliza, una fuente de sílice y alúmina, como la arcilla, y una fuente de óxido de hierro como el mineral de hierro. La mezcla correctamente proporcionada de las materias primas se muele finamente y luego se calienta a aproximadamente  $1500C(2700F)$  para que tengan lugar las reacciones que forman las fases de cemento. El producto del horno de cemento es conocido como clinker de cemento portland. Después de enfriar, el clinker se muele con una adición de sulfato de calcio (yeso) para formar un cemento portland.

Los cementos hidráulicos mezclados se hacen generalmente moliendo clinker de cemento portland con sulfato de calcio (yeso) y una cantidad de un material reactivo adecuado tal como las puzolanas naturales crudas o calcinadas, escoria granulada de alto horno o humo de sílice. También se pueden hacer mezclando finamente estos ingredientes previamente molidos por separado. [2]

## **Agua**

La correcta selección y adición del agua en la mezcla es primordial para determinar las propiedades mecánicas y físicas del concreto resultante. En primer lugar, la relación agua cemento determina la resistencia a la compresión del concreto. Una mayor proporción de agua da mayor plasticidad y, por lo tanto, es más fácil de trabajar y de llenar por completo las áreas deseadas, aunque la resistencia del concreto a la compresión disminuye. Una mayor proporción de cemento brinda mayor resistencia a la compresión y en general mejores propiedades mecánicas. En segundo lugar, el agua genera una reacción química al entrar en contacto con el cemento que adhiere los agregados a la mezcla y permite una adherencia homogénea.

El agua utilizada en la mezcla debe cumplir con la norma COGUANOR NTG 41073 (ASTM C1602) la cual indica que es posible utilizar casi cualquier agua natural que sea potable y no tenga sabor u olor pronunciado. Impurezas excesivas al mezclar el agua pueden afectar el tiempo de fraguado, la resistencia y la estabilidad del volumen, pero también pueden causar eflorescencia o corrosión del refuerzo. En donde sea posible, el uso de agua con altas concentraciones de sólidos disueltos debería ser evitado. Sales u otras sustancias nocivas aportadas por los agregados o aditivos se adicionan a los que podrían ser contenidos en el agua de la mezcla. Estas cantidades adicionales deben ser consideradas en la evaluación de la aceptabilidad del total de impurezas que pueden ser nocivas para el concreto o el acero. COGUANOR NTG 41073 (ASTM C1602) permite el uso de agua potable sin pruebas e incluye métodos para calificar aguas no potables con consideración de los efectos sobre el tiempo y resistencia. Las frecuencias de prueba se establecen para asegurar el seguimiento continuo de la calidad del agua. [2]

## **Agregados**

La norma COGUANOR NTG 41006 define el término agregado como un material granular tal como arena, grava, piedra triturada (o pedrín), o escoria de alto horno usada con un medio cementante para formar el concreto de cemento hidráulico o mortero.

### **Agregado grueso**

El agregado predominantemente, retenido en un tamiz de 4,75mm (No. 4) o aquella porción de un agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No. 4).

### **Agregado fino**

Agregado que pasa el tamiz de 9,5 mm (3/8"), que pasa casi completamente el tamiz de 4,75 mm /No. 4) y es retenido casi en su totalidad por el tamiz de 75 Km (No. 200), o aquella porción de agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y es retenido en el tamiz de 75  $\mu m$ (No.200).

### **Agregado de alta densidad**

Es el agregado con una densidad relativa mayor de 3.3, tal como barita (sulfato de bario natural) magnetita, limonita, hierro o acero.

### **Agregado de baja densidad**

Es el agregado con una densidad aparente menor que 1129 kg/| (70 lb/ $pie^3$ ), tal como la pómez, la escoria volcánica, cenizas volcánicas, toba, y diatomita, arcilla expandida o calcinada, esquisto, pizarra, esquisto diatomáceo, perlita, vermiculita o escoria de metales, y subproductos de la combustión de carbón de piedra o coque. [3]

## **Aditivos químicos**

Un aditivo se define como un material distinto del agua, agregados, cemento hidráulico y refuerzo de fibra utilizado como ingrediente de concreto o mortero, y agregado a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Los aditivos químicos son principalmente sustancias solubles en agua utilizadas para mejorar las propiedades del concreto o mortero en estado plástico y endurecido. Estos beneficios incluyen un aumento de la resistencia a la compresión y a la flexión en todas las edades, disminución de la permeabilidad, durabilidad mejorada, reducción de la corrosión, reducción de la contracción, mayor asentamiento y trabajabilidad, bombeo mejorado, entre otros. Un aditivo o una combinación de aditivos puede ser requerido para lograr los resultados deseados específicos; sin embargo, se requieren diseños de mezcla apropiados para obtener beneficios óptimos. Los aditivos químicos no son

sustitutos de una mezcla adecuada en las proporciones de los ingredientes que conforman el concreto ni de las buenas prácticas de construcción. [4]

Se agregan en pequeñas cantidades a la mezcla inmediatamente antes o después del mezclado. La norma COGUANOR NTG 41070 (ASTM C494) especifica los aditivos químicos que se utilizan para el concreto. Se indican ocho tipos distintos de aditivos para el concreto hidráulico:

- TIPO A: Aditivos reductores de agua: Aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada.

- TIPO B: Aditivos retardadores: Aditivo que retarda el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto.

- TIPO C: Aditivos aceleradores: Aditivo que acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto.

- TIPO D: Aditivos reductores de agua y retardadores: Aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir una consistencia dada y retarda el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto.

- TIPO E: Aditivos reductores de agua y aceleradores: Aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir una consistencia dada y acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto.

- TIPO F: Aditivos reductores de agua de alto rango: Aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más.

- TIPO G: Aditivos reductores de agua, de alto rango y retardadores: Aditivo que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más y retarda el fraguado del concreto.

- TIPO S: Aditivos de desempeño específico: Aditivo que provee las características de desempeño deseables, diferentes a la reducción del contenido de agua o a las del cambio del tiempo de fraguado sin producir efectos adversos sobre las propiedades del concreto endurecido y su durabilidad. [4]

- Para este estudio se utilizó MasterPolyheed 789, el cual cumple con la especificación de los Tipos B y D, ya que es un aditivo reductor de agua y retardante.

o Aditivos inclusivos de aire: Se usan para mejorar la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo. Deben cumplir con la norma COGUANOR NTG 41069 (ASTM C260 y C618). Forman espuma al mezclarse con el agua de la mezcla generando billones de celdas de aire independientes que se incorporan en el concreto. El aire atrapado en la mezcla ayuda a resistir los esfuerzos de contracción y expansión por fraguado y temperatura. Estos aditivos suelen utilizarse en países con climas extremos o con el propósito de mejorar características físicas del concreto. En Guatemala, el concreto celular debe cumplir con los siguientes requisitos.

<b>TABLA 1 Requisitos Físicos<sup>A</sup></b>	
<b>Aditivos incorporadores de aire</b>	
Tiempo de fraguado, desviación admisible respecto al de control, h:min:	
Inicial: no más de	1:15 antes Ni 1:15 después
Final: no más de	1:15 antes Ni 1:15 después
Resistencia a la compresión, mín, % del de control:	
3 días	90
7 días	90
28 días	90
Resistencia a la flexión, mín, % del de control: <sup>B</sup>	
3 días	90
7 días	90
28 días	90
Cambio de longitud, máx retracción	
(requisitos alternativos): <sup>B, C</sup>	
Porcentaje del de control	120
Aumento sobre el control, puntos de porcentaje <sup>D</sup>	0.006
Factor de durabilidad relativa, mín	80
Exudación de la cantidad neta de agua de mezclado, máx porcentaje	
Sobre el control <sup>E</sup>	2

Figura 1: Requisitos físicos para aditivos incorporadores de aire  
Fuente: COGUANOR NTG 41069

- A: Los valores en la tabla incluyen la tolerancia para la variación normal en los resultados de ensayo. El motivo del requisito del 90 % de resistencia a la compresión para aditivos incorporadores de aire es requerir un nivel de comportamiento comparable con el del concreto de referencia.
- B: Aplicable solo cuando es requerido por el comprador.
- C: Requisitos alternativos, el límite “porcentaje de del control” es relevante cuando el cambio de longitud del control es 0.30 % o mayor, el límite “aumento sobre el control” es relevante cuando el cambio de longitud del control es menor a 0.030 %.
- D: Aplicable cuando la retracción del concreto de control es menor a 0.030 %.
- E: La exudación es computada como un porcentaje de la cantidad neta de agua de mezclado en cada concreto. El agua neta de mezclado es el agua en exceso de la presente como agua absorbida en los agregados. Por ejemplo, una mezcla de concreto que contiene 4.65 kg de agua de mezclado neta y produce 0.29 kg de agua de exudación tendría 6.24 % en masa de agua en exudación respecto al agua neta de mezclado. Si una mezcla de control produce 7.05 % de agua de exudación, el cambio en la exudación entre las mezclas de concreto de ensayo y de control sería de – 0.81 puntos de porcentaje.[5]

### 6.1.3. Curado del concreto

El curado del concreto es la práctica de mantener el concreto húmedo y a temperaturas específicas para incrementar la adherencia entre la pasta y los agregados y evitar pérdidas de humedad. Un correcto curado es importante para evitar agrietamientos o pérdida de resistencia a la compresión por un secado prematuro. Inmediatamente después de moldear y acabar, los especímenes deben ser almacenados por un período de hasta 48 h en un rango de temperatura entre 16 y 27 ° Celsius. La norma que rige el curado de especímenes de ensayo de concreto en obra es la COGUANOR NTG 41061 (ASTM C31) y la que rige el curado de especímenes de ensayo de concreto en laboratorio es la COGUANOR NTG 41060 (ASTM C192-07).

#### Almacenamiento

Si los especímenes no pueden ser moldeados en el lugar donde recibirán el curado inicial, mover los especímenes inmediatamente después del acabado al lugar de curado inicial para almacenamiento. La superficie de apoyo sobre la cual los especímenes son almacenados debe estar nivelada dentro de 20 mm por m [ $\frac{1}{4}$  pulg. por ft]. Si los cilindros en los moldes de un solo uso son movidos, levantar y tomar los cilindros de la parte inferior de los moldes con una plancha grande o dispositivo similar. Si la superficie superior es estropeada durante el movimiento al lugar de almacenamiento inicial, realizar el acabado de nuevo inmediatamente.

#### Curado inicial

Inmediatamente después de moldear y acabar, los especímenes deben ser almacenados por un período de hasta 48 h en un rango de temperatura entre 21 y 25 °C y en un ambiente que evite la pérdida de humedad de los especímenes. Para mezclas de concreto con una resistencia especificada de 40 MPa [6000 psi] o más, la temperatura del curado inicial debe estar entre 21 y 25 °C. Son varios los procedimientos que se pueden utilizar para mantener las condiciones de temperatura y humedad especificadas durante el período de curado inicial. Se debe utilizar un procedimiento apropiado o combinación de procedimientos. Proteger todos los especímenes de la luz directa del sol, y de dispositivos calefactores radiantes, si se utilizan. La temperatura de almacenamiento debe ser controlada utilizando dispositivos de calefacción y enfriamiento, como sea necesario. Registrar la temperatura utilizando un termómetro de máxima-mínima. Si se utilizan moldes de cartón, proteja las superficies exteriores de los moldes del contacto con la arpillera mojada u otras fuentes de agua. [6]

### 6.1.4. Concreto en estado fresco

Al ser mezclado el concreto, se genera una reacción química exotérmica entre el agua y el cemento. Esta permite la adherencia y mezcla homogénea de todos los componentes de la mezcla. Inmediatamente al finalizar el mezclado comienza la etapa de fraguado que es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del concreto, producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos procedentes de la reacción química del agua

con los óxidos presentes en el clinker que compone el cemento. Es durante este corto periodo de tiempo en que la mezcla aún se encuentra en estado plástico y se pueden llevar a cabo ensayos en el concreto fresco según las normas COGUANOR y ASTM correspondientes. Los ensayos que se pueden llevar a cabo en el concreto en estado fresco son, entre otros:

- **Temperatura:** se toma la temperatura de la mezcla al salir de la máquina mezcladora según la norma COGUANOR NTG 41053 (ASTM C1064). El dispositivo debe estar sumergido al menos 3 pulgadas dentro del concreto fresco. El dispositivo de medición se debe dejar dentro de la mezcla como mínimo 2 minutos hasta que la lectura de la temperatura se estabilice.
  
- **Consistencia:** La consistencia de la mezcla es medida mediante la prueba de asentamiento llamada cono de Abrams midiendo el asentamiento al levantar el cono según la norma COGUANOR NTG 41017 h4 (ASTM 143). Para concreto celular y otros tipos de concreto demasiado plásticos en estado fresco se lleva a cabo la prueba del cono de Abrams invertido midiendo el diámetro del círculo de concreto resultante al levantar el cono. [7]
  
- **Densidad:** La densidad del concreto en estado fresco se mide llenando por completo un recipiente de masa y volumen conocidos y midiendo su masa totalmente lleno para luego restar la masa de la tara y dividir el peso resultante dentro del volumen del recipiente. Se utiliza este método según la norma COGUANOR NTG 41010h2 (ASTM 138).
  
- **Volumen de vacíos:** Para medir el volumen de vacíos se utiliza el método de presión que consiste en introducir la mezcla en estado fresco en un recipiente cerrado, introducir agua al recipiente hasta que quede totalmente lleno y posteriormente, bombear aire para determinar la presión interna en el recipiente según la norma COGUANOR NTG 41017h7 (ASTM C 231). [8]

Al concluir el fraguado, la mezcla queda totalmente sólida y comienza a perder agua a un ritmo mucho más lento. El concreto comienza a endurecerse lentamente hasta llegar a su resistencia de diseño a los 28 días o antes.

### **6.1.5. Concreto en estado endurecido**

El concreto endurecido presenta propiedades mecánicas y físicas, entre las cuales se encuentran: la resistencia a la compresión, el módulo de rotura, módulo de elasticidad, la relación de Poisson, volumen de vacíos, permeabilidad, aislamiento térmico y aislamiento acústico. Dichas propiedades se describen a continuación.

## 6.2. Propiedades del concreto

### 6.2.1. Propiedades mecánicas del concreto

#### Resistencia a la compresión

Es la capacidad del concreto de resistir carga por unidad de área. Se expresa en términos de esfuerzo en Mega Pascales en el sistema internacional y psi en el sistema imperial. La resistencia a la compresión es la propiedad más importante al momento de elegir un diseño de concreto estructural pues exceptuando los pavimentos rígidos, en donde el concreto se diseña por su capacidad a flexión, el resto de las estructuras utilizan el concreto para soportar los esfuerzos de compresión y este se refuerza con acero para soportar los esfuerzos de tensión. En general, las mezclas de concreto estructural se diseñan para la resistencia a la compresión que tendrá 28 días después de ser elaborada. Esto se debe a que el proceso de deshidratación del concreto es largo y conforme se pierde agua en la mezcla gana resistencia. Las edades más usuales para medir la resistencia a compresión del concreto son 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 y 360 días de elaborado con condiciones de humedad de arriba de 95 %. Para medir esta propiedad se elaboran cilindros en moldes especiales que tienen 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La norma COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C31 y C39) rige los procedimientos de elaboración de los cilindros y ensayo de resistencia a la compresión. [9]

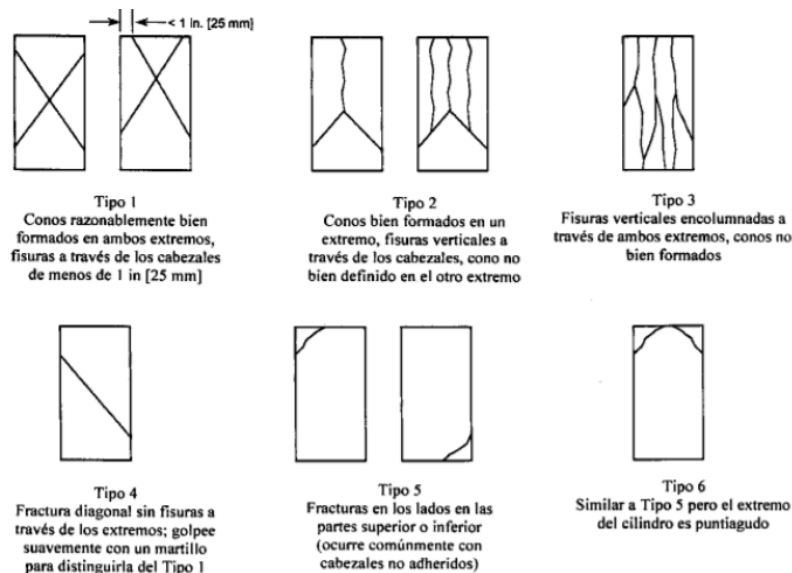


Figura 2: Tipos de fallas en cilindros de concreto  
Fuente: COGUANOR NTG 41017 h1

#### Módulo de rotura

Resistencia a la flexión del concreto. Es la propiedad determinante en el diseño de pavimentos rígidos. Suele ser de 10 a 20 % de la resistencia a la compresión. En concretos de peso normal, el valor teórico en concretos de peso normal se aproxima del 1.99 a 2.65 veces

el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. En el ensayo del concreto a tensión por flexión se produce un estado combinado de esfuerzos en donde la resistencia se concentra tanto en la pasta de concreto como en los agregados. Es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 150 mm x 150 mm de sección transversal y con una luz de 3 veces su espesor como mínimo. La resistencia a flexión se expresa como módulo de rotura (MR) en MPa y se determina mediante el método de ensayo de la norma COGUANOR NTG 41017 h2 (ASTM C78).

El módulo de ruptura se calcula dependiendo si la fractura se inicia en la superficie de tensión dentro o fuera del tercio medio de la luz. Si falla dentro del tercio medio de la luz se calcula de la siguiente manera.

$$R = \frac{P * L}{b * d^2} \quad (1)$$

Donde:

R: Módulo de ruptura (MPa o Psi)

P: Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo (N o lbf)

L: Longitud de la separación de apoyos. (mm)

b: Ancho promedio del espécimen, en fractura (mm).

d: Espesor promedio del espécimen, en la fractura (mm)

Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz, entre apoyos por no más de 5% de la luz, el módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{3 * P * a}{b * d^2} \quad (2)$$

Donde:

R: Módulo de ruptura (MPa o Psi)

P: Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo (N o lbf)

a: Distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga (mm)

b: Ancho promedio del espécimen, en fractura (mm).

d: Espesor promedio del espécimen, en la fractura (mm)

Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz, entre apoyos por más de 5% de la misma, descartar los resultados del ensayo. [10] .

## Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El módulo de elasticidad caracteriza la rigidez de un material y su capacidad de deformación, se denota por el símbolo  $E_c$ . La norma COGUANOR NTG 41017 h16 (ASTM C469-02) establece la determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión. El coeficiente de Poisson es la relación entre las deformaciones unitarias lateral y axial, se representa mediante  $\mu$ . La relación de Poisson en el concreto de peso normal está comprendida entre 0.15 y 0.25 y depende del tipo de agregado, de la edad del concreto, de la humedad de éste y de la resistencia a la compresión. [11]

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson se utilizan para el dimensionamiento de elementos reforzados o no reforzados, para establecer la cantidad de refuerzo y para calcular los esfuerzos para las deformaciones unitarias observadas. Para determinar el módulo de elasticidad se utiliza un compresómetro y para determinar el módulo de Poisson se utiliza un extensómetro. El valor del módulo de elasticidad del concreto varía con las distintas resistencias del concreto, con la edad de éste, con el tipo de carga y con las características y proporciones de los agregados. La sección 19.2.2 del código ACI 318-14 establece que el módulo de elasticidad es la pendiente de la línea trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de  $0.45 f_c$ . [11]

### 6.2.2. Propiedades físicas del concreto

#### Densidad

La densidad es la masa de un elemento por unidad de volumen. Se calcula al dividir la masa de un objeto dentro de la cantidad de volumen que ocupa. La densidad es expresada en el sistema internacional en kilogramos / metro cúbico. La densidad relativa se refiere a la densidad de un objeto en relación a la densidad del agua. Esta se calcula al dividir la densidad de un objeto dentro de la densidad del agua ( $1000 \text{ kg}/m^3$ ).[3]

#### Permeabilidad

Es la cantidad de agua u otros líquidos que atraviesan un material en un determinado tiempo. En el caso del concreto, su permeabilidad depende de la porosidad de la pasta y su resistividad eléctrica. Puede ser medida por medio del método de Torrent, método de presión hidrostática y otros. La resistividad eléctrica generalmente es un buen indicador de la permeabilidad que tiende a ser inversamente proporcional a la resistividad eléctrica.[3]

#### Resistividad eléctrica

: Cuantifica la fuerza con la que se opone un material dado al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica. Los metales de resistencia baja requieren mayores corrientes para producir la misma cantidad de calor. Los materiales de resistencia baja también exhiben una baja resistencia

constante. La figura a continuación muestra como los materiales menos permeables tienden a tener una mayor resistividad eléctrica.

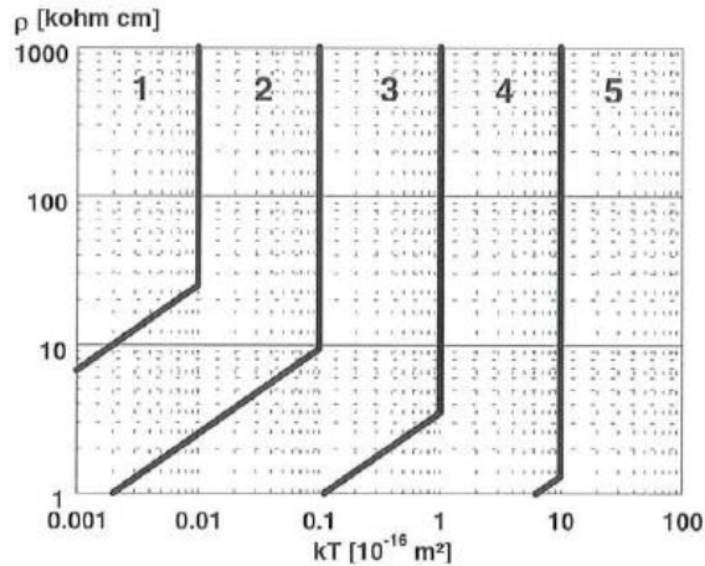


Figura 3: Relación entre permeabilidad y resistividad eléctrica  
Fuente: COGUANOR NTG 41017 h43[12]

### 6.2.3. Porosidad

Durante el proceso de mezcla, una cierta cantidad de aire se mezcla en el concreto. El agua y el aire toman espacio dentro del concreto aún después que el concreto es derramado en el lugar y durante las primeras etapas del fraguado. Cuando el concreto se trabaja en su lugar y empieza a fraguar, el cemento y los agregados tienden a asentarse en el fondo mientras que el agua, flota hacia arriba donde se evapora o se exprime por los lados o el fondo. Según se exprime se mueve en todas direcciones. El agua, al ocupar espacio, deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Según el aire escapa, tiene el mismo efecto. Estos espacios huecos se atan entre sí creando lo que se llama porosidad.

Frecuentemente los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo. Los poros están entretrejidos y entre conectados, permitiendo así el pasaje lento del agua a través del concreto. Mientras más denso el concreto, más apretados los poros y menos agua puede pasar a través. La estructura de la porosidad en el concreto influye en las propiedades mecánicas y físicas del mismo. [13]

#### Tipos de porosidad

- Porosidad cerrada: Son vacíos que no se comunican entre sí, en los materiales de porosidad cerrada no puede haber circulación de fluidos, por lo mismo estos son impermeables.

- Porosidad abierta: Los vacíos están unidos entre sí, por canales, los materiales con porosidad abierta presentan una serie de poros y canales que permiten el paso y la circulación de fluidos.
- Porosidad total: Es el volumen total de poros vacíos por unidad de volumen total de concreto. Se incluyen la porosidad abierta y cerrada, su valor no puede obtenerse de forma experimental ya que se incluyen los espacios vacíos no comunicados con el exterior. [14]

### **Tipos de poros**

- Poros gel: La mayor parte de estos poros varía entre 1.5 y 2.0 nanómetros de diámetro aunque sus valores van desde 0.5 hasta 5 nanómetros. No tienen una influencia adversa en la resistencia del concreto, pudiendo despreciarse sin introducir ningún error significativo, pero sí afecta directamente en la fluencia y la retracción.
- Poros capilares: Variarán entre 5 y 5.000 nanómetros de diámetro, la cantidad de estos poros y su distribución sí influyen de manera negativa en los valores de la resistencia.[14]

### **Volumen de vacíos**

El volumen de vacíos es la cantidad de aire retenido en la mezcla. Este puede ser medido en estado fresco o en estado endurecido y corresponde a un porcentaje del volumen total de la mezcla. Este volumen es cercano al 1 % en concretos de peso normal y puede ser aumentado por medio del uso de aditivos incorporadores de aire.

### **Consistencia**

La consistencia de una mezcla de concreto está relacionada con su fluidez en estado fresco. Esta propiedad depende directamente de la presencia de agua o aditivos fluidificantes en la mezcla de concreto. Otro factor que influye en la consistencia de la mezcla es la granulometría de los agregados. Las mezclas con granulometrías más gruesas tienden a ser menos fluidas que las mezclas con granulometrías más finas. Las mezclas más fluidas tienen mayor trabajabilidad pues fluyen más fácilmente a través del acero de refuerzo en estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, debido a que la resistencia a la compresión del concreto depende de la relación agua / cemento, el incremento en la cantidad de agua en la mezcla resulta en un decremento en la resistencia a la compresión.

El concreto se puede clasificar según su nivel de fluidez según la norma europea UNE-EN-206 en categorías que van desde S1 hasta S5 desde más rígido hasta más fluido respectivamente. Los concretos con fluidez mayor a la categoría S5 se denominan autocompactables y deben ser evaluados mediante el método de cono de Abrams invertido. Los concretos autocompactables se clasifican desde SF1 hasta SF3 según su consistencia. [15]

Clase	Asentamiento (mm)
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	>220

Cuadro 1: Clasificación de concreto según su consistencia  
Fuente: EN-206 [15]

Clase	Diámetro de flujo (mm) Cono de Abrams invertido
SF1	550 - 650
SF2	660 - 750
SF3	760 - 850

Cuadro 2: Clasificación de concreto autocompactable según su diámetro de flujo  
Fuente: EN-206 [15]

#### 6.2.4. Conductividad térmica

##### Calor

El calor se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas debido a la diferencia de temperatura. El calor es energía en transición y se reconoce únicamente cuando cruza la frontera de un sistema. Al ser una forma de energía, se mide en unidades de energía (kJ) El calor siempre viaja desde los objetos con temperatura más alta hacia los objetos con temperaturas más bajas hasta llegar a un equilibrio térmico entre los objetos en el sistema. La tasa de transferencia de calor es cuanto calor es transferido por unidad de tiempo. Generalmente se mide en kW.[16]

##### Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética de las de las moléculas. En un líquido o gas, esta energía se debe al movimiento aleatorio de sus moléculas, así como a sus movimientos de vibración y rotación. Cuando colisionan dos moléculas que poseen energías cinéticas distintas, parte de esta energía proveniente de la molécula más energética (mayor temperatura) se transfiere a la de menor energía (menor temperatura).[16]

##### Formas de transferencia de calor

- **Conducción:** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas hacia las menos energéticas en un medio que puede ser sólido líquido o gaseoso. En los gases y los líquidos este intercambio de energía entre partículas se debe a colisiones de las moléculas durante sus movimientos aleatorios. En los sólidos, este fenómeno ocurre

debido a la combinación de moléculas en una red y transporte de energía mediante electrones libres. La ley de Fourier de conducción de calor, indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa misma dirección.[16]

- Convección: es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de conducción y movimiento del fluido: mientras más rápido sea este mayor es la transferencia de calor por convección.
- Radiación: es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio

### Aislamiento térmico

El aislamiento térmico se refiere a la capacidad de un material de impedir la transmisión de calor a través de él. Se representa con un coeficiente k. El coeficiente de conductividad térmica se refiere a la cantidad de calor que atraviesa a un material por unidad de tiempo se mide en vatios / (metro × Kelvin) (W/(m·K)). El coeficiente es propio de cada tipo de material y un mayor coeficiente significa que una mayor cantidad de calor es capaz de atravesar dicho material.[16]

Conductividades térmicas de  
algunos materiales en condiciones  
ambiente

Material	Conductividad térmica, W/m · K
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (ℓ)	8.54
Vidrio	1.4
Ladrillo	0.72
Agua (ℓ)	0.613
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Hule suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Figura 4: Coeficiente k típico de algunos materiales  
Fuente: (Cengel, 2011)[16]

## Ley de Boltzmann

La ley de Stefan Boltzmann sirve para determinar la tasa máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura absoluta  $T_s$ . Se calcula al multiplicar la temperatura absoluta por el área superficial por la constante de Boltzmann que equivale a  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . La superficie idealizada que emite la radiación máxima recibe el nombre de cuerpo negro. Todas las superficies reales emiten una radiación inferior a la de un cuerpo negro con la misma área y a la misma temperatura.[16]

## Emisividad

La tasa de radiación real de una superficie se calcula al multiplicar su área por la temperatura absoluta por su factor de emisividad que es una medida entre cero y uno que indica que tan cerca se encuentra una superficie a un cuerpo negro para el cual la emisividad tiene un valor de 1.

Emisividad de algunos materiales a 300 K	
Material	Emisividad
Papel aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

Figura 5: Emisividad de algunos materiales  
Fuente: (Cengel, 2011)[16]

## Absorbancia

Es la fracción de la energía de radiación incidente absorbida por una superficie. Al igual que la emisividad su valor está en el rango de cero a uno. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él y por lo tanto su absorbancia es de 1.

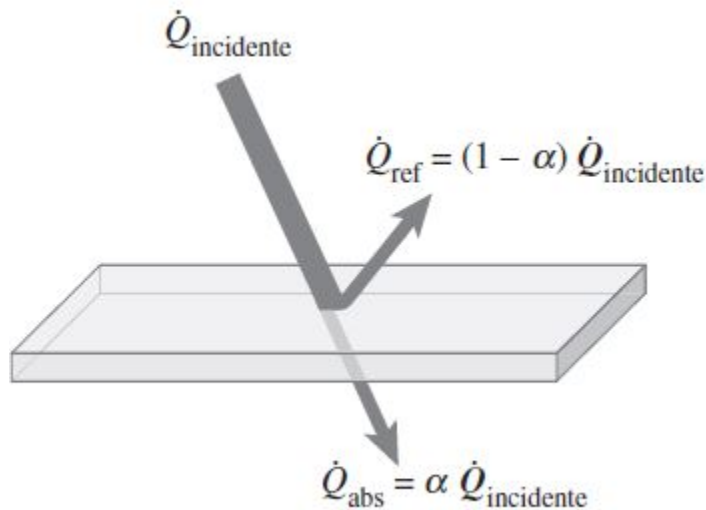


Figura 6: Absorción de radiación incidente sobre una superficie opaca  
Fuente: (Cengel, 2011)[16]

### Ley de Kirchnoff

La ley de Kirchnoff establece que la emisividad y la absorbencia de una superficie son iguales si la temperatura y la longitud de onda son iguales. La tasa a la que una superficie absorbe radiación se calcula al multiplicar la tasa a la que la radiación incide sobre un cuerpo por la absorbencia de la superficie. La diferencia entre la radiación emitida y absorbida por una superficie se denomina transferencia neta de calor por radiación. De esta manera, si la radiación absorbida es mayor que la emitida, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. Por el contrario, si la radiación emitida es mayor que la radiación emitida, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación.[16]

### La segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck

El enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica, expresa que: ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia térmica de 100 % o bien: para que una central eléctrica opere, el fluido de trabajo debe intercambiar calor con el ambiente. Esto quiere decir que toda máquina tendrá una eficiencia que se medirá respecto a cuanta energía destinada a convertirse en trabajo no se perderá en forma de calor. Esto se debe a que está demostrado que incluso bajo condiciones ideales una máquina de este tipo debe rechazar algo de calor hacia un depósito que se encuentra a baja temperatura con la finalidad de completar el ciclo. La integral de Planck generalmente se evalúa entre 0.39 y 0.78 micrómetros de longitud de onda que corresponden al espectro de luz visible para emisores que generan radiación dentro del espectro de luz visible.

## Ley de Planck

$$W = \int \frac{c1*\lambda^{-5}}{e^{\frac{c2}{\lambda*T}} - 1} d\lambda \quad (3)$$

Donde:

T: Temperatura del emisor

C1:  $3.742 \times 10^8 \text{ w}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ , la primer constante de radiación

C2:  $1.439 \times 10^4 \mu\text{mK}$ , la segunda constante de radiación

### 6.2.5. Aislamiento acústico

#### Sonido

El sonido es una perturbación que se propaga a través de un fluido debido a cambios locales de presión, velocidad vibratoria o densidad. La parte del sonido que es audible por el humano oscila en frecuencias de onda de entre 20 Hz y 20 KHz. A estas frecuencias, el oído percibe oscilaciones en la presión de aire y las convierte en ondas mecánicas para ser percibidas por el cerebro. La intensidad de los sonidos percibidos se expresa en belios o decibelios. Las ondas con frecuencias inferiores a los 20 Hz se denominan infrasonidos y en contraparte, las ondas superiores a los 20 KHz reciben el nombre de ultrasonidos. La propagación del sonido desde el emisor hasta el receptor debe pasar por un medio material que puede ser gaseoso, sólido o líquido. La velocidad de transmisión depende de las propiedades del medio de propagación. El sonido suele viajar mucho más rápido a través de sólidos que en el aire.[17]

#### Ruido

El ruido es un sonido aleatorio molesto o no deseado para el receptor. Algunos sonidos pueden ser considerados ruido para unos receptores y sonido para otros. El ruido puede ser utilizado para calibrar equipos de audio y medir aislamiento acústico. Las generaciones de ruido en mediciones tienen como finalidad poder reproducir tantas veces como sea posible unas mediciones utilizando los mismos parámetros para la toma de datos. Para garantizar que las mediciones se realicen con parámetros reproducibles, se utilizan fuentes sonoras. Estas fuentes son programables con respecto al espectro que pueden emitir. Permitiendo generar espectros de ruido rosa y ruido blanco que son espectros de medición perfectamente definidos.[17]

## Ruido blanco

El ruido blanco es una señal aleatoria que contiene todas las frecuencias audibles por el ser humano con una potencia constante al igual que la luz blanca. Su potencia por octava es creciente puesto que cada octava superior representa el doble de energía que la anterior. En contraste, su intensidad por octava es constante. [18]

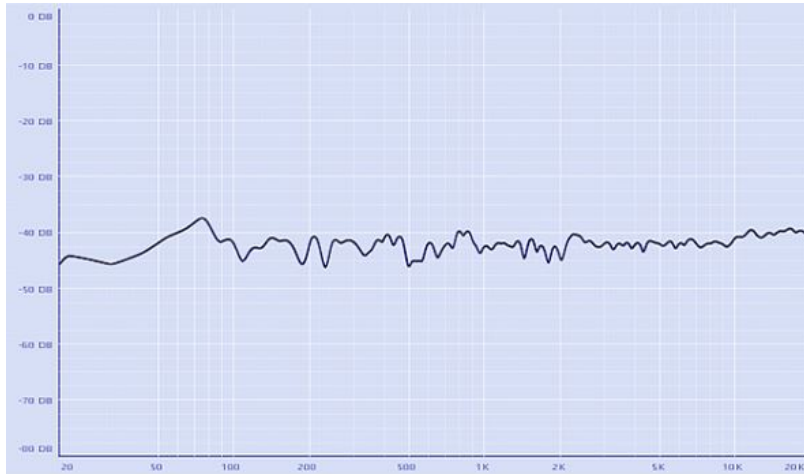


Figura 7: Espectro de frecuencias del ruido blanco  
Fuente: (Ena, 2015) [18]

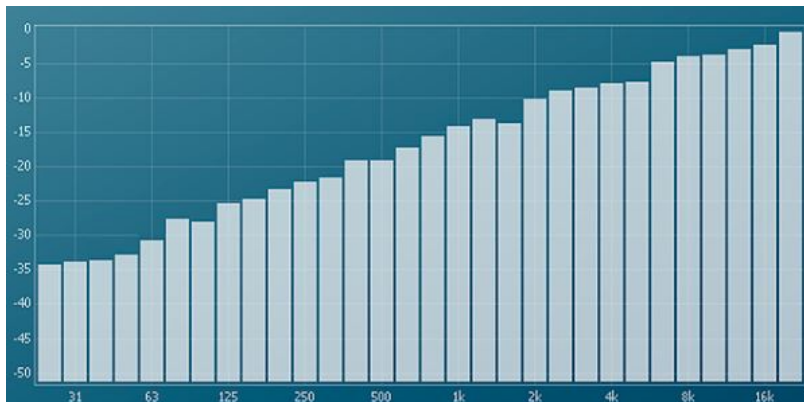


Figura 8: Energía por octava en ruido blanco  
Fuente: (Ena, 2015) [18]

## Ruido rosa

El ruido rosa es un tipo de ruido aleatorio que emite todas las frecuencias comprendidas en el umbral auditivo del ser humano que oscila entre los 20 Hz y los 20000 Hz. A diferencia del ruido blanco, el ruido rosa no otorga la misma potencia por Hertz a lo largo de todas las frecuencias. Posee una densidad espectral de potencia que se relaciona a través de  $1/f$  con la frecuencia. El ruido rosa presenta igual potencia en todas las octavas del espectro por lo que dominan las frecuencias altas al igual que ocurre con la luz rosa.

La manera más común de generar ruido rosa es filtrar el ruido blanco de manera que se le otorgue a todas las octavas la misma potencia. Esa pérdida de frecuencias agudas hace que su espectro decaiga en amplitud según sube la frecuencia, concretamente con una pendiente de 3 dBs por octava. [18]

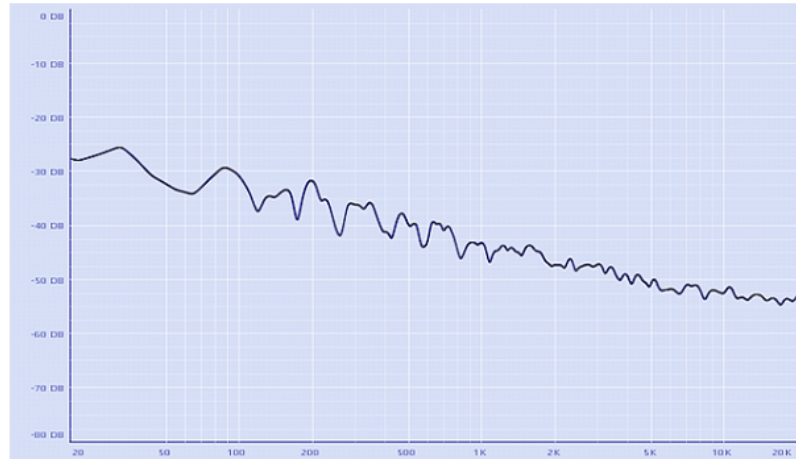


Figura 9: Espectro de frecuencias del ruido rosa  
Fuente: (Ena, 2015) [18]

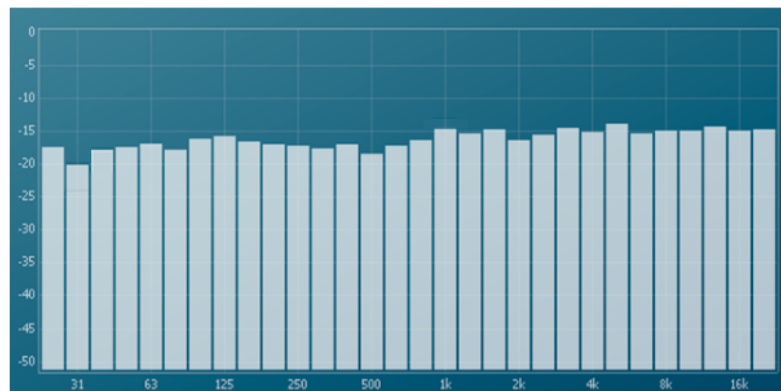


Figura 10: Energía por octava en ruido rosa  
Fuente: (Ena, 2015) [18]

Para ecualización la más común suele ser el ruido rosa visualizado por bandas plano, ya que los ecualizadores gráficos suelen permitir las correcciones por bandas.

### Propiedades de las ondas sonoras

- Amplitud de onda: la cantidad de presión sonora que ejerce la vibración en el aire. También determina la cantidad de energía o potencia acústica que se transmite. Por lo tanto, entre mayor sea la amplitud de la onda, mayor será la intensidad del sonido. La unidad con la que se mide la amplitud en el sistema internacional es el Pascal.

- Longitud de onda: es la distancia que existe entre dos ondas. Es medida en metros y se relaciona con el periodo y la frecuencia.
- Periodo: es el tiempo que tarda en producirse oscilación completa. Se mide en segundos.
- Frecuencia: es el número de oscilaciones que ocurren por segundo. Es el inverso del periodo y su unidad de medida es el Hertzio (Hz) que corresponde a un ciclo por segundo. La frecuencia determina el tono de un sonido. Por lo tanto, los sonidos agudos poseen frecuencias altas mientras que los sonidos graves tienen frecuencias bajas. [17]

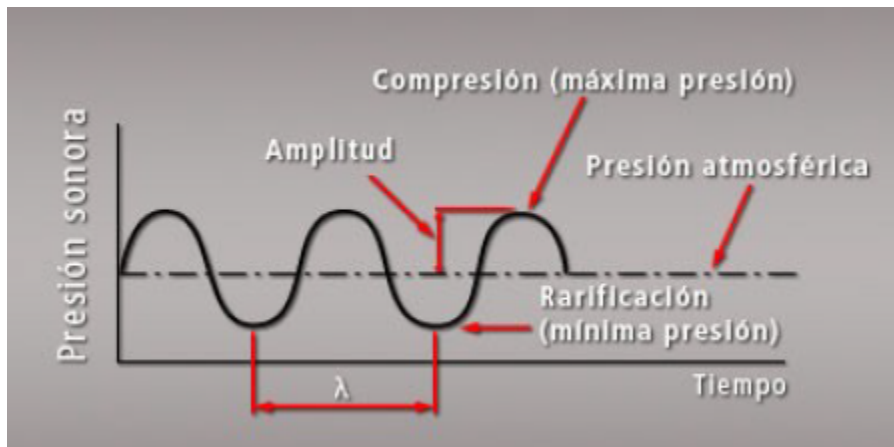


Figura 11: Propiedades de las ondas sonoras  
Fuente: (ZIGURAT, 2014) [17]

## Presión acústica

La presión acústica es una magnitud física que representa la variación de la presión atmosférica que genera un sonido. Se expresa en unidades de potencia Vatios (W). Su cuantificación sonora viene determinada por el nivel de presión sonora ( $L_p$ ) y es expresada en decibelios (dB). Se define con la siguiente expresión matemática. [17]

$$dB = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_e} \right) \quad (4)$$

Donde:

dB: Intensidad del sonido en decibelios,

$P_s$ : Valor de la presión sonora medida,

$P_e$ : Valor de la presión de referencia, fijado en  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>

## El Belio

El belio (B) es una unidad de referencia utilizada para expresar el diferencial entre dos presiones sonoras. Un belio es un diferencial de intensidad muy pequeño e imperceptible para el oído humano. Por lo tanto, las magnitudes suelen estar expresadas en decibelios (dB). El nombre es en honor al científico Alexander Graham Bell. Es una expresión que no es lineal, sino logarítmica, adimensional y matemáticamente escalar. Ni el bel, ni el decibel son unidades del Sistema internacional de unidades. La escala de belios es logarítmica con base 10. Por lo tanto, una variación un objeto que emita 60 dB será 10 veces más ruidoso que uno que emita 50 dB y cien veces más ruidoso que uno que emita 40 dB.

## Terminología de medición de ruido

- dB(A) Decibeles con ponderación 'A'. Es la ponderación de frecuencia más usada y está diseñada para reflejar la respuesta humana al ruido.
- dB(C) Decibeles con ponderación 'C'. Pone mucho más énfasis a los sonidos de baja frecuencia que la ponderación 'A', y es esencialmente plana para las frecuencias entre 31,5Hz y 8kHz. Es la ponderación de frecuencia usada comúnmente para mediciones de nivel de ruido Peak.
- dB(Z) Decibeles con ponderación 'Z'. Ponderación de frecuencia con respuesta plana entre 10Hz y 20kHz  $\pm 1.5$ dB (excluyendo la respuesta del micrófono).

## Ponderaciones temporales rápida, lenta e impulsiva

Los parámetros de medición que utilicen ponderaciones temporales mostrarán una S (Slow) cuando se utilice la respuesta lenta, F (Fast) cuando se utilice la respuesta rápida, e I (Impulse) cuando se utilice la respuesta impulsiva. [19]

## Nivel de presión sonora peak

El valor peak corresponde al punto más alto de la onda de presión sonora, antes de que cualquier ponderación sea aplicada.

## Nivel de ruido continuo equivalente (Leq)

Leq Nivel de ruido continuo equivalente. Es el valor más comúnmente usado para describir los niveles de ruido que varían con el tiempo. El Leq es el nivel que produce la misma energía sobre un período de tiempo definido usando una tasa de intercambio de 3dB. Está definido como el nivel de presión sonora de un ruido fluctuante sobre un período de tiempo T, expresado como la cantidad de energía promedio. [19]

## Filtros de 1:1 y 1:3 octava

Cuando se necesita contar con información más compleja de una fuente sonora, el rango de frecuencias puede ser dividido en secciones, o bandas de frecuencia, para facilitar su análisis. Un sonómetro puede tener 1:1 octava, o filtros de bandas de octava, o 1:3 octava, o filtros de bandas de tercio de octava. Una octava es una banda de frecuencia donde la frecuencia superior es el doble de la frecuencia inferior. Por ejemplo, un filtro de banda de octava con una frecuencia central de 1kHz, tiene una frecuencia inferior de 707Hz y una frecuencia superior de 1414Hz. Una banda de tercio de octava posee un tercio del ancho de una banda de octava. [19]

## Umbral auditivo

El umbral auditivo de los seres humanos comprende las frecuencias entre el rango de 20 Hz hasta los 20,000 Hz. En relación con la intensidad, el rango auditivo comienza a partir de 20 dB que es aproximadamente el murmullo de las hojas de los árboles al moverse por una suave brisa. Por el contrario, los sonidos a partir de los 120 dB son molestos y a partir de los 140 dB generan dolor.



Figura 12: Intensidades de sonidos  
Fuente: (ZIGURAT, 2014) [17]

## Potencia acústica

La potencia acústica también conocida como volumen, expresa la totalidad de la energía sonora que irradia un emisor. Viene determinada por la siguiente fórmula:

$$Lw(dB) = 10 * \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (5)$$

Donde:

Lw: Nivel de potencia sonora de dB.

W: Potencia acústica

W0: Potencia de referencia establecido en 1000Hz

### **Absorción acústica**

La absorción acústica: Cuando una onda incide con la superficie de un material se producen tres efectos físicos: una parte de la onda es reflejada, otra parte es absorbida y el resto es transmitido a través del objeto.

### **Aislamiento acústico**

El aislamiento acústico es la capacidad que tiene un material para reducir la transmisión de sonido a través de él. Esta transmisión de ruido se puede medir por medio de decibelios ponderados.

### **Mediciones de sonido digital**

El audio puede venir en señales analógicas o digitales. El audio analógico tiene como unidad de medida los DBu-voltios y se mide con un voltímetro. El audio digital tiene unidad de medida los DBfs y se mide en números binarios: ceros y unos. Los dBFS son decibelios de escala completa. Mide los niveles de amplitud de decibelios en sistemas digitales por impulsos codificados y tienen un nivel definido de pico máximo disponible. En la medición digital, O dBFS se refiere al máximo nivel posible antes de que se genere recorte de señal (clipping) generando distorsión en la onda senoidal. La Audio Engineering Society y la Unión Europea de Radiodifusión han recomendado que la calibración en digital sea 0 dBu igual -18 dBFS. Por lo tanto, en una mezcladora calibrada a 0 dBu igual -18 dBFS, una señal analógica de +4dBu corresponderá a -14 dBFS. [20]

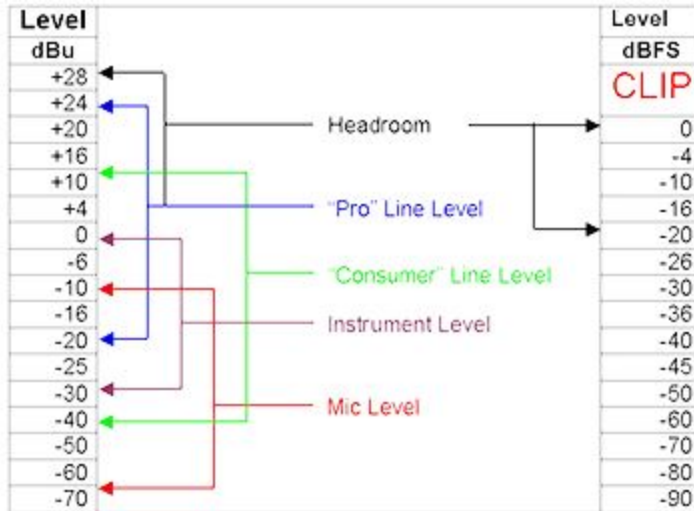


Figura 13: dBFS vs DBu  
Fuente: Musiki.org[20]

## 6.3. Concreto celular

### 6.3.1. Definición

El concreto celular se define como concreto elaborado con cemento hidráulico, agua, agente espumante que forman un material endurecido con una densidad de  $1920\text{kg}/\text{m}^3$  o menos. Estas mezclas pueden incluir agregados que cumplan con las normas ASTM C33, C144, C330, C331 y C332. El concreto celular puede ser denominado “concreto celular de baja densidad” si su densidad seca es inferior a los  $800\text{kg}/\text{m}^3$ . En este caso se debe diseñar con base a la guía ACI 523.1R-06. Si la densidad del concreto celular es superior a los  $800\text{kg}/\text{m}^3$ , se debe consultar la guía ACI 523.3R-14.

Existen cuatro procesos generales para elaborar concreto celular. Estos se clasifican en métodos químicos y espumados. A continuación, se detallan los métodos de elaboración:

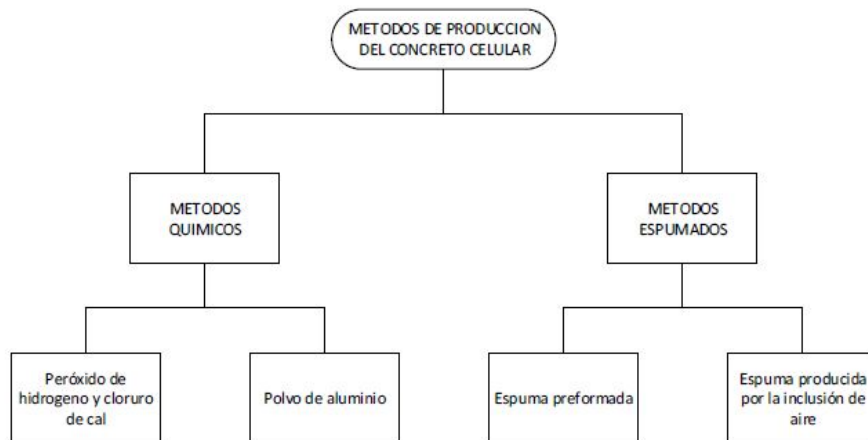


Figura 14: Métodos de elaboración de concreto celular  
Fuente: (Lazo, 2017) [14]

### Métodos espumados

- Se adiciona un aditivo generador de espuma en la mezcla de acuerdo a la dosis especificada por el fabricante o de acuerdo a los ensayos de prueba, que al contacto con el agua de la mezcla y con un determinado tiempo de mezclado se consigue generar espuma en la mezcla, la relación entre el tiempo de mezclado y la densidad del concreto producido es inversa (mayor tiempo de mezclado se obtendrán densidades más bajas). La densidad del concreto resultante depende de la cantidad de aditivo generador de espuma y el tiempo de la mezcla.
- Se produce espuma estable con agua y aditivo espumante en un equipo generador de espuma y se agrega a la masa cementante, la mezcla de espuma más cemento deberá mantener su consistencia hasta mezclarse con los agregados y realizar la colocación del concreto celular. Estos generadores logran su función gracias a un aditivo espumante y se obtiene una espuma densa y estable de color blanco con burbujas de tamaño homogéneo. La densidad del concreto resultante depende de la cantidad de aditivo generador de espuma y el tiempo de la mezcla. Se debe tener un buen control de la cantidad de espuma incorporada a la mezcla por que puede presentar variaciones importantes en la densidad final, además con el paso del tiempo la espuma preformada pierde su estabilidad y se convierte en líquido.[14]

### Métodos químicos

- Peróxido de hidrógeno y cloruro de cal: Consiste en adicionar agua oxigenada y cloruro de cal ocasionando una reacción química produciendo hidrógeno, el cual es el material de relleno de la burbuja, la mezcla final dependerá del tipo de producto empleado. Este proceso produce mezclas con baja resistencia y alta contracción por secado.
- Polvo de aluminio: Consiste en lograr una reacción química que genere hidrógeno, el cual forma burbujas, y se logra a partir del hidróxido de calcio en presencia de agua

y polvo de aluminio, las mezclas presentan elevadas contracciones por secado y baja resistencia, el agente de polvo de aluminio puede ser empleado en una proporción de 0.2% del peso del cemento. [14]

### **6.3.2. Componentes del concreto celular**

Los componentes básicos de concreto celular son cemento, agua, y agente espumante. Debido a que el ingrediente principal por volumen en la mezcla es agente espumante, es crítico que todos los materiales en la mezcla sean compatibles con el agente espumante. Esta compatibilidad debe ser puesta a prueba en laboratorio. Los concretos celulares también pueden incluir materiales cementicios suplementarios compatibles con el agente espumante.

#### **Cemento**

En Guatemala, el cemento deberá cumplir con los requerimientos de COGUANOR NTG 41095 (ASTM C1157). Los cementos mezclados hidráulicos pueden incluir tanto cementos portland como cementos mezclados, ya sea con puzolanas, con escoria u otros cementos hidráulicos solos o combinados. Si se desea alta resistencia temprana se puede utilizar cemento hidráulico de alta resistencia inicial.

#### **Agregados**

Los agregados deben cumplir con los requerimientos de las normas ASTM C33, C144, C330 y C332. Si los agregados son livianos (para concretos celulares de baja densidad) deben cumplir con los requerimientos del grupo uno de ASTM C 331. El tamaño máximo del agregado no debe exceder un quinto de la dimensión más corta entre los lados de la formaleta, tres cuartos del espaciamiento mínimo entre el acero de refuerzo o un tercio de la profundidad de las losas. [21]

#### **Agua**

El agua utilizada en la mezcla debe ser potable y libre de niveles perjudiciales de ácidos, alcalinos, sales, aceites y otros materiales orgánicos de acuerdo con la norma ASTM C94. Agua no potable puede ser utilizada tras ser sometida a análisis de laboratorio y determinar que cumpla con los requerimientos de la norma ASTM C109 y C191. [21]

#### **Aditivo espumante**

El aditivo espumante se crea al diluir concentrado de espuma líquido en agua en proporciones predeterminadas y pasarlo a través de un soplador generador de espuma. La densidad del material resultante suele ser de entre 32 y 80 kg/m<sup>3</sup>. El concentrado de espuma debe tener una composición química capaz de producir y mantener células de aire estables capaces de resistir las fuerzas físicas e interacciones químicas que ocurren durante el mezclado,

bombeo y colocación que ocurre durante la fundición. Si las células de aire no son capaces de resistir estos procesos e interacciones, se reventarán liberando aire de la mezcla y por lo tanto aumentando la densidad y modificando las propiedades físicas y mecánicas. Los concentrados de espuma deben cumplir con los requerimientos de COGUANOR NTG 41069 (ASTM C796 y C869.) [21]

### 6.3.3. Tipos de concreto celular

- Concreto celular de baja densidad La norma ACI 523.2R define el concreto celular de baja densidad un producto ligero con una densidad inferior a  $800 \text{ kg} / \text{m}^3$  que consiste en cemento Portland y cal con material silíceo fino, como arena, escoria o ceniza volante mezclada con agua para formar una pasta que tiene una estructura celular o de vacío homogénea. La estructura celular se logra mediante la inclusión de vacíos macroscópicos resultantes de la reacción química de liberación de gas o la incorporación mecánica de aire u otros gases. Generalmente no contiene agregados, sin embargo, si se incluyen en la mezcla deben ser agregados de baja densidad que cumplan con la norma ASTM C332. (American Concrete Intitute, 2006)
- Concreto celular con densidad mayor a  $800 \text{ kg}/\text{m}^3$  La norma ACI 521.2R define el concreto celular de baja densidad un producto ligero con una densidad mayor a  $800 \text{ kg} / \text{m}^3$  pero inferior a  $1920 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Este concreto puede contener agregados de peso normal que cumplan con las normas ASTM C33, C144, C330, C331 y C332. [21]

### 6.3.4. Mezclado y manejo

#### Aditivo espumante

El concreto celular debe mezclarse mecánicamente para producir una distribución uniforme de materiales según la densidad deseada. Se debe evitar una mezcla excesiva, ya que puede causar cambios en la densidad y consistencia. En primer lugar, se introduce agua y aditivos solubles en agua a la mezcladora primero, seguido de cemento, agregados y todos los ingredientes excepto la espuma preformada, que se agrega al final, debe mezclarse hasta obtener una consistencia uniforme. Esta secuencia minimiza la destrucción de las celdas de aire. Se permite variar la secuencia recomendada si resulta ventajoso. Los materiales son proporcionados para obtener la densidad de diseño en el punto de colocación. HSe debe considerar cualquier cambio en la densidad causado por el método de colocación, como el bombeo. Cuando se utiliza equipo de mezcla de tránsito, la espuma preformada debe agregarse en el sitio de trabajo inmediatamente antes de transportar el concreto a su colocación final. Un tiempo de 2 a 3 minutos es suficiente para integrar la espuma en la mezcla. La figura a continuación muestra el proceso de elaboración de concreto celular con agente espumante.

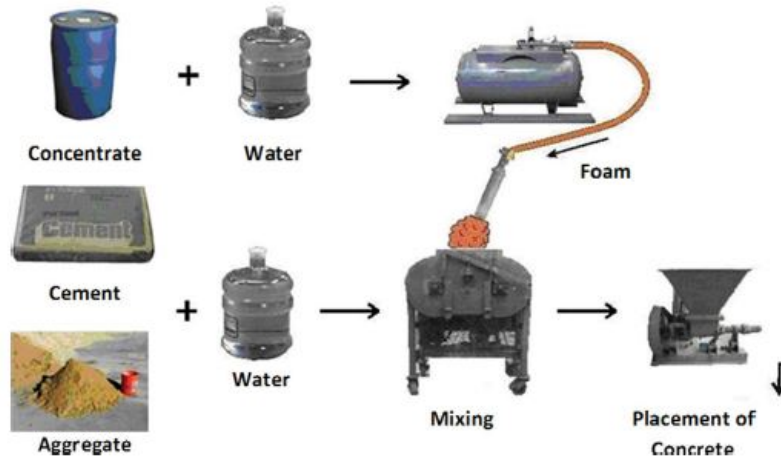


Figura 15: Procedimiento de elaboración de concreto celular  
Fuente: ACI 523.3R-14

## Curado

Para el curado del concreto celular se aplica el curado estándar, se aplicarían los métodos de ACI 308R. Sin embargo, los especímenes de laboratorio con densidades inferiores a  $1000 \text{ kg/m}^3$  no pueden ser sumergidos en pilas de curado por su densidad. En estos casos, se deben mantener en ambientes con humedad y temperatura controladas o bien cubiertos con telas o materiales húmedos.

### 6.3.5. Propiedades mecánicas

#### Resistencia a la compresión

Factores como la densidad, contenido de cemento, relación agua cemento, tipo, propiedades y contenido de agregados, y las condiciones de curado afectan la resistencia a la compresión del concreto celular. La densidad es un criterio clave para controlar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto celular. Debido a que la resistencia está relacionada con la densidad, es posible utilizar la densidad húmeda determinada en el momento de la colocación para estimar la resistencia a la compresión eventual, utilizando los resultados presentados en la que se muestra a continuación. La resistencia a la compresión para el concreto celular se debe medir con pruebas de compresión según ASTM C796 / C796M. Los resultados deben ser correspondientes a las condiciones del campo. Por lo tanto, las muestras de prueba de compresión no deben ser secadas al horno ni ensayadas en condiciones húmedas.

Densidad en estado fresco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Relación Arena-cemento	Relación Agua-cemento	Cantidad de cemento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Resistencia a la compresión estimada (MPa)
800	0.79	0.60	335	1.70
800	0.55	0.50	390	2.10
800	0.29	0.50	446	2.80
960	1.27	0.60	335	2.40
960	0.96	0.50	390	2.80
960	0.65	0.50	446	3.50
1120	1.75	0.60	335	3.10
1120	1.37	0.50	390	3.50
1120	1.06	0.45	446	4.10
1280	2.22	0.60	335	4.10
1280	1.78	0.50	390	4.50
1280	1.42	0.45	446	4.80
1440	2.85	0.45	335	7.60
1440	2.19	0.50	390	7.60
1440	1.78	0.45	446	9.00
1600	3.18	0.60	335	8.60
1600	2.65	0.45	390	11.70
1600	2.14	0.45	446	12.40
1760	3.66	0.60	335	13.80
1760	3.06	0.45	390	17.90
1760	2.44	0.50	446	17.20
1920	3.32	0.60	390	22.90
1920	2.80	0.50	446	24.30

Cuadro 3: Resistencia a la compresión típica de concreto celular  
Fuente: ACI 523.3R-14

### Resistencia a la tensión

Utilizando ASTM C496 / C496M, se determina la resistencia a la tracción de los concretos celulares. La resistencia a la tensión es generalmente del 10 al 15 % de la resistencia a la compresión.

### Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto celular teórico se obtiene al multiplicar la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión por 33 y por el coeficiente gama elevado a 1.5. El cuadro a continuación muestra el módulo de elasticidad típico para distintas densidades de concreto celular.

Densidad en estado fresco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Resistencia a la compresión típica a 28 días (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
800	1.70 - 2.80	1.03
1040	2.80 - 3.80	2.05
1280	4.10 - 5.10	3.38
1520	5.50 - 7.60	5.31
1760	9.00 - 11.00	8.21

Cuadro 4: Módulo de elasticidad para distintas densidades de concreto celular  
Fuente: ACI 523.3R-14

### 6.3.6. Propiedades físicas

#### Consistencia

El concreto celular tiene excelente trabajabilidad y demuestra propiedades de autoni-velación. Se considera autocompactable y por lo tanto no requiere vibración durante la colocación.

#### Densidad húmeda

La densidad húmeda generalmente se determina en el punto de colocación pesando un contenedor tarado de volumen conocido lleno de concreto celular. Este procedimiento se detalla en ASTM C796 / C796M. Cualquier aire atrapado en el concreto celular se alivia golpeando los costados del contenedor. Varillar o utilizar vibradores mecánicos para lograr la consolidación no se requiere porque el concreto celular se auto consolida. El uso de vibradores puede aumentar la densidad húmeda pues rompe las celdas microscópicas de aire.

#### Densidad seca

Densidad de secado al aire: la densidad de secado al aire representa la densidad del material en su lugar. Se ve afectada por la temperatura, humedad, edad, madurez, densidad de fundición, relación agua cemento y el área de superficie disponible para evaporación. En concreto celular es aproximadamente  $5 \text{ lb} / \text{ft}^3$  ( $80 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) menor que la densidad húmeda. En condiciones de baja humedad la diferencia puede ser de incluso hasta  $10 \text{ lb} / \text{ft}^3$  ( $160 \text{ kg} / \text{m}^3$ ).

El concreto celular tiende a perder volumen o encogerse debido a la destrucción de celdas de aire durante los procesos de mezclado y fraguado. Este efecto se atenúa conforme se reduce la densidad del concreto celular. Por este motivo, el concreto celular generalmente no necesita juntas de dilatación pues sus esfuerzos de contracción son mucho mayores. La figura a continuación muestra la reducción percentil de volumen a distintas densidades en  $\text{lb}/\text{ft}^3$ .

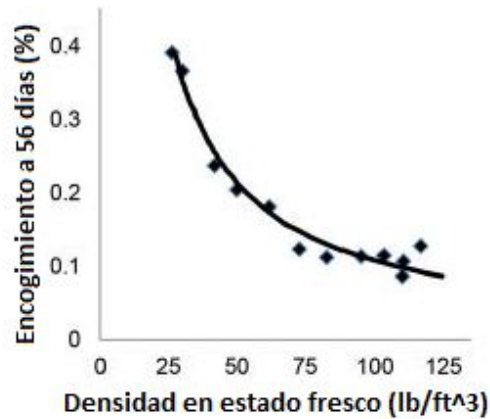


Figura 16: Porcentaje de encogimiento según densidad a 56 días  
Fuente: ACI 523.3R-14

### Permeabilidad

La absorción de agua del concreto celular depende de su densidad y mezcla de ingredientes. Las celdas interconectadas permiten aumentar absorción de agua. La adición de agregados livianos puede provocar una mayor absorción de agua. La adición de cenizas o el humo de sílice pueden reducir la porosidad capilar, por lo tanto, disminuir la absorción de agua.

La permeabilidad en concretos celulares generalmente aumenta con la disminución de la densidad, y se puede medir con ASTM D2434. El método es más preciso que otros métodos, como ASTM D4491, que fue desarrollado para geotextiles. Otro método que proporciona permeabilidad aproximada más rápidamente se muestra en ACI 522R.

### Conductividad térmica

La conductividad térmica del concreto celular es principalmente una función de su densidad. A mayor densidad, mayor será el coeficiente de conductividad térmica "k". Se determina de acuerdo con el método de placa caliente protegida (ASTM C177) o el método del medidor de flujo de calor (ASTM C518). El cuadro a continuación muestra los coeficientes de conductividad térmica típicos para distintas densidades de concreto celular.

Densidad en estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de conductividad térmica "k" (W/(m*K))
800	0.20
1080	0.30
1280	0.40
1520	0.57
1760	0.77

Cuadro 5: Coeficientes de conductividad térmica típicos del concreto celular  
Fuente: ACI 523.3R-14

### Aislamiento acústico

El concreto celular posee una excelente absorción del sonido debido a su estructura celular. Las millones de celdas microscópicas llenas de aire generan una serie de barreras diminutas para las ondas acústicas. Gracias a su densidad reducida, este concreto también mejora la atenuación del sonido.

### Coefficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica para los concretos celulares varía directamente con la densidad. Es típicamente de  $5.0$  a  $7.0 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{F}$  ( $9.0$  a  $12.6 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{C}$ ) en comparación con el coeficiente de expansión térmica para concreto de peso normal de  $3.3$  a  $7.3 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{F}$  ( $5.9$  a  $13.1 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{C}$ ). Se debe considerar la expansión térmica para aplicaciones con variación de temperatura de  $\pm 36^{\circ}\text{F}$  ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ) en temperaturas de colocación, temperaturas de funcionamiento, o ambas.

### Resistencia al fuego

El concreto celular posee excelente resistente al fuego. Por ejemplo, concreto celular ligero reforzado con fibra demostró un mejor rendimiento en pruebas de resistencia al fuego porque el aire contenido redujo el peligro de falla por explosión. Las microgrietas formadas a alta temperatura. previenen la fractura frágil del concreto celular. Adicionalmente, la fusión de las fibras reduce la presión del vapor de agua. El espesor requerido de concreto celular necesario para lograr una clasificación de fuego particular en horas puede ser menos que la mitad del concreto normal. El cuadro a continuación muestra resistencias típicas al fuego del concreto celular.

Horas de resistencia al fuego ASTM E119				
Densidad en estado seco (kg/m <sup>3</sup> )	2	3	4	5
400 - 800	2.2-2.8	2.8-3.3	3.3-3.8	3.8-4.2
800 - 960	2.8-3.1	3.3-3.5	3.9-4.1	4.4-4.6
1120 - 1280	3.1-3.4	3.8-4.2	4.4-4.8	4.9-5.4
1600	4.0	5.0	5.80	-

Cuadro 6: Resistencia al fuego típica del concreto celular  
Fuente: ACI 523.3R-14

### 6.3.7. Aplicaciones típicas del concreto celular

- Concreto ligero para aislamiento: Se utiliza principalmente concretos con aire incorporado para muros divisorios (tabiques) con fines de aislamiento debido a su baja conductividad térmica, acústica y alta resistencia al fuego, mayor que la de un concreto convencional. También se puede fundir sobre losas de entrepiso una capa de este material que sirva como aislante térmico y acústico sin tener generar un incremento sustancial en las cargas muertas de la estructura gracias a su baja densidad.
- Concreto ligero estructural: Es aquel concreto que posee una densidad menor que la de un concreto convencional entre 1440 kg/m<sup>3</sup> y 1920 kg/m<sup>3</sup> y para que tenga aplicaciones estructurales, su resistencia debe de ser mayor a 175 kg/m<sup>2</sup>. Generalmente este concreto se fabrica sustituyendo parcial o totalmente el agregado de peso normal por agregado ligero, los agregados ligeros para uso estructural deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 330. Estructuralmente se usan bloques o elementos prefabricados curados en autoclave.
- Rellenos fluidos: Gracias a su gran fluidez se usa como relleno alrededor de tuberías enterradas, el concreto celular deberá ser de similar resistencia que el suelo que rodea a la tubería con la mínima densidad posible. El concreto celular proporciona la ventaja de disminuir las cargas laterales en paredes circundantes (ver Figura 17). Además, si se necesita hacer cambios posteriores, el material puede ser fácilmente excavado. Adicionalmente, el concreto celular no necesita compactación, proporciona aislamiento térmico y es autocompactable. [14]



Figura 17: Concreto celular utilizado como relleno fluido  
Fuente: (Lazo, 2017) [14]

### 6.3.8. Sostenibilidad del concreto celular

Varias características de rendimiento del concreto celular contribuyen a la sostenibilidad, incluida su excelente durabilidad, resistencia contra llamas de fuego o humo, congelación y deshielo. Este desempeño mejora la vida útil de las estructuras basadas en concreto celular. Estas requieren un mantenimiento mínimo, y son una solución para proyectos de construcción sostenible a largo plazo.

El aislamiento térmico mejorado y masa térmica de las paredes o las estructuras de la cubierta del techo de concreto celular ayudan a reducir costos de energía en edificios. El sistema de clasificación LEED proporciona un conjunto de normas para la construcción ambientalmente sostenible. Las cubiertas de techo de concreto celular se han utilizado en muchos proyectos con certificación LEED, ayudando con la certificación de utilizando materiales locales y reciclados, así como ayudando con cumplir con los requisitos de emisión de energía y atmósfera.

Adicionalmente, el concreto celular es completamente reciclable pues al final de su vida útil puede ser utilizado efectivamente como agregado en mezclas de concreto. [21]

### 6.3.9. Eficiencia energética

Los muros y techos de concreto celular proporcionan aislamiento térmico eficaz en edificios, reduciendo significativamente los costos asociados de calefacción y aire acondicionado. La masa térmica mejorada del concreto celular en las cubiertas de techo ayuda a aumentar la vida útil de las estructuras reduciendo su shock térmico. Este material se puede usar junto con techos verdes, ayudando a controlar la escorrentía del agua almacenando agua y, a través de evapo-transpiración, reduce el efecto de isla de calor y ruido interior. Finalmente, el concreto celular es un común sustrato para membranas para techos que tienen baja reflectividad y emisividad.[21]

## 7.1. Generalidades

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas y físicas del concreto celular en comparación con las del concreto de densidad convencional, se elaboraron tres mezclas de distintas densidades de concreto celular utilizando espuma preformada sin agregados y una mezcla de control. Las mezclas A, B y C son de concreto celular y se diseñaron para densidades de  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $800 \text{ kg/m}^3$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. La mezcla D es la mezcla de control y se diseñó para una densidad de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Se elaboraron 7 cilindros y un muro de  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.1\text{m}$  de cada mezcla repartidos de la siguiente manera; dos cilindros para medir la resistencia a la compresión a los 7 días, 2 cilindros para medir la resistencia a la compresión a los 28 días, 2 cilindros para medir la permeabilidad a los 28 días, uno por medio del método de Torrent y el otro con el método de presión hidrostática. Los muros sirvieron para medir el aislamiento térmico y acústico. Las mezclas fueron elaboradas en el laboratorio de la Planta Sur de Mixto Listo y todos los ensayos mecánicos y físicos en estado endurecido se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

## 7.2. Diseño de mezclas

Todas las mezclas se diseñaron para un volumen de 55 litros considerando la cantidad de concreto necesario para llenar los cilindros de ensayos y los muros. Todas las mezclas incluyeron dosis de Polyheed 789 que es un aditivo retardante y plastificante para simular al concreto premezclado elaborado actualmente que por lo general incluye este tipo de aditivos, especialmente por motivos de transporte y bombeo. La cantidad de aditivo depende

de la cantidad de cemento en la mezcla. Finalmente, todas las mezclas excepto la mezcla control recibieron la adición de espuma generada por la combinación de agua con el aditivo espumante en proporciones recomendadas por el fabricante.

Las mezclas de concreto celular fueron diseñadas según su densidad y no para una resistencia a la compresión específica. Por lo tanto, las proporciones de los ingredientes de la mezcla no dependían de la relación agua / cemento sino de la densidad de cada material y el volumen de vacíos deseado. Para las tres mezclas de concreto celular se utilizó una relación agua / cemento de 0.40. Por lo tanto, para incrementar la densidad de una mezcla de concreto celular sin agregados, se debía aumentar la cantidad de cemento y agua manteniendo la relación agua / cemento reduciendo la cantidad de espuma generada por el agente espumante. Por el contrario, para reducir la densidad se debe reducir el agua y el cemento manteniendo su proporción aumentando la cantidad de espuma en la mezcla. A continuación, se muestran los diseños de las mezclas.

La mezcla A se diseñó para un volumen de vacíos de 68.65 %. Se consideró un porcentaje de espuma igual al volumen de vacíos en el bache de 55 litros. Considerando la densidad de la espuma, se incluyó en el bache 0.04 kg de espuma lo que corresponde a 40 litros de espuma. Debido a la ausencia de agregados en el diseño, el resto de la mezcla fue compuesto por agua y cemento. Considerando que la relación agua cemento es 0.4, se incluyó 17 % de agua y 14 % de cemento en la composición de la mezcla A. Para la elaboración de esta mezcla se mezcló primero el agua y el cemento y posteriormente, se introdujo en la mezcladora la espuma previamente elaborada y se mezcló durante 5 minutos con la pasta compuesta por el cemento y el agua.

<b>Mezcla A</b>				
<b>Datos buscados:</b>				
<b>Densidad</b>	600m <sup>3</sup>			
<b>Relación A/C</b>	0.40			
<b>Volumen de vacíos</b>	69 %			
<b>Bache de prueba:</b>	55 L			
	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Densidad</b>	<b>Proporción</b>	<b>Kg/55L</b>
<b>Agua</b>	169.89	1000	0.17	9.34
<b>Cemento</b>	430.11	3000	0.14	23.66
<b>Espuma</b>		0	0.69	0.04
<b>MP 789</b>				82.80

Cuadro 7: Diseño de mezcla A  
Fuente: Elaboración propia



Figura 18: Proporción de materiales Mezcla A  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla B se diseñó para un volumen de vacíos de 58 %. Para obtener este volumen de vacíos, se consideró un porcentaje de espuma igual al volumen de vacíos en el bache de 55 litros. Considerando la densidad de la espuma, se incluyó en el bache 0.032 kg de espuma lo que corresponde a 32 litros de espuma. Debido a la ausencia de agregados en el diseño, el resto de la mezcla fue compuesto por agua y cemento. Considerando que la relación agua cemento es 0.40, se incluyó 23 % de agua y 19 % de cemento en la composición de la mezcla B. Para la elaboración de esta mezcla se mezcló primero el agua y el cemento y posteriormente, se introdujo en la mezcladora la espuma previamente elaborada y se mezcló durante 5 minutos con la pasta compuesta por el cemento y el agua.

<b>Mezcla B</b>				
<b>Datos buscados:</b>				
<b>Densidad</b>	$800m^3$			
<b>Relación A/C</b>	0.40			
<b>Volumen de vacíos</b>	58 %			
<b>Bache de prueba:</b>	55 L			
	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Densidad</b>	<b>Proporción</b>	<b>Kg/55L</b>
<b>Agua</b>	230.20	1000	0.23	12.66
<b>Cemento</b>	569.80	3000	0.19	31.34
<b>Espuma</b>		0	0.58	0.032
<b>MP 789</b>				109.69

Cuadro 8: Diseño de mezcla B  
Fuente: Elaboración propia

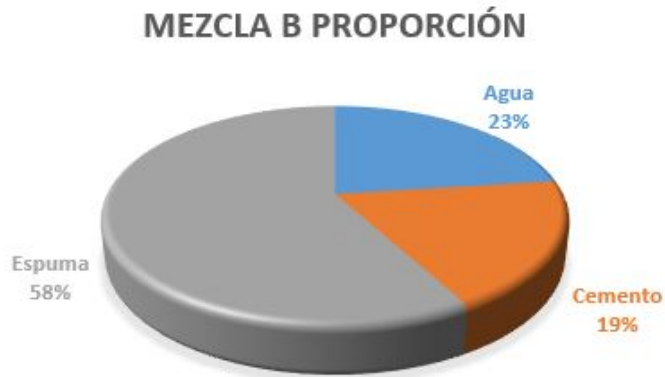


Figura 19: Proporción de materiales Mezcla B  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla C se diseñó para un volumen de vacíos de 37 %. Se consideró un porcentaje de espuma igual al volumen de vacíos en el bache de 55 litros. Considerando la densidad de la espuma, se incluyó en el bache 0.021 kg de espuma lo que corresponde a 21 litros de espuma. Debido a la ausencia de agregados en el diseño, el resto de la mezcla fue compuesto por agua y cemento. Considerando que la relación agua cemento es 0.40, se incluyó 34 % de agua y 29 % de cemento en la composición de la mezcla C. Para la elaboración de esta mezcla se mezcló primero el agua y el cemento y posteriormente, se introdujo en la mezcladora la espuma previamente elaborada y se mezcló durante 5 minutos con la pasta compuesta por el cemento y el agua.

Mezcla C				
Datos buscados:				
<b>Densidad</b>		1200m <sup>3</sup>		
<b>Relación A/C</b>		0.40		
<b>Volumen de vacíos</b>		37 %		
<b>Bache de prueba:</b>		55 L		
	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Densidad</b>	<b>Proporción</b>	<b>Kg/55L</b>
<b>Agua</b>	339.78	1000	0.34	18.69
<b>Cemento</b>	860.22	3000	0.29	47.31
<b>Espuma</b>		0	0.37	0.021
<b>MP 789</b>				165.59

Cuadro 9: Diseño de Mezcla C  
Fuente: Elaboración propia

## MEZCLA C PROPORCIÓN

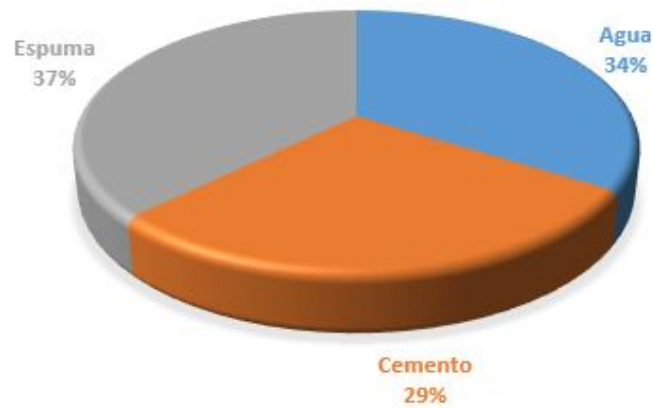


Figura 20: Proporción de materiales Mezcla C  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla D representa al concreto convencional. Esta mezcla fue la única que se diseñó para una resistencia dada en lugar de para una densidad específica. Adicionalmente, fue el único diseño que incluyó agregados, estos fueron distribuidos en 48 % de agregados gruesos y 52 % de agregados finos. Se consideró un diseño para una relación agua cemento de 0.715 y densidad de  $2400 \text{ kg/m}^3$  esperando obtener una resistencia a la compresión a los 28 días superior a los 3000 psi. El proceso de mezclado consistió en la adición del agua, cemento, y agregados en la mezcladora y se mezcló durante 5 minutos.

Mezcla D				
Datos buscados:				
Densidad	$2400 \text{ m}^3$			
Relación A/C	0.72			
Volumen de vacíos	1 %			
Bache de prueba:	55 L			
	$\text{Kg/m}^3$	Densidad	Proporción	$\text{Kg}/55\text{L}$
Agua	149.09	1000	0.15	8.20
Cemento	233.64	3000	0.08	12.85
Agregado fino	1034.55	2650	0.39	56.90
Piedrín 3/8''	332.73	2660	0.13	18.30
Piedrín 1''	632.73	2690	0.24	34.80
MP 789				61.04

Cuadro 10: Diseño de Mezcla D  
Fuente: Elaboración propia

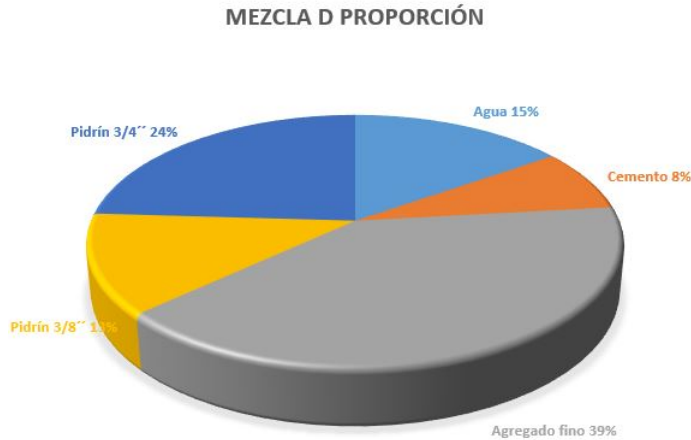


Figura 21: Proporción de materiales Mezcla D  
Fuente: Elaboración propia

## 7.3. Materiales

### 7.3.1. Cemento

Para todas las mezclas, se utilizó cemento CFB de Cementos Progreso el cual se fabrica bajo la norma COGUANOR NTG 41095 (ASTM C1157-09). Este cemento pertenece a una categoría de alta resistencia inicial (ARI), con una resistencia mínima a los tres días, de 3,460 psi. La resistencia mínima a compresión a los 28 días es de 5,000 psi.

### 7.3.2. Agregados

#### Agregado fino

Como agregado fino, se utilizó de roca basáltica triturada sin presencia de materia orgánica. El agregado fino, se caracterizó por una granulometría de 0-1/4'' con densidad de  $2,650 \text{ kg}/\text{m}^3$ . La arena utilizada registró una humedad relativa de 2.80 y una absorción de 2.80. El agregado fino fue suministrado por AGRECA (Agregados de Centroamérica).

#### Agregado grueso

Para el agregado grueso se utilizó piedrín basáltico de 3/4'' y densidad de  $2,690 \text{ kg}/\text{m}^3$  y piedrín basáltico de 3/8'' con densidad de  $2,660 \text{ kg}/\text{m}^3$ . El piedrín de 3/8'' registró una humedad relativa de 1.40 y una absorción de 1.00. Por otra parte, el piedrín de 3/4'' registró una humedad relativa de 3.30 y una absorción de 1.00. El agregado grueso fue suministrado por AGRECA (Agregados de Centroamérica).

### 7.3.3. Aditivos

#### Aditivo Polyheed 789

Es un aditivo plastificante y reductor de agua de 12 al 20 %. Cumple con las especificaciones COGUANOR NTG 41070 (ASTM C-494 Tipo B y D, AASHTO M 194 y CRD C-87). Puede ser utilizado para:

- Concreto donde se requiera extender el fraguado y la trabajabilidad.
- Concreto donde se requiera un rango de asentamiento medio de 15 a 20 cm (6 a 8 pulg).
- Mezclas de concreto con una amplia variedad de cementos Tipo Pórtland o adicionados.
- Concretos de uso arquitectónico

#### Eucozell 100

Es un aditivo líquido diseñado para la fabricación de concretos fluidos, con altos contenidos de aire, baja densidad y resistencia a compresión. Posee una densidad de 1040 kg /  $m^3$ . y puede ser empleado para:

- 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 incorporador de aire de alto rango para controlar la segregación en mezclas muy ásperas; su uso baja las resistencias en todas las edades.

## 7.4. Equipo de laboratorio

- Los moldes que están en contacto con el concreto deben ser hechos de acero, hierro fundido o cualquier otro material no absorbente, no reactivo con el concreto que contenga cemento Portland u otros cementos hidráulicos. Todos los moldes fueron recubiertos en su interior con desencofrante y a los moldes para concreto celular se les sellaron los bordes con plastilina para evitar que su alta fluidez causara que se escurriera a través de estos.

- Varillas compactadoras Deben ser varillas de acero cilíndricas, rectas, con el extremo para apisonar redondeado en una punta semiesférica del mismo diámetro de la varilla. Se especifican las siguientes medidas:
  - Varilla larga: 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud.
  - Varilla corta: 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud.
- Mazo: con cabeza de hule o cuero crudo de  $1.25 \pm 0.50$  lb de peso.
- Aparatos para medir asentamiento: Deben cumplir con los requisitos del método de ensayo COGUANOR NTG 41052 (ASTM C 143/ C143M)
- Equipo de tamizado en húmedo: Debe cumplir con los requerimientos de la práctica COGUANOR NTG 41057 (ASTM C172)
- Aparato de contenido de Aire: Debe cumplir con los métodos de ensayo COGUANOR NTG 41017 h7 (ASTM C231) o COGUANOR NTG 41017 h6 (ASTM C173)
- Dispositivo para medición de temperatura: Debe cumplir con los métodos de ensayo COGUANOR NTG 41053 (ASTM C1064)
- Mezcladora del concreto: Si es motorizada, debe ser de tambor giratorio, capaz de mezclar completamente las amasadas de las cantidades requeridas, al asentamiento requerido. (Comisión Guatemalteca de Normas, 2012).
- Compresor neumático: Debe generar una presión interna de al menos 100 psi para generar espuma estable según recomendaciones del fabricante del aditivo.



Figura 22: Equipo de laboratorio Mixto Listo Planta Sur  
Fuente: Elaboración propia

## 7.5. Elaboración de espuma

Para la elaboración de la espuma preformada, se utilizó el aditivo Eucocell 1000 en una proporción de un litro por cada 20 litros de agua según recomendaciones del fabricante. Para elaborar la espuma requerida para todas las mezclas se utilizaron dos litros de este aditivo y 40 litros de agua. El agua y el aditivo fueron introducidos en un compresor neumático con capacidad de alcanzar los 300 psi de presión. Siguiendo recomendaciones del fabricante, se elaboró la espuma a una presión de 100 psi.



Figura 23: Composición de espuma  
Fuente: Elaboración propia

La espuma se genera por la reacción química entre el agua y el agente espumante al ser sometidos a una presión determinada. En este caso para determinar la composición de esta, se aforó una producción generada por 40 litros de agua y 2 litros de agente espumante. Se midió una producción de 220 galones o 832.8 litros. Por lo tanto, se determinó que la espuma consiste en 0.24 % aditivo incorporador de aire, 4.80 % agua y 94.96 % aire.



Figura 24: Adición de aditivo espumante al compresor neumático  
Fuente: Elaboración propia

Se observó que conforme se produce espuma, el compresor pierde presión y la calidad de la espuma disminuye volviéndose menos estable y duradera. Adicionalmente, la exposición al aire por periodos de tiempo superiores a media hora, generaban pérdidas visibles de burbujas en cantidad y calidad. Por este motivo, la espuma que no se utilizaba inmediatamente debía ser desechada. En la figura a continuación, se observa como la espuma en la cubeta del lado derecho tiene una apariencia más rala y es más transparente por su pérdida de burbujas a través del tiempo. En contraste, la cubeta del lado izquierdo muestra espuma recién mezclada y más estable.



Figura 25: Espuma preformada para concreto celular  
Fuente: Elaboración propia

## 7.6. Elaboración de mezclas

Todas las mezclas fueron elaboradas en el laboratorio de la planta sur de la empresa Mixto Listo el 10 de julio del 2019 en una mezcladora motorizada con capacidad para 100 litros.

La mezcla D (control) fue elaborada según la norma COGUANOR NTG 41060 (ASTM C192). Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio. En primer lugar, se insertó en la mezcladora el agregado grueso, parte del agua de mezclado y la solución de aditivo retardante. Posteriormente, se encendió la mezcladora y se agregó en movimiento el agregado fino, cemento y resto del agua. Se mezcló el concreto durante 3 minutos luego se dejó en reposo durante 3 minutos y finalmente se mezcló por 2 minutos más. En necesario cubrir el extremo abierto de la mezcladora para prevenir evaporación en el período de reposo.

Para la elaboración de mezclas de concreto celular se insertó en la mezcladora primero el agua y el cemento con el aditivo Polyheed 789 en las proporciones y cantidades requeridas y se mezclaron por 5 minutos para eliminar la mayor cantidad posible de grumos. Posteriormente, se detuvo la mezcladora para introducir la espuma en la mezcla y se dejó mezclando por otros 5 minutos a un ángulo de 35 grados. Finalmente, la mezcla fue examinada en estado fresco y se elaboraron los especímenes.



Figura 26: Mezclado de concreto celular  
Fuente: Elaboración propia

## 7.7. Elaboración especímenes

Se elaboraron los cilindros de concreto según la norma COGUANOR NTG 41060 (ASTM C 192-07). Previo al llenado de los especímenes, se elaboró la mezcla de concreto. Se debe mezclar el concreto durante 3 minutos, después de que todos los componentes estén dentro de la mezcladora, se deja en reposo durante 3 minutos y finalmente se mezcla por 2 minutos adicionales. Se debe cubrir el extremo abierto de la mezcladora para prevenir evaporación en el período de reposo.

Se elaboraron 20 cilindros de concreto (5 por muestra) de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura. Se utilizaron dos de estos cilindros por muestra para los ensayos a compresión a 7 días y otros dos para los ensayos a compresión a 28 días. Se utilizó el cilindro restante de cada muestra para medir el módulo de elasticidad a los 28 días.

Se elaboraron dos cilindros de 6 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de altura de cada muestra para medir la permeabilidad a los 28 días. Finalmente, se elaboró un muro por mezcla de 0.30m x 0.30m x 0.10 para las pruebas de aislamiento térmico y acústico.

Todos los especímenes de la mezcla control fueron varillados de acuerdo con la norma COGUANOR NTG 41060 (ASTM C 192-07). Los especímenes de concreto celular no fueron varillados debido a su alta fluidez.

## 7.8. Curado

Luego de desencofrar los especímenes, se procedió a identificarlos según su densidad en estado fresco y la fecha de elaboración. Estos se deben curar a una temperatura de 23 grados Celsius en agua con cal para ensayar a 7 y 28 días. Puesto que el concreto celular por su baja densidad flota en el agua, los especímenes celular se curaron manteniéndolos cinco días en sus moldes y luego se curaron a la intemperie hasta ser ensayados.

## 7.9. Ensayos en estado fresco

### Temperatura

Se tomó la temperatura del concreto en estado fresco, introduciendo un termómetro certificado según la norma COGUANOR NTG 41053 (ASTM C1064). El dispositivo debe estar sumergido al menos 3 pulgadas dentro del concreto fresco. El dispositivo de medición se debe dejar dentro de la mezcla como mínimo 2 minutos hasta que la lectura de la temperatura se estabilice.



Figura 27: Medición de temperatura de concreto fresco  
Fuente: Elaboración propia

### Densidad

La densidad en estado fresco se midió llenando totalmente una tara de volumen y masa conocidos y luego pesando la tara llena, restando su masa y dividiendo dentro del volumen de la misma. Según la norma COGUANOR NTG 41010h2 (ASTM C138). Para medir las

densidades en estado seco se midió la masa de los cilindros de ensayo y se dividió dentro de su volumen conocido. [22]

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (6)$$

Donde:

M: Densidad aparente de los agregados  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/pe}^3$ )

G: Masa de los agregados más el recipiente,  $\text{kg}$  ( $\text{lb}$ )

T: Masa del recipiente,  $\text{kg}$  ( $\text{lb}$ ).

V: Volumen del recipiente  $\text{m}^3$  ( $\text{pe}^3$ )



Figura 28: Medición de densidad en estado fresco  
Fuente: Elaboración propia

## Asentamiento

Para medir el asentamiento, se utilizó un cono de Abrams, un metro y una varilla apisonadora. Para este ensayo, primero se humedeció el molde y se colocó en una superficie plana. Se mantuvo firmemente en su lugar durante del llenado. Se llenó el molde en tres capas, cada una se varilló 25 veces en toda la sección transversal de cada capa. Luego se removió el cono y se midió el asentamiento de la mezcla con el metro según la norma ASTM norma COGUANOR NTG 41017 h4 C143. Este ensayo solo se pudo realizar en la mezcla control por su fluidez. Para las mezclas de concreto celular se llevó a cabo la prueba de cono de Abrams invertido (ver Figura 29) en la cual se mide el diámetro de la circunferencia formada por el concreto al remover el cono según la norma ASTM C 1611.



Figura 29: Ensayo de cono de Abrams invertido  
Fuente: Elaboración propia

## Volumen de vacíos

Para medir el volumen de vacíos, según la norma COGUANOR NTG 41017- h7 (ASTM C231). Para este ensayo se utilizó un medidor tipo B, el cual consiste en un recipiente que iguala un volumen conocido de aire a una presión conocida, en una cámara de aire sellada, con el volumen conocido de aire en la muestra de concreto. El indicador del medidor de presión se calibra en términos del porcentaje de aire para la presión observada. Se llenó el recipiente en tres capas de igual volumen, cada capa se varilló 25 veces y se golpearon los lados del recipiente de 10 a 15 veces con el mazo para cerrar cualquier vacío. Este ensayo no funciono en las mezclas de concreto celular porque el agua introducida penetraba bajo el concreto rompiendo celdas de aire de la mezcla y sin generar presión. Para las mezclas de concreto celular se calculó el volumen de aire según su contenido de espuma. [8]

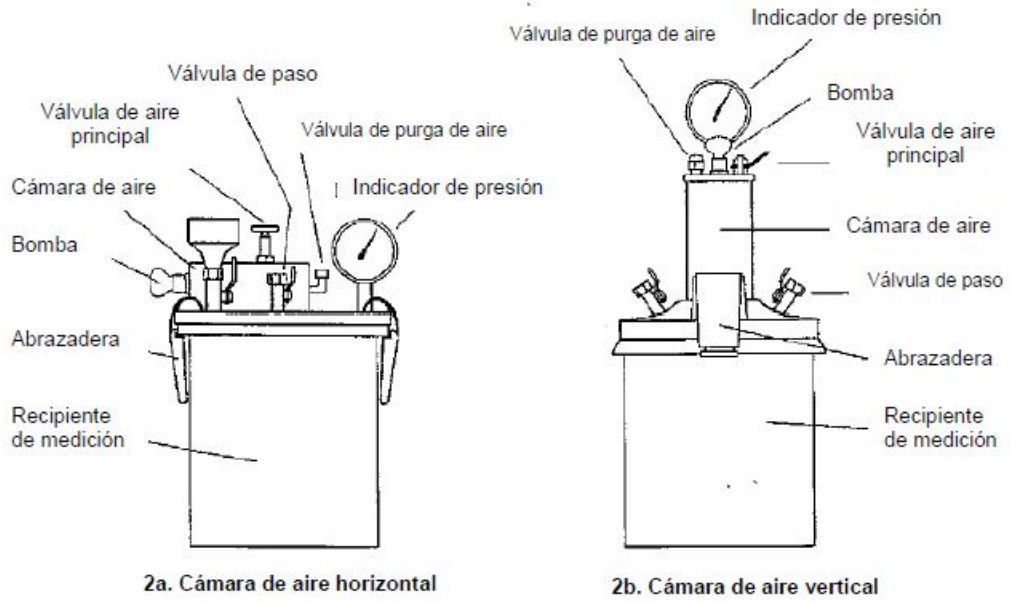


Figura 30: Medidor tipo B  
 Fuente: COGUANOR NTG 41017h7[8]



Figura 31: Medición de volumen de vacíos  
 Fuente: Elaboración propia

## 7.10. Ensayos en estado endurecido

### 7.10.1. Propiedades mecánicas

#### Resistencia a la compresión

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo dentro del área de la sección transversal del espécimen.

La carga debe aplicarse a una velocidad de movimiento (medida desde la platina a la cruzeta) correspondiente a una velocidad de esfuerzo sobre el espécimen de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s ( $35 \pm 7$  (lb/pulg<sup>2</sup>)/s). La velocidad de movimiento designada debe ser mantenida al menos durante la última mitad de la fase de carga prevista. Se debe aplicar la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que la carga está decreciendo progresivamente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido.[9]

$$f_{cm} = \frac{4000 * P_{max}}{3.14159 * D} \quad (7)$$

Donde:

$f_{cm}$ : Resistencia a la compresión en MPa (lb/pulg<sup>2</sup>).

Pmax: Carga máxima kN (lb fuerza).

D: Medida del diámetro promedio en mm (pulg).



Figura 32: Ensayo de resistencia a la compresión  
Fuente: Elaboración propia

### Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El módulo de elasticidad indica la rigidez y capacidad del material de deformarse. La relación de Poisson indica la relación entre las deformaciones unitarias laterales y axiales en el material. Para medir el módulo de elasticidad y la relación de Poisson se utilizó la norma COGUANOR NTG 41017 h16 (ASTM C469-02). En primer lugar, se nivelaron los extremos superior e inferior de los cilindros con azufre. Posteriormente, se colocó en cada muestra tres deformímetros en forma de aro. Se colocó uno en el extremo superior, uno en el centro, y el último en el extremo inferior. Luego se procedió a aplicar el 40 % de la carga máxima que cada mezcla resiste a la compresión de manera que se genere una deformación por esfuerzos de compresión sin llegar a la ruptura del cilindro. De esta manera se registraron las deformaciones laterales y axiales en cada cilindro al ser sometido a este porcentaje de su capacidad a compresión.[11]

### Cálculo de módulo de elasticidad

$$E = \frac{S2 - S1}{2 - 0.000050} \quad (8)$$

Donde:

E: módulo de elasticidad cuerda, MPa (psi).

S2: esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última MPa (psi).

S1: esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, 1, de 50 millonésimas, en MPa (psi).

e2: deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2, en millonésimas: m (pulg.).

### Cálculo de relación de Poisson

$$u = \frac{et2 - et1}{e2 - 0.000050} \quad (9)$$

Donde:

u: Relación de Poisson.

et2: Deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por S2 en millonésimas: m (pulg.).

et1: Deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por el esfuerzo S1 en millonésimas: m (pulg.).



Figura 33: Ensayo de módulo de elasticidad  
Fuente: Elaboración propia

### 7.10.2. Propiedades físicas

#### Densidad en estado endurecido

Para calcular la densidad de los especímenes en estado endurecido, se calculó la masa promedio de los cuatro cilindros ensayados a compresión para cada mezcla. Posteriormente, se dividió dentro del volumen del cilindro conocido de 0.0016 metros cúbicos para cilindros de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura. A continuación, se muestra la fórmula utilizada para el cálculo.

$$\rho = \frac{4 \times 10^9 * W}{L * D^2 * 3.14159} \quad (10)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del espécimen  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/pe}^3$ ).

W: Masa del espécimen al aire  $\text{kg}$  ( $\text{lb}$ ).

L: Promedio de la medida de longitud  $\text{mm}$  ( $\text{pulg}$ ).

D: Promedio de la medida del diámetro  $\text{mm}$  ( $\text{pulg}$ ).

Posteriormente, se midió el porcentaje de encogimiento para cada mezcla midiendo el volumen en estado endurecido de los muros elaborados en moldes de  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ . Con el diferencial entre volumen conocido del molde de  $0.09$  metros cúbicos, y el volumen medido en estado endurecido se obtiene el porcentaje de encogimiento. Este dato sirve para compensar el volumen de los cilindros para el cálculo de la densidad en estado endurecido de cada mezcla. A continuación, se muestra el cálculo del porcentaje de encogimiento.

$$\text{Encogimiento} = 1 - \left( \frac{\text{Volumen}}{0.09\text{m}^3} \right) \quad (11)$$



Figura 34: Muros para ensayos de conductividad térmica y acústica  
Fuente: Elaboración propia

## Permeabilidad

### Medición de resistividad eléctrica

El método de medición de cuatro puntos que se utiliza ofrece una medida exacta de la resistencia, reduciendo al mínimo los efectos de las esponjas conductoras y la presión

aplicada a los electrodos. La muestra debe estar en una condición saturada de agua para obtener una medida significativa. Una fuente de corriente alterna se utiliza para aplicar corriente a través del cilindro o núcleo saturado. Se utiliza un voltímetro para medir la caída de voltaje a través de la muestra, y un amperímetro mide la corriente. La resistividad total es la inversa de la conductividad a granel, es decir,  $R = 1 / C$ . De la medición de la corriente  $I$  y el voltaje  $V$ , la conductividad a granel se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{I}{V} \cdot \frac{L}{A} \quad (12)$$

Donde:

C: Conductividad eléctrica.

L: Longitud de la probeta.

A: Área de muestra de corte transversal.

I: Corriente.

V: Voltaje. [23]



Figura 35: Medición de resistividad eléctrica  
Fuente: Elaboración propia

### Método de presión hidrostática

Este método consiste en someter a los cilindros de 6 pulgadas de diámetro a un flujo constante de agua bajo presión de 500 KPa durante un periodo de 72 horas. El agua intenta penetrar constantemente el cilindro dependiendo de la permeabilidad de la mezcla, será la penetración de esta en el cilindro. Al cabo de la prueba se mide la penetración media y la

penetración máxima en milímetros. Si se observaran filtraciones, el ensayo no se considerará válido, se deberá registrar en el informe y repetir la prueba con otro espécimen.[24]



Figura 36: Medición de permeabilidad por método de presión hidrostática  
Fuente: Elaboración propia

### Método de Torrent

Por medio de una bomba de vacío, se crea un vacío dentro de la cámara principal de ensayo y en una cámara exterior (anillo de protección concéntrico), ambos en contacto con la superficie del concreto. Posteriormente la conexión entre la cámara de ensayo y la bomba de vacío se cierra herméticamente. El aumento de presión en la cámara de ensayo, debido al aire que fluye a través del concreto, se mide en función del tiempo. La permeabilidad al aire se calcula como la función del cambio de presión con el tiempo y otros valores característicos.[12]



Figura 37: Medición de permeabilidad por método de Torrent  
Fuente: Elaboración propia

## Aislamiento térmico

Para la medición del aislamiento térmico se utilizaron muros de 0.30m x 0.30m x 0.10m de cada una de las mezclas y se introdujeron en el medio de cajas de madera de 0.60m x 0.35m x 0.35m. Como emisor se utilizó una bombilla halógena de 90 W con frecuencia de 60 Hz en contacto con el muro. Los muros fueron secados al horno a 110 grados Celsius durante 24 horas previo a la prueba para evitar que la humedad contenida influyese en el resultado. La prueba fue empírica y comparativa y se utilizó como referencia la norma ASTM E1225-04. Con esta norma se determinó la geometría de los muros y el número de sensores embebidos en los mismos. La prueba consistió en colocar un emisor de calor de un lado del muro encendido por 24 horas y dos sensores de temperatura colocados a 3.34 cm de distancia entre si fundidos en el centro de los muros.[25]

Se registró la temperatura en cada uno de los sensores de temperatura fundidos a la mitad de cada muro separados entre sí a 3.34 cm cada 30 minutos durante la prueba y de esta manera se midió el diferencial de temperatura en cada punto entre los dos sensores de temperatura de cada mezcla utilizando del recopilador de datos Trimble Nomad. Al sensor más próximo a la bombilla en cada muro se le dio el nombre de T1 y al sensor más alejado de esta se le dio el nombre T2. Sin embargo, debido al alto nivel de incertidumbre con respecto a la ubicación exacta de los sensores fundidos dentro de los muros de concreto y considerando el gran impacto que una pequeña desviación en la ubicación de los mismos puede tener en el cálculo del coeficiente de conductividad térmica, se decidió tomar estas mediciones como referencia pero no utilizarlas en el cálculo de este coeficiente. Por lo tanto, se midió con un termómetro infrarrojo en cada corrida la temperatura de ambas caras externas del muro.

Esta prueba se repitió tres veces para cada mezcla. Considerando que es una prueba comparativa en la cual todas las bombillas están en contacto con una de las caras externas de cada muro, se desprecian las pérdidas de calor en el aire. Por lo tanto, se asume que toda la emisividad de la bombilla llega a los muros.



Figura 38: Pruebas de aislamiento térmico  
Fuente: Elaboración propia

Para medir el coeficiente  $k$  de cada material se utilizó la temperatura registrada en las caras externas de cada muro debido a la alta incertidumbre en la posición exacta de los sensores de temperatura internos al momento de fundirlos dentro de los muros. Estas pequeñas variaciones de espesor de concreto pueden tener un gran impacto en los coeficientes de conductividad térmica pues dependen directamente del espesor del material para ser calculados. En contraste, las caras externas de los muros garantizan un espesor de concreto de 10 cm.



Figura 39: Medición de temperatura en caras externas  
Fuente: Elaboración propia

Para calcular el coeficiente de conductividad térmica de las mezclas, se modelaron las superficies como cuerpos negros según la ley de Boltzmann para obtener la radiación máxima que podía emitir la bombilla. Para esto se utilizó la constante de Boltzmann y se multiplicó por la temperatura de operación de la bombilla elevada a la cuarta potencia. Esta temperatura fue investigada con el proveedor de la bombilla.

Constante de Boltzmann:

$$\sigma = 5.6697 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

Poder emisivo de la bombilla modelada como cuerpo negro:

$$Wb = \sigma * Tb^4 \quad (13)$$

Posteriormente, se utilizó la ley de Planck para medir la emisividad teórica de la bombilla dentro del espectro de luz visible. Para esto se utilizaron las constantes de la ley Planck:

$$C1 = 3.72 * 10^8 \frac{W * \mu m^2}{m^2}$$

$$C2 = 1.4389 * 10^4 \mu m * K$$

Emisividad teórica de la bombilla:

$$W = \int_{0.39}^{0.78} \frac{c1 * \lambda^{-5}}{e^{\frac{c2}{\lambda * Tb}} - 1} d\lambda \quad (14)$$

Para calcular la eficiencia de la bombilla se dividió su emisividad teórica espectral dentro de su radiación máxima de emisión como cuerpo negro.

$$\eta = \frac{W}{Wb} \quad (15)$$

Posteriormente, se multiplicó la potencia teórica de la bombilla por uno menos su eficiencia para obtener la cantidad de vatios de calor generados por este emisor.

$$Q = 90W (1 - \eta) \quad (16)$$

Finalmente, con el área expuesta a radiación, el espesor conocido, la tasa de radiación recibida y el diferencial de temperaturas medidas en ambos sensores de temperatura dentro de los muros, se calculó el coeficiente k para cada mezcla.

$$K = \left( \frac{Q}{A} \right) \cdot \left( \frac{L}{\Delta T} \right) \quad (17)$$

Donde:

K: Coeficiente de conductividad térmica (W/m\*K).

Q: Vatios de calor recibidos (W).

A: Area expuesta a radiación ( $m^2$ ).

L: Espesor del material (m).

Delta T: Diferencial de temperatura (K).

## **Aislamiento acústico**

Para medir el aislamiento acústico, se solicitó el asesoramiento y equipo de la empresa de audio Sound Check. Se diseñó una prueba empírica y comparativa tomando como referencia la norma IRAM 4063.3 (ISO 140.3). La norma indica el procedimiento para la generación de ruido rosa y la medición de las intensidades. Adicionalmente, la norma muestra cómo se tabulan y grafican los resultados. [26]

En este caso, se utilizaron los muros de 0.30m x 0.30m x 0.10m de cada una de las mezclas. Se introdujeron en una caja acústica elaborada con dos capas de madera de palo blanco de 1.5 pulgadas intercaladas con planchas de duroport de una pulgada para aislar acústicamente. Se seleccionó Palo Blanco como madera a utilizar debido a que su densidad es alta y esto tiende a mejorar el aislamiento acústico en los materiales. Adicionalmente, se colocó cartón de huevo en el centro de la caja para reducir los efectos de resonancia y reverberación. Posteriormente, se insertó un micrófono DBX RTA dentro de la caja y se fijó una bocina Yamaha HS-7 a 10 cm de la caja. La bocina fue conectada a una consola Midas 32 para la generación del ruido rosa.



Figura 40: Equipo de medición de aislamiento acústico  
Fuente: Elaboración propia

Se procedió a generar ruido rosa en frecuencias de entre 100Hz y 20000Hz con la misma intensidad para cada corrida a través de la bocina a 10 cm del punto de colocación del muro. Se excluyeron las frecuencias de 20Hz a 99Hz porque son rara vez perceptibles por el oído humano. Se eligió ruido rosa para la medición debido a su propiedad de emitir cada octava con la misma potencia.

En primer lugar, se midió sin ningún muro para tener la medición sin aislamiento acústico. Posteriormente, se reprodujo el ruido rosa con cada uno de los cuatro muros de las mezclas actuando como aislantes. Se analizaron las mediciones del micrófono utilizando, el software Logic Pro y el analizador Voxengo SPAN. De esta manera se obtuvo la intensidad percibida por el micrófono para las frecuencias entre 100Hz y 20000Hz con cada una de las mezclas actuando como aislante acústico. Finalmente, se midió el diferencial de decibelios registrado para cada frecuencia en este rango entre la medición sin aislamiento y las mediciones con cada muro. El promedio ponderado de estos diferenciales es el índice de reducción acústica ponderado.



Figura 41: Pruebas de aislamiento acústico sin muro  
Fuente: Elaboración propia



Figura 42: Pruebas de aislamiento acústico con muro  
Fuente: Elaboración propia



## 8.1. Resultados en estado fresco

### 8.1.1. Densidad

Las mezclas de concreto fueron diseñadas para una densidad específica en lugar de para una resistencia a la compresión deseada. La mezcla A fue diseñada para una densidad de  $600 \text{ kg/m}^3$  mientras que las mezclas B y C fueron diseñadas para densidades de  $800 \text{ kg/m}^3$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. La mezcla control fue diseñada para una densidad de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Para medir la densidad en estado fresco se llenó por completo una tara de masa y volumen conocidos según la norma COGUANOR NTG 41010h2 (ASTM C138). Posteriormente se midió la masa y se calculó la densidad con el volumen conocido.

Densidad en estado fresco			
Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D
$433 \text{ kg/m}^3$	$806 \text{ kg/m}^3$	$1150 \text{ kg/m}^3$	$2392 \text{ kg/m}^3$

Cuadro 11: Densidad en estado fresco  
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la mezcla A obtuvo una densidad mucho menor a la de diseño. Esto se debe a que esta mezcla fue la primera en ser elaborada y por lo tanto se utilizó la primera parte de la espuma en el tanque. Considerando que el tanque pierde presión conforme libera espuma, es posible afirmar que la espuma elaborada con la presión de diseño (100 psi) será más estable y tendrá mayor contenido de aire retenido que la espuma elaborada posteriormente a presiones más bajas. En el resto de las mezclas se obtuvieron densidades en estado fresco cercanas a las de diseño pues se dosificó el contenido de espuma en las mezclas

de manera que se contuviera la cantidad de vacíos en la mezcla para obtener la densidad deseada en cada mezcla.

### 8.1.2. Temperatura

Para medir la temperatura en estado fresco del concreto se introdujo un termómetro tres pulgadas sumergido en la mezcla durante dos minutos. Considerando que el calor en el concreto fresco es generado por la reacción química entre el cemento y el agua que ocurre durante el fraguado, se esperaba que las mezclas con mayor contenido de cemento registraran temperaturas más elevadas. En este caso, las mediciones corroboraron lo esperado. A continuación, se muestra como la temperatura en estado fresco es directamente proporcional a la cantidad de cemento en la mezcla.

Temperatura en estado fresco			
Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D
24.5 °C	27.0 °C	32.5 °C	23.6 °C

Cuadro 12: Temperatura en estado fresco  
Fuente: Elaboración propia

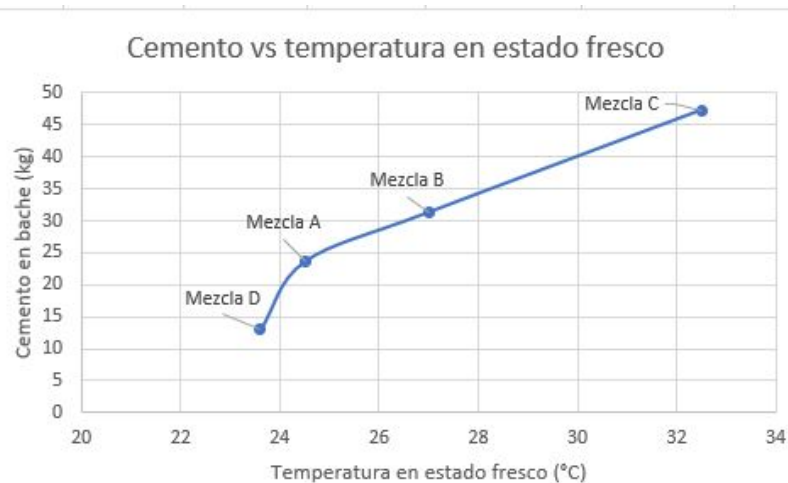


Figura 43: Cemento vs temperatura en estado fresco  
Fuente: Elaboración propia

### 8.1.3. Consistencia

Las consistencias de las mezclas de concreto celular por su alta fluidez fueron medidas utilizando el cono de Abrams invertido. La alta fluidez en estas mezclas se debe a la ausencia de agregados y al uso de aditivo fluidificante. Los resultados muestran como la fluidez aumenta conforme la densidad disminuye. En las tres mezclas se obtuvieron valores de entre 150 y 165 cm por lo que se consideran mucho más fluidas que la categoría SF3 para concretos autocompactables. Para la mezcla control, se midió la consistencia utilizando el método del

cono de Abrams. Para esta mezcla se obtuvo un asentamiento de aproximadamente 16 cm por lo que se puede considerar una mezcla de la categoría "S4".

<b>Asentamiento (Cono de Abrams)</b>			
<b>Mezcla A</b>	<b>Mezcla B</b>	<b>Mezcla C</b>	<b>Mezcla D</b>
N/A	N/A	N/A	158.75 mm

Cuadro 13: Asentamiento de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

<b>Diámetro de flujo (Cono de Abrams invertido)</b>			
<b>Mezcla A</b>	<b>Mezcla B</b>	<b>Mezcla C</b>	<b>Mezcla D</b>
1651.0 mm	1524.0 mm	1498.6 mm	N/A

Cuadro 14: Diámetro de flujo de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

#### 8.1.4. Volumen de vacíos

Para medir el volumen de vacíos, según la norma COGUANOR NTG 41017- h7 (ASTMC231) se utilizó un recipiente que iguala un volumen conocido de aire a una presión conocida, en una cámara de aire sellada, con el volumen conocido de aire en la muestra de concreto. Para la mezcla control se llevó a cabo este procedimiento y se obtuvo un 1.6 % de aire contenido en la mezcla en estado fresco. Para las mezclas de concreto celular se intentó llevar a cabo el mismo procedimiento, pero al introducir agua en la cámara de aire sellada, el agua penetraba en la mezcla de concreto celular rompiendo las micro celdas de aire y evitando que se pudiera medir la presión en la cámara. Por lo tanto, se asume que en estado fresco las mezclas de concreto celular poseen el contenido de aire de diseño según la cantidad de espuma introducida en la mezcla.

<b>Mezcla</b>	<b>Volumen de vacíos</b>
<b>Mezcla A</b>	68.65 %
<b>Mezcla B</b>	58.00 %
<b>Mezcla C</b>	37.30 %
<b>Mezcla D</b>	1.60 %

Cuadro 15: Volumen de vacíos en estado fresco  
Fuente: Elaboración propia

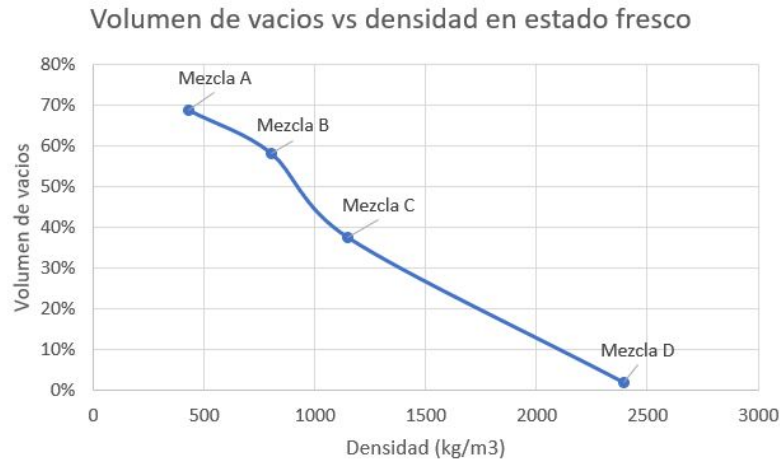


Figura 44: Densidad vs volumen de vacíos  
Fuente: Elaboración propia

## 8.2. Resultados en estado endurecido



Figura 45: Cilindros de las cuatro mezclas  
Fuente: Elaboración propia

### 8.2.1. Propiedades mecánicas

#### Resistencia a la compresión a 7 días

Se determinó la resistencia a la compresión del concreto a 7 y 28 días mediante la aplicación de carga axial de compresión a los cilindros moldeados, bajo los criterios de la norma COGUANOR NTG 41017h1 (ASTM C39) “Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.”. El concreto tiende a adquirir entre un 75 % y un 80 % de su resistencia de diseño 7 días después de ser mezclado. Generalmente, las mezclas que no llegan a este porcentaje de resistencia a esta edad temprana, difícilmente llegarán a su resistencia de diseño. Es por esto que el concreto usualmente se ensaya a 7 días

para verificar a una edad temprana si la mezcla cumplirá con el diseño, si necesitará algún tipo de refuerzo adicional o si no debe ser tomada en cuenta.

Se observa que las mezclas de concreto celular obtuvieron resistencias promedio muy bajas en comparación a la mezcla control que alcanzó 107 % de su resistencia de diseño a los 7 días. En particular, uno de los cilindros de concreto celular se fracturó al ser colocado en la compresora universal por lo que se aproxima su resistencia a la compresión a cero MPa. La baja resistencia se debe al alto volumen de vacíos en la mezcla que la vuelven porosa y altamente inestable en especial en mezclas con densidades inferiores a la del agua. La resistencia a la compresión experimental concluye que estas mezclas no deben ser utilizadas para fines estructurales sino más bien como tabiquería u otros usos no estructurales.

<b>Resistencia a la compresión a 7 días (MPa)</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Promedio 7 días</b>
<b>Mezcla A</b>	0.80	0.00	0.40
<b>Mezcla B</b>	1.70	1.60	1.65
<b>Mezcla C</b>	4.00	5.10	4.55
<b>Mezcla D</b>	22.20	22.20	22.20

Cuadro 16: Resistencia a la compresión a los 7 días  
Fuente: Elaboración propia

### **Resistencia a la compresión a 28 días**

A los 28 días se observa que la mezcla control alcanza una resistencia promedio de 5040 psi que representa un 57 % de crecimiento con respecto a los resultados obtenidos a 7 días. Generalmente, las mezclas tienden a alcanzar resistencias a la compresión superiores a las de diseño debido a que se diseñan con factores de seguridad por irregularidades en los materiales y en los procesos de elaboración. Las mezclas A, B y C presentaron crecimientos promedio de 88 %, 36 % y 7 % respectivamente. A pesar de su crecimiento, estas mezclas de concreto celular aún no pueden considerarse para usos estructurales. La mezcla A, incluso presento daños por manipulación por lo que no se puede recomendar su uso incluso en implementaciones no estructurales pues se pulveriza con facilidad.

<b>Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Promedio 28 días</b>
<b>Mezcla A</b>	0.80	0.70	0.75
<b>Mezcla B</b>	2.40	2.10	2.25
<b>Mezcla C</b>	4.80	4.90	4.85
<b>Mezcla D</b>	35.20	34.30	34.75

Cuadro 17: Resistencia a la compresión a los 28 días  
Fuente: Elaboración propia

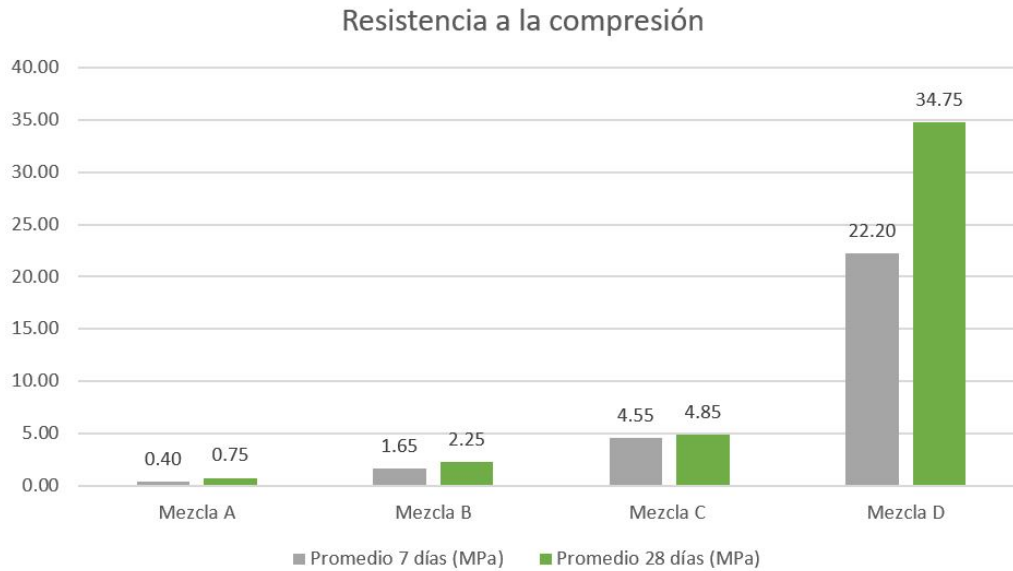


Figura 46: Resistencia a la compresión  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que la resistencia a la compresión incrementa exponencialmente conforme la densidad seca aumenta. Se evidencia que, a pesar de tener una menor relación agua cemento que la mezcla control, las mezclas de concreto celular presentan resistencias a la compresión notablemente inferiores al concreto convencional. Esto se debe al alto porcentaje de aire retenido en las mezclas de baja densidad que genera vacíos y porosidad. La porosidad no permite que los esfuerzos se transmitan uniformemente a través del material por lo que las esbeltas paredes de las celdas de aire se fracturan con facilidad.



Figura 47: Densidad vs resistencia a la compresión  
Fuente: Elaboración propia

## Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material es un indicador de su rigidez. La rigidez es la resistencia de un material a las deformaciones elásticas. En el concreto generalmente es directamente proporcional a la resistencia a la compresión de la mezcla. En este caso se observa un crecimiento exponencial en el módulo de elasticidad conforme la resistencia a la compresión de la mezcla aumenta. Esto significa que la mezcla control tiene mayor rigidez que las mezclas de concreto celular. Cabe mencionar que la rigidez de un material depende de su módulo de elasticidad y de su inercia. Sin embargo, para este ensayo todos los cilindros contaban con la misma geometría y por lo tanto su rigidez en este caso depende únicamente del módulo de elasticidad de cada mezcla.

	<b>Módulo de Elasticidad (MPa)</b>	<b>Relación de Poisson</b>
<b>Mezcla A</b>	1034	0.13
<b>Mezcla B</b>	1724	0.18
<b>Mezcla C</b>	4826	0.17
<b>Mezcla D</b>	39645	0.15

Cuadro 18: Módulo de elasticidad y relación de Poisson  
Fuente: Elaboración propia

La relación de Poisson indica la relación entre las deformaciones unitarias transversales y las deformaciones unitarias longitudinales. De esta manera, conforme aumentan las deformaciones unitarias transversales, aumenta la relación de Poisson. En contraste, conforme aumentan las deformaciones unitarias longitudinales, se reduce la relación de Poisson del material. En este caso se observa como dos de las mezclas de concreto celular alcanzaron relaciones de Poisson más altas que la mezcla control. Esto significa que obtuvieron deformaciones unitarias transversales mayores a las del concreto convencional. Esto se debe a la dureza de las mezclas. El concreto convencional posee una mayor dureza que el concreto celular y por lo tanto su falla siempre será frágil y súbita. Mientras tanto, el concreto celular puede deformarse más antes de alcanzar su punto de ruptura.

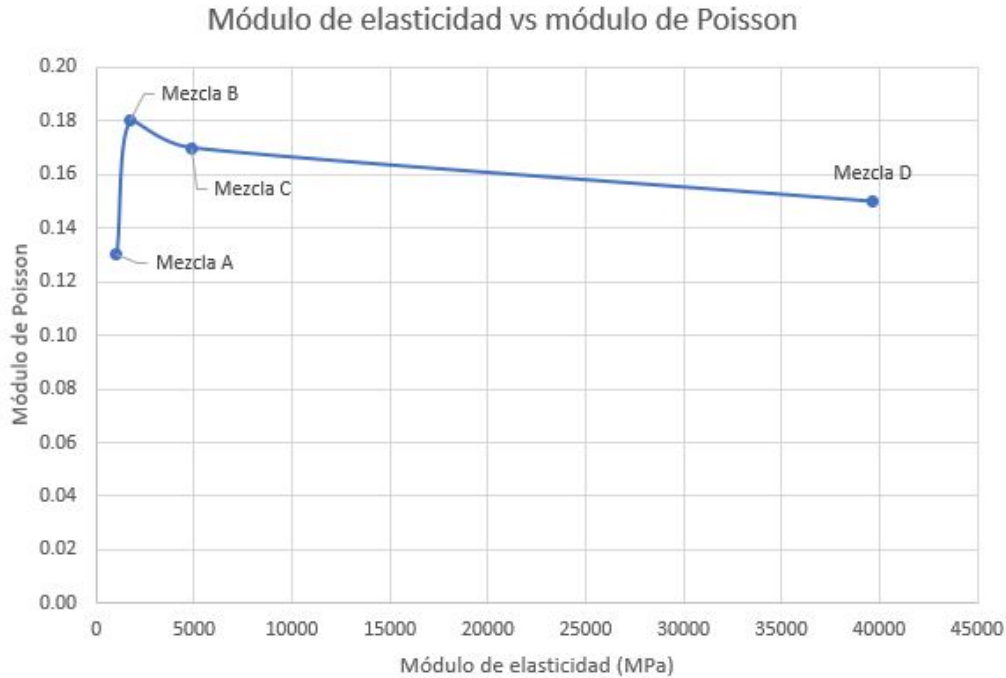


Figura 48: Densidad vs relación de Poisson  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla A registró los módulos de elasticidad y de Poisson más bajos de todas las mezclas. Se esperaba que esta mezcla tuviese la capacidad de resistir deformaciones elásticas más baja de todas las mezclas considerando que posee la menor resistencia a la compresión. Sin embargo, también fue la medición más baja de módulo de Poisson. Esto se debe a su alta fragilidad e inestabilidad causada por su extremadamente baja densidad. Al ser más frágil, posee menor capacidad de deformarse axialmente.

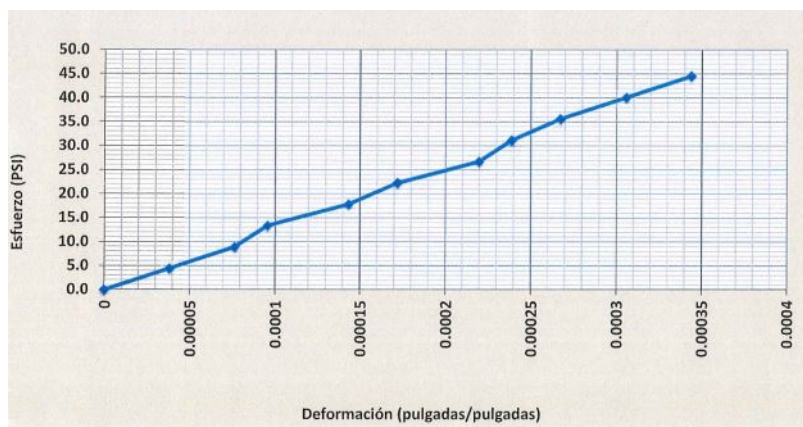


Figura 49: Presión vs deformación unitaria Mezcla A  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla B el segundo menor módulo de elasticidad debido a su baja resistencia a la compresión que es solo superior a la de la mezcla A. Sin embargo, esta mezcla registró

el módulo de Poisson más alto. Esto significa que fue la mezcla con mayor capacidad de deformarse axialmente lo cual indica una menor fragilidad y dureza.

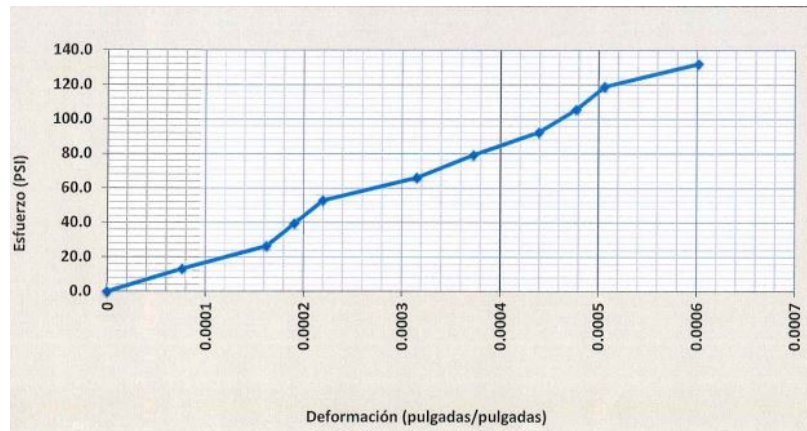


Figura 50: Presión vs deformación unitaria Mezcla B  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla C obtuvo el módulo de elasticidad más alto de las mezclas de concreto celular. Sin embargo, aún es mucho menor al registrado por la mezcla de concreto convencional. Esta mezcla presentó el segundo módulo de Poisson más alto por debajo de la mezcla B. Esto indica que esta mezcla posee mayor capacidad de deformarse axialmente que la mezcla de concreto celular lo cual se traduce en una menor fragilidad y dureza.

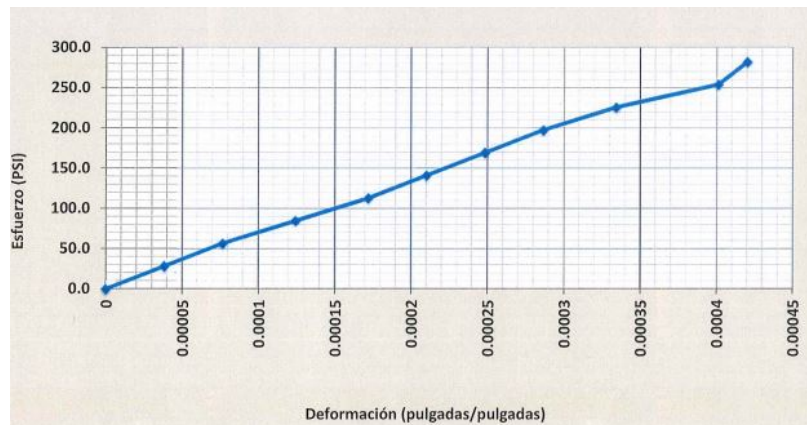


Figura 51: Presión vs deformación unitaria Mezcla C  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla D registró el módulo de elasticidad más alto de todas las mezclas. Esto significa que esta mezcla posee mayor capacidad de resistir las deformaciones elásticas que las mezclas de concreto celular. En contraste, esta mezcla posee menor capacidad de deformación axial de acuerdo con su módulo de Poisson. Esta mezcla posee la segunda mayor fragilidad que es solo superada por la de la mezcla A.

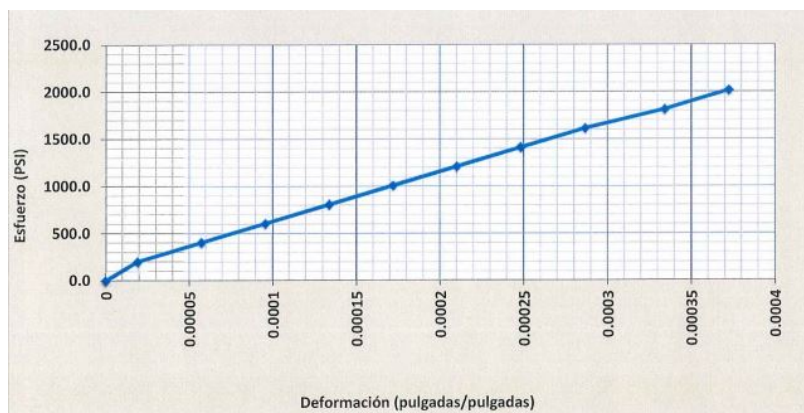


Figura 52: Presión vs deformación unitaria Mezcla D  
Fuente: Elaboración propia

## 8.2.2. Propiedades físicas

### Densidad

El concreto tiende a perder densidad luego de fraguar debido a la pérdida de humedad que compone parte de su masa en estado fresco por evaporación. Sin embargo, las mezclas de concreto celular muestran aumentos en su densidad en estado endurecido en relación con su densidad en estado fresco. Esto se debe a que, durante la reacción química del fraguado del concreto, se generan esfuerzos de expansión que tienden a romper celdas de aire contenidas en la mezcla por la inclusión de la espuma. Esta pérdida de vacíos genera un efecto de encogimiento que incrementa conforme la densidad disminuye y que puede ser de hasta el 0.4% en mezclas de  $400 \text{ kg/m}^3$ . Este encogimiento, se debe a la fragilidad de las celdas de aire microscópicas retenidas en la mezcla y puede aumentar debido a un mezclado excesivo de la mezcla de concreto celular.

Para medir el encogimiento en las mezclas se utilizaron los muros de 30 cm x 30 cm x 10 cm elaborados con el propósito de medir la conductividad térmica y acústica de las mezclas. Se midió que los muros elaborados con las mezclas de concreto celular redujeron su altura considerablemente. Con el volumen teórico conocido de  $0.09 \text{ m}^3$  de los muros, fue posible determinar el porcentaje de encogimiento para cada mezcla.

	Ancho	Altura	Espeor	Volumen	Encogimiento
<b>Mezcla A</b>	0.30 m	0.280 m	0.10 m	$0.0084 \text{ m}^3$	6.67 %
<b>Mezcla B</b>	0.30 m	0.292 m	0.10 m	$0.00876 \text{ m}^3$	2.67 %
<b>Mezcla C</b>	0.30 m	0.295 m	0.10 m	$0.00885 \text{ m}^3$	1.67 %
<b>Mezcla D</b>	0.30 m	0.300 m	0.10 m	$0.009 \text{ m}^3$	0.00 %

Cuadro 19: Encogimiento de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que la mezcla control fue la única que no registró variación en su volumen que fuera medible con los instrumentos utilizados. Por lo tanto, se aproxima a cero. Las mezclas

B y C mostraron variaciones volumétricas de 2.67 % y 1.67 % respectivamente. La mezcla A midió la mayor variación volumétrica que fue de casi 7 %. Estos resultados permiten asumir que hay una relación directamente proporcional entre el volumen de vacíos y el encogimiento de las mezclas. Esta relación se debe a las pérdidas de burbujas de aire que sufren las mezclas durante el proceso de fraguado. Esta pérdida de burbujas aumenta conforme al porcentaje de espuma en la mezcla aumenta. Estos porcentajes de encogimiento son mucho mayores a los esperados teóricamente para estas densidades y esto se debe a una exposición temprana al aire y a una débil estructura celular de la espuma.

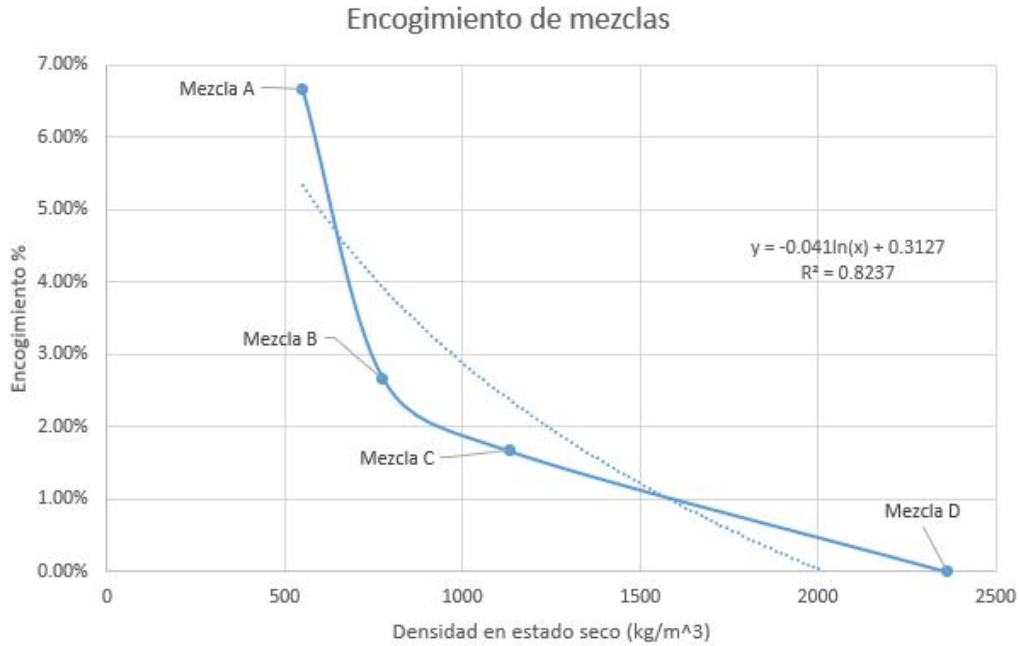


Figura 53: Encogimiento en mezclas  
Fuente: Elaboración propia

Para calcular estas densidades en estado seco, se calculó la masa promedio de los cuatro cilindros ensayados a compresión para cada mezcla. Posteriormente, se dividió dentro del volumen del cilindro conocido de  $0.0016m^3$  para cilindros de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura. Finalmente, se modificó este volumen según porcentaje de encogimiento propio de cada mezcla. Los resultados se muestran a continuación.

	C-1	C-2	C-3	C-4	Promedio	Encogimiento	Densidad seca
<b>A</b>	1.20 kg	0.84 kg	0.86 kg	N/A	0.97 kg	6.67%	548.74 kg/m <sup>3</sup>
<b>B</b>	1.45 kg	1.47 kg	1.18 kg	1.14 kg	1.31 kg	2.67%	775.51 kg/m <sup>3</sup>
<b>C</b>	1.92 kg	1.94 kg	1.85 kg	1.86 kg	1.89 kg	1.67%	1131.86 kg/m <sup>3</sup>
<b>D</b>	3.86 kg	3.85 kg	3.91 kg	3.91 kg	3.88 kg	0.00%	2361.38 kg/m <sup>3</sup>

Cuadro 20: Densidad seca de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla control registró una densidad seca inferior a la densidad húmeda puesto que el concreto convencional no pierde una gran cantidad de vacíos durante su fraguado, pero sí

pierde humedad por evaporación. En contraste, la mezcla A al ser la más inestable registró una densidad seca mucho mayor a su densidad húmeda por su gran pérdida de vacíos. Las mezclas B y C no presentaron variaciones significativas entre sus densidades secas y húmedas. Esto se debe a que su pérdida de vacíos durante el proceso de fraguado compensó la pérdida de humedad por evaporación. Es notable que, puesto que las mezclas A y B registraron densidades inferiores a la del agua pueden flotar al entrar en contacto con la misma. Sin embargo, debido a su alta permeabilidad luego de pocos segundos flotando, se saturaban de agua y se hundían.

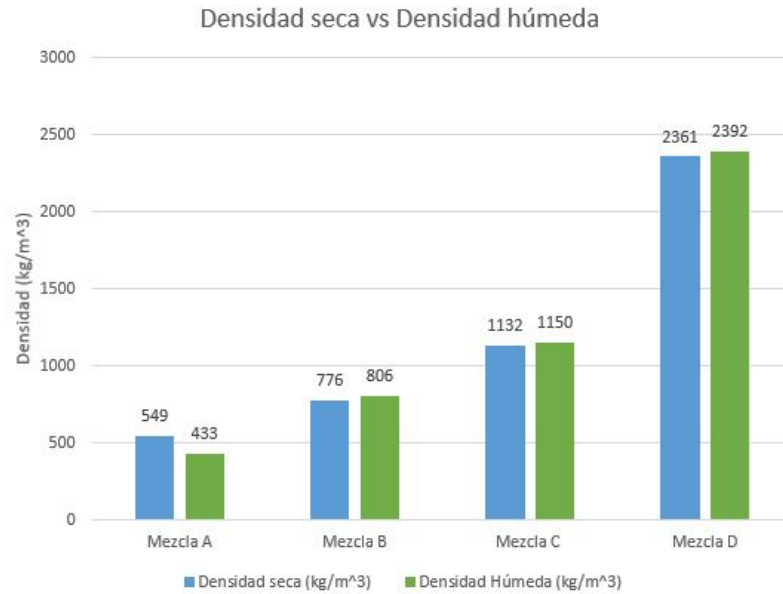


Figura 54: Densidad seca vs densidad húmeda  
Fuente: Elaboración propia

## Permeabilidad

Se intentó medir la permeabilidad utilizando los métodos de Torrent y presión hidrostática. Sin embargo, debido a la alta porosidad abierta de las mezclas de concreto celular, no fue posible medir su permeabilidad por ninguno de los dos métodos puesto que el agua atravesó las mezclas inmediatamente en la prueba de presión hidrostática y la porosidad no permitió la adherencia de la ventosa en el método de Torrent. Estos poros abiertos se generan debido a que durante el proceso de fraguado, el agua y la espuma al ser los componentes de menor densidad en la mezcla, tienden a subir y este movimiento genera grietas microscópicas que llegan hasta la superficie del concreto y permiten el ingreso de fluidos. Adicionalmente, el rompimiento de burbujas de la espuma preformada por el movimiento del mezclado y por el calor del fraguado genera vacíos interconectados que también permiten el paso libre de fluidos. Por lo tanto, se asume que las permeabilidades para las mezclas de concreto celular son cercanas al 100 %.



Figura 55: Agua penetrando cilindros en prueba de presión hidrostática  
Fuente: Elaboración propia

Al exponer las mezclas de A y B al agua, se observó que se hundían rápidamente a pesar de sus densidades relativas inferiores a uno. Esto refleja una alta capacidad de absorber agua y por lo tanto, a una alta permeabilidad. Esta alta permeabilidad permite concluir que el uso de estas mezclas debe ser exclusivo para interiores y no debe estar en contacto directo con humedad excesiva.

Mezcla	Resistividad eléctrica	Método de Torrent Factor KT	Método de presión hidrostática Penetración media
A	72,000 ohms·cm	N/A	N/A
B	13,000 ohms·cm	N/A	N/A
C	6,000 ohms·cm	N/A	N/A
D	13,000 ohms·cm	$0.017 \times 10e-16 \text{ m}^2$	11.44 mm

Cuadro 21: Medición de permeabilidad de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

Fue posible medir la resistividad eléctrica que se sabe que es inversamente proporcional a la permeabilidad y usualmente sirve como indicador de la misma. Las resistividades eléctricas muestran resultados contrarios a las expectativas generadas por su alta permeabilidad puesto que el concreto celular no registró en general resistividades eléctricas inferiores al concreto celular. Esto se debe a que las mezclas de concreto celular debido a una baja estabilidad de espuma sufrieron la pérdida de vacíos durante el proceso de fraguado que generó poros y grietas tan grandes que interrumpían las líneas de conductividad a través del medio sólido y por lo tanto, una alta resistividad eléctrica. Es especialmente notable que la mezcla más porosa registró la resistividad eléctrica más alta. Esto se debe a las grietas y fisuras adicionales que esta mezcla sufrió por manipulación y desencofrado debido a su alta fragilidad.

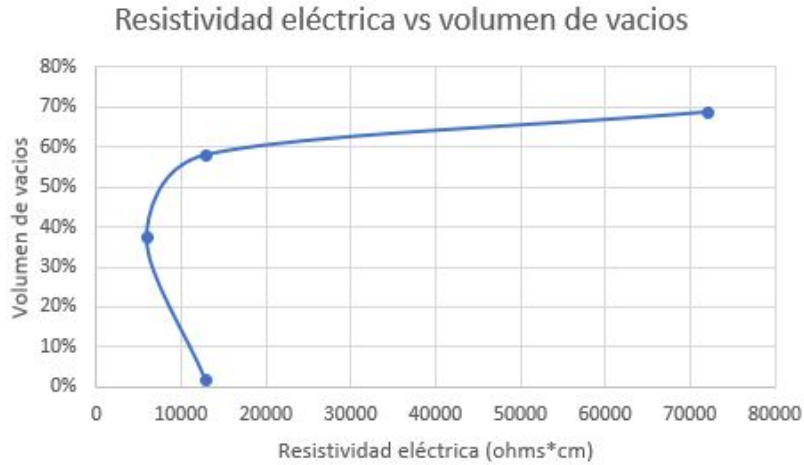


Figura 56: Resistividad vs volumen de vacíos  
Fuente: Elaboración propia

### Aislamiento térmico

A continuación, se muestran las gráficas de calorimetría obtenidas de los sensores de temperatura fundidos al centro de cada muro y separados entre sí a una distancia de 3.34 cm. La gráfica muestra como la mezcla que más elevó su temperatura cercana a la fuente de radiación fue la mezcla B. En contraste, la mezcla que menos elevó su temperatura cercana al emisor de calor fue la mezcla D. Sin embargo, la mezcla con temperatura más alta registrada en el sensor lejano a la bombilla fue la mezcla D. Mientras tanto la mezcla con la temperatura más baja en el lado alejado del emisor fue la mezcla A. Estos resultados indican que el concreto celular posee una mayor absorbanza que el concreto convencional pues absorbieron mayor energía de radiación que se refleja en las altas temperaturas en sus sensores cercanos a la bombilla. Por otro lado, el concreto celular demostró tener una menor capacidad de conducción puesto que todos los sensores de temperatura en el lado alejado de la bombilla en los muros de concreto celular registraron temperaturas más bajas que el termómetro en el lado alejado de la bombilla en el concreto convencional. Esto se traduce en que las mezclas de concreto celular son peores conductoras térmicas que la mezcla control.

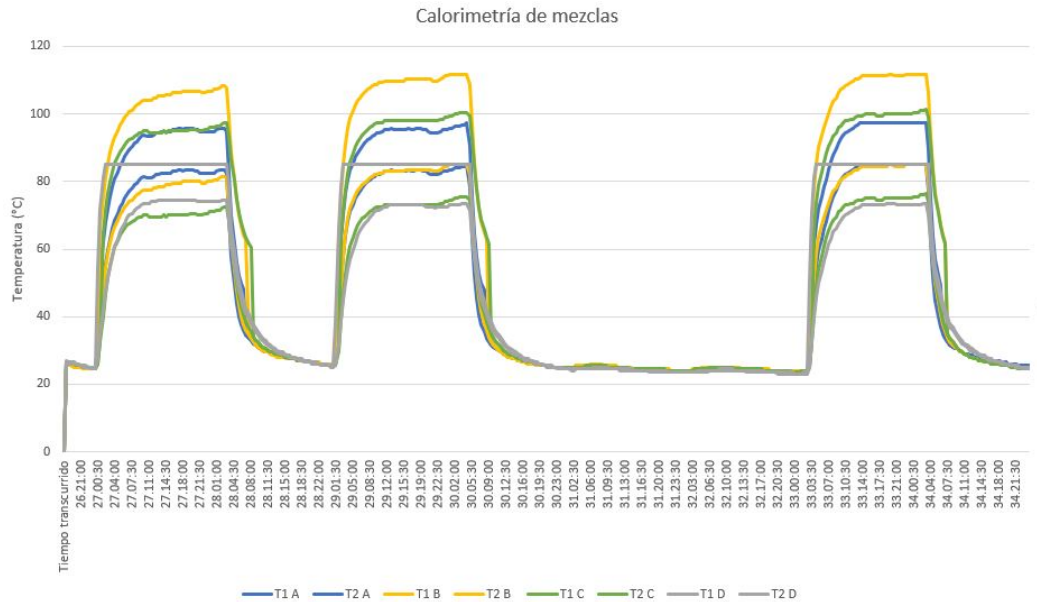


Figura 57: Calorimetría interna de muros  
Fuente: Elaboración propia

Para medir las temperaturas en las caras externas de los muros en cada corrida, se utilizó un termómetro infrarrojo. Posteriormente, se calculó el promedio de las mediciones. Al observar los datos se observa que coinciden con lo registrado por los sensores de temperatura fundidos dentro de los muros. Se registró que la mezcla que más elevó su temperatura en la cara en contacto con la fuente de radiación fue la mezcla B. La mezcla que menos elevó su temperatura en la cara en contacto con emisor de calor fue la mezcla D. La mezcla con temperatura más alta registrada en la cara lejana al emisor fue la mezcla D. Mientras tanto la mezcla con la temperatura más baja en la cara alejada de la bombilla fue la mezcla A. Estos resultados ratifican que el concreto celular es un mejor aislante térmico que el concreto convencional.

	Temperatura de cara en contacto con bombilla	Temperatura de cara opuesta al contacto con bombilla	Diferencial de temperatura
Mezcla A	209.3°C	47.0°C	162.3°C
Mezcla B	240.5°C	50.5°C	190.0°C
Mezcla C	192.4°C	59.4°C	133.0°C
Mezcla D	160.2°C	65.7°C	94.5°C

Cuadro 22: Temperatura en caras externas de muros  
Fuente: Elaboración propia

Para determinar los coeficientes de conductividad térmica de las mezclas, se utilizaron las temperaturas promedio en las caras externas debido a la alta incertidumbre en la posición exacta de los sensores de temperatura internos al momento de fundirlos dentro de los muros. Estas pequeñas variaciones de espesor de concreto pueden tener un gran impacto en los coeficientes de conductividad térmica pues dependen directamente del espesor del material

para ser calculados. Las caras externas de los muros garantizan un espesor de concreto de 10 cm.

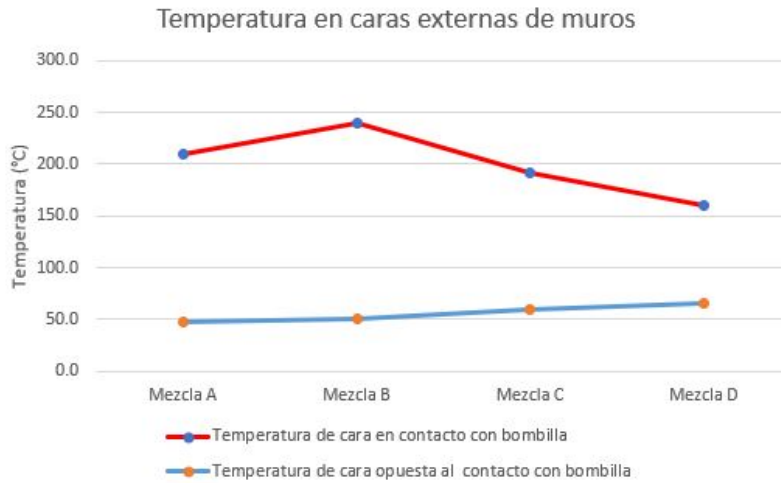


Figura 58: Temperatura en caras externas de muros  
Fuente: Elaboración propia

Para calcular el coeficiente de conductividad térmica de cada material, se fue necesario calcular, el área del muro en contacto con la radiación por lo tanto se midió el área de los muros elaborados en moldes de 30cm x 30cm para considerar sus dimensiones reales luego del encogimiento sufrido durante el proceso de fraguado. Luego se calculó el diferencial de temperatura que se obtuvo de restar la temperatura registrada en la cara opuesta al contacto con el emisor de radiación con la temperatura registrada en la cara en contacto con la bombilla de cada muro.

Para calcular los vatios de calor emitidos por la bombilla halógena, se procedió a modelar la bombilla como un cuerpo negro investigando la temperatura de operación de la bombilla, elevándola a la cuarta potencia y se multiplicándola por la constante de Boltzmann para obtener los vatios teóricos de Boltzmann.

Se utilizó la ley de Planck para integrar entre 0.39 y 0.78 micrómetros de longitud de onda del espectro de luz visible y obtener la distribución teórica espectral para el poder emisivo de la bombilla. Al dividir el poder emisivo de la bombilla dentro de sus vatios teóricos de Boltzmann, se obtuvo una eficiencia del 17%. Por último, se multiplicaron los 90 vatios teóricos de la bombilla por uno menos la eficiencia y se concluyó que esta bombilla emite 74.8 W de calor. Con este último dato, fue posible calcular el coeficiente de conductividad térmica de cada Mezcla como se muestra a continuación.

### Cálculo de radiación emitida por un cuerpo negro

$$Wb = 5.6697 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * (3273.15K)^4$$

$$Wb = 6.51 * 10^6 \frac{W}{m^2}$$

## Cálculo de emisividad teórica espectral de la bombilla en frecuencias de luz visible

Temperatura de operación de la bombilla:

$$T_b = 3273.15K$$

$$W = \left( 3.72 * 10^8 \frac{W * \mu m^2}{m^2} \right) * \int_{0.39}^{0.78} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{1.4389 * 10^4 \mu m * K}{\lambda * 3273.15K}} - 1} d\lambda$$

$$W = 1,099,646.21 \frac{W}{m^2}$$

## Cálculo de eficiencia de la bombilla

$$\eta = \frac{1.1 * 10^6 \frac{W}{m^2}}{6.51 * 10^6 \frac{W}{m^2}} = 0.169$$

## Cálculo de vatios de calor emitidos por la bombilla

$$Q = 90W * (1 - 0.169) = 74.79W$$

## Cálculo de coeficiente de conductividad térmica para Mezcla A

$$Q = 74.79W \quad A = 0.084m^3 \quad L = 0.10m \quad \Delta T = 162.3K$$

$$K = \left( \frac{74.79W}{0.084m^3} \right) \cdot \left( \frac{0.10m}{162.3K} \right) = 0.549 \frac{W}{m \cdot K}$$

Se observa que la mezcla A, a pesar de tener la cara opuesta al contacto con la bombilla más fría de las cuatro mezclas, no obtuvo el menor coeficiente de conductividad térmica. Esto se debe a que su diferencial de temperaturas fue inferior al de la mezcla B. Sin embargo, debido a su superior volumen de vacíos, se esperaba que esta mezcla fuese el mejor aislante térmico. Este resultado se debe a que la mezcla A por su baja densidad fue la que sufrió un mayor porcentaje de pérdida de micro celdas de aire durante el fraguado. Adicionalmente registró el mayor encogimiento característico de los concretos de baja densidad. Por último, la mezcla A sufrió ligeros daños en su geometría debido a su alta fragilidad que pudieron haber repercutido en los resultados.

### Cálculo de coeficiente de conductividad térmica para Mezcla B

$$Q = 74.79W \quad A = 0.089m^3 \quad L = 0.10m \quad \Delta T = 190K$$

$$K = \left( \frac{74.79W}{0.089m^3} \right) \cdot \left( \frac{0.10m}{190K} \right) = 0.445 \frac{W}{m \cdot K}$$

La mezcla B obtuvo el menor coeficiente de conductividad térmico y fue por lo tanto el mejor aislante térmico. Esto se debe a su alto volumen de vacíos sin llegar al extremo de ser inestable físicamente como la mezcla A. La mezcla B presentó las temperaturas más altas en la cara en contacto con el muro. Esto indica que esta mezcla era la que mayor absorbanza poseía. Por lo tanto, la mezcla B fue capaz de absorber la mayor cantidad de energía y consecuentemente fue la que menos calor transfirió.

### Cálculo de coeficiente de conductividad térmica para Mezcla C

$$Q = 74.79W \quad A = 0.088m^3 \quad L = 0.10m \quad \Delta T = 133K$$

$$K = \left( \frac{74.79W}{0.088m^3} \right) \cdot \left( \frac{0.10m}{133K} \right) = 0.642 \frac{W}{m \cdot K}$$

La mezcla C fue la mezcla de concreto celular con el coeficiente de conductividad térmica más alto. Esto se debe a que su volumen de vacíos era inferior al de las mezclas A y B y por este motivo, no poseía la cantidad de micro celdas de aire para contener el calor. Sin embargo, la mezcla C fue sustancialmente mejor aislante térmico que la mezcla de concreto convencional. La mezcla C claramente muestra una menor absorbanza y un porcentaje de energía reflejada más alto que se puede asumir debido a su temperatura más baja que el resto de mezclas de concreto celular en la cara en contacto con el emisor de radiación.

### Cálculo de coeficiente de conductividad térmica para Mezcla D

$$Q = 74.79W \quad A = 0.09m^3 \quad L = 0.10m \quad \Delta T = 94.5K$$

$$K = \left( \frac{74.79W}{0.09m^3} \right) \cdot \left( \frac{0.10m}{94.5K} \right) = 0.879 \frac{W}{m \cdot K}$$

La mezcla D que representa al concreto convencional, registró el mayor coeficiente de conductividad térmica. Esto significa que el concreto convencional es un peor aislante térmico que el concreto celular. En las mediciones, se observa que esta mezcla obtuvo los registros más bajos en su cara pegada a la bombilla lo que se traduce en un mayor porcentaje de

calor reflejado y no absorbido. Consecuentemente, esta mezcla registró las temperaturas más altas en la cara opuesta al contacto con el emisor. Esto permite concluir que debido a su bajo volumen de vacíos, el concreto convencional posee baja absorción y por lo tanto es un mejor conductor térmico.

	<b>Coefficiente de conductividad térmica "k"</b>
<b>Mezcla A</b>	0.55 W/(m*K)
<b>Mezcla B</b>	0.45 W/(m*K)
<b>Mezcla C</b>	0.64 W/(m*K)
<b>Mezcla D</b>	0.88 W/(m*K)

Cuadro 23: Coeficiente de conductividad térmica de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

Al comparar las densidades en estado seco con el coeficiente de conductividad térmica es posible concluir que la capacidad de transferencia de calor es inversamente proporcional al volumen de vacíos. Consecuentemente, la absorción es directamente proporcional al volumen de vacíos del concreto. En cuanto al porcentaje de la energía reflejada, se puede asumir que decrece conforme el volumen de vacíos aumenta. En conclusión, todas mezclas de concreto celular probaron ser mejores aislantes térmicos y tener una mayor absorción que el concreto convencional. Los coeficientes de conductividad térmica obtenidos en las mezclas de concreto celular son más altos de lo que se esperaba teóricamente. Esto se debe a que, en los cálculos, se despreciaron las pérdidas de calor en el aire y se asumió que todo el poder emisor de la bombilla llegaba a los muros.

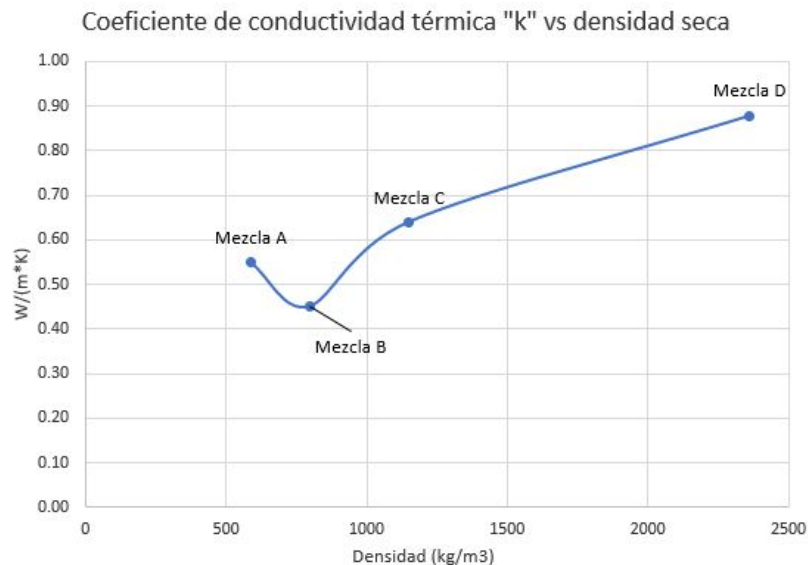


Figura 59: Coeficiente de conductividad térmica vs densidad  
Fuente: Elaboración propia

## Aislamiento acústico

Con el objetivo de determinar el nivel de aislamiento acústico se sometieron todas las mezclas a ruido rosa para comprender su aislamiento acústico en las frecuencias audibles por el ser humano. Para esto, se elaboró una caja acústica con una abertura en una cara de 30 cm x 30 cm para que se pudiese colocar el muro de cada mezcla en esta abertura. Esto permitió aislar un micrófono de manera que el sonido solo pudiese ingresar a la caja a través de los muros. La caja fue elaborada por dos capas de pulgada y media de madera de Palo Blanco intercaladas con dos capas de una pulgada de duroport. En el interior de la caja se colocaron adicionalmente placas de cartón de huevo para reducir los efectos de resonancia y reverberación. Se seleccionó madera de Palo Blanco debido a que su alta densidad ofrece mejores propiedades de aislamiento acústico.

En primer lugar, se expuso el micrófono a ruido rosa dentro de la caja sin ningún muro de manera que se pudiese conocer la intensidad con la que las ondas eran percibidas por el micrófono sin aislamiento alguno. Posteriormente, se colocó cada uno de los muros y se expusieron a ruido rosa. Los registros del micrófono para cada muro se muestran a continuación en comparación con los valores sin muro. Se debe considerar que la escala de frecuencia es logarítmica debido a que cada octava comprende el doble de frecuencia que su octava inmediata inferior.

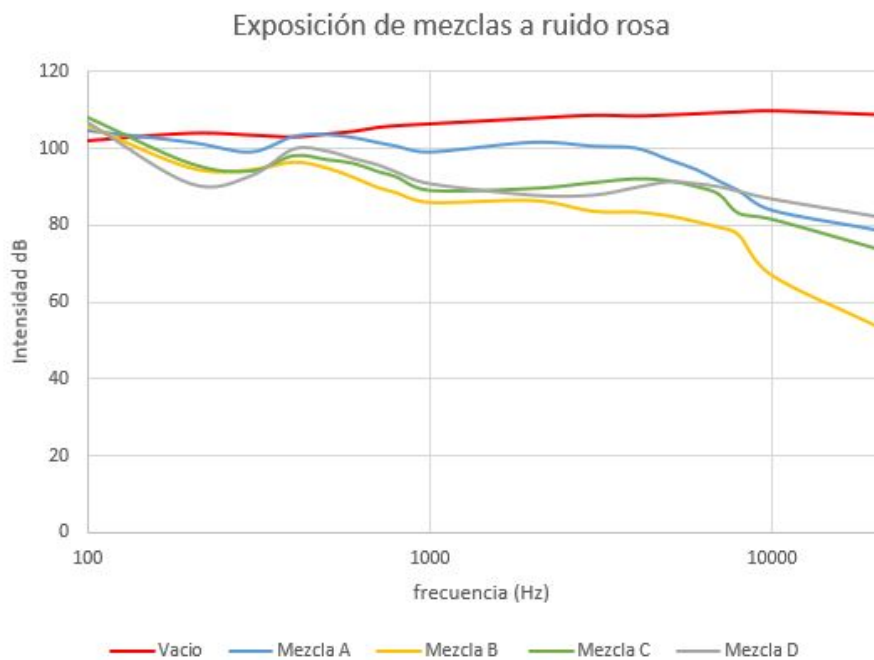


Figura 60: Exposición de mezclas a ruido rosa  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que a 100 Hz la resonancia dentro de la caja es tan alta que incluso se registran intensidades más altas con muros que en la medición sin muro. Esto se debe a que las frecuencias muy bajas inferiores a 100Hz son casi imposibles de aislar por el concreto y, por lo tanto, su efecto de resonancia tiene un mayor impacto en la medición que la reducción debida al muro, lo que resulta en un aislamiento negativo y en datos poco fiables. Es por

este motivo que se consideran en el estudio frecuencias inferiores a los 100Hz. Si la reducción es negativa, se asume igual a cero y no se considera en el cálculo del índice de reducción acústica ponderado. Se observa cómo a partir de los 100 Hz la resonancia disminuye y el aislamiento acústico incrementa en todas las mezclas.

<b>Reducción acústica por frecuencia (dB)</b>				
<b>f (Hz)</b>	<b>Mezcla A</b>	<b>Mezcla B</b>	<b>Mezcla C</b>	<b>Mezcla D</b>
<b>100</b>	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>200</b>	2.50	9.00	8.00	13.00
<b>300</b>	4.50	9.00	9.50	10.50
<b>400</b>	0.00	6.50	5.00	3.00
<b>500</b>	0.30	8.80	6.80	4.30
<b>600</b>	1.80	12.00	8.50	7.00
<b>700</b>	4.00	15.50	11.50	9.50
<b>800</b>	5.50	17.50	13.50	12.00
<b>1000</b>	7.50	20.50	17.50	15.50
<b>2000</b>	6.50	21.50	18.50	20.00
<b>3000</b>	8.30	25.10	17.80	20.80
<b>4000</b>	8.60	25.10	16.60	18.60
<b>5000</b>	11.90	26.40	17.40	17.40
<b>6000</b>	14.70	28.20	19.20	18.20
<b>7000</b>	18.00	30.00	21.50	19.30
<b>8000</b>	20.70	32.20	26.70	20.70
<b>10000</b>	26.00	34.50	28.50	23.00
<b>20000</b>	30.00	36.50	31.00	26.50
<b>índice de reducción acústica ponderado</b>	<b>10.68</b>	<b>21.08</b>	<b>16.32</b>	<b>15.25</b>

Cuadro 24: índice de reducción acústica ponderado  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que la mezcla A no registró un aislamiento sustancial en frecuencias bajas. Sin embargo, su aislamiento acústico mejoró drásticamente en frecuencias altas. Esta mezcla obtuvo un índice de reducción acústica ponderado de 10.68 dB que es la más baja de todos los muros ensayados. Esto contrasta con lo esperado que, a mayor volumen de vacíos, mejor aislamiento acústico. Sin embargo, se debe considerar que esta mezcla fue la que sufrió la mayor pérdida de burbujas de aire durante el proceso del fraguado y el mayor encogimiento .

Esta mezcla presentó la mayor fragilidad al ser manipulada por lo que su integridad física fue comprometida y en el momento del ensayo sus dimensiones eran de 28 cm x 28 cm. Esto generó una abertura entre la caja y el muro por donde se filtraba el sonido. Por lo tanto, se considera que esta prueba no aplica para la mezcla A y los resultados acústicos de esta mezcla se incluyen como referencia, pero no son concluyentes en este estudio. Esta filtración genera sesgo en los resultados y muestra la inestabilidad de la muestra que, además, la hace poco útil para uso en edificaciones, debido a su baja densidad. La mezcla A, fue especialmente ineficiente en la reducción de la intensidad del ruido en frecuencias inferiores a 1000Hz, pero mejoró considerablemente su aislamiento en frecuencias altas.

## Reducción acústica de mezcla A

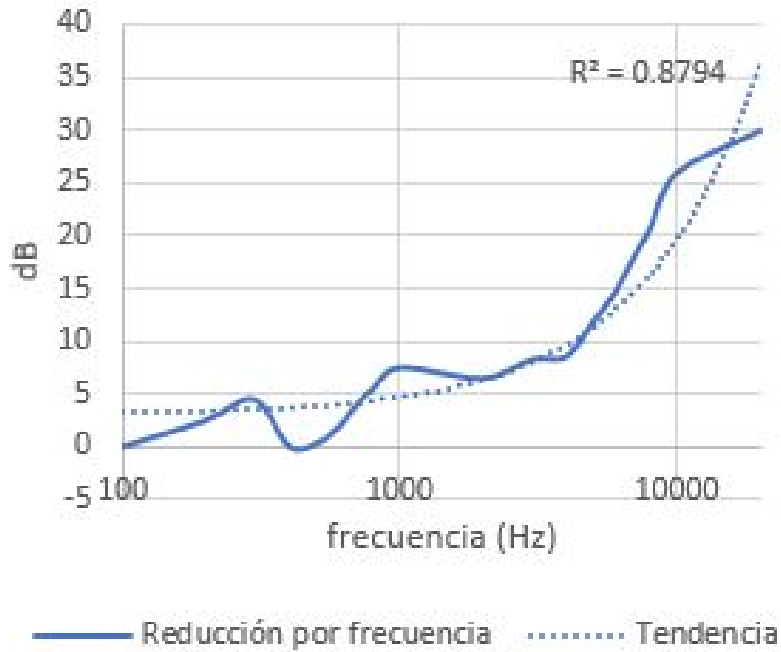


Figura 61: Aislamiento acústico de Mezcla A  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla B obtuvo el mejor índice de reducción acústica ponderado reduciendo la intensidad del sonido en 21.08 dB. En la gráfica se observa una reducción sustancial en la intensidad del sonido tanto en frecuencias altas como en frecuencias bajas. La mezcla B probó ser el mejor aislante acústico tanto por encima, como por debajo de los 1000Hz debido a que posee un elevado volumen de vacíos sin llegar al extremo en que se comprometa su geometría por encogimiento y deterioro por manipulación como en el caso de la mezcla A. En frecuencias inferiores a 500 Hz, la mezcla B fue la segunda mejor aislante detrás el concreto convencional.

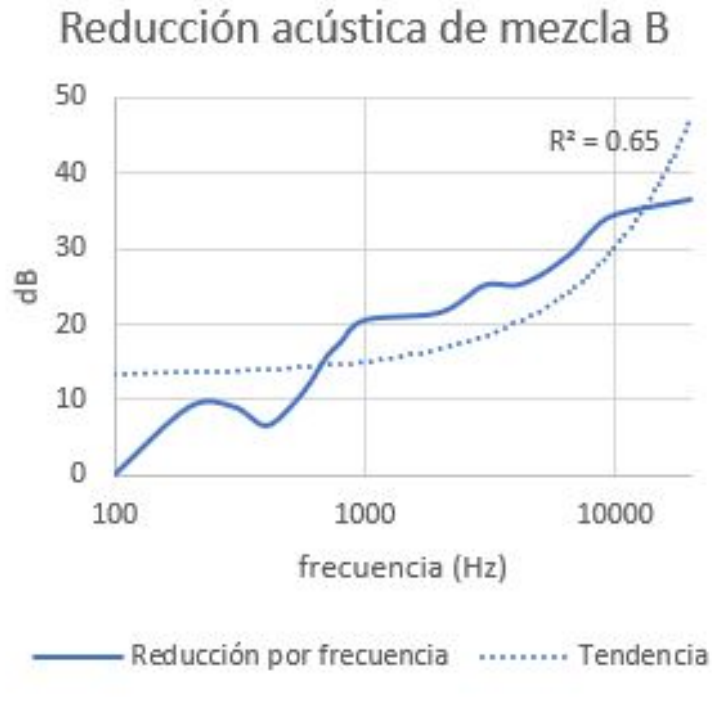


Figura 62: Aislamiento acústico de Mezcla B  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla C muestra una reducción importante en frecuencias altas y bajas con un índice de reducción acústica ponderado de 16.32 dB. La mezcla C fue la segunda más efectiva en la reducción de la intensidad del ruido, tanto en frecuencias altas como en frecuencias bajas. La mezcla C tuvo un desempeño superior a la mezcla A a pesar de tener menor volumen de vacíos gracias a que no sufrió encogimiento sustancial ni daños por manipulación. Debido al inferior contenido de aire, la mezcla C no logró ser tan buen aislante acústico como la mezcla B en especial en frecuencias superiores a 1000Hz.

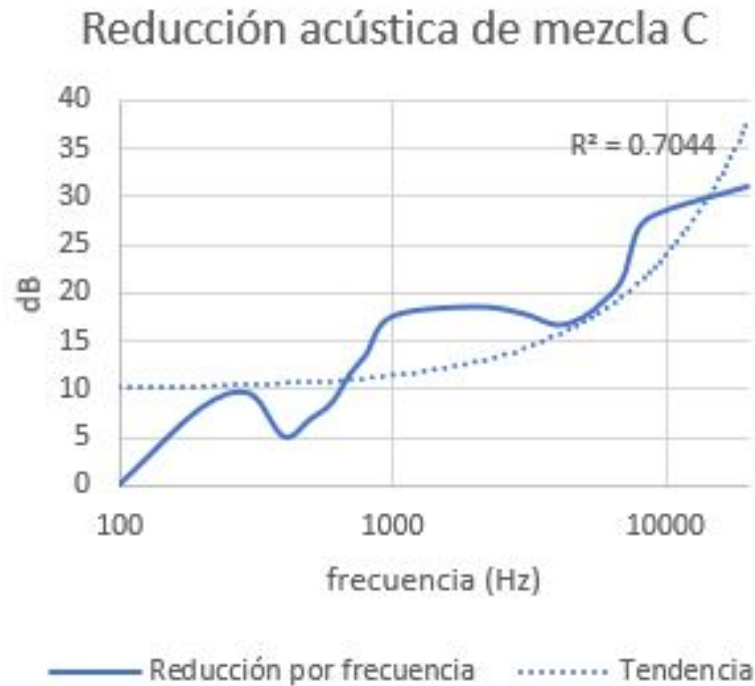


Figura 63: Aislamiento acústico de Mezcla C  
Fuente: Elaboración propia

La mezcla D representa al concreto convencional. Debido a su alta densidad, el concreto convencional fue el más efectivo en reducir la intensidad del ruido en frecuencias inferiores a 500Hz. Sin embargo, no proporcionó una reducción sustancial de intensidad de ruido en frecuencias superiores a esta frecuencia. Esto se debe al bajo contenido de aire contenido en la mezcla. Este tipo de resultados indican que el concreto convencional no es capaz de aislar acústicamente una habitación y necesita materiales complementarios para compensar esta carencia, en especial en frecuencias altas.

## Reducción acústica de mezcla D

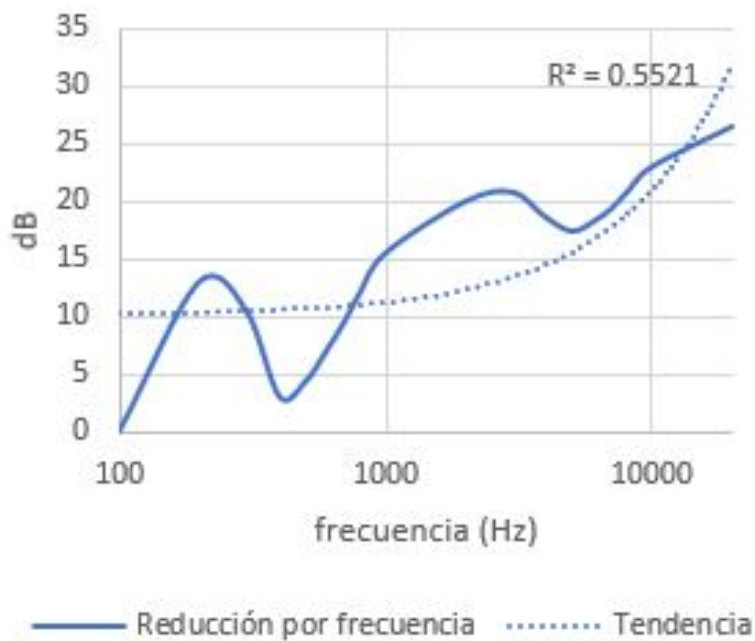


Figura 64: Aislamiento acústico de Mezcla D  
Fuente: Elaboración propia

Al observar globalmente las cuatro mezclas en comparación con la corrida sin muro se observa gráficamente el desempeño de aislamiento acústico de cada mezcla. Se puede observar como el peor aislante fue la mezcla A y como el mejor aislante fue la mezcla B. Adicionalmente se puede observar cómo en frecuencias inferiores a 1000Hz, la mezcla control fue la que obtuvo el mejor desempeño. Mientras que, en frecuencias altas, claramente la mezcla B fue la más efectiva en la reducción de la intensidad del ruido.

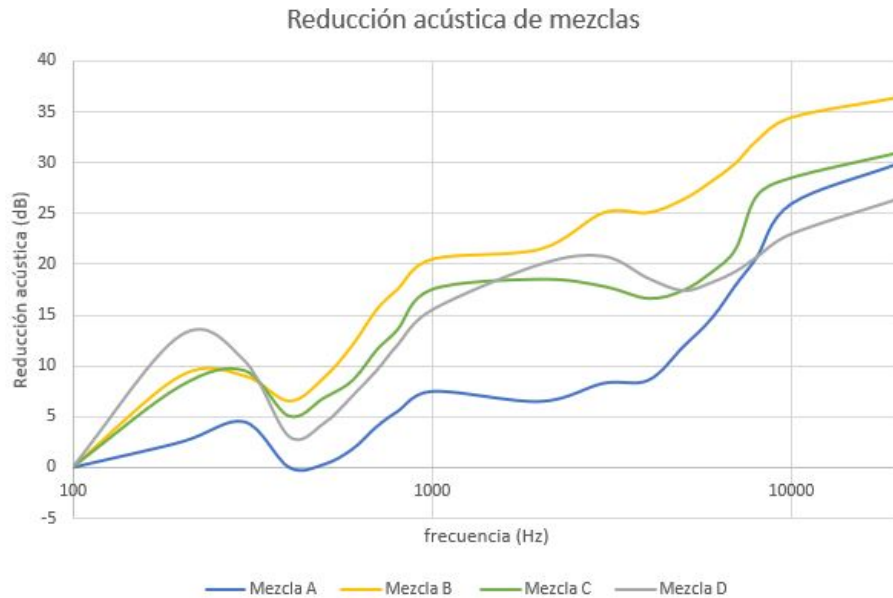


Figura 65: Reducción acústica de cada mezcla por frecuencia  
Fuente: Elaboración propia

Se puede obtener un índice de reducción ponderado para frecuencias inferiores a 1000Hz y otro para frecuencias de entre 1000Hz y 20000Hz. Con esta información se puede comprender de una forma más clara el desempeño acústico de las mezclas. Es importante notar que la escala es logarítmica debido a que cada octava superior representa el doble de frecuencia que su octava inmediatamente anterior. Se puede observar cómo en términos generales es mucho más fácil reducir la intensidad de las ondas de superiores a 1000Hz que la de las ondas de frecuencias inferiores a esta frecuencia.

Índice de reducción acústica ponderado			
	100-1000 Hz	1000-20000 Hz	Total
Mezcla A	3.73 dB	16.08 dB	10.68 dB
Mezcla B	12.35 dB	28.83 dB	21.08 dB
Mezcla C	10.04 dB	21.91 dB	16.32 dB
Mezcla D	9.35 dB	20.50 dB	15.25 dB

Cuadro 25: Índice de reducción acústica diferenciado  
Fuente: Elaboración propia

Al observar los índices para frecuencias superiores e inferiores a los 1000Hz se puede concluir que el concreto celular es más efectivo en la reducción de la intensidad del ruido en frecuencias altas que en frecuencias bajas. En contraste, el concreto convencional presentó un mejor rendimiento en frecuencias bajas que en frecuencias altas. Los resultados indican que hay una relación directamente proporcional entre la densidad de un material y su capacidad de aislar acústicamente en frecuencias bajas. Asimismo, los resultados reflejan una relación directamente proporcional entre el volumen de vacíos y el aislamiento acústico de los materiales en frecuencias superiores a los 1000Hz.

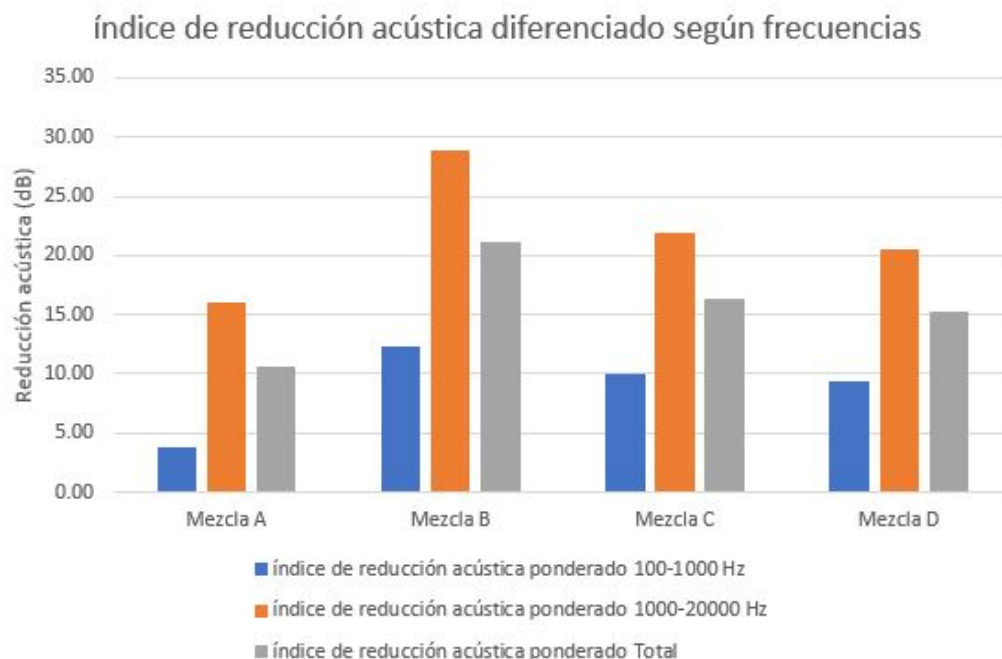


Figura 66: Índice de reducción acústica ponderado  
Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria al índice de reducción acústica ponderado, se seleccionó la medición más alta registrada en cada una de exposiciones del micrófono a ruido rosa con y sin los muros actuando como aislantes acústicos. Para este análisis no se consideraron frecuencias de 100 Hz o inferiores debido a los altos niveles resonancia en estas frecuencias. Los datos a continuación muestran como las mezclas B y C registraron mediciones pico menores a la registrada en el concreto convencional. Esto se debe a que las frecuencias que llegaron con mayor intensidad al micrófono durante la exposición a ruido rosa generalmente son frecuencias altas en las cuales como se observó anteriormente, el concreto celular tiende a tener un mejor desempeño como aislante acústico. La mezcla A registró la medición pico más alta debido a su geometría reducida que permitió el paso libre del sonido.

	<b>Registro pico</b>
<b>Vacío</b>	110.0 dB
<b>Mezcla A</b>	103.5 dB
<b>Mezcla B</b>	96.5 dB
<b>Mezcla C</b>	98.0 dB
<b>Mezcla D</b>	100.0 dB

Cuadro 26: Registros pico en mezclas  
Fuente: Elaboración propia

En la reducción de medición pico, la mezcla B registró el menor dato reduciendo en 13.5 dB la intensidad más alta registrada sin muro durante exposición a ruido rosa. La mezcla A fue la menos efectiva en reducción de registro pico, reduciendo solo en 6.5 dB el registro máximo sin muro aislante. Las mezclas C y D redujeron el registro pico en 12 dB y 10 dB

respectivamente. La reducción del registro pico es un indicador del nivel de desempeño como aislante acústico que posee un material.

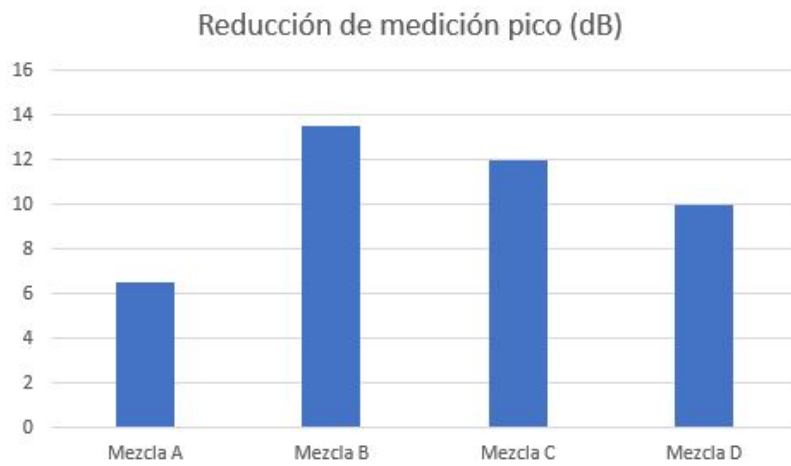


Figura 67: Registros pico en mezclas  
Fuente: Elaboración propia

## Análisis de costos

Con el propósito de determinar el costo unitario de cada mezcla, se cotizó el costo del cemento, arena, pedrín de 3/8'', pedrín de 1'' y los aditivos fluidificante y espumante. Se desprecia el costo del agua en todas las mezclas. Se determinaron los costos promedio de las presentaciones más comunes de estos materiales en ferreterías de Guatemala. La tabla a continuación muestra los precios de venta obtenidos para los materiales que componen las mezclas:

Material	Precio de venta
Cemento (saco de 42.5 kg)	Q 77.00
Agregado grueso 1'' ( $1m^3$ )	Q 190.00
Agregado grueso 3/8'' ( $1m^3$ )	Q 205.00
Agregado fino ( $1m^3$ )	Q 100.00
Polyheed 789 (Galón)	Q 9.25
Aditivo espumante (L)	Q 35.00

Cuadro 27: Costos de materiales  
Fuente: Elaboración propia

Los agregados en Guatemala generalmente se venden por metro cúbico, por lo que fue necesario conocer sus densidades para determinar sus costos por kilogramo. Para determinar el costo unitario de la espuma, fue necesario determinar la cantidad de aditivo espumante contenido en un litro de espuma. Para esto fue necesario realizar un aforo en el que se determinó que dos litros de espuma y 40 litros de agua producen 832.8 litros de espuma por lo que es posible afirmar que el aditivo espumante representa únicamente el 0.24 % de la composición de la espuma y es el único de los componentes de la espuma con un valor considerable. Finalmente, se obtuvo la siguiente tabla con los costos unitarios de cada mezcla.



Figura 68: Aforo de espuma  
Fuente: Elaboración propia

Para calcular los costos por unidad de volumen de cada mezcla, se multiplicó la cantidad de cada insumo utilizado en la bachada de 55 litros por su costo unitario para cada mezcla. Esta suma se dividió por uno menos el porcentaje de encogimiento propio de cada mezcla para compensar las pérdidas volumétricas por encogimiento. Finalmente, se dividió cada costo de bachada dentro de 0.055 para obtener el costo de un metro cúbico de cada mezcla.

Costo de mezclas					
Material	Costo Unitario	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D
Cemento (kg)	Q 1.81	Q 42.85	Q 56.80	Q 85.70	Q 23.46
Agregado grueso 1'' (kg)	Q 0.07	Q -	Q -	Q -	Q 2.46
Agregado grueso 3/8'' (kg)	Q 0.08	Q -	Q -	Q -	Q 1.41
Agregado fino (kg)	Q 0.04	Q -	Q -	Q -	Q 2.15
Polyheed 789 (L)	Q 9.36	Q 0.77	Q 1.03	Q 1.55	Q 0.58
Espuma (L)	Q 0.08	Q 3.20	Q 2.56	Q 1.60	Q -
Costo bache 55 L		Q 46.82	Q 60.39	Q 88.85	Q 30.05
Costo por m <sup>3</sup>		Q 851.33	Q 1,097.92	Q 1,615.39	Q 546.43

Cuadro 28: Costos de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

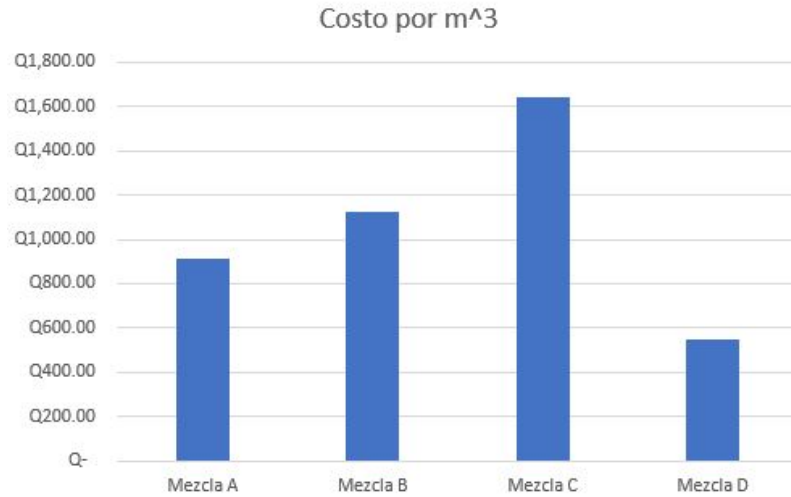


Figura 69: Costo unitario de mezclas  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que las mezclas A, B y C son aproximadamente 50 %, 100 % y 200 % más costosas por unidad de volumen respectivamente, que la mezcla control D. Estos elevados costos se deben a las elevadas cantidades de cemento incluidas en las mezclas de concreto celular que incrementan conforme la densidad de diseño aumenta. Esto se debe a la ausencia de agregados en las mezclas, lo que obliga al uso del cemento como única manera de aumentar la densidad de diseño.

	Coefficiente de conductividad térmica "k"	Costo por m <sup>3</sup>
Mezcla B	0.45	Q 1,097.92
Mezcla A	0.55	Q 851.33
Mezcla C	0.64	Q 1,615.39
Mezcla D	0.88	Q 546.43

Cuadro 29: Costo unitario de mezclas vs coeficiente de conductividad térmica  
Fuente: Elaboración propia



Figura 70: Costo unitario de mezclas vs coeficiente de conductividad térmica  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que todas las mezclas de concreto celular registraron coeficientes de conductividad térmica inferiores al concreto convencional hasta en un 50 %. Este aumento en la capacidad de absorber calor se debe a las millones de micro celdas de aire que componen la estructura del concreto celular y convierte a estas mezclas en mejores aislantes térmicos que el concreto de densidad normal. Esta reducción sustancial de energía transmitida debe considerarse como un beneficio sustancial que debe ser considerado como una ventaja en un análisis de costo-beneficio para estas mezclas.

	índice de reducción acústica ponderado	Costo por m <sup>3</sup>
Mezcla A	10.68 dB	Q 851.33
Mezcla D	15.25 dB	Q 546.43
Mezcla C	16.32 dB	Q 1,615.39
Mezcla B	21.08 dB	Q 1,097.92

Cuadro 30: Costo unitario de mezclas vs índice de reducción acústica ponderado  
Fuente: Elaboración propia

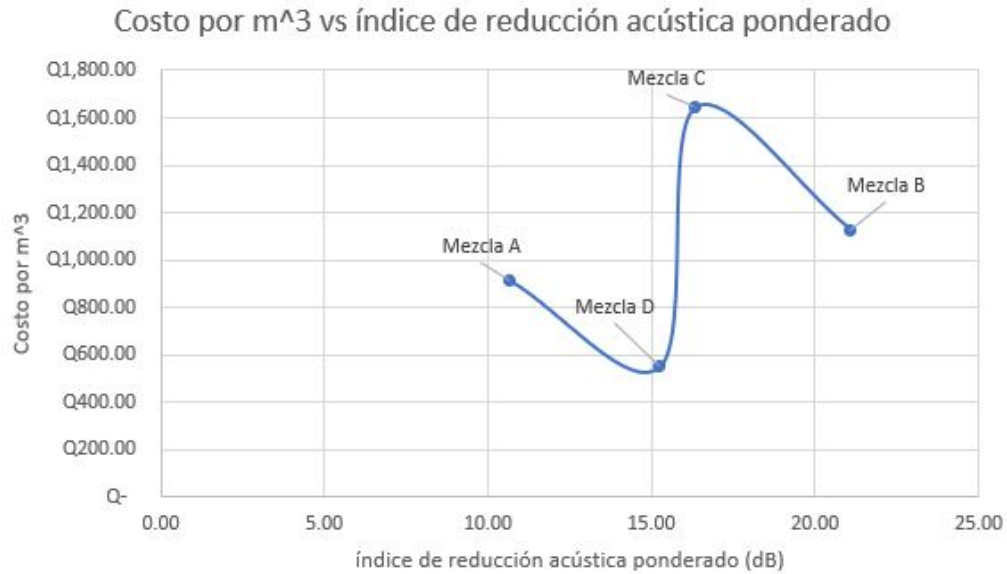


Figura 71: Costo unitario de mezclas vs índice de reducción acústica ponderado  
Fuente: Elaboración propia

Se observa que dos de las tres mezclas de concreto celular registraron índices de reducción acústica ponderados considerablemente superiores a los del concreto de densidad convencional. La mezcla A solo se coloca como referencia, pero sus resultados no son confiables pues su geometría no aplica para esta prueba. Por lo que se puede asumir que estas mezclas de concreto celular en general presentaron un mejor comportamiento como aislantes acústicos lo cual debe considerarse como un beneficio sustancial que debe ser considerado como una ventaja en un análisis de costo-beneficio para estas mezclas.

Considerando que las ventajas que proporciona el concreto celular están relacionadas con la comodidad de la estructura y no con su desempeño estructural, es posible que su uso con estos altos costos sea muy limitado. Sin embargo, los beneficios físicos del concreto celular son evidentes y al incluir agregados de baja densidad como granza, perlita o piedra pómez en la mezcla, su costo unitario disminuirá y será más factible que sea utilizado en la industria de la construcción.



---

### Discusión de resultados

---

Los resultados de pruebas elaboradas a las mezclas en este estudio aplican para concretos celulares sin agregados elaborados con espuma preformada para densidades de entre  $400\text{kg}/m^3$  y  $1200\text{kg}/m^3$ . Los resultados no aplican para otras densidades de concreto celular, concretos celulares elaborados con agregados o concretos celulares elaborados con otros métodos distintos a la espuma preformada.

La mezcla A incrementó considerablemente su densidad en estado seco debido a pérdidas de micro celdas de aire durante el proceso de fraguado que generó encogimiento y una gran cantidad de poros abiertos. El resto de las mezclas mantuvieron densidades secas cercanas a sus densidades húmedas. Esta mezcla presentó alta fragilidad y sufrió daños físicos durante el desencofrado y la manipulación. Debido a que su integridad física se vio comprometida, los resultados en estado endurecido de la mezcla A se toman como referencia, pero no son concluyentes en esta investigación. Los resultados de las pruebas se resumen a continuación en el Cuadro 31.

<b>Propiedades mecánicas y físicas de las mezclas</b>				
<b>Mezcla</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Densidad en estado fresco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	433.00	806.00	1150.00	2392.00
Densidad en estado seco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	548.74	775.51	1131.86	2361.38
Encogimiento (%)	6.67	2.67	1.67	0.00
Volumen de vacíos (%)	68.65	58.00	37.30	1.60
Temperatura ( $^{\circ}$ Celsius)	24.50	27.00	32.50	23.60
Asentamiento (mm)	N/A	N/A	N/A	158.75
Diámetro de flujo (mm)	1651.00	1524.00	1498.60	N/A
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	0.75	2.25	4.85	34.75
Módulo de elasticidad (MPa)	1034.00	1724.00	4826.00	39645.00
Módulo de Poisson	0.13	0.18	0.17	0.15
Penetración hidrostática media (mm)	N/A	N/A	N/A	11.44
Factor Kt ( $\text{m}^2$ )	N/A	N/A	N/A	0.0017*10e-8
Resistividad eléctrica ( $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ )	72000.00	13000.00	6000.00	13000.00
Coefficiente de conductividad térmica "k" ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )	0.55	0.45	0.64	0.88
Índice de reducción acústica ponderado (dB)	10.68	21.08	16.32	15.25
Costo unitario ( $\text{Q}/\text{m}^3$ )	912.14	1128.00	1642.00	549.45

Cuadro 31: Propiedades mecánicas y físicas de las mezclas  
Fuente: Elaboración propia

## 10.1. Propiedades en estado fresco

Se observó al medir la temperatura en estado fresco que las mezclas de concreto celular registraron temperaturas más altas. Esto se debe a que estas mezclas poseen una mayor proporción de cemento. El cemento se mezcla con el agua a través de una reacción química exotérmica que es la que genera el calor de fraguado. Por lo tanto, la temperatura en estado fresco es directamente proporcional a la cantidad de cemento en la mezcla.

De acuerdo al asentamiento registrado, se clasificó a las mezclas de concreto celular en la categoría SF3 de concretos autocompactables según la norma europea UNE-EN 206. Esto significa que no necesitan ser vibrados al momento de su colocación in situ. La mezcla control se clasificó en la categoría S4 según la norma misma norma por lo que, se considera un concreto fluido, pero no autocompactable.

## 10.2. Propiedades mecánicas

Se determinó que estas mezclas de concreto celular no poseen la capacidad mecánica de ser utilizadas en elementos estructurales debido a su baja resistencia a la compresión. Todas las mezclas de concreto celular registraron resistencias por debajo de los 5 MPa a

28 días por lo que solo se puede recomendar su uso en tabiquería, o como capa aislante acústico y térmico entre losas de edificaciones. La mezcla A presentó una resistencia a la compresión tan baja que sufre daños al ser manipulada y por lo tanto no se recomienda su uso en implementaciones estructurales o no estructurales. La mezcla D alcanzó la resistencia de diseño de 22 MPa en 7 días y a los 28 días una resistencia a la compresión cercana 35 MPa.

El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material y es proporcional a su resistencia a la compresión. Los resultados indican que estas mezclas de concreto celular poseen menor capacidad de resistir las deformaciones elásticas que la mezcla de concreto convencional debido a su inferior resistencia a la compresión. El módulo de Poisson refleja que en términos generales, estas mezclas de concreto celular tienden a deformarse más axialmente que las mezclas de concreto convencional a ser sometidas a cargas de compresión.

### 10.3. Propiedades físicas

El contenido de aire en las mezclas de concreto celular fue igual al porcentaje de espuma incluido en cada una de estas mezclas. Esto se debe a que la espuma se compone de 94.96 % de aire, 4.80 % de agua y 0.24 % de agente espumante. La mezcla A se diseñó para un contenido de aire de 69 %. Las mezclas B y C se diseñaron para contenidos de aire de 58 % y 37 % respectivamente. La mezcla D registró un contenido de aire de 1.60 % que se encuentra en el rango normal de concretos convencionales.

Existe una relación directamente proporcional entre el volumen de vacíos y el encogimiento de las mezclas. Esta relación se debe a las pérdidas de burbujas de aire que sufren las mezclas durante el proceso de mezclado y fraguado. Esta pérdida de burbujas aumenta conforme al porcentaje de espuma en la mezcla aumenta y genera poros abiertos y fisuras en las mezclas.

La mezcla B obtuvo los mejores resultados en las pruebas de aislamiento térmico y acústico debido a su alto volumen de vacíos y poros cerrados que generaron millones de micro celdas de aire independientes que generaron espacios confinados donde se disipó energía y por lo tanto, mejoró su aislamiento térmico y acústico.

Debido a su gran porosidad abierta, no fue posible medir la permeabilidad de las mezclas de concreto celular. Los poros abiertos en las mezclas de concreto celular permiten el paso de fluidos convirtiéndolas en altamente permeables al extremo de no poder contener el agua durante los ensayos de presión de hidrostática, y no poder contener el vacío de aire en los ensayos de permeabilidad de aire de Torrent. Estos resultados permiten inferir una permeabilidad cercana al 100 % en todas las mezclas de concreto celular. Por lo tanto, el uso de estas mezclas debe ser exclusivo para interiores y no debe estar en contacto directo con agua.

Se identificó que todas las mezclas de concreto celular registraron coeficientes de conductividad térmica entre 29 % y 50 % más bajos que la mezcla de concreto convencional. Los resultados indican que las mezclas de concreto celular gracias a sus millones de micro celdas de aire poseen mayor absorción y por lo tanto menor capacidad de transmitir calor lo cual

las convierte en mejores aislantes térmicos. Por lo tanto, se puede concluir que la capacidad de transferir calor del concreto es inversamente proporcional a su volumen de vacíos. Los valores K registrados para las mezclas de concreto celular fueron significativamente superiores a los esperados debido a que en las pruebas no se consideró la pérdida de calor de la bombilla que no llega al muro y se pierde en el aire.

Las mezclas B y C de concreto celular registraron índices de reducción acústica 28 % y 7 % superiores respectivamente a la mezcla de concreto convencional. La mezcla A registró el peor índice de reducción acústica debido a alteraciones en su integridad física causados por encogimiento o por daño durante manipulación debido a su alta fragilidad. Esto causó que se generaran grietas en el muro y espacios entre la caja acústica y el muro por donde se filtraba el sonido durante las mediciones. Descartando la mezcla A, se observa que las mezclas de concreto celular fueron más efectivas en el aislamiento acústico en especial en frecuencias superiores a los 1000Hz. Por lo tanto, es posible concluir que el aislamiento acústico es directamente proporcional al volumen de vacíos en las mezclas consideradas.

#### **10.4. Costo**

Se determinó que elaborar estas mezclas de concreto celular es aproximadamente entre 50 % y 200 % más costoso por unidad de volumen que elaborar concreto convencional. Se identificó que el costo es directamente proporcional a la cantidad de cemento contenido en la mezcla. Por lo tanto, se puede reducir sustancialmente si se incluyen agregados en los diseños.

#### **10.5. Aplicaciones**

Según los resultados físicos y mecánicos obtenidos, se puede concluir que estas mezclas de concreto celular no deben ser utilizadas para fines estructurales. Sin embargo, poseen suficiente resistencia para ser utilizadas como rellenos fluidos para tuberías enterradas donde se desee reducir las cargas laterales circundantes. Por último, estas mezclas presentaron características físicas ideales para ser utilizadas en tabiquería y como capa aislante térmico y acústico sobre losas de entrapiso.

---

## Conclusiones

---

- En estado fresco, el concreto celular se comportó como un concreto auto compactable con alto calor de reacción debido a sus altas proporciones de cemento en sus mezclas. Las densidades de las mezclas en estado fresco fueron directamente proporcionales al volumen de aditivo espumante incluido en cada mezcla. La estabilidad de los vacíos de aire en las mezclas resultantes depende de la densidad de la espuma preformada y los tiempos de mezclado y fraguado debido a que las burbujas de aire se degradan con el tiempo y el movimiento.
- En estado endurecido, se observó que el concreto celular registró un mayor aislamiento térmico y acústico en comparación con el concreto de densidad normal. Esto se debe al volumen de vacíos independientes o poros cerrados que actúan como una barrera al flujo de calor y a las ondas sonoras. La permeabilidad de las mezclas fue mucho mayor a la esperada. Esto se debe al gran volumen de poros abiertos accidentales que surgieron por el rompimiento de burbujas de la espuma preformada a causa del movimiento del mezclado y por el calor del fraguado que genera vacíos interconectados que permiten el paso libre de fluidos. Esta pérdida de burbujas también causó encogimientos sustanciales en las mezclas que modificaron las densidades en estado endurecido.
- El concreto celular, registró resistencias a la compresión demasiado bajas como para ser considerado para usos estructurales. Sin embargo, sus usos principales son como aislante, tabiquería y rellenos fluidos, funciones para las cuales, la resistencia a la compresión no es prioritaria. Los resultados del módulo de elasticidad indican que estas mezclas de concreto celular poseen menor capacidad de resistir las deformaciones elásticas que la mezcla de concreto convencional debido a su inferior resistencia a la compresión. El módulo de Poisson refleja que, en términos generales, estas mezclas de concreto celular tienden a deformarse más axialmente que las mezclas de concreto convencional a ser sometidas a cargas de compresión.
- Se determinó que el costo unitario de la producción de estas mezclas de concreto celular es sustancialmente mayor a la producción del concreto celular. Esto se debe al alto porcentaje de cemento en las mezclas de concreto celular a causa de la ausencia de

agregados. Sin embargo, el aumento en el costo es compensado por un aumento en la capacidad de aislamiento térmico y acústico.

- Los resultados de las pruebas mecánicas y físicas permiten concluir que estas mezclas de concreto celular son adecuadas para usos no estructurales como tabiquería, aislante térmico y acústico sobre losas de entrepiso o rellenos fluidos para tuberías enterradas donde se desee reducir las cargas laterales circundantes.

---

### Recomendaciones

---

Se recomienda a las facultades de ingeniería y arquitectura estudiar el concreto celular como una solución a la reducción de las cargas muertas en zona sísmica para elementos no estructurales como tabiquería y pañuelos en losas y como solución al aislamiento térmico y acústico en edificaciones.

Se recomienda investigar y experimentar métodos de elaboración de concreto celular con propiedades mecánicas que le permitan tener aplicaciones estructurales como unidades de mampostería.

Al elaborar mezclas de concreto celular utilizando espuma preformada, se recomienda utilizar espuma elaborada a presiones superiores a los 100 psi. Se observó que la espuma elaborada a presiones inferiores a este valor era de una calidad inferior puesto que las burbujas generadas son menos estables. Adicionalmente, es necesaria una supervisión minuciosa de la cantidad de espuma que adicionará en la mezcla debido a que pequeñas variaciones en la dosis de espuma producen grandes variaciones en la densidad y características del concreto resultante. Se recomienda realizar réplicas de las mezclas para obtener un diseño final.

Se debe tener extrema precaución al elaborar y manipular mezclas con densidades inferiores a  $800 \text{ kg}/m^3$  pues el concreto celular se vuelve altamente inestable y frágil al punto de dañarse al ser desencofrado y manipulado. Debido a su alta porosidad y permeabilidad, se recomienda que el concreto celular no sea expuesto contacto directo con humedad por lo que se recomienda su uso en interiores. Adicionalmente, se recomienda buscar métodos alternativos para medir la permeabilidad en mezclas de concreto celular.

Se recomienda realizar un estudio comparativo entre las propiedades mecánicas y físicas de concreto celular curado elaborado por medio de métodos químicos y con aditivo espumante no preformado.

Se recomienda investigar el impacto de los aditivos acelerantes y retardantes en la propiedades mecánicas y físicas del concreto celular. Al incrementar el tiempo de fraguado del concreto celular es posible que se pierdan más vacíos en el proceso de fraguado. Sin embargo,

los aditivos acelerantes incrementan la temperatura de la mezcla en estado fresco lo cual, podría igualmente resultar en pérdida de vacíos durante el proceso de fraguado.


Para comprender el impacto de la densidad de la espuma en el material resultante, se recomienda hacer un estudio comparativo entre las propiedades resultantes de las espumas preformadas elaboradas a distintas presiones manteniendo la misma proporción del agente incorporador de aire y el agua.

Las mezclas de concreto celular estudiadas en esta investigación pueden ser recomendadas para usos no estructurales como tabiquería, aislante térmico y acústico sobre losas de entrepiso o rellenos fluidos para tuberías enterradas donde se desee reducir las cargas laterales circundantes. Estas mezclas registraron un elevado costo de elaboración debido a la alta proporción de cemento en las mezclas. Por lo tanto, se recomienda investigar las propiedades mecánicas y físicas de concreto celular con agregados de densidad normal y de baja densidad como solución a los altos costos de las mezclas estudiadas en esta investigación.

- 
- [1] M. L. Cifuentes Jacobs, D. Estuardo Son, E. J. Mijangos Morales, E. S. A. García Chuc, J. V. de Paz Pérez, D. Estuardo, S. E. José, M. Morales, E. Sergio, A. García, G. C. E. S. A. Julián y V. De Paz Pérez, “Fundamentos, Especificaciones, Usos Y Futuro Del Concreto Celular En Guatemala”, pág. 19, 2015. dirección: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/39640481/Investigacion.ConcretoCelular.pdf>.
  - [2] “Guía para la selección y uso de concretos celulares”, 1999.
  - [3] COGUANOR, “NTG 41006 Terminología referente al concreto y agregados para concreto.”, Guatemala, inf. téc., 2010.
  - [4] —, “NTG 41070 Aditivos químicos para producción de concreto fluido. Especificaciones”, Guatemala, inf. téc., 2011.
  - [5] —, “NTG 41069 Aditivos incorporadores de aire para concreto. Especificaciones”, Guatemala, inf. téc., 2011.
  - [6] —, “NTG 41061 Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra.”, Guatemala, inf. téc., 2010.
  - [7] —, “NTG – 41017 h4 Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.”, Guatemala, inf. téc., 2010.
  - [8] —, “NTG – 41017h7 Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.”, Guatemala, inf. téc., 2010.
  - [9] —, “NTG 41017-h1 Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.”, Guatemala, inf. téc., 2017.
  - [10] —, “NTG 41017-h2 Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)”, Guatemala, inf. téc., 2011.
  - [11] —, “NTG 41017-h16 Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión.”, Guatemala, inf. téc., 2011.


- [12] —, “NTG 41017 h43 Método de ensayo para la medición in situ de la permeabilidad al aire del concreto. (Método Torrent).”, Guatemala, inf. téc., 2018.
- [13] J. O. López Orozco, “Porosidad del concreto”, *Universidad de San Carlos de Guatemala*, n.º Trabajo fin de grado, pág. 84, 2004.
- [14] B. : Lazo, A. Jaime, D. De, M. María y E. Sánchez García, “Universidad Nacional De San Agustin De Arequipa Facultad De Ingenieria Civil Diseño De Concreto Celular Para Diferentes Densidades, Analisis De Sus Propiedades Y Sus Aplicaciones Presentado Por”, 2017.
- [15] E. STANDARD, “En 206-1”, inf. téc., 2000, págs. 1-72.
- [16] Yunus A. Cengel, *Termodinamica Cengel Séptima edición*. 2011.
- [17] ZIGURAT, “Modelado Bim De Instalaciones Bloque, Cálculo Y Construcción, Diseño Y”, inf. téc., 2014.
- [18] D. Ena, *¿Conoces la diferencia entre el Ruido Blanco y el Ruido Rosa?*, 2015. dirección: <http://cosasdeaudio.com/conoces-la-diferencia-entre-el-ruido-blanco-y-el-ruido-rosa/> (visitado 07-08-2019).
- [19] CIRRUS RESEARCH S.L., “Guía para Terminología de Medición de Ruido”, inf. téc., 2018. dirección: <https://www.cirrusresearch.co.uk/library/documents/ebooks/guia-terminologia-medicion-ruido.pdf>.
- [20] Musiki, *DBfs*. dirección: <http://musiki.org.ar/DBfs> (visitado 07-07-2019).
- [21] “523.3R-14: Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft<sup>3</sup> (800 kg/m<sup>3</sup>)”, *Technical Documents*, vol. 3,
- [22] COGUANOR, “NTG – 41010h2 Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) e índice de vacíos en los agregados.”, Guatemala, inf. téc., 2010.
- [23] Merlin, “Resistividad Electrica Total en el concreto”,
- [24] COGUANOR, “NTG 41017 h42 Método de ensayo para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en el concreto endurecido.”, Guatemala, inf. téc., 2018.
- [25] “ASTM E1225 - 04 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique”, American Society for Testing y Materials, inf. téc., 2004.
- [26] “IRAM 4063-3 Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Médición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción.”, Instituto argentino de normalización y certificación, inf. téc., 2002.

14.0.1. Resistencia a la compresión mezcla A



**CEMENTOS PROGRESO**  
Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

**CEMENTOS PROGRESO, S.A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



**ACREDITADO**  
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.08  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 35076-2  
Fecha OT: 2019.07.16

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.				Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD			
Dirección: 15 AV., 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA				Dirección: CON AGENTE ESPUMANTE TESIS HECTOR VASQUEZ			
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO				Muestra: CILINDROS			
Teléfono: 22864100				Analista: DELBERT VILLATORO			

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPÉCIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm²)	Carga (KN)	Resis-tencia (N/mm²)	Resis-tencia (PSI)	T. Rot
1	MEZCLA 2	35076-2-02	RUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	433KG/M3	65.00						
2	MEZCLA 2	35076-2-05	RUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	MOD.ELAS	65.00						
3	MEZCLA 2	35076-2-01	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	433KG/M3	65.00	1.20	8012	6.1	0.8	110	2
4	MEZCLA 2	35076-2-03	RUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	433KG/M3	65.00	0.84	8012	6.3	0.8	110	2
5	MEZCLA 2	35076-2-04	RUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	433KG/M3	65.00	0.86	8012	6.0	0.7	110	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

**INFORME PRELIMINAR**  
Fecha: 09/08/2019

Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE EN ORDEN DE TRABAJO, MASA UNITARIA (KG/M3) 433.00 MEZCLAS REALIZADAS EN LABORATORIO DE MIXTO LISTO.


*[Firma]*  
Analista

*[Firma]*  
Jefe Laboratorio/Coordinador

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo: laboratorio@ceotec@cmpro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.


SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

## 14.0.2. Resistencia a la compresión mezcla B



**CEMENTOS PROGRESO, S.A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181

Compartimos Sueños. Construimos Realidades.



ACREDITADO  
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.08  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 35076-3  
Fecha OT: 2019.07.16

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: CON AGENTE ESPUMANTE TESIS HECTOR VASQUEZ
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia (PSI)	T. Rot
1	MEZCLA 3	35076-3-05	PRUEBAS DE LABORATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	MOD.ELAS	60.00						
2	MEZCLA 3	35076-3-01	PRUEBAS DE LABORATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	806KG/M3	60.00	1.45	8091	13.6	1.7	240	3
3	MEZCLA 3	35076-3-02	PRUEBAS DE LABORATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	806KG/M3	60.00	1.47	8091	12.8	1.6	230	2
4	MEZCLA 3	35076-3-03	PRUEBAS DE LABORATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	806KG/M3	60.00	1.18	8012	19.5	2.4	350	2
5	MEZCLA 3	35076-3-04	PRUEBAS DE LABORATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	806KG/M3	60.00	1.14	8012	17.0	2.1	310	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

**INFORME PRELIMINAR**

Fecha: 09/08/2019

*Estuardo*

Analista

*Delbert Villatoro*


Jefe Laboratorio/Coordinador

Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE EN ORDEN DE TRABAJO, MASA UNITARIA (KG/M3) 806.00 MEZCLAS REALIZADAS EN LABORATORIO DE MIXTO LISTO.

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorio@cepro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.


SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

### 14.0.3. Resistencia a la compresión mezcla C



**CEMENTOS PROGRESO, S.A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181

Compartimos Sueños. Construimos Realidades.



**ACREDITADO**  
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.08  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 35076-4  
Fecha OT: 2019.07.16

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: CON AGENTE ESPUMANTE TESIS HECTOR VASQUEZ
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resis -tencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resis -tencia (PSI)	T. Rot
1	MEZCLA 4	35076-4-01	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	1150KG M3	59.00	1.92	8091	32.6	4.0	580	2
2	MEZCLA 4	35076-4-02	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	1150KG M3	59.00	1.94	8091	41.1	5.1	740	2
3	MEZCLA 4	35076-4-05	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	MOD.ELAS	59.00						
4	MEZCLA 4	35076-4-03	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	1150KG M3	59.00	1.85	8012	38.3	4.8	690	2
5	MEZCLA 4	35076-4-04	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	1150KG M3	59.00	1.86	8012	39.6	4.9	720	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

No. 22785 CETEC

**INFORME PRELIMINAR**

Fecha: 09/08/2019

*[Firma]*  
Analista


*[Firma]*  
Jefe Laboratorio/Coordinador

Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE EN ORDEN DE TRABAJO.MASA UNITARIA (KG/M3) 1150.0 MEZCLAS REALIZADAS EN LABORATORIO DE MIXTO LISTO.

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorioctec@cmpro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.


SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

### 14.0.4. Resistencia a la compresión mezcla D



**CEMENTOS PROGRESO**  
Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

**CEMENTOS PROGRESO, S.A.**  
CENTRO TECNOLÓGICO  
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera  
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



**ACREDITADO**  
OGA-IE-052-13

Fecha impresión: 2019.08.08  
Página: 1 de 1  
Usuario: GNOCHEZ  
OT: 35076-1  
Fecha OT: 2019.07.16

Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO.	Proyecto: CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD
Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA	Dirección: CON AGENTE ESPUMANTE TESIS HECTOR VASQUEZ
Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 22864100	Analista: DELBERT VILLATORO

**INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPÉCIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1**

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Resis -tencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resis -tencia (PSI)	T. Rot
1	MEZCLA 1	35076-1-05	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	MOD.ELAS	6.25						
2	MEZCLA 1	35076-1-01	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	3003	6.25	3.86	8012	177.7	22.2	3220	2
3	MEZCLA 1	35076-1-02	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.07.17	7	3003	6.25	3.85	8012	177.7	22.2	3220	2
4	MEZCLA 1	35076-1-03	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	3003	6.25	3.91	8091	284.5	35.2	5100	2
5	MEZCLA 1	35076-1-04	PRUEBAS DE LABOTATORIO	2019.07.10	2019.08.07	28	3003	6.25	3.91	8091	277.9	34.3	4980	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extreme puntiagudo

No. 22782  
**CETEC**

**INFORME PRELIMINAR**  
Fecha: 09/08/2019

*[Firma]*  
Analista


*[Firma]*  
Jefe Laboratorio Coordinador

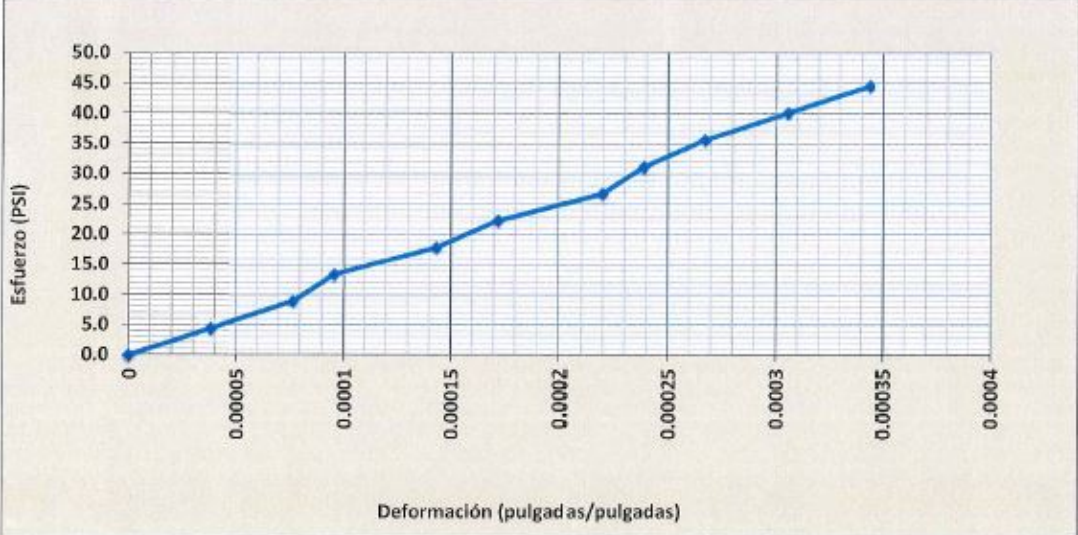
Observaciones: MUESTREO Y DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE EN ORDEN DE TRABAJO. % AIRE 1.60, MASA UNITARIA (KG/M3) 2392.0 MEZCLAS REALIZADAS EN LABORATORIO DE MIXTO LISTO.



Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo: laboratoriocetec@cempro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

14.0.5. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla A

 <p><b>Cementos Progreso</b>  <b>Centro Tecnológico</b>                  15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera, Ciudad de Guatemala                  Tel: 2286-4178 email: laboratoriocetec@cempro.com</p>		OT:	35076-2										
		FECHA OT:	2019-06-17										
		PAGINA:	1 DE 4										
		IMPRESION:	2019-07-08										
CLIENTE:	CI+D / CETEC												
CONTACTO:	ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO												
DIRECCIÓN:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA												
MUESTRA:	CILINDROS 4 X 8 "												
PROYECTO:	Concreto Liviano Baja Densidad con Agente Espumante, Tesis Héctor Vásquez												
<b>INFORME DE ENSAYO</b>													
<b>MODULO ESTÁTICO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON EN CONCRETO</b>													
<b>ASTM C 469</b>													
Id. Cilindro	Tipo de curado	Fecha de hechura	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Resistencia a compresión		Módulo de Elasticidad			Módulo de Poisson
								PSI	N/mm <sup>2</sup>	PSI	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
35076-2-06	ESTANDAR	2019-07-10	2019-08-07	28	101.0	203.0	0.84	111	0.8	150,000	10,546	1,034	0.13



 Edwini Barriles Analista de laboratorio	 Jefe y Coordinador de laboratorio
---	---


Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al tel. 2286-4178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com .  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente.

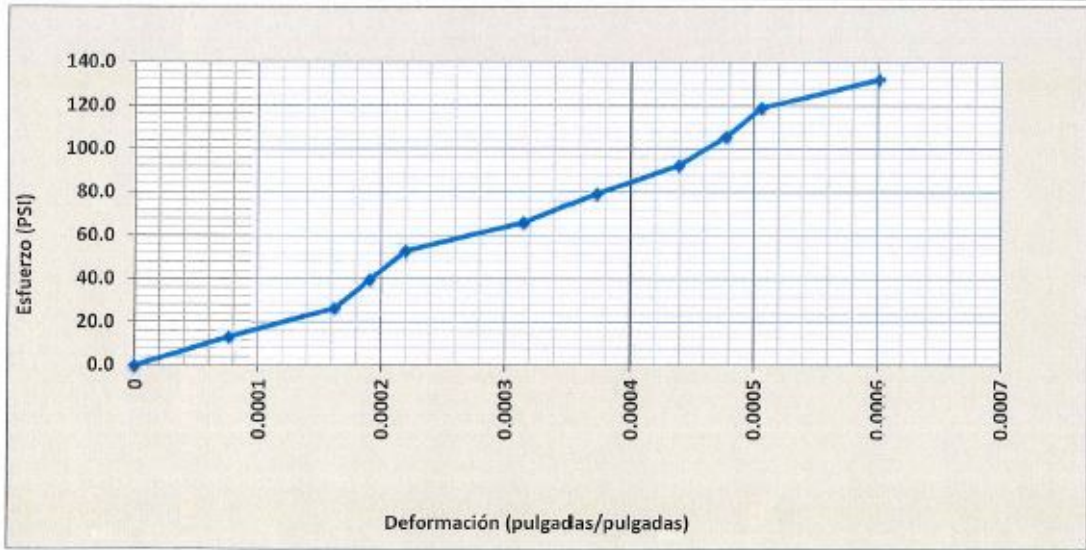
Observaciones:



**LA RESISTENCIA A COMPRESION CORRESPONDE A LOS CILINDROS DE 6 X 12 " No. 35076-2-03 y 04**

\* MUESTRAS PROPORCIONADAS POR EL CLIENTE.

14.0.6. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla B

 <p><b>Cementos Progreso</b> Centro Tecnológico 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera, Ciudad de Guatemala Tel: 2286-4178 email: <a href="mailto:laboratoriocotec@cempro.com">laboratoriocotec@cempro.com</a></p>		OT:	35076-3										
		FECHA OT:	2019-06-17										
		PAGINA:	1 DE 4										
		IMPRESION:	2019-07-08										
CLIENTE:	CI+D / CETEC												
CONTACTO:	ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO												
DIRECCIÓN:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA												
MUESTRA:	CILINDROS 4 X 8 "												
PROYECTO:	Concreto Liviano Baja Densidad con Agente Espumante, Tesis Héctor Vásquez												
<b>INFORME DE ENSAYO</b>													
<b>MODULO ESTATICO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON EN CONCRETO</b>													
<b>ASTM C 469</b>													
Id. Cilindro	Tipo de curado	Fecha de hechura	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Resistencia a compresión		Módulo de Elasticidad			Módulo de Poisson
								PSI	N/mm <sup>2</sup>	PSI	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
35076-3-05	ESTANDAR	2019-07-10	2019-08-07	28	101.0	203.0	1.16	330	2.3	250,000	17,577	1,724	0.18


 Edwin Barrios Analista de laboratorio	 Jefe Coordinador de laboratorio
---	---

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al tel. 2286-4178 o al correo [laboratoriocotec@cempro.com](mailto:laboratoriocotec@cempro.com).  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.  
 Observaciones:

**LA RESISTENCIA A COMPRESION CORRESPONDE A LOS CILINDROS DE 6 X 12 " No. 35076-3-03 y 04**

\* MUESTRAS PROPORCIONADAS POR EL CLIENTE.



### 14.0.7. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla C

		Cementos Progreso		OT:	35076-4								
		<b>Centro Tecnológico</b> 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera, Ciudad de Guatemala Tel: 2286-4178 email: laboratorioctec@cempro.com		FECHA OT:	2019-06-17								
				PAGINA:	1 DE 4								
				IMPRESION:	2019-07-08								
CLIENTE:	CI+D / CETEC												
CONTACTO:	ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO												
DIRECCIÓN:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA												
MUESTRA:	CILINDROS 4 X 8 "												
PROYECTO:	Concreto Liviano Baja Densidad con Agente Espumante, Tesis Héctor Vásquez												
<b>INFORME DE ENSAYO</b>													
<b>MODULO ESTATICO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON EN CONCRETO</b>													
<b>ASTM C 469</b>													
Id. Cilindro	Tipo de curado	Fecha de hechura	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Resistencia a compresión		Módulo de Elasticidad			Módulo de Poisson
								PSI	N/mm <sup>2</sup>	PSI	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
35076-4-05	ESTANDAR	2019-07-10	2019-08-07	28	101.0	203.0	1.84	705	4.9	700,000	49,215	4,826	0.17



 Edwin Barrón Analista de laboratorio	 Jefe / Coordinador de laboratorio
--	---


Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al tel. 2286-4178 o al correo laboratorioctec@cempro.com .  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente.

Observaciones:

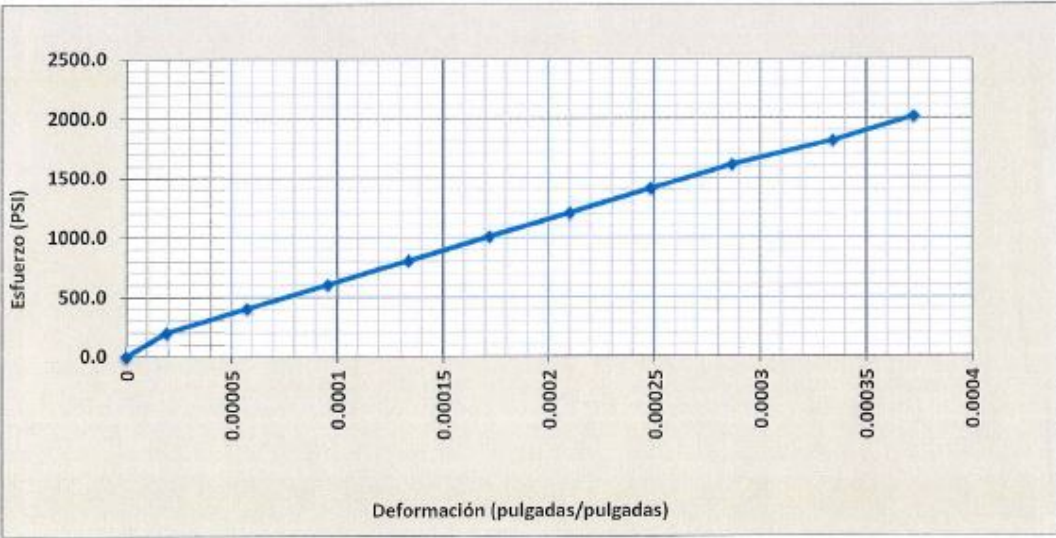
**LA RESISTENCIA A COMPRESION CORRESPONDE A LOS CILINDROS DE 6 X 12 " No. 35076-4-03 y 04**

\* MUESTRAS PROPORCIONADAS POR EL CLIENTE.



### 14.0.8. Módulos de elasticidad y Poisson mezcla D

		Cementos Progreso <b>Centro Tecnológico</b> 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera, Ciudad de Guatemala Tel: 2286-4178 email: laboratorioctec@cempro.com		OT: 35076-1 FECHA OT: 2019-06-17 PAGINA: 1 DE 4 IMPRESION: 2019-07-08									
CLIENTE:	CI+D / CETEC												
CONTACTO:	ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO												
DIRECCIÓN:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA												
MUESTRA:	CILINDROS 4 X 8 *												
PROYECTO:	Concreto Liviano Baja Densidad con Agente Espumante, Tesis Héctor Vásquez												
<b>INFORME DE ENSAYO</b>													
<b>MODULO ESTATICO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON EN CONCRETO</b>													
<b>ASTM C 469</b>													
Id. Cilindro	Tipo de curado	Fecha de hechura	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Resistencia a compresión		Módulo de Elasticidad			Módulo de Poisson
								PSI	N/mm <sup>2</sup>	PSI	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	
35076-1-05	ESTANDAR	2019-07-10	2019-08-07	28	101.5	203.0	3.90	5,040	34.8	5,750,000	404,265	39,845	0.15



 Edwin Barrios Analista de laboratorio	 Jefe de Laboratorio
---	---

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al tel. 2286-4178 o el correo laboratorioctec@cempro.com .  
 Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente.

Observaciones:

**LA RESISTENCIA A COMPRESION CORRESPONDE A LOS CILINDROS DE 6 X 12 " No. 35076-1-03 y 04**

\* MUESTRAS PROPORCIONADAS POR EL CLIENTE.

## 14.0.9. Ensayo de permeabilidad

	<b>CEMENTOS PROGRESO S. A.</b> <b>CENTRO TECNOLÓGICO</b> 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 2286-4100 Fax: 2286-4178 <a href="mailto:central@cempro.com">central@cempro.com</a>		<b>OT:</b> 35076 <b>FECHA OT:</b> 2019-06-17 <b>PÁGINA:</b> 1 DE 1
	<b>Cliete:</b> CENTRO I+D / CETEC	<b>Teléfono:</b> 2286-4100	<b>Analista:</b> HÉCTOR HERNÁNDEZ
<b>Dirección:</b> 15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	<b>Fecha de impresión:</b> 2019-09-17	<b>Proyecto:</b> CONCRETO LIVIANO BAJA DENSIDAD CON AGENTE ESPUMANTE, YESO HÉCTOR VÁSQUEZ	

**INFORME DE ENSAYO PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE AGUA BAJO PRESIÓN AL CONCRETO ENDURECIDO  
NORMA NTG 41017 I-42**

No.	ID. De muestra	Fecha de hechura	Edad en días	Fecha de ensayo	Tipo de concreto	Diametro (mm)	Hora inicio de ensayo	Ubicación elemento fundido	Promedio de penetración (mm)	Profundidad máxima penetración (mm)
1	CILINDRO 6X12	2019-07-10	31	2019-08-10	-	152.5	14:30	CILINDRO 6X12	11.44	14.46

NOTA: El diametro requerido para este ensayo es de 152 mm cilindra de 15x30 cm, según normativa NTC 41017 I-42

*[Firma]*  
Analista de Laboratorio

*[Firma]*  
Jefe de Laboratorio / Coordinador

**Observaciones:**

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo [laboratorioctec@cempro.com](mailto:laboratorioctec@cempro.com)

501-CI-CP-R-32 Rev 0

## 14.0.10. Ficha técnica aditivo Polyheed 789



The Chemical Company

# POLYHEED® 789

*Aditivo Reductor de Agua de Rango Medio y Retardante*

### DESCRIPCION

POLYHEED 789 es un aditivo líquido, listo para usarse, reductor de agua de rango medio que mantiene su trabajabilidad en ambientes con altas temperaturas.

POLYHEED 789 cumple con las especificaciones ASTM C-494 Tipo B y D, AASHTO M 194 y CRD C-87.

### USOS RECOMENDADOS

Concreto donde se requiera extender el fraguado y la trabajabilidad.

Concreto donde se requiera un rango de revenimiento medio de 15 a 20 cm (6 a 8 pulg).

Mezclas de concreto con una amplia variedad de cementos Tipo Portland o adicionados.

Concretos de uso arquitectónico.

### VENTAJAS

- Reduce la Segregación en concretos de altos revenimientos.
- Reducción de agua de 12 al 20 % y excelente desempeño en un amplio rango de revenimientos, especialmente de 10 a 20 cm (4 a 8 pulg).
- Mejora las características de manejabilidad, capacidad de bombeo y acabado aún en mezclas de concreto con bajas cantidades de material cementante.
- Incremento en el desarrollo de resistencia a compresión y flexión durante su vida útil.
- Características de fraguado moderadamente retardado en las dosis recomendadas.
- Mejor desempeño con una amplia variedad de cementos, cenizas volantes, escorias granuladas y agregados, incluyendo arenas gruesas de trituración.
- Mejor resistencia al daño por los ciclos de congelamiento y deshielo.

### DOSIFICACION

POLYHEED 789 se aplica en un rango de 4 a 8 ml por kg de material cementante (6 a 12 oz. fl por 100 lb de material cementante).

Para usar otras dosificaciones que estén fuera del rango recomendado consulte a su representante local de BASF Construction Chemicals.

### RECOMENDACIONES

#### COMPATIBILIDAD

POLYHEED 789 puede utilizarse en combinación con cualquier otro aditivo de BASF Construction Chemicals. Cuando se usa con otros aditivos, cada uno deberá vaciarse a la mezcla en forma separada.

POLYHEED 789 puede utilizarse con aditivos inclusores de aire siempre que satisfagan las especificaciones ASTM, AASHTO y CRD.

#### CORROSIVIDAD

POLYHEED 789 no es corrosivo, no contiene cloruros.

POLYHEED 789 no iniciará o promoverá la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

#### TEMPERATURA

Si el POLYHEED 789 se congela, se recomienda elevar la temperatura a 2°C (35°F) o más y agitarlo hasta que esté completamente reconstituido. No se debe usar aire a presión para agitarlo.

#### EMPAQUE

POLYHEED 789 se suministra en tambores de 208 litros o a granel.

#### ALMACENAMIENTO

POLYHEED 789 debe almacenarse a temperaturas superiores a 0°C (32°F) en sus tambores originales sellados.

POLYHEED 789 tiene una vida útil de 18 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, esta puede ser mayor.

#### DATOS TECNICOS

Estado Físico:	Líquido
Color:	Café Oscuro
Densidad 25°C (77°F):	1,14 ± 0,014 g/ml
pH:	10 ± 1

#### SEGURIDAD

POLYHEED 789 No contiene sustancias peligrosas que deban indicarse en la etiqueta. Se usa con seguridad siguiendo las precauciones estándares para la industria de la construcción como, guantes, lentes de seguridad, etc.

La información indicada representa nuestro leal saber y entender y se basa no solamente en el trabajo de laboratorio, sino también en la experiencia de campo. Sin embargo, debido a los diferentes factores que afectan los resultados, ofrecemos esta información sin garantía y sin asumir una responsabilidad manifiesta.

## 14.0.11. Ficha técnica aditivo EucoCELL 1000

### EUCOCELL 1000

Aditivo Líquido para Rellenos Fluidos en Inyección

#### Descripción

**EUCOCELL 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 TOXEMENT.

#### Información Técnica

Apariencia : Líquido  
Color : Transparente  
Densidad : 1.04 kg/l +/- 0.01 kg/l  
Contenido de cloruros: Ninguno

La adición del **EUCOCELL 1000** sobre un mortero para lograr morteros celulares, cumple los parámetros establecidos para las siguientes mediciones:

**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.

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.

**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.

**Contracción:** 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 contracción inferior al 3%.

**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.

**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/m<sup>2</sup>) en un mortero diseñado con 600 kg/m<sup>3</sup>.

**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%.

Los anteriores ensayos fueron realizados utilizando una mezcla de 500 kg a 850 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 TOXEMENT.

#### Usos

El **EUCOCELL 1000** es un aditivo para fabricación de morteros fluidos utilizados en inyección empleado en:

- 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 TOXEMENT.

## 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 concreteira.

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

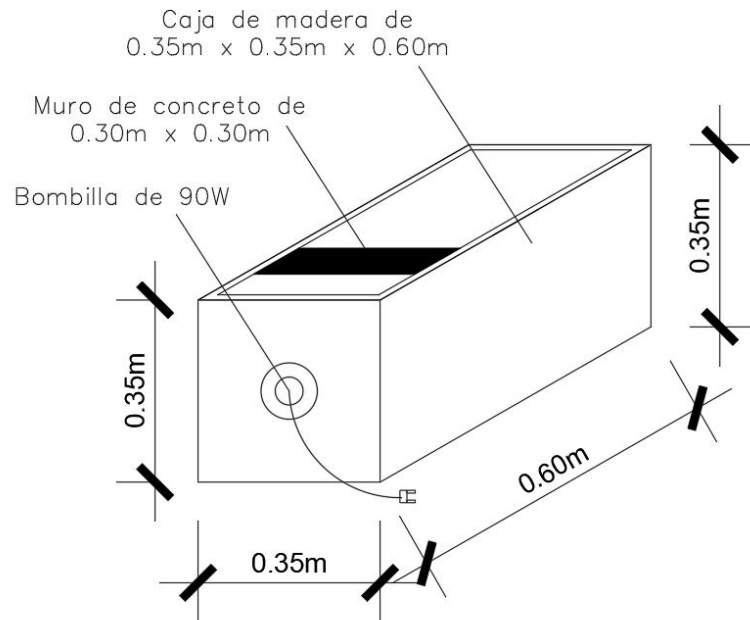
Debido a que el material puede incorporar del 35% - 45% de aire, la densidad de la masa puede variar de 1200 kg/m<sup>3</sup> - 1600 kg/m<sup>3</sup> mientras un mortero convencional normal puede tener de 2100 kg/m<sup>3</sup> - 2300 kg/m<sup>3</sup>.

Se pueden obtener variaciones en la resistencia a la compresión entre 10 kg/cm<sup>2</sup> y 100 kg/cm<sup>2</sup> haciendo variación en la dosificación del cemento.

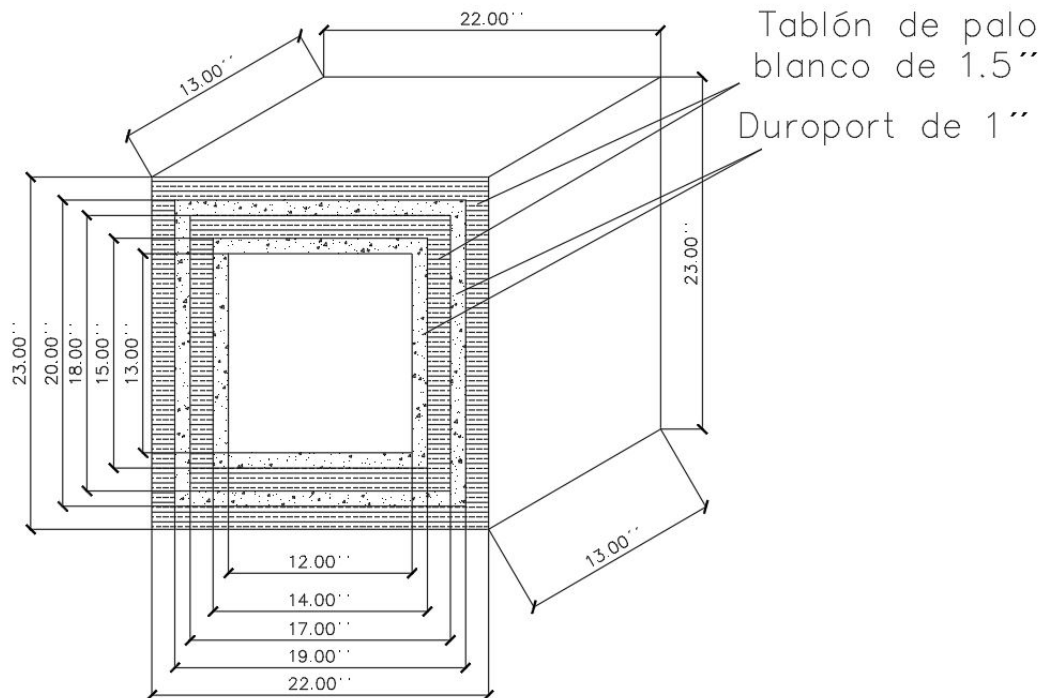
El diseño de las mezclas puede variar en función de las necesidades y de las aplicaciones específicas requeridas.

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

### 14.0.12. Plano de caja térmica



### 14.0.13. Plano de caja acústica





- ACI: American Concrete Institute (Instituto Americano de Concreto).
- Aditivo (Admixture). Material diferente del agua, los agregados, material cementante hidráulico, y del refuerzo de fibras, que puede ser usado como un ingrediente de una mezcla cementicia para modificar sus propiedades en estado fresco tal como su fraguado o sus propiedades en estado endurecido y que puede ser agregado a la amasada (bachada) de concreto, inmediatamente antes o durante su mezclado.
- Aditivo acelerante (accelerating Admixture). Aditivo que acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto o mortero (ASTM C494/C494M).
- Aditivo incorporador de aire (air entraining admixture). Aditivo que produce el desarrollo de un sistema de burbujas microscópicas en el concreto o el mortero, durante el mezclado.
- Aditivo químico: (chemical admixture). Aditivo no puzolánico en la forma de un líquido, una suspensión o un sólido soluble en agua.
- Aditivo retardante: (retarding admixture). Aditivo que retarda el fraguado del concreto o mortero (ASTM C494).
- Aditivo reductor de agua: (water-reducing admixture). Un aditivo que incrementa el asentamiento de un mortero o concreto recién mezclados, sin aumentar el contenido de agua, o que mantiene el asentamiento con una cantidad reducida de agua, debido a factores diferentes a la incorporación de aire.
- Agregado: (Aggregate). Material granular tal como arena, grava, piedra triturada (o pedrín), o escoria de alto horno usada con un medio cementante para formar el concreto de cemento hidráulico o mortero.

- Agregado grueso: (Coarse Aggregate) El agregado predominantemente, retenido en un tamiz de 4,75mm (No. 4) o aquella porción de un agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No. 4).
- Agregado fino: (Fine Aggregate) Agregado que pasa el tamiz de 9,5 mm (3/8"), que pasa casi completamente el tamiz de 4,75 mm /No. 4) y es retenido casi en su totalidad por el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200), o aquella porción de agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y es retenido en el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200).
- Agregado de alta densidad: (High-density aggregate). Es el agregado con una densidad relativa mayor de 3.3, tal como barita (sulfato de bario natural) magnetita, limonita, hierro o acero.
- Agregado de baja densidad: (low density aggregate). Es el agregado con una densidad aparente menor que 1129 kg/m<sup>3</sup> (70 lb/ft<sup>3</sup>, tal como la pómez, la escoria volcánica, cenizas volcánicas, toba, y diatomita, arcilla expandida o calcinada, esquisto, pizarra, esquisto diatomáceo, perlita, vermiculita o escoria de metales, y subproductos de la combustión de carbón de piedra o coque.
- Cemento hidráulico: (Hydraulic cement). Un cemento que fragua y endurece por reacción química con el agua y es capaz de tener esta acción bajo el agua.
- Concreto: (concrete). Un material compuesto que consiste esencialmente de un medio conglomerante dentro del cual están embebidas las partículas o fragmentos del agregado; en el concreto de cemento hidráulico, el conglomerante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua.
- Concreto autocompactable: CAC (Self Consolidating Concrete, SCC). Concreto que puede fluir alrededor del refuerzo y es capaz de consolidarse bajo su propia masa, sin necesidad de esfuerzo adicional y sin exceder los límites especificados de segregación.
- Concreto celular: (Cellular Concrete). Un concreto liviano de cemento hidráulico que tiene una estructura homogénea de poros y celdas, lograda mediante el empleo de químicos formadores de gas o de agentes gasificadores.
- Concreto endurecido: (Hardened Concrete). Concreto que ha desarrollado la suficiente resistencia para servir a un propósito definido o para resistir a una carga estipulada, sin fallar.
- Concreto fresco: (fresh concrete). Concreto que aún posee la suficiente trabajabilidad original, para ser colocado y consolidado por los medios deseados.
- Consistencia: (consistency). Del concreto fresco, mortero, graut. Es la relativa movilidad o habilidad para fluir.
- Contenido de aire: (air content). El volumen de los poros o vacíos de aire o de otro gas en la pasta de cemento, mortero o concreto, excluyendo los poros impermeables contenidos en las partículas del agregado, usualmente expresado como un porcentaje del volumen total de la pasta, mortero o concreto.
- Curado: (curing). Acción que se toma para mantener las condiciones de humedad y temperatura de una mezcla cementicia recién colocada, para permitir la hidratación

del cemento y si son aplicables), las reacciones puzolánicas a ocurrir de manera que se desarrollen las propiedades potenciales de la mezcla.

- Densidad: (density). Masa por unidad de volumen. Usualmente se conoce como al término en desuso: peso unitario)
- Endurecimiento: (hardening). Desarrollo o ganancia de resistencia y otras propiedades de una mezcla cementicia, como resultado de la hidratación, después del fraguado final.
- Material cementante: (cementitious material) Un material inorgánico o mezcla de materiales inorgánicos que fragua y desarrolla resistencia por reacción química con el agua por la formación de hidratos y que es capaz de esta acción bajo el agua.
- Relación agua-cemento: (water-cement ratio). Relación entre la masa de agua, (excluyendo únicamente el agua absorbida por los agregados) y la masa de cemento Portland en concreto, mortero o grout, expresada preferiblemente como una fracción decimal.
- Trabajabilidad o Manejabilidad: (del concreto) (workability of concrete). Propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una determinada cantidad de concreto recién mezclado con una pérdida mínima de homogeneidad.
- Vacío o poro de aire (Air void). Un espacio en la pasta de cemento, mortero o concreto, lleno con aire u otro gas, un vacío o poro de aire atrapado tiene un ancho característico de 1mm o más y una forma irregular, un vacío o poro de aire incorporado tiene una forma típicamente esférica o casi esférica y es de un diámetro entre 10µm y 1000µm.[3]

