



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades
mecánicas del concreto celular de baja densidad**

Lima-2020

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Civil

AUTOR(ES):

De la Cruz Lloclla, Luis David (ORCID: 0000-0003-3411-3209)

Mucho Ticona, Edson Jhimmy (ORCID: 0000-0001-9714-4737)

ASESOR:

Mag. Ing. Villegas Martínez, Carlos Alberto (ORCID: 0000-0002-4926-8556)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño Sísmico y Estructural

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios por haberme otorgado la vida, familia y amigos que con su apoyo incondicional y consejos. estoy aquí y quiero seguir avanzando para corresponder su esfuerzo.

Y a nuestros familiares quienes se esforzaron para seguir adelante formando de valores a esta familia a pesar de las dificultades, brindándome palabras de aliento preocupándose por mi bienestar, así como Dios lo quiso.

AGRADECIMIENTO

Al todo poderoso por haberme dado la oportunidad de vivir y disfrutar de una vida plena con los seres que más quiero, conocer y mirar con gran admiración a personas que fueron pieza importante de mi desarrollo.

A nuestros padres y hermanos por brindarnos valores, apoyándome en los buenos y malos momentos, así como su perseverancia.

A cada profesional docente e instituciones con la que tuve la oportunidad de haber compartido conocimiento necesario para mi crecimiento y formación profesional

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Tipo de investigación y Diseño de Investigación	26
3.2. Variables y Operacionalización.....	29
3.3. Población, muestra y muestreo	30
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	34
3.5. Procedimientos	34
3.6. Método de análisis de datos	37
3.7. Aspectos éticos.....	38
IV. RESULTADOS.....	39
V. DISCUSIÓN	66
VI. CONCLUSIONES	68
VII. RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS	70

ANEXOS 74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del concreto celular	11
Tabla 2. Propiedades físicas del humo de sílice	17
Tabla 3. Composición química de humo de sílice	17
Tabla 4. Resultado de resistencias a la compresión con porcentajes de adición de humo de sílice	18
Tabla 5. Cantidad de muestras para evaluar las propiedades mecánicas del concreto celular	33
Tabla 6. Cuadro resumen de propiedades del Cemento Andino tipo I	39
Tabla 7. Cuadro resumen de propiedades físicas del agente espumante.....	40
Tabla 8. Cuadro resumen de las características físicas del humo de sílice	40
Tabla 9. Cálculos Varios, obtención mezcla de densidad 818 kg/m ³	44
Tabla 10. Diseño de mezcla patrón.....	45
Tabla 11. Diseño de mezcla con 5% de SF.....	45
Tabla 12. Diseño de mezcla con 10% de SF.....	45
Tabla 13. Valores de Slump determinado para concreto auto-consolidante	50
Tabla 14. Peso unitario del concreto celular	50
Tabla 15. Resultados de resistencia promedio del ensayo a compresión ASTM C-495 según la edad.....	51
Tabla 16. Resultados de resistencia promedio del ensayo a tracción ASTM C-496 según la edad.....	53
Tabla 17. Análisis de la varianza de la resistencia a la compresión a los 7 días... 55	
Tabla 18. Medias de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 7 días.	56
Tabla 19. Agrupación de la información de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 7 días usando el método Tukey con un factor de confianza de 95%.	56
Tabla 20. Medias en subconjuntos homogéneos para la resistencia a la compresión del concreto celular de los 7 días.....	57

Tabla 21. Análisis de la varianza de la resistencia a la compresión a los 28 días.	58
Tabla 22. Medias de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 28 días.	58
Tabla 23. Agrupación de la información de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 28 días usando el método Tukey con un factor de confianza de 95%.	59
Tabla 24. Medias en subconjuntos homogéneos para la resistencia a la compresión del concreto celular de los 28 días.....	59
Tabla 25. Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción a los 7 días.	60
Tabla 26. Medias de la resistencia a la tracción del concreto a los 7 días.	61
Tabla 27. Agrupación de la información de resistencia a la tracción del concreto celular a los 7 días utilizando el método Tukey con un factor de confianza del 95%.	61
Tabla 28. Medias en subconjuntos homogéneos en la resistencia a la tracción a los 7 días.....	62
Tabla 29. Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción a los 28 días.	63
Tabla 30. Medias de la resistencia a la tracción del concreto celular a los 28 días.	63
Tabla 31. Agrupación de información de la resistencia a la tracción del concreto celular a los 28 días haciendo uso del método Tukey con factor de confianza de 95%.	64
Tabla 32. Medias en subconjuntos homogéneos de resistencia a la tracción a los 28 días	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y FIGURAS

Figura 1. Producción de cemento a nivel mundial.....	1
Figura 2. Concreto celular	5
Figura 3. Procedimiento de preparación de concreto celular	6
Figura 4. Materiales de concreto celular	7
Figura 5. Proceso de hidratación de la pasta estabilizada con humo de sílice	14
Figura 6. Resistencia a la compresión del concreto celular en diferentes tiempos	14
Figura 7. Proceso de producción del humo de sílice.....	15
Figura 8. Aspecto físico del humo de sílice	16
Figura 9. Esquema grafico de la relación de resistencia y adición de humo de sílice	18
Figura 10. Resultados de las resistencias a la compresión y tracción por división	19
Figura 11. Variación de la resistencia a la compresión del concreto celular con porcentajes de SF	23
Figura 12. Tipos de fractura de concreto: (a) falla de aglutinante, (b) falla de interfaz, (c) falla de poro / agregado.....	26
Figura 13. Espuma producida mediante el método de prespumado	47
Figura 14. Mezclado de cemento y agua con taladro de alta revolución	47
Figura 15. Generación de concreto celular	48
Figura 16. Toma de muestra y poza de curado.....	49
Figura 17. Representación gráfica de los resultados obtenidos de resistencia a compresión a los 7 y 28 días.....	52
Figura 18. Representación gráfica de los resultados obtenidos de resistencia la tracción a los 7 días y 28 días	54
Figura 19. Materiales utilizados para elaborar Concreto Celular.....	80
Figura 20. Pesaje de humo de sílice	80
Figura 21. Pesaje de cemento.....	81
Figura 22. Máquina de control para generar espuma.....	81
Figura 23. Espuma preformada.....	81

Figura 24. Características de la espuma preformada.....	82
Figura 25. Preparación de mortero.....	82
Figura 26. Mezcla de mortero con espuma preformada.....	82
Figura 27. Ensayo de trabajabilidad de Concreto Celular	84
Figura 28. Determinación del diámetro generado por el Concreto Celular auto- consolidante	84
Figura 29. Determinación del peso unitario del Concreto Celular	85
Figura 30. Llenado de los moldes	85
Figura 31. Testigos de Concreto Celular.....	86
Figura 32. Curado de testigos de Concreto Celular	86
Figura 33. Probetas de Concreto Celular curado a 7 días	87
Figura 34. Ensayo de resistencia a la compresión de probetas de Concreto Celular	87
Figura 35. Rotura de probetas a compresión	88
Figura 36. Ensayo de Resistencia a la Tracción	88
Figura 37. Ensayo de Resistencia a la Tracción	89
Figura 38. Probetas ensayadas en laboratorio para resistencia a la compresión y tracción.....	89
Figura 39. Ensayo de resistencia a tracción.....	90
Figura 40. Ensayo de resistencia a compresión.....	90
Figura 41. Ensayo de resistencia a compresión.....	91
Figura 42. Ensayo de resistencia a compresión.....	91

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia	74
Anexo 2. Matriz de Operacionalización de Variables	74
Anexo 3. Diseño de mezcla patrón.....	75
Anexo 4. Diseño de mezcla con adición de 5% de humo de sílice.....	75
Anexo 5. Diseño de mezcla con adición de 10% de humo de sílice.....	75
Anexo 6. Ficha de recolección de datos Peso Unitario ASTM C-138.....	77
Anexo 7. Ficha de recolección de datos Ensayo de asentamiento ASTM C-1611	78
Anexo 8. Ficha de recolección de datos humo de sílice ASTM C-1240	79
Anexo 9. Detalle fotográfico de la preparación de Concreto Celular	80
Anexo 10. Ensayo de compresión y tracción diametral a los 7 días.....	87
Anexo 11. Ensayo de compresión y tracción diametral a los 28 días.....	90
Anexo 12. Resultados del ensayo de resistencia a la tracción a los 7 días	92
Anexo 13. Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción a los 28 días..	93
Anexo 14. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días	94
Anexo 15. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días de concreto patrón	95
Anexo 16. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días con adición de 5% de SF	96
Anexo 17. Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días con adición de 10% de SF	97
Anexo 18. Certificado de calibración de la prensa	98
Anexo 19. Norma ACI 523. Guide for Cast-in-Place Low-Density.....	100
Anexo 20. Norma ASTM C-138. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete	113
Anexo 21. Norma ASTM C-495. Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete	116
Anexo 22. Norma ASTM C-496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens	119

Anexo 23. Norma ASTM C-1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures	124
Anexo 24. Norma ASTM C-1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete	129
Anexo 25. Norma ASTM C-796. Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam	133
Anexo 26. Norma ASTM C-869. Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete	138
Anexo 27. Certificado de turnitin	139

RESUMEN

El presente proyecto de investigación posee como objetivo general determinar la influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad, comprendiendo como objetivos específicos determinar el efecto del humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad y determinar la influencia del humo de sílice en la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad. La investigación es de tipo aplicada, de enfoque cuantitativo y de nivel explicativo. La cantidad de muestra utilizada fue de 78 probetas de concreto celular, con 3 diseños de mezclas, ensayadas en el laboratorio a la resistencia a compresión en 2 edades (7 días y 28 días) y ensayadas a la resistencia a la tracción diametral en dos edades (7 días y 28 días).

La finalidad del presente proyecto de investigación es la búsqueda de nuevos materiales que nos permitan producir concretos sostenibles y concretos de bajo peso muerto (ligero) que actúen con mayor eficiencia en las edificaciones, es por ello que se estudia el humo de sílice (SF) que es un residuo industrial, como reemplazo en porcentajes del peso de cemento en el concreto celular de baja densidad, para obtener mayor resistencia con menor cantidad de cemento; así como de usar nuevos materiales alternativos que reduzcan el uso de materiales contaminantes en la construcción, disminuyendo el índice de la contaminación anual producida por el cemento, con ello se mejora la calidad del ecosistema.

Los resultados obtenidos del presente proyecto de investigación confirman que el reemplazo del humo de sílice (SF) en peso del cemento mejoran la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad en la dosis de 10% SF, aumentando en un 13.82% con respecto al concreto patrón y mejora la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad en la dosis de 10% SF, incrementando en un 63.55% con respecto al diseño del concreto patrón.

Palabras clave: concreto celular de baja densidad, humo de sílice, resistencia a la compresión.

ABSTRACT

The present research project's general objective is to determine the influence of silica fume related to the mechanical properties of low-density cellular concrete, including as specific objectives to determine the effect of silica fume on the compressive strength of low-density cellular concrete. density and determine the influence of silica fume on the tensile strength of low-density cellular concrete. The research is of an applied type, with a quantitative approach and an explanatory level. The amount of sample used was 78 cellular concrete specimens, with 3 mix designs, tested in the laboratory for compressive strength at 2 ages (7 days and 28 days) and tested for diametrical tensile strength at two ages (7 days and 28 days).

The purpose of this research project is the search for new materials that allow us to produce sustainable and low dead weight (light) concretes that act more efficiently in buildings, which is why silica fume (SF) is studied that it is an industrial waste, as a percentage replacement of the weight of cement in low-density cellular concrete, to obtain greater resistance with less cement; as well as using new alternative materials that reduce the use of polluting materials in construction, reducing the rate of annual pollution produced by cement, thereby improving the quality of the ecosystem.

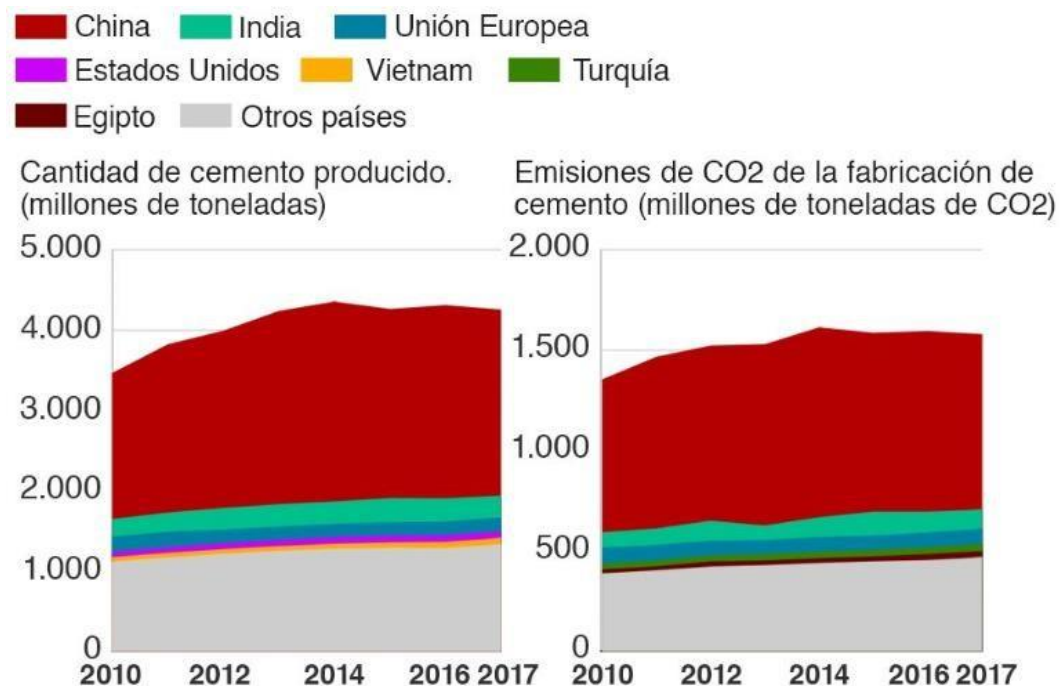
The results obtained from this research project confirm that the replacement of silica fume (SF) by weight of cement improves the tensile strength of low-density cellular concrete in the dose of 10% SF, increasing by 13.82% with respect to standard concrete and improves the compressive strength of low-density cellular concrete in the dose of 10% SF, increasing by 63.55% with respect to the design of the standard concrete.

Keywords: low density cellular concrete, silica fume, compressive strength.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, a nivel global la industria de la construcción ha ido migrando a la utilización de nuevos materiales sostenibles, debido a la alta emisión de CO₂ producto de la demanda en la producción de materiales cementosos y naturales, representando el 8% a nivel mundial, ello se debe a la producción de 4129 Mt en el año 2016; en el caso de Perú, la producción y consumo fue de 10.39 y 10.48 Mt respectivamente, ver figura 1 (International Cement Review, 2016).

Figura 1. Producción de cemento a nivel mundial



Fuente: BBC News

El cemento portland ha sido uno de los materiales de mayor utilización en la creación de concretos tradicionales, debido a ello se están realizando muchas investigaciones, buscando nuevas alternativas que reemplacen al concreto tradicional; con cualidades que contribuyan al ahorro de energía, mitigación de contaminantes, económicos y sostenibles.

El concreto celular es uno de los materiales ecológicos que se ha ido implementando progresivamente en los diferentes países, por las principales cualidades que brinda, tales como: reducción de la carga muerta en la estructura, excelente aislante acústico, térmico, así como alta resistencia al fuego; lo que permite realizar menores costos en la producción, bombeo y manipulación del mismo. A diferencia del concreto tradicional, el concreto celular se caracteriza por incluir poros de aire en su estructura mediante agentes espumantes, no obstante la estructura de la espuma en todo el proceso de preparación de la mezcla tiende a fusionarse, deformarse o incluso explosionar debido a la baja estabilidad que posee, por tal motivo el uso de humo de sílice actúa como agente para estabilizar la estructura de la espuma del hormigón celular por sus características puzolánicas y de relleno, con ello contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas.

Formulación del problema

De no incluirse humo de sílice en la elaboración del concreto celular, generaría consigo la falta de uniformidad, fusión, así como interconexión de poros; ello implicaría la falta de mejora en las propiedades del concreto celular. Por ello se plantearon los siguientes problemas de investigación:

Como problema general se planteó lo siguiente:

¿Cuál es la influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad?

Y como problemas específicos se formulan los siguientes:

¿Cuál es el efecto del humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad?

¿Cuál es la influencia del humo de sílice en la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad?

Justificación

El presente proyecto de investigación servirá de guía para la elaboración de un concreto sostenible adicionado con humo de sílice como agente estabilizador de espuma que servirá como reemplazo parcial del cemento portland ordinario, con ello se reducirá la utilización del mismo en la industria de la construcción y de esta manera ayudará a reducir la emisión de CO₂ en el planeta.

El humo de sílice como material cementoso alternativo actuará como estabilizador de espuma, permitiendo reducir la depresión y generar una mayor estabilidad; por consiguiente, mejorará las propiedades mecánicas del concreto celular. Este tipo de concreto ligero y sostenible servirá en la elaboración de muros de tabiquería, muros divisores de baja densidad en las construcciones aporticadas y como paneles de losa aligerada, con el cual ayudará a reducir la carga muerta de las construcciones, beneficiando a la industria de la construcción formal e informal y a la sociedad en general.

Del mismo modo, la información recabada en el presente proyecto de investigación enriquecerá y ampliará los conocimientos teóricos acerca del concreto celular como una nueva alternativa de aplicación y producción en la industria de la construcción.

Objetivos

El objetivo general de la investigación es:

Determinar la influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad.

Y los objetivos secundarios son los siguientes:

Determinar el efecto del humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad.

Determinar la influencia del humo de sílice en la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad.

Hipótesis

La hipótesis general es:

El humo de sílice mejora las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad.

Y las hipótesis específicas son las siguientes:

El humo de sílice incrementa la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad.

El humo de sílice incrementa la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad.

II. MARCO TEÓRICO

El Concreto Celular y sus aplicaciones

Bindiganavile, Vivek y Hoseini, Meghdad (2019), en su artículo de investigación titulado "Foamed concrete" publicado en la revista *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, realiza un estudio profundo acerca del hormigón celular. Hace más de 5000 y 2000 años descubrieron los egipcios y los romanos el concreto con poros de aire como se observa en la figura 2, al mezclar los agregados con sangre de animales, no obstante, no se logró avanzar en las investigaciones acerca del tema hasta los inicios de 1900, donde en Dinamarca y Suecia se inició a fabricarse concretos con la inclusión de burbujas de aire, así como las espumas actuales de cemento. Fue en el año de 1923 donde Axel Eriksson patentó concreto con la inclusión de poros de aire, el cual era gas de hidrógeno; fue entonces desde ese momento su uso ha ido avanzado tecnológicamente.

Figura 2. Concreto celular



Fuente: Construction and Building Materials

El concreto celular o llamado también hormigón celular es un tipo usual de concreto con características de baja densidad hecho a base de cemento, agua y espuma generada, la característica especial que tiene la espuma es su capacidad de generar pequeñas burbujas de aire que cuando se unen al mortero este produce una esfera cerrada y sólida, las pequeñas burbujas de aire se encuentran presentes en la estructura del concreto de manera homogénea con tamaños en diámetro que van desde 0.1 y 1 mm en particular de forma ovoide y esférica, de esta forma le proporciona al concreto peso ligero, una buena resistencia a altas temperaturas, así como una baja resistencia a la compresión, así como baja conductividad térmica y debido a su estructura poroso está expuesto a agentes agresivos (Chica y Alzate, 2019).

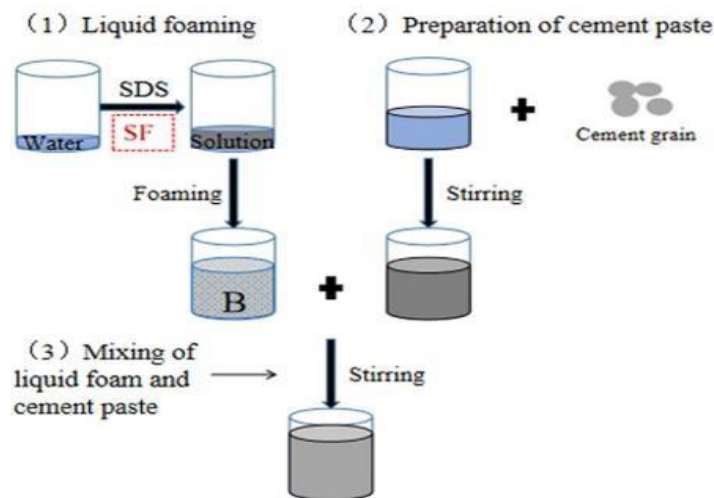
Es por ello que según (ACI 523. 2R-96, 1996), el hormigón celular se define como: un producto liviano que está compuesto por cemento portland, escoria, cenizas volantes o escoria y agua; los cuales se mezclan para formar concreto con células de poros de aire. El sistema de poros de aire se forma principalmente por la incorporación de agentes espumantes u otros gases.

Por su parte la (Asociación Británica de Cemento, 1994), definió el concreto celular como “un producto ligero que es generado mediante la inclusión de la espuma preformada, en la masa de aglutinante de cemento, usando una

mezcladora normada”. Es por ello que los poros de aire retenidas reducen el peso del concreto y por lo tanto la densidad.

Tradicionalmente el concreto celular está compuesto por agua, arena, cemento, agua y aire; por lo cual no contiene agregado grueso. Es por ello que muchos investigadores del tema se refieren como una suspensión de cemento fuertemente incorporado de aire (Beningfield et al., 2005). Además, se afirma que dicho producto se genera mediante la incorporación de aire realizado por la dilución de agua y un agente espumante durante la etapa de pre espumado; dicha espuma es mezclado con la pasta aglutinante, como ve en la figura 3 (Cox, 2005).

Figura 3. Procedimiento de preparación de concreto celular



Fuente: Construction and Building Materials

Por consiguiente, el concreto celular se define como un producto liviano cementoso, donde el mínimo volumen que debe tener la espuma debe de ser 20% de volumen total.

Los principales materiales que componen la estructura del concreto celular son el agua, cemento portland, agente espumante de origen proteico y/o sintético y materiales finos, se observa en la figura 4. Además, se pueden reemplazar los

minerales, cementos y aditivos siempre en cuando sean compatibles y que la estabilidad de la espuma no se vea afectada.

Figura 4. Materiales de concreto celular



Fuente: Construction and Building Materials

El cemento portland es componente primordial del concreto celular, por tal motivo se han empleado diferentes tipos de cemento en las dosis que varían de 300 kg/m³ hasta 500 kg/m³ tales como: cemento de alto contenido de alúmina, cemento portland de rápido endurecimiento y el cemento sulfo-aluminato de calcio con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y su tiempo de endurecimiento (Jones y McCarthy, 2005). También se usan cementos alcalino y geocementos con el propósito de aumentar la resistencia al fuego del concreto celular (Krivenko. Kovalchuk y Kuvalchu, 2005).

También se han utilizado los aditivos minerales como el humo de sílice (SF), cenizas volantes (FA), escoria de alto horno (GGBFS), lodo de papel, poliestireno expandido, cáscara de arroz y otros sólidos como reemplazo del cemento en concreto celular (Lee y Hung, 2005). De los cuales las cenizas volantes (FA) se han incorporado con éxito hasta un 80 %, los (GGBFS) de 30% hasta 50% en peso del

cemento y el humo de sílice para mejorar la conductividad térmica con volumen de espuma alto (0, 30%). No obstante, al usar dichos aditivos se debe tener especial cuidado en la economía, estabilidad de la mezcla, consistencia, y su idoneidad en la distribución de los poros (Jones y McCarthy, 2006).

En tanto en el caso del uso de los agregados se sabe que en el concreto celular no se usa el agregado grueso, pero sí el agregado fino de hasta 5 mm de tamaño como máximo. Empero esos agregados finos pueden ser reemplazados por otros materiales residuos de la industria como el humo de sílice, poliestireno expandido, cenizas volantes, tiza, cal, granito, concreto triturado, vidrio reciclado, etc. Los cuales pueden reemplazar en forma parcial o total; en ese caso no es de extrañarse que el agregado fino sea excluido por completo (Lee y Hung, 2005).

Los agentes espumantes pueden ser proteicas o sintéticas, las proteicas son productos refinados de origen animal, en cambio las sintéticas están fabricadas a base de la condensación de naftaleno sulfonato formaldehído y óxido de amina y aminas. De los cuales los agentes espumantes de origen animal son mejores al generar burbujas cerradas, de mayor cantidad, estables y más fuertes, en comparación a los agentes sintéticos que tienen una mayor expansión y menor densidad (Beningfield, Gaimster y Griffin, 2005).

El agente espumante (tensoactivo) son moléculas hidrofóbicas e hidrofílicas que al entrar en contacto con un líquido tienen la capacidad de generar espuma, la elección del tensoactivo determinará la estabilidad y una buena calidad de la espuma, los tipos de tensoactivos se clasifican en sintéticos y proteicos (naturales), este último proviene de desechos de animales y plantas, que son tratados, ya en su forma son capaces de generar burbujas de aire más pequeñas y uniformes en la pasta. Por otro lado, los agentes espumantes sintéticos se basan en sustancias químicas que al interactuar con el agua son capaces de producir burbujas de aire. El tipo de agente y la técnica para generar espuma determinará la estabilidad de la misma (Sritam et al, 2018).

En la actualidad la producción de burbujas a base de cemento se realiza de 3 formas diferentes: (1) a través de la adición de agentes espumantes químicos en el proceso de la mezcla; (2) mediante la incorporación de espumas; y (3) a través de la incorporación de potentes agentes que introducen aire. De donde estos concretos se denominan como: concreto celular, concreto espumado y concreto altamente arrastrado por aire, debido a su estructura de poros se denominan hormigón celular (p.365-390).

La espuma preformada se divide en dos vertientes: espuma húmeda el cual es producido al pulverizar el agente sintético y agua en una malla fina que produce poros con diámetro desde 2 a 5 mm. Es por ello que no es viable para concretos con densidades menores a 1100 kg/m³. Y la espuma seca que es semejante a la espuma de afeitar tiene diámetro menor a 1 mm y se caracteriza por ser muy estable. La gran diferencia entre espumas sintéticas y proteicas es que las primeras son duraderas a largo tiempo, se necesita menor energía para producir, menos costo y mucho más fáciles de manipular, en tanto la segunda genera concretos más fuertes, ya que en su interior mantiene agua el cual se libera durante la hidratación del cemento (Aldrige, 2005).

Es por ello que no existen métodos estándar de diseño de mezcla en concreto celular. La resistencia del CLC se basa en la relación c/w , no obstante, también influirá el tipo de agente espumante que se use; así como el uso de aditivos como SF, FA, GGBFS y MK tendrán un efecto en las propiedades frescas como endurecidas del concreto. Según Kearsley y Mostert (2005), para diseñar la mezcla primero se tiene una densidad como base, luego se halla la masa del cemento, agua, cenizas y la cantidad de la espuma según el requerimiento de la densidad.

La producción del concreto celular en la actualidad se basa en la incorporación de la espuma con el material aglutinante. Los 2 métodos de producción del hormigón espumado es de pre espumado y espuma de mezcla, en el primero se genera la espuma en un envase aparte con agua para luego ello agregar a la mezcla del concreto, y en segundo caso la espuma se mezcla junto y

a la vez con todos los agregados. De todos ellos se debe tener muy en cuenta es el tamaño de las burbujas, ya que a mayor dimensión tendrá menor estabilidad y es más propensa a romperse durante el mezclado, vibrado, transportado y colocado en las construcciones (Timbrell, 2007).

Existen dos metodologías que son utilizados para generar espuma los cuales son el mezclado a alta velocidad y el método pre espumado, el método a alta velocidad para generar espuma consiste en utilizar un mezclador rotatorio en ello se mezcla el agente espumante para generar pequeñas burbujas de aire debido a la acción rotatoria y luego adicionar los demás componentes a la mezcla, por otro lado el método de pre espumado consiste en la utilización de una máquina para generar burbujas de aire, de los dos métodos el pre espumado puede generar burbujas de aire más estables a diferencia del generado a alta velocidad ya que este método puede generar burbujas de aire dañadas reduciendo el contenido de aire en la estructura (Panesar, 2013).

A comparación de los materiales de aislamiento tradicionales, el concreto celular es un material alternativo que mejor se acomoda debido a alta resistencia al fuego, así como una mejor relación resistencia/peso al considerarse un material ligero, las propiedades que lo caracterizan son una mejor capacidad de deformación por tracción, coeficiente de expansión térmica mínima, así como una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico producto de la estructura de poros, en la tabla 1 se observa las propiedades del concreto celular. La baja densidad puede ayudar a disminuir la configuración estructural de vigas, losas, columnas y transmitir una menor carga a los cimientos (Hamad, 2014)

Tabla 1. *Propiedades del concreto celular*

Densidad seca (kg/m³)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Módulo de elasticidad (valor E) (Gpa)	Conductividad térmica (valor E) (W/mK)	Contracción por secado (%)
400	0.5-1.0	0.8-1.0	0,10	0.30-0.35
600	1.0-1.5	1.0-1.5	0,11	0.22-0.25
800	1.5-2.0	2.0-2.5	0.17-0.23	0.20-0.22
1000	2.5-3.0	2.5-3.0	0.23-0.30	0.15-0.18
1200	4.5-5.5	3.5-4.0	0.38-0.42	0.09-0.11
1400	6.0-8.0	5.0-6.0	0.50-0.55	0.07-0.09
1600	7.5-10	10.0-12.0	0.62-0.66	0.06-0.07

Fuente: International Journal of Materials Science and Engineering

Si bien es cierto que las propiedades de los concretos dependen de los compuestos que lo conforman, no obstante a pesar de ello existen propiedades importantes y generales tales como: muy buena relación de resistencia/ peso, alto coeficiente de impermeabilidad, mínima absorción del agua, alta resistencia al deshielo, estructuras de poros muy unidas, alta resistencia a la contracción, muy buen aislante térmico, alta propiedad de resistencia al impacto, alta resistencia a sustancias patógenas y UV (Aldrige, 2005).

Las principales propiedades del concreto en estado fresco (batido delgado grisáceo), es la trabajabilidad y el requerimiento de agua, ello se caracteriza principalmente por ser autonivelante, autocompactante, posee la disponibilidad de ser bombeado en lugares irregulares y restringidas. No obstante, tiene un tiempo límite crítico de mezclado, si el tiempo de mezclado sobrepasa ello se iniciará a perder el contenido de burbujas de aire obtenido. El flujo del CLC depende de la cantidad en volumen de la espuma, es por ello que cuando la mezcla ya contiene un agente espumante y además de ello se le agrega más cemento se produce una caída del contenido de los poros del aire (Beningfield et al., 2005).

La densidad del concreto celular es base para el diseño de las mezclas, es por ello que los diseños se realizan teniendo como base la densidad objetivo. Sin

embargo, existen diferencias entre las densidades frescas y endurecidas, pero existe una relación directa.

Otra de las propiedades en estado fresco del concreto celular es el calor de hidratación, ya que tiene una buena disponibilidad como aislante térmico, al disminuir la densidad del CLC la temperatura se ve afectado mínimamente (Jones y McCarthy, 2005).

Según (Timbrell, 2007), los concretos celulares curados al aire libre tienen mejores resistencias mecánicas que las curadas en agua, esto debido a que las burbujas se desintegran liberando agua el cual es absorbida por cemento para su hidratación.

Las principales propiedades del concreto celular en estado endurecido es la resistencia a la compresión, el cual depende mucho de la densidad, en la práctica existe densidades típicas que varían desde 0.34 MPa hasta 20 MPa, no obstante, se han logrado alcanzar densidades de hasta 50 MPa con densidades de 1500 kg/m³ mediante la adición de residuos como FA y SF sin llegar a alterar la estabilidad de la espuma (Kearsley y Wainwright, 2001). También existe la relación de la estructura de poros con la resistencia, mientras los poros sean de menor tamaño y mejor distribuidos y de menor cantidad la resistencia a la compresión aumenta. No obstante, se puede obtener mayores resistencias eligiendo componente con densidades bajas, así como empleando materiales como SF y FA como aditivo; en conclusión, las resistencias a la compresión no se ven afectados por la cantidad de agua sino, en mayor medida por la cantidad de espuma. Es decir, se queremos mejorar la resistencia a la compresión del CLC con baja densidad solo se necesitaría agregar un poco de cemento, por consiguiente, la resistencia a la compresión del CLC depende del uso del agente espumante, donde los proteicos generan poros cerrados y alcanzan mayor resistencia que los sintéticos. El módulo de elasticidad del CLC es menor que del concreto convencional, debido a que no contiene agregados gruesos.

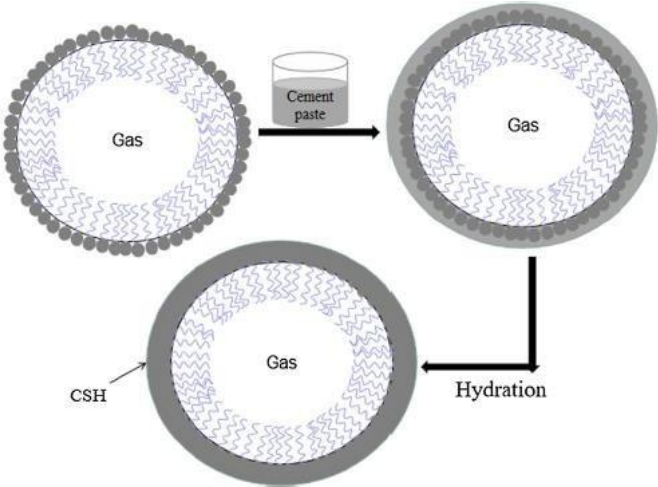
De la misma manera es un producto aislante debido a su baja conductividad térmica, así mismo la adición de FA, SF y MK reduce las propiedades de conductividad térmica. En tanto el sistema de estructura de poros del CLC está compuesto por poros capilares, poros de gel y huecos de aire; donde el tamaño, volumen y la separación de las burbujas influye en la densidad y ello en las resistencias (Jones y McCarthy, 2006). También son muy buenos en resistir al fuego, ello se eleva aún más cuando se adiciona FA. En cuanto a su contracción se encogió en su estado endurecido más que los concretos tradicionales, ello varía desde 0.1 % hasta 0.35%, pero la contracción se puede controlar incorporando aditivos como FA. Y su absorción de agua depende de su densidad, el cual depende de la presencia de agregados finos; de la misma manera su permeabilidad al agua, al oxígeno y del aire aumentan con la disminución de la densidad. Y su propiedad de resistencia al deshielo tiene muy buena congelación resistencia al deshielo; y su propiedad de Walkability (capacidad para mantener el tráfico peatonal), sostiene que cuando se espera un tráfico peatonal intenso sobre el CLC esto se debe cubrir con maderas.

Relación del humo de sílice en la estabilidad del agente espumante

Wang, Xin (2020), en su artículo de investigación titulado "Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete" publicado en la revista Construction and Building Materials, sostiene que: El humo de sílice también conocido como micro sílice es una partícula de tamaño nano o micro de origen inorgánico, que varía de (0.1-30 micra), por lo tanto es más pequeño que las partículas del cemento; el cual posee la suficiente capacidad de garantizar que la espuma se mantenga estable como se visualiza en la figura 5, durante un determinado tiempo. Además, posee las propiedades de relleno y puzolánico, debido a que es un óxido de silicio que no tiene forma definida, por ello es viable que se use como reemplazo del cemento. Dicho estudio realizó un experimento de resistencia a la compresión del concreto celular con probetas en forma de cubos de dimensiones 4 cm x 4 cm x 4 cm, en el cual se reemplazó el 1 % de cemento por

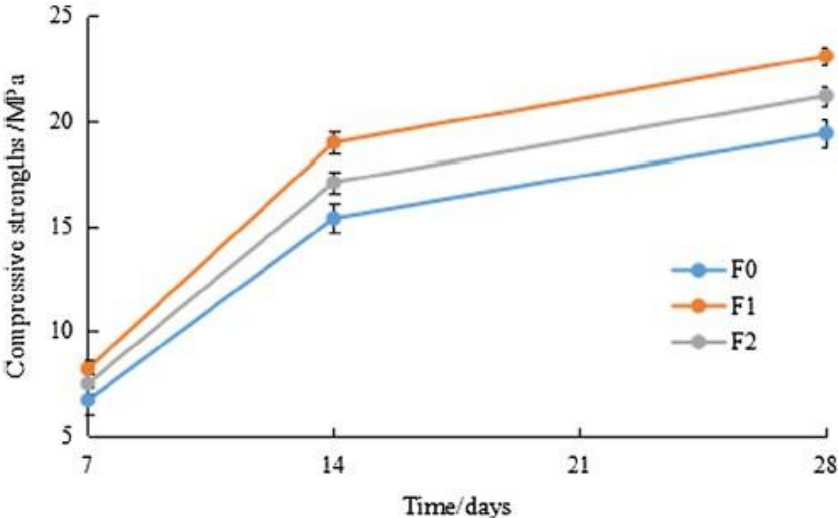
humo de sílice en la etapa de preparación de espuma (pre espumado), y en otro grupo en el proceso de preparación de la pasta, relación de agua/aglutinante de 0.29. De ello, luego de realizar la prueba de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días concluyó que las probetas con humo de sílice elaborados en la etapa de pre espumado alcanzan 1 MPa, 4 MPa y 4 MPa, ver figura 6, por consiguiente, el SF contribuye a mejorar la resistencia a la compresión del concreto celular.

Figura 5. Proceso de hidratación de la pasta estabilizada con humo de sílice



Fuente: Construction and Building Materials

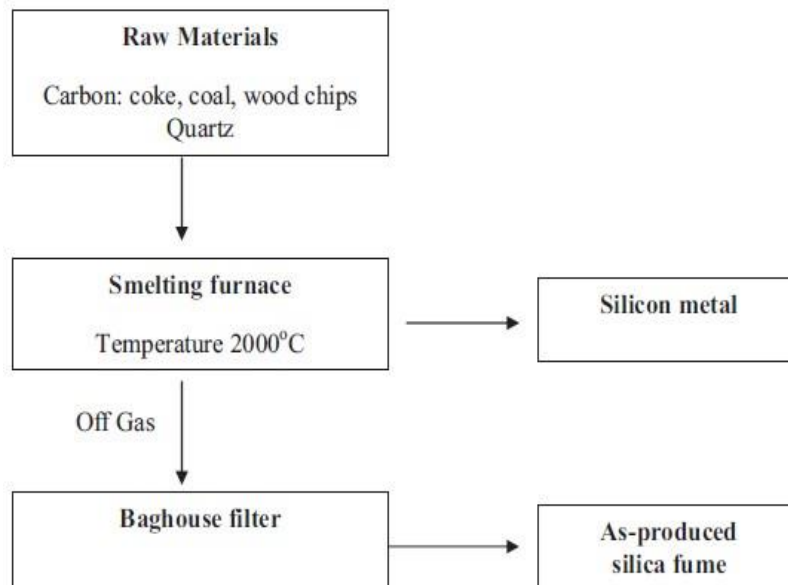
Figura 6. Resistencia a la compresión del concreto celular en diferentes tiempos



Fuente: Construction and Building Materials

El humo de sílice se obtiene a partir de la quema de cuarzo con coque, leña o carbón a temperaturas de 2000 °C, debido a ello es un residuo industria ultra fino no biodegradable que tiene forma esférica, de color gris o blanco, posee 75% de sílice en su estructura es conocido también como micro sílice, ver figura 7 (Siddique, 2011). En tal sentido la sustitución de cemento por SF es factible debido a que es altamente reactivo con hidróxido de calcio, el cual se produce durante la hidratación del cemento portland, actúa como relleno al ingresar a los espacios vacíos de las partículas del cemento y mejorar el empaquetamiento de ellos. La aleación está relacionada al contenido de SiO₂ en SF, los óxidos de SF reaccionan y consumen Ca(OH)₂ que es CH producido durante la hidratación del cemento, por consiguiente, la incorporación de SF en el concreto podría provocar un sangrado menor, una menor porosidad y permeabilidad.

Figura 7. Proceso de producción del humo de sílice



Fuente: Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete

Su característica puzolánica y la presencia de sílice amorfa (aquello que carece de una forma fija o estable: líquido y gaseoso), hace que reaccione con hidrato de calcio (CH), para formar silicato de calcio hidratado (CSH), el cual es un producto que posee la característica de resistencia en materiales a base de cemento, de

unión, mejor distribución de pequeños poros, menor liberación de calor y el desarrollo de fuerza. En consecuencia, por su tamaño las partículas de humo de sílice se llenan en los poros de la matriz de cemento endurecido, aumentando así la resistencia y la densidad de la pasta endurecida.

Las principales propiedades físicas que lo caracterizan son que tiene forma esférica, color blanco o gris, tamaños menores de 1 micrómetro, por ello es 100 veces más pequeño que el cemento y su área superficial está de 13000 – 30000 m²/kg, ver figura 8.

Figura 8. Aspecto físico del humo de sílice



Fuente:

<http://es.silicafumesupplier.com/wp-content/uploads/2018/01/96-Undensified-Silica-Fume>

Rafat, Siddique (2011) en el artículo de investigación “Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties” publicado en la revista Resources, Conservation and Recycling, menciona las propiedades físicas y químicas del humo de sílice en cuanto al tamaño de las partículas son menores a 1 μm y que abarcan casi el 95% de toda la estructura, con un área superficial que puede abarcar de 13000 a 30000 m²/kg así como las siguientes propiedades mecánicas que se mencionan en la tabla 2.

Tabla 2. *Propiedades físicas del humo de sílice*

Densidad a Granel	Valor
Tamaño de partícula	<1µm
(Tal como se produce)	130-430 kg/m ³
(Suspensión)	1320-1440 kg/m ³
(Densificado)	480-720 kg/m ³
Gravedad específica	2.2
Área de superficie	13000-30000 m ² /kg

Fuente: Resources, Conservation and Recycling

Sus propiedades químicas principales son la presencia de magnesio, hierro, óxidos alcalinos y contiene de 85 a 98.5 % de óxido de silicio; la presencia de los últimos hace que posee característica cementosa y puzolánica. Y su característica morfológica se da por la presencia de sílice amorfa con diámetro 0.1 micrómetro y su color depende de la cantidad de hierro y carbono (p. 1-18).

En cuanto a las propiedades químicas, el humo de sílice, tiene un alto contenido de dióxido de silicio (SiO₂) los rangos se componen desde 89-95% en su estructura, así como su composición varía en pequeños porcentajes de hierro, magnesio, así como óxidos alcalinos, una mejor distribución de se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. *Composición química de humo de sílice*

Óxidos	Sandvik y Cjorv (1992)	Titherington y Hooton (2004)	Yazici (2008)
SiO ₂	92.1	96.66	92.26
Al ₂ O ₃	0.5	0.23	0.89
Fe ₂ O ₃	1.4	0.07	1.97
CaO	0.5	0.31	0.49
MgO	0.3	0.04	0.96
K ₂ O	0.7	0.56	1.31
NaO	0.3	0.15	0.42
SO ₃	-	0.17	0.33
LOI	2.8	2.27	-

Fuente: Resources, Conservation and Recycling

Aplicaciones del Humo de Sílice en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto celular

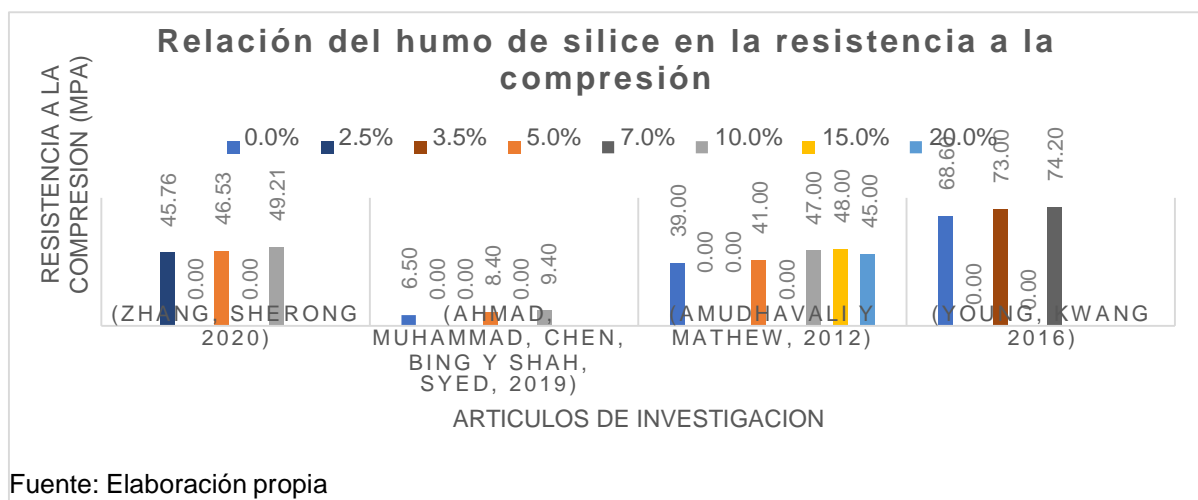
Para entender el comportamiento del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular, se detalla en la tabla 4 y figura 9 donde se encuentra la representación gráfica de los resultados obtenidos:

Tabla 4. Resultado de resistencias a la compresión con porcentajes de adición de humo de sílice

Investigador	0.0%	2.5%	3.5%	5.0%	7.0%	10.0%	15.0%	20.0%
(Zhang, Sherong 2020)		45.76	0.00	46.53	0.00	49.21		
(Ahmad, Muhammad, Chen, Bing y Shah, Syed, 2019)	6.50	0.00	0.00	8.40	0.00	9.40		
(Amudhavali y Mathew, 2012)	39.00	0.00	0.00	41.00	0.00	47.00	48.00	45.00
(Young, kwang 2016)	68.60	0.00	73.00	0.00	74.20			

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Esquema grafico de la relación de resistencia y adición de humo de sílice

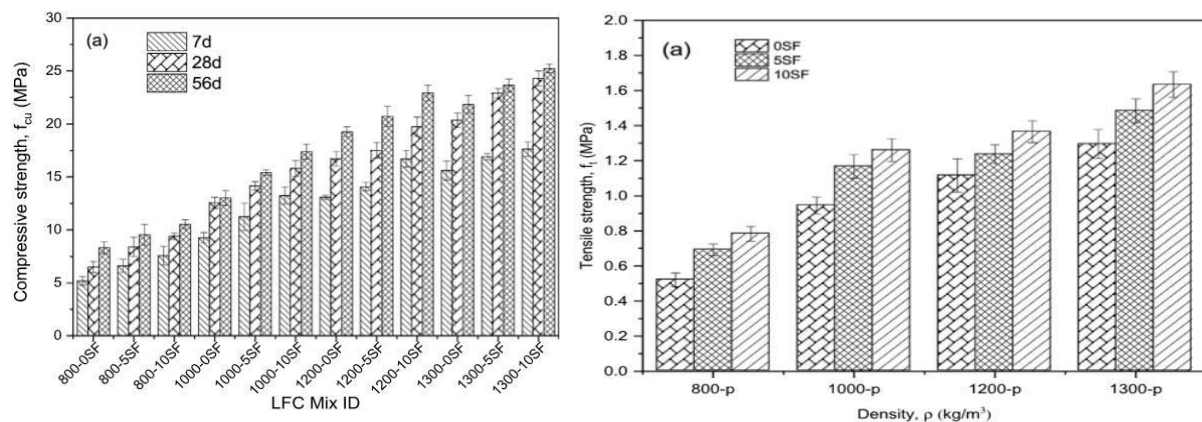


Fuente: Elaboración propia

Ahmad, Muhammad, Chen, Bing y Shah, Syed (2019), en su artículo de investigación titulado "Investigate the influence of expanded clay aggregate and

silica fume on the properties of lightweight concrete” publicado en la revista Construction and building Materials, sostiene que: Es imprescindible elaborar concretos livianos que necesiten menor uso de energía y que promueva el desarrollo sostenible. En tal sentido elaboró concretos livianos para uso estructural con densidades de (1300, 1200, 1000 y 800 kg/m³), con 0, 5 y 10% de reemplazo de cemento portland por humo de sílice. De ello concluyó que las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción mejoraron cuando la densidad pasó de 800 a 1300 kg/m³; cuando la probetas tenían densidades de 800 kg/m³ y 0% de SF la resistencias fueron de 6.50 MPa y 0.52 MPa respectivamente, en cambio cuando las probetas tuvieron una densidad 1300 kg/m³ y 10% de SF las resistencias fueron de 24.30 MPa y 1.63 MPa, ello se debe principalmente a la reducción de las burbujas de aire por la incorporación del humo de sílice SF, ver figura 10 (p. 253-266).

Figura 10. Resultados de las resistencias a la compresión y tracción por división



Fuente: Construction and Building Materials

She, Wei (2018), en su artículo de investigación titulado “Application of organic and nanoparticle- modified foams in foamed concrete: Reinforcement and Stabilization Mechanisms” publicado en la revista Investigación de cemento y concreto, sostiene que: La nano sílice tiene la capacidad de retrasar y de unirse así como la desproporción de los poros de aire al retenerse en la capa superficial de los poros de aire, incrementando la adherencia de la pared celular, impidiendo de esa

manera la transferencia de las partículas gaseosas y líquidas; por consiguiente se densifica y se produce el sistema de poros de aire más finas y homogéneas. Dicha investigación elaboró probetas espumados cilíndricas con radio de 2.5 cm, con 3 cm de altura, en el cual el contenido de humo de sílice fue de 1%, 3% y 5%. De ello se concluyó que el nano-sílice mejoró exponencialmente la estabilidad de la espuma, debido a que en la espuma con adición de NS no hubo pérdida ni drenaje de espuma en 30 minutos en comparación con espuma normal en el cual solo en 30 minutos desapareció completamente la espuma (p. 12-22).

Sheron, Zhan, et al. (2019) en su artículo de investigación "Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete" incorporó polvo de mármol y humo de sílice como reemplazo del cemento para evaluar el comportamiento del concreto celular variando los porcentajes de humo de sílice SF de 0, 2.5, 5 y 10% así como el polvo de mármol con porcentajes que van desde 0, 5, 10, 15, 20% preparando 19 mezclas y una muestra patrón con una relación de agua-cemento de 0.33 constante en todas las muestras, las resistencias obtenidas con la adición de SF se incrementaron en 15%, 18% y 24% con relaciones de adición de 2.5, 5 y 10% con un valor máximo de 56.58 MPa, para el caso de polvo de mármol es lo contrario ya que las resistencias disminuyen cuando el reemplazo excede del 5%, en cuanto a la resistencia a la tracción tiene un incremento cuando el reemplazo de polvo de mármol se da hasta un 15% pero se exhibe una disminución cuando el contenido es de un 20%, en cuanto al porcentaje de absorción agua disminuye debido a la presencia de SF permitiendo refinar la estructura y con ello evitar la penetración iones sulfatos.

Tanyildizi, Harun y Coskun Ahmet, (2008), en su artículo de investigación denominado "Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature" publicado en la revista Construction and Building Materials, investigó la influencia de humo de sílice sobre la resistencia a la tracción por compresión y a la rotura del concreto celular después de someter a temperaturas de 200, 400 y 800 C; para lo cual agregó el humo de sílice en 0, 10, 20, y 30 % en la mezcla de concreto

celular compuesto por cemento portland tipo I, escoria, SF, superplastificante y agua. Las resistencias a la tracción por división y compresión inician a disminuir desde los 200 C conforme aumenta la temperatura, ello se evitó con la incorporación del SF en el CLC; el mejor parámetro se obtuvo en probetas que contenían 20% de SF a una temperatura de 200 C (p. 2124-2129).

J. Esfandiari y P. Loghmani (2019) en el presente artículo “Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder” incluyó como reemplazo de cemento al humo de sílice y polvo de perlita y la combinación de ambas en relación de porcentajes de 0, 5, 10, 15 y 20% , así como aditivo superplastificante reductor de agua, agregado grueso de tamaño 17 mm así como 90% de cemento y 10% de cal para los 28 tipo de mezclas que se realizó, al evaluar las densidades de las mezclas, se vio que al incrementar el porcentaje de polvo de perlita la densidad disminuye debido a la gravedad específica que tiene el PP, en cuanto a las resistencias el SF humo de sílice presentó los mejores resultados que van desde 42.3-46.4 MPa en cambio los adicionados con PP mostraron resultados desde 10.7-46.3 MPa, el comportamiento de resistencia con SF se desarrolla a temprana edad con 10% , para el PP la resistencia se vio afectada cuando los porcentajes se incrementaron desde 15-20%.

Fuat, Koksai, Osman, Gencal y Mehmet Kaya (2015) en el artículo de investigación “Combineb effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures” usando proporciones de vermiculita de 4, 6 8 en V/C así mismo las proporciones de SF humo de sílice fueron de 0, 5, 10, 15% para evaluar el comportamiento mecánico, térmico y la microestructura generada por estas adiciones realizando 12 tipos de mezclas, las cuales con adición de 5% de humo de sílice en la mezcla no conduce a un incremento de la resistencia, el aumento de la capacidad de flujo de la mezcla se reflejó con el incremento de la relación v/c, para el caso de la adición de SF humo de sílice fue lo contrario debido a la alta superficie específica, además la vermiculita

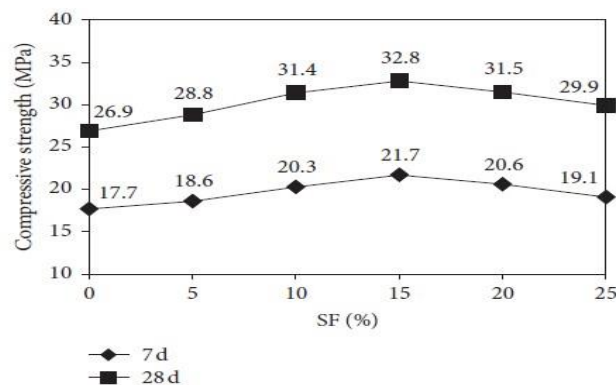
reduce el 30% de la densidad obteniendo densidades de 780-1200 kg/m³, las resistencias a la compresión variaron desde 3.9-16.4 MPa con el incremento del humo de sílice, las muestras expuestas a altas temperaturas sufrieron menores pérdidas de resistencia de 39.6% a 300°C, 38.6% a 600°C y 68.9% a 900°C debido a la presencia de vermiculita.

Youm, Kwang-Soo [et al] (2016), en su artículo de investigación con título “experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume” publicado en la revista *Construction and Building Materials*, diseñó probetas de concreto celular de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura con el fin de obtener una resistencia a la compresión de 60 MPa con una densidad a los 28 días menores que 1900 kg/m³, usando tres tipos de agregado gruesos que son: arcilla expandida triturada, pizarra triturada y granito triturado, en el cual reemplazó el cemento con humo de sílice en 0%, 3.5% y 7% en peso del cemento; los cuales se curaron en agua a una temperatura de 20 C para luego realizar las pruebas de resistencia de rotura a la tracción a los 7, 28, 56 y 91 días y las pruebas de resistencia a la compresión a los 2, 5, 7, 28, 56, y 91 días según las normas ASTM C469 y ASTM C39. Del cual concluyó que el SF al aumenta de 0% a 3.5 % influye significativamente en la resistencia a la compresión, ya que las resistencias fueron de 8% y 11% mejores que las probetas sin humo de sílice, y la resistencia a la tracción no se veo afectado significativamente por SF; no obstante, no se pudo superar el límite de resistencia de 60 MPa, y solo se llegó a los 56 MPa como máximo (p. 517-527).

Mehta, Ankur y Kumar, Deepankar (2020), en su artículo de investigación denominado “Deepankar. Silica fume and waste glass in cement concrete production: a review” publicado en la revista *Journal of Building Engineering*, sugiere que es imprescindible el uso de materiales residuales de la industria en el sector de la construcción con la finalidad de mitigar la contaminación ambiental, en tal sentido resumió documentos del uso de humo de sílice en las propiedades mecánicas del concreto celular denominado concreto verde; llegando a concluir que

la incorporación de SF en el CLC mejora las resistencias a la tracción y compresión con un aumento hasta 20% de SF, a causa de la acelerada hidratación del cemento, también influye mucho el aumento del tiempo de curado (p. 1-18). Trato de investigar la influencia del humo de sílice SF con porcentajes de 0, 5, 10, 15, 20 y 25% y nano sílice NS de 0, 1, 2, 3, 4 y 5%, y su influencia en la resistencia a la compresión del concreto celular, el tamaño de partícula del SF varía entre 0.1-0.3 micras, su densidad específica fue de 2.2 g/cm^3 , así como se utilizó arena de cuarzo, el agente espumante fue de a base de proteínas. Los resultados obtenidos en la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de prueba, aumentaron y disminuyeron conforme se incrementa la porción de SF obteniendo los mayores resultados con 15% de 21.7 MPa y 32 MPa respectivamente, ver figura 11 (Gong, et al. 2020).

Figura 11. Variación de la resistencia a la compresión del concreto celular con porcentajes de SF



Fuente: Journal of Building Engineering

Lozada, Jaime (2017), en su tesis titulado “Diseño de concreto celular para diferentes densidades, análisis de sus propiedades y sus aplicaciones” para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Realizó el diseño de concreto celular con diferentes densidades, con el objetivo de estudiar sus aplicaciones y propiedades del concreto celular. El concreto celular denominado también como concreto espumoso, aireado o gaseoso se logra incorporando grandes cantidades de poros de aire mediante el uso de un agente

espumante de origen proteico o sintético. Elaboro 3 diseños, con densidades menores a 1800 kg/m^3 (1) diseño a base de arena y cemento, (2) arena pómez, arena y cemento y (3) cemento, arena y piedra de huso 89; de los cual se realizaron diferentes ensayos y llegó a la conclusión de que el diseño (3) tuvo mayor resistencia a la compresión alcanzando $f'c= 260 \text{ kg/cm}^2$. Debido a ello sostiene que es necesario tomar en cuenta un control minucioso en todo el proceso de la elaboración del CLC.

Peña, Cecilia y Zambrano, Fulton (2001), en su tesis titulado “Hormigón celular con la utilización de materiales locales” para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Escuela Superior Politécnica realizaron investigaciones en la elaboración de bloques ligeros con ingredientes: cemento puzolánico, cenizas de cáscara de arroz, arenas , cal viva, fibras, polvo de aluminio, soda cáustica y agentes espumantes orgánicos; la temperatura de curado varía de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $130 \text{ }^\circ\text{C}$ con densidades inferiores a 1400 kg/m^3 , donde la cantidad de la estructura de poros varía de 24% a 28% y con ello se alcanzó resistencias a la compresión de hasta 135 kg/m^3 y llegaron a la conclusión que a mayor cantidad de espuma mayor porosidad y ello disminuye las resistencias mecánicas.

Izquierdo, Miguel y Ortega, Oscar (2017), en su tesis “Desarrollo y Aplicaciones del Concreto Celular a base de aditivo Espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiques no portantes en edificaciones” para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, realizaron investigaciones con el objetivo de analizar las características físicas y mecánicas del concreto celular como alternativa en la elaboración de muros de tabiquería, en las cuales concluyeron que la resistencia 40 kg/cm^2 y densidad de 450 kg/m^3 son óptimos para reducir el peso en las edificaciones, así como una baja conductividad térmica, absorción y succión en comparación con los materiales alternativos.

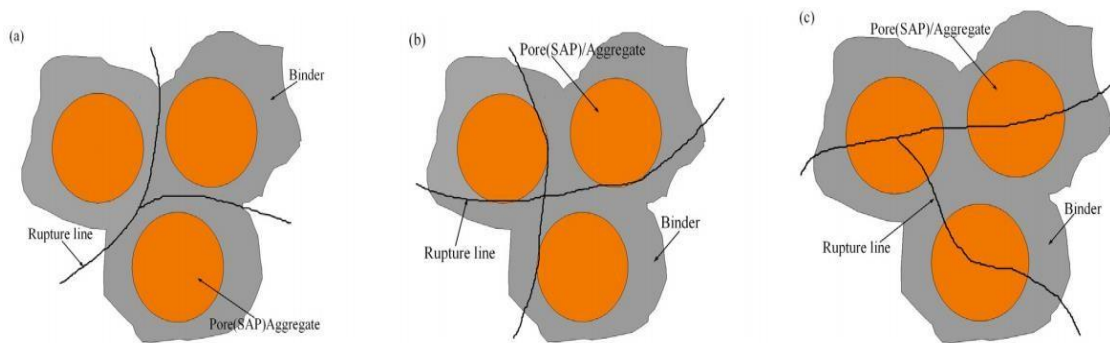
Garcia, Luis (2018), en su tesis titulado “Concreto de alto desempeño utilizando hormigón con adición de microsílíce y superplastificante en la ciudad de Huancayo” para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional

del Centro del Peru, realizo la presente investigación con el objetivo de verificar el porcentaje óptimo de microsílíce y superplastificante para obtener un concreto de alto desempeño, llegó a la conclusión que relaciones de a/c de 0.30 y 8% de microsílíce se obtiene la mejor resistencia en relación al concreto patrón establecido de 823.9 kg/cm², tracción diametral de 146.2 kg/cm² y resistencia a la flexión de 16.5 kg/cm² favoreciendo en gran medida el desempeño del concreto.

Influencia del tamaño y la cantidad de poros en la resistencia a la compresión y tracción por división del concreto celular.

El tamaño de poros y la porosidad influyen significativamente en los comportamientos de compresión y tracción por división del concreto celular, la resistencia a la tracción por división y la compresión disminuyen con el aumento del tamaño de poros y la cantidad de poros, no obstante dichos comportamientos del concreto celular no se ven afectados significativamente cuando la porosidad es menor a 10% y el tamaño de poros es mayor que 9.5 mm; muchos estudios han generalizado en tres tipos la fractura de concreto como es: fractura del agregado, fractura de la interfaz (interfaz entre aglutinante y agregado) y la fractura agregado aglutinante. La fractura del concreto celular se da principalmente por la falla del aglutinante y la falla de la interfaz (entre el agregado y el aglutinante), a continuación, se observa los diferentes tipos de fracturas como se muestra en la figura 12 (Zhang, et al., 2020).

Figura 12. Tipos de fractura de concreto: (a) falla de aglutinante, (b) falla de interfaz, (c) falla de poro / agregado



Fuente: Construction and Building Materials

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación y Diseño de Investigación

Tipo de Investigación

Aplicada

Se basa en la aplicación de los conocimientos teóricos científicos a una determinada situación para transformar en tecnología, por ello es llamada también utilitaria o constructiva; el investigador busca conocer para construir, actuar, hacer, modificar y aplicar de manera inmediata sobre una realidad; se afirma que es la investigación que realiza el investigador educado (Sánchez, 1998, p. 40).

En concordancia con ello el presente proyecto de investigación se basa en la aplicación de los conocimientos teóricos de tecnología de materiales, diseño de concreto convencional y de concreto celular, basándose en la necesidad de mejorar y ampliar la calidad en las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad, reemplazando el cemento por humo de sílice (SF).

Nivel Explicativo

Se basan a responder por las causas de los fenómenos o eventos, se enfoca en explicar en qué condiciones y por qué ocurre un evento, o explicar por qué se

relacionan las variables; además de ello son bien estructurados. Es decir, el propósito del alcance explicativo está alineado a responder por las causas de los fenómenos o eventos sociales o físicos y su valor está en que se encuentra mucho más estructurado de los demás alcances; con lo cual no dirige a un entendimiento de los eventos que se estudia (Hernández, 2010, p. 95).

Por ello que el presente proyecto de investigación es de alcance explicativo, ya que se busca responder las causas de por qué las propiedades mecánicas del concreto celular (resistencia a la compresión y tracción) mejoran al reemplazar el cemento por humo de sílice (variable independiente).

Enfoque

Representa una cantidad de procesos secuencial y probatoria que usa un conjunto de datos numéricos recolectados para probar las hipótesis mediante el análisis estadístico y la medición numérica, empleando software como: SPSS y Excel, con la finalidad de establecer modelos de comportamiento y comprobar teorías; sus principales características son: la necesidad de estimar y medir las magnitudes de los problemas, los datos se representan en números, debe ser lo más objetiva posible y los resultados se intenta generalizar (Hernández, 2010, p. 4).

Es por ello que en el presente proyecto de investigación se reemplaza el cemento por humo de sílice (variable independiente), para luego analizar sus efectos en las propiedades mecánicas del concreto celular, específicamente en la resistencia a la compresión y tracción (variable dependiente), luego con los datos numéricos obtenidos de las pruebas del laboratorio, se realiza el análisis estadístico e interpretación de los resultados para comprobar las hipótesis de si el humo de sílice mejora las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad, con el apoyo de los software SPSS y Excel; por todo lo mencionado previamente, el presente proyecto de investigación tiene un enfoque **cuantitativo**.

Diseño de investigación

Experimental

Es un estudio en el cual se manipulan las variables independientes intencionalmente, para luego analizar los efectos que tienen sobre las variables dependientes; es decir se realiza una determinada acción para luego observar las consecuencias. Y es de tipo **cuasi-experimental**, en el cual se manipula por lo menos una variable independiente con el fin de observar su efecto en la variable dependiente; los grupos experimentales ya están conformados previamente antes del experimento, los cuales han sido agrupados independientemente del experimento. Posee un grupo de control y puede incluir hasta más de dos grupos experimentales, a los cuales se va administrar un estímulo o tratamientos para luego determinar el efecto en las variables dependientes. Es de modalidad de diseño con medición de post-prueba y grupos intactos, en el cual dos o más grupos recibe el tratamiento y el otro no (grupo de control). Es decir, hay un grupo de concreto celular sin humo de sílice (grupo de control), y hay dos grupos de concreto celular, uno con 5% de SF y el otro con 10% de SF (grupos experimentales), luego se realiza la comparación del diseño de concreto celular patrón con el diseño de concreto celular reemplazado con humo de sílice en peso del cemento en cantidades de 5% y 10% en tiempos de curado de 7 y 28 días para analizar si el tratamiento con humo de sílice (SF) tuvo un efecto sobre la variable dependiente (propiedades mecánicas de compresión y tracción del concreto celular de baja densidad), en base a la dosificación por el método ACI 523, ASTM C-495, ASTM C-796 y ASTM C-496 respectivamente. Diagrama de diseño:

G1----- X1-----M1

G2----- X2-----M2

G3----- - -----M3

Donde:

G: Grupo de muestras

M: Medición de la variable dependiente

X: Estímulo de la variable dependiente

3.2. Variables y Operacionalización

Variables

La presente investigación tratará de estudiar los aspectos, atributos de las que involucran a las variables, como el estudio de la densidad, el tamaño de partícula, el módulo de finura de la variable independiente (humo de sílice), del mismo modo el estudio de las propiedades del concreto celular principalmente enfocado a la resistencia a la compresión y tracción, las cuales presentarán valores números en todo el proceso que se pueden medir (Gómez, 2012).

Por ello, las variables de estudio que se presentan en el proyecto de investigación son:

Variable Independiente

El humo de sílice se considerará como la variable independiente la cual se realizará el reemplazo parcial con porcentajes de 0%, 5% y 10% en peso del cemento, por consiguiente, se evaluará y medirá los cambios que se presentan en la variable dependiente (propiedades del concreto celular) (Borja, 2016).

Variable Dependiente

Las propiedades del concreto celular serán consideradas como variable dependiente debido a que serán el producto, resultado de las variaciones de porcentaje de variable independiente (humo de sílice), las cuales influyen en los resultados numéricos de la resistencia a compresión y tracción del concreto celular (Borja, 2016).

Operacionalización de variables

Se realizará un exhaustivo estudio de las variables, tanto de la variable independiente (humo de sílice) tomando como dimensiones la dosificación, la

densidad, el tamaño de partícula, así como el grado de pureza. Del mismo modo se realizará el tratamiento de la variable dependiente (propiedades mecánicas del concreto celular), tomando como dimensiones la resistencia a la compresión y tracción del concreto celular, y sus respectivos indicadores para su medición (Borja, 2016).

Definición Conceptual

Se definirá la variable independiente (humo de sílice), como la dependiente (propiedades mecánicas del concreto celular) en relación a la concepción que se tiene en la investigación.

Definición Operacional

Se hará uso de los procedimientos establecidos en la norma ASTM C-1240 para lograr comprender el tratamiento que se realizará a la variable independiente (humo de sílice) y su comportamiento en la mezcla de concreto celular, del mismo modo se hará uso de las normas ASTM C-495 y C496 para percibir los valores de resistencia a la compresión y tracción del concreto celular (Hernández, 2014).

3.3. Población, muestra y muestreo

Población

La población o escenario de investigación es el campo de diseño de concreto celular de baja densidad, a lo que Hernández (2014) sostiene que la población es un grupo o conjunto que tiene relación con una variedad de propiedades y/o especificaciones. Para el caso de estudio la población es infinita y/o indeterminada ya que el escenario de investigación es el campo de diseño de concreto celular de baja densidad (concreto no estructural), que abarca de densidad 600 kg/m^3 hasta 1200 kg/m^3 , los cuales se utilizan para la elaboración de paneles, bloques y se usan para el revestimiento de paredes internos y externos, así como para cielos rasos, aislante térmico, aislante acústico, losas de techos y paredes divisorias en edificios comerciales y residenciales de varios pisos.

Criterios de inclusión: Las características principales del concreto celular de baja densidad que se toma en cuenta para considerar parte de la población del presente proyecto de investigación son: Las densidades se encuentran dentro del rango de

600 a 1200 kg/m³, y las resistencias características a compresión superiores a 4.9 MPa o 50 kg/cm².

Criterio de exclusión: Las condiciones o características que se toman en cuenta para no tomar en cuenta dentro de la población de estudio del concreto celular de baja densidad son: con densidades inferiores a 600 kg/m³, densidades superiores a 1200 kg/m³, resistencias características superiores a 17 MPa o 173.35 kg/cm², resistencias a la compresión inferiores a 4.9 MPa o 50 kg/cm² y concretos celulares estructurales.

Muestra

La muestra, en resumen, es un subproducto o grupo de elementos que tienen todas las propiedades o características del universo de que provienen del conjunto denominado población (Hernández, 2014). Debido a que la población es indeterminada ya que su estudio abarca las propiedades mecánicas del concreto celular con densidades de 600 a 1200 kg/m³, la muestra se calculará con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z^2 pq}{d^2}$$

Donde:

n: Representa al número de muestras

Z: Nivel de confianza

p: Probabilidad de éxito (de acuerdo a los conocimientos obtenidos por bibliografía)

q: Probabilidad de fracaso (grupo de control que no cumple con los requerimientos)

d: Precisión (error muestral admisible). (Borja, 2016)

$$n = \frac{1.96^2 0.90 * 0.10}{0.05^2} = 138.29$$

Por lo tanto, la cantidad de muestras es 139 unidades, pero por criterio del investigador y tomando en cuenta el aspecto económico, la NORMA ASTM C 495 y la NORMA ASTM C 496, los cuales afirman que se debe hacer por lo menos 4

probetas para cada prueba, siguiendo dichas normas, la cantidad de muestras para el presente proyecto será de 78 unidades distribuidas en la ejecución de ensayos para determinar las propiedades mecánicas del concreto celular, como se muestra en la tabla N° 5.

Las muestras de análisis del presente proyecto de investigación son 42 probetas cilíndricas de concreto celular con humo de sílice SF, de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de longitud para compresión y 24 probetas para tracción, con 818 kg/m³ de densidad, las pruebas de resistencia a la compresión y tracción se realizarán a los 7 y 28 días después de curado en agua, siguiendo el procedimiento estándar de las normas ASTM C 796, ASTM C 495 y la norma ACI 523. Así mismo 12 probetas de cilíndricas de las mismas dimensiones anteriores para realizar las pruebas de densidad seca de acuerdo a la norma ASTM C 869; por lo tanto, la cantidad de total de muestras es 78 probetas cilíndricas.

- Evaluación de la resistencia a la compresión:
 - Grupo de control: 14 probetas
 - Grupo experimental 1 (5% SF): 14 probetas
 - Grupo experimental 2 (10% SF): 14 probetas
- Evaluación de la resistencia a la tracción:
 - Grupo de control: 8 probetas
 - Grupo experimental 1 (5% SF): 8 probetas
 - Grupo experimental 2 (10% SF): 8 probetas
- Evaluación de la densidad seca del concreto celular de 818 kg/m³ :
 - Grupo de control: 4 probetas
 - Grupo experimental 1 (5% SF): 4 probetas
 - Grupo experimental 2 (10% SF): 4 probetas

Tabla 5. Cantidad de muestras para evaluar las propiedades mecánicas del concreto celular

Número de probetas de concreto celular para evaluar la resistencia a la compresión				Total
Edad (días)	Porcentaje de humo de sílice			
		Patrón	5%	10%
07 días	04	04	04	12
28 días	10	10	10	30
Sub total				42
Número de probetas de concreto celular para evaluar la resistencia a la tracción				Total
Edad (días)	Porcentaje de humo de sílice			
		Patrón	5%	10%
07 días	04	04	04	12
28 días	04	04	04	12
Sub total				24
Número de probetas de concreto celular para evaluar la densidad				Total
Edad (días)	Porcentaje de humo de sílice			
		Patrón	5%	10%
28 días	04	04	04	12
				78

Fuente: Elaboración propia

Unidad de análisis: Cada una de las probetas cilíndricas de concreto celular con humo de sílice con 7.5 cm de diámetro x 15 cm de longitud con densidades desde 818 kg/m³.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos implica en la elaboración de un minucioso y detallado plan que constará de procedimientos que conduzcan a la recolección de datos sobre los atributos, conceptos o variables de las unidades de muestreo con un propósito en específico (Hernández, 2014)

Técnica de recolección de datos.

Observación - directa - no participante - estructurada. - Técnica que consiste en la percepción de las actividades, con la finalidad de recoger o anotar información para su posterior análisis y su respectivo uso; cuyo objetivo es la obtención de información a gran escala. De tal manera el investigador se encuentra en contacto directo con las acciones o fenómenos antes que se realice las pruebas de laboratorio, para registrar la mayor cantidad de información con la ayuda de tablas, fichas, cuadros, etc. (observación sistemática).

Instrumentos de recolección de datos.

Lista de cotejo (check-list). - Se registran los datos que arrojan las máquinas de laboratorio al realizar las pruebas de laboratorio, es decir se anotan toda la información acerca de cada una de la probetas y ensayos para de esa manera tener detalladamente la información para su posterior análisis y uso.

La confiabilidad y validez de los instrumentos de recolección de datos se basan en seguir los pasos estandarizados aceptados por las normas y la comunidad científica en el tema de diseño de concreto celular, se realizan las pruebas, teniendo en cuenta el control minucioso en todos los aspectos de:

3.5. Procedimientos

Para la analizar las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad, se realizará tomando en cuenta el siguiente plan de investigación que constará de 4 fases:

Fase 1, contara en la recolección de datos de los materiales utilizados tomando en cuenta las normas ASTM C-1240 para humo de sílice, la norma ASTM C-869 para los agentes espumantes, para cemento la ASTM C-150. Fase 2, para la preparación y curado de especímenes se hará uso de la norma ASTM C-192, así mismo se realizará los ensayos ASMT C-1611 para determinar el flujo de la mezcla. Fase 3, para esta fase se hará uso de las normas ASTM C-495 para los ensayos de compresión y ASTM C-496 para la medición de los ensayos de resistencia a la rotura por tracción que a continuación se detalla:

Ensayo de Resistencia a la compresión (ASTM C-495)

Este método abarca la etapa de preparación de las muestras, así como la determinación de la resistencia a la compresión del concreto aislante liviano que tiene un peso seco al horno que no excede las 50 lb/ft³ (800 kg/m³), según los procedimientos determinado en esta guía, Este método de prueba cubre la preparación de moldes con dimensiones de 75 x 150 mm de forma cilíndrica (ASTM C-495).

Procedimiento:

- Los tamaños de muestra a elegir para el presente ensayo son de 7x15 cm de forma cilíndrica.
- En la etapa de moldeado, se golpea tres veces a los lados del molde de manera ligera en capas para llenar completamente el molde, eliminando las muestras después de llenar los moldes, luego cubra el molde con una tapa de metal o vidrio.
- El retiro de los moldes será dentro de los 7 días posterior al moldeo para evitar dañar la muestra.
- El curado se realizará luego de las 24 horas de moldeo manteniendo las muestras a temperatura ambiente para luego realizar las pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días.

- Para la colocación de muestra, verifique la planeidad de las superficies de contacto así de la máquina de ensayo, de manera cuidadosa se debe alinear la superficie de contacto con el centro de carga de la muestra.
- Se realizará la aplicación de la carga a la muestra hasta que esta falle y se anotará los datos obtenidos, así como la verificación del tipo de falla y la apariencia del mismo.
- Luego la carga obtenida se dividirá con el área transversal promedio para obtener la resistencia a la compresión del concreto celular (ASTM C-495).

$$f'_c = P / A = 4P / \pi D^2$$

Donde el f'_c representa a la resistencia a la compresión, P es la carga máxima aplicada a la muestra, A es el área de la sección transversal y D el diámetro de la muestra.

Ensayo de Resistencia a la tracción (ASTM C-496)

Este ensayo permite determinar la resistencia a la rotura de especímenes por tracción de cilindros moldeados de concreto, así como la preparación de muestras de dimensiones de 150 x 300 mm de forma cilíndrica (ASTM C-496)

Procedimiento:

- El tamaño de muestras a elegir para el presente ensayo será de 150 x 300 mm de forma cilíndrica.
- Para concreto liviano se realizará el proceso de curado a 7 días en húmedo y los 21 días restantes a temperatura ambiente.
- Para el ensayo de resistencia a la rotura por tracción en cada muestra se debe dibujar una línea diametral axial.
- Luego realizar la medición de diámetro promedio de tres mediciones tanto al extremo como en el medio, así como la medición de la longitud de la muestra marcada diametralmente.

- Utilizando tiras, posicione la muestra en el centro de apoyo de la placa superior.
- Aplicar la carga de manera continua hasta la falla por rotura de la muestra.
- Se realizará el registro de la falla por rotura de tracción, así mismo se debe de verificar el tipo de falla y el aspecto de la muestra.
- Para determinar la resistencia a la rotura por tracción se debe de realizar el siguiente cálculo:

$$T = 2P/\pi ld$$

Donde T representa la resistencia a la rotura por tracción, P la carga máxima registrada de la muestra hasta le falló, la longitud diametral y del diámetro de la muestra (ASTM C-496).

Fase 4, se analizará los datos obtenidos de laboratorio proveniente de los ensayos de resistencia a la compresión y tracción la cual serán analizados por gráficos representativos en Excel, así como el uso del SPSS 24 para el análisis estadístico.

3.6. Método de análisis de datos

Análisis Univariado. - Mediante este tipo de análisis se realiza el estudio estadístico independiente de cada una de las variables por separado, con la finalidad de tener bien definido los fenómenos o acciones (causa - efecto) en las variables en estudio del proyecto de investigación. La separación de la cantidad de frecuencia de cada variable está supeditado a la categoría a la cual pertenece, los cuales al concluir se muestran en formato de porcentajes (Therese, 1997).

Por lo tanto, en el presente proyecto de investigación se realizará el análisis de las variables de manera independiente, como los porcentajes de humo de sílice que se van a reemplazar en pesos de cemento, y otro de los variables es el análisis de las resistencias resistencia a la compresión y tracción del concreto celular patrón (sin humo de sílice), y con humo de sílice; es decir, que cada una de las variables

tienen sus propias características independientes que se deben analizar por separado.

3.7. Aspectos éticos.

En el presente proyecto de investigación consideramos imprescindible los aspectos éticos que se presentan en cada uno de los estudios de las variables y al momento de realizar las pruebas y recolección de datos de los ensayos de resistencia a la compresión y tracción de las probetas de concreto celular de baja densidad, En ese sentido el proyecto cuenta con el estudio riguroso conforme lo establecen las normas ACI, ASTM y la NTP para garantizar la veracidad y rigurosidad de los resultados, de la misma manera considerando en todo momento y minuciosamente respeto a los resultados obtenidos en todo momento sin perjuicio de alterarlas para la investigación. Además de ello la dirección técnica del asesor enriquecerá los conocimientos con el propósito de validar la investigación.

IV. RESULTADOS

Propiedades físicas de los agregados

Características del cemento

En la presente Tabla 6, se muestra las propiedades físicas que presenta el cemento Andino de tipo I según la UNACEM, del mismo modo, el rango de valores radica tomando en consideración la NTP-334.009 así como la norma ASTM C-150.

Tabla 6. Cuadro resumen de propiedades del Cemento Andino tipo I

Características físicas del Cemento			
Parámetro	Unidad	Cemento Andino Premium	Requisitos NTP-334.009 / ASTM C-150
Contenido de aire	%	5.08	Máximo 12
Expansión autoclave	%	-0.02	Máximo 0.80
Superficie específica	m ² /kg	373	Mínimo 260
Densidad	g/ml	3.15	No específica
Resistencia a la Compresión			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm ²	274	Mínimo 122
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm ²	340	Mínimo 194
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm ²	440	Mínimo 285*
Composición Química			
MgO	%	1.8	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.67	Máximo 3.0
Pérdida al fuego	%	1.49	Máximo 3.0
Residuo insoluble	%	0.72	Máximo 1.5

Fuente: Ficha técnica UNACEM

Características físicas del agente espumante de origen proteico

En la presente Tabla 7 se muestran las propiedades y características físicas del agente espumante de origen proteico Blotock, tomando en consideración la norma ASTM C-796 y ASTM C-869 en la cual especifica el estándar de estos aditivos para la producción de concreto celular.

Tabla 7. Cuadro resumen de propiedades físicas del agente espumante

Características físicas del agente espumante	
Datos técnicos	Descripción
Composición	Proteínas hidrolizadas 25% sales minerales 4% (metálicas 1-1,5%, cloruro de zinc, cloruro de magnesio, sulfato de hierro)
Aspecto	Líquido marrón, de olor no nauseabundo, no fermentable
Peso específico	1,16 +/- 0,3
Densidad	1,10 +/- 0.02 g/ml
Viscosidad	4.0 +/- 2.0 mm ² /s
Neutralidad	7.0+/- 1.0
Incompatibilidad	Aceites, grasas, sustancias similares
Peso aconsejado de espuma	70-75 g/l
Solubilidad en agua	debe diluir al 2% (100 litros de agua/ 2 litros de producto)

Fuente: Ficha técnica Agente Espumante Foamin C

Características físicas del Humo de Sílice

Del mismo modo, en la presente Tabla 8, se presenta las características físicas del Humo de Sílice, así como su composición, se basa tomando en consideración la norma ASTM C-1240 donde se muestra las especificaciones estándar para uso de humo de sílice en concreto.

Tabla 8. Cuadro resumen de las características físicas del humo de sílice

Características físicas del Humo de Sílice	
Datos técnicos	Descripción
Base Química	Mezcla de ingredientes reactivos latentes
Apariencia / Color	Polvo gris
Superficie específica	15000-30000 m ² /kg
Densidad	~0.65 kg/l
Contenido Total de Iones de Cloruro	< 0.3 M-%
Dosificación Recomendada	5 - 10% en peso de cemento.

Fuente: Ficha técnica Humo de Sílice

Diseño de mezcla

Procedimiento para obtener la dosificación de mezclas:

El principal objetivo de dosificar una mezcla de hormigón es para lograr las propiedades física-mecánicas en estado endurecido, así como en estado fresco. La mayoría de los diseños buscan la resistencia a la compresión con una consistencia específica, sin embargo, en este caso al tratarse de concreto con cualidades diferentes y especiales se realizará un diseño en base a al peso específico como dato inicial de la mezcla conforme a la norma ACI 523.2R-96 y ASTM C-138 método gravimétrico. Para la dosificación optima se seguirá un plan de investigación bibliográfica de diseño de concreto celular para dar lugar a los diseños de prueba piloto, terminando luego con la selección de diseño definitivo. Es importante recalcar que partiremos de un diseño de mezcla de concreto celular realizado y validado con cemento tipo I, curado en agua y agente espumante de origen proteico; realizado con una densidad fresca de 818 kg/m^3 , relación agua cemento de 0.30 y densidad seca de 624 kg/m^3 , con la finalidad de estudiar las variaciones de resistencia y densidad, realizado por. (Falliano et al, 2020, p. 738).

Dosificación por volúmenes aparentes

Este principio se tomó de ACI 523.2R-96 para mezclas de concreto convencional, para el diseño se deberá cumplir con las siguientes condiciones:

1. Para una resistencia requerida a compresión mayor a 20 kg/cm^2 , conforme a la norma E-070, se usa una cantidad específica de cemento y la relación de agua cemento, luego para un asentamiento requerido se hallan los valores que al establecerlos en volúmenes aparentes su suma es igual 1000 lt.
2. A partir de este principio se estableció cantidades grandes de cemento para 1m^3 de concreto, del mismo modo se establece una relación baja de agua cemento, con la finalidad de alcanzar altas resistencias.
3. Como la suma de los volúmenes de los materiales es de 1000 l, se establece una función entre el volumen de espuma y cantidad de cemento, obteniendo así diferentes volúmenes de espuma para diferentes cantidades de cemento; de esta

manera se aplica el principio de conservación de masa con la finalidad de determinar la densidad referencial objetivo.

4. La suma de las masas de los diferentes materiales se divide entre 1000 l de volumen, el cual dará la densidad teórica de la mezcla.

Como se ha mencionado anteriormente, se aplicará los principios del método a una mezcla de 1 m³ y luego se ajustará a la capacidad de la mezcladora.

Manifestando los anterior se tiene:

M: masa

V: volumen

D: densidad

C: cemento

W: agua

E: espuma

Dónde:

$$v_c + v_w + v_e = 1000 \text{ lts}$$

$$\text{volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}}$$

$$\frac{m_c}{d_c} + \frac{m_w}{d_w} + \frac{m_e}{d_e} = 1000 \text{ lts}$$

$$\frac{w}{c} = \frac{m_w}{m_c}$$

$$\frac{m_c}{d_c} + \left(\frac{w}{c} \right) \frac{m_c}{d_w} + v_e = 1000 \text{ lts}$$

Luego establecemos el volumen de espuma (v_e) dependiente de la cantidad de cemento:

$$v_e = 1000 \text{ lts} - m_c \left(\frac{1}{d_c} + \frac{w}{c \cdot d_w} \right)$$

dando valores de la cantidad de cemento se logra una función lineal de cemento-espuma, luego se suma las masas y se divide entre los 1000 l que finalmente se tiene la densidad teórica objetivo, como se observa en la tabla 9.

Haciendo referencia a las revisiones previas de artículos de investigación de concreto celular, se toma en cuenta como base de este diseño el artículo de investigación denominado: Investigación experimental sobre la resistencia a la compresión del hormigón celular: efecto de las condiciones de curado, tipo de cemento, agente espumante y densidad seca; en el cual para una densidad fresca de 818 kg/m^3 , relación de agua cemento 0.30, agente espumante Foamin C+ y cemento tipo I, se logró alcanzar una resistencia a la compresión de 5.88 MPa a los 28 días.

Teniendo los datos de los materiales, relación agua cemento baja y el uso del agente espumante Foamin C+ de origen proteico, así como la densidad objetivo del concreto celular de 818 kg/m^3 se obtiene:

$$d_c = 3.15 \text{ g/cm}^3$$

$$d_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$d_e = 0.08 \text{ g/cm}^3$$

$$w/c = 0.30$$

Tabla 9. Cálculos Varios, obtención mezcla de densidad 818 kg/m³.

mc (kg)	ve (lts)	Dhc (kg/m ³)
580	642.140	805
585	639.055	812
586	638.438	813
587	637.821	814
588	637.204	815
589	636.587	817
590	635.97	818
595	632.885	824
600	629.8	830

Fuente: Elaboración propia

Diseño de mezcla patrón:

Al realizar los diseños pilotos, no se alcanzaba la densidad fresca requerida para el concreto celular, ya que los resultados fueron insatisfactorios debido a la inexperiencia que se tenía respecto a la generación de espuma, cuando se realiza usando el taladro de alta revolución, así como en la calibración del equipo generadora del pre espumado, durante este proceso de ensayo y error en la calibración del peso de la espuma se alcanzó la espuma requerida de densidad 0.08 g/cm³ y con ello el peso específico del concreto celular de baja densidad de 818 kg/m³.

Ya con los resultados satisfactorios obtenidos, este diseño se estableció como mezcla patrón, con el cual se realizará las pruebas para hallar el concreto celular patrón; a continuación, se muestra la mezcla patrón en la tabla 10.

Tabla 10. Diseño de mezcla patrón

Insumo	Nomenclatura	Unidad	Prueba	Metrado
			kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (kg/m ³)	Kg	590.00	11.182
Agua	w (kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice (SF)	SF (kg/m ³)	Kg	0.00	0.000
Ratio 1	w/c	-	0.30	-

Fuente: Elaboración propia

Dosificación del concreto celular con 5% de humo de sílice (SF)

Tabla 11. Diseño de mezcla con 5% de SF

Diseño de mezcla con 5% de humo de sílice				
Insumo	Nomenclatura	Unidad	Prueba	Metrado
			kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (kg/m ³)	Kg	560.50	10.623
Agua	w (kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice (SF)	SF (kg/m ³)	Kg	29.50	0.559
Ratio 1	w/c	-	0.30	-

Fuente: Elaboración propia

Proporciones de materiales para una densidad de 818 kg/m³, posee 5% de humo de sílice como remplazo con relación al peso del cemento, el cual se muestra en la tabla 11.

Dosificación del concreto celular con 10% de humo de sílice (SF)

Tabla 12. Diseño de mezcla con 10% de SF

Diseño de mezcla con 10% de humo de sílice				
Insumo	Nomenclatura	Unidad	Prueba	Metrado
			kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (kg/m ³)	Kg	531.00	10.064
Agua	w (kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice	SF (kg/m ³)	Kg	59.00	1.118
Ratio 1	w/c	-	0.30	-

Fuente: Elaboración propia

Proporciones de materiales para un peso unitario de diseño de 818 kg/m³, esta dosificación contiene 10% de humo de sílice como reemplazo en peso del

cemento, con la finalidad de mejorar la resistencia del concreto celular, como se muestra en la tabla 12.

Proceso de elaboración de concreto celular:

Para la elaboración del hormigón celular se utilizó el método pre espumado, en el cual se hace uso de un taladro eléctrico de alta revolución con capacidad de 1200 rev/min, el procedimiento que se sigue es el siguiente:

- Se dosifica el agente espumante para generar la espuma preformada, la espuma proteica Foamin C+ de acuerdo a sus especificaciones técnicas que es de 2 lts por 100 litros de agua, pero en este caso por recomendación del técnico de la producción del concreto celular BHCPERÚ se dosificó 4 lts por cada 100 lts de agua; dentro del generador de espuma, el agua, el aire comprimido y el agente espumante se mezclan trasladándose mediante una manguera a un colector en donde se genera la espuma mediante una turbulencia mecánica; la presión del aire comprimido es de aproximadamente de 60 psi, mientras que el agente espumante Foamin C+ se introduce en 2% en volumen, produciendo una espuma de aproximadamente de 80 g/l de densidad, el cual se encuentra dentro del rango permitido de 60 a 80 g/l según las especificaciones técnicas del fabricante, el cual se observa en la figura 13.

Figura 13. Espuma producida mediante el método de prespumado



Fuente: Elaboración propia

- Una vez obtenida la espuma con la densidad requerida, el siguiente paso es mezclar durante 3 minutos el cemento y el agua, sin embargo, hasta lograr un mortero homogéneo en un mezclador, para este caso se utilizó un taladro eléctrico con una velocidad de 1200 rpm, se observa en la figura 14.

Figura 14. Mezclado de cemento y agua con taladro de alta revolución



Fuente: Elaboración propia

- Luego de ello se integra la pasta de cemento con la espuma preformada mezclando por un tiempo de 2 minutos hasta ver que la espuma esté uniformemente distribuida, en el cual la espuma forma la red de sistema de burbujas de aire uniforme y homogénea en la matriz cementosa, el cual se observa en la figura 15.

Figura 15. Generación de concreto celular



Fuente: Elaboración propia

- Cumplido el tiempo de mezclado, se realizan los ensayos en estado fresco como el peso unitario, consistencia y finalmente se vierte en los moldes cilíndrico de 3 x 6 pulgadas previamente tratadas con el desmoldante, una vez vertidas en los moldes cilíndricos, se usa una comba de goma para acomodar y/o compactar el concreto celular de baja densidad conforme a ACI 523.3R-93.
- Finalmente, los especímenes se desmoldaron a las 24 horas después de haber sido coladas, y luego posteriormente se introdujeron en pozas de agua de curado, el cual se muestra en la figura 16.

Figura 16. Toma de muestra y poza de curado



Fuente: Elaboración propia

Ensayos en el concreto celular

Ensayos en estado fresco

Ensayo de Trabajabilidad

Tomando en consideración el ensayo de asentamiento para un tipo de concreto auto-consolidado se rige según la norma ASTM C-1611 el cual permite realizar la medición del slump a través del cono invertido para medir el flujo de la mezcla, realizando la medición 2 medidas del diámetro de la pasta, según la tabla 13.

Tabla 13. Valores de Slump determinado para concreto auto-consolidante

Tipo de concreto celular	Cantidad de SF	Slump		Valor promedio	
		Centímetros	Pulgadas	Centímetros	Pulgadas
Concreto Patrón	0.00 kg	63.50	25.00	63.25	24.90
		63.00	24.80		
Concreto con 5% de SF	0.559 kg	62.00	24.41	62.05	24.43
		62.10	24.45		
Concreto con 10% de SF	0.559 kg	60.50	23.82	60.85	23.96
		61.20	24.09		

Fuente: Elaboración propia

Ensayo de Peso Unitario del concreto

Tomando en consideración la norma ASTM C-138 se realizó los procedimientos establecidos para calcular el peso unitario del concreto, es decir la densidad del concreto, el cual consiste realizar el pesaje del recipiente y mezcla con conjunto para luego obtener el peso del concreto con relación a 1 litro, obteniendo como resultados en la tabla 14.

Tabla 14. Peso unitario del concreto celular

Ítem	Descripción	Und.	Identificación			Promedio
			P.	P.5%	P.10%	
A	PESO DEL RECIPIENTE+PESO DEL CONCRETO	(gr.)	874.00	868.00	855.00	865.67
B	PESO DEL RECIPIENTE	(gr.)	56.00	56.00	56.00	56.00
C	VOLUMEN INTERNO DEL RECIPIENTE	(l)	1.000	1.000	1.000	1.00
D	PESO DEL CONCRETO=A-B	(gr.)	818.00	812.00	799.00	809.67
E	PESO UNITARIO=D/C	(gr/l)	818.00	812.00	799.00	809.67
	PESO UNITARIO	(kg/m ³)	818.00	812.00	799.00	809.67

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra el ensayo de peso unitario de concreto, el cual se realizó el cálculo para los tres tipos de mezcla tanto patrón, con adición de 5% de

SF, 10% de SF, obteniendo como resultados de 818 kg/m³, 812 kg/m³ y 799 kg/m³ consecutivamente, el cual cumple con la densidad que se realizó el diseño de mezcla del concreto celular de baja densidad.

Ensayos en estado endurecido

Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión para concreto celular se realizó siguiendo los estándares mencionados en la norma ASTM C-495, así mismo dichos ensayos se realizaron con los especímenes producto del diseño de mezcla para muestra patrón, adición de 5% de SF y 10% de SF, en la siguiente Tabla muestra los resultados obtenidos a la edad de 7 días en relación con el porcentaje obtenido a esa edad, como se observa en la tabla 15.

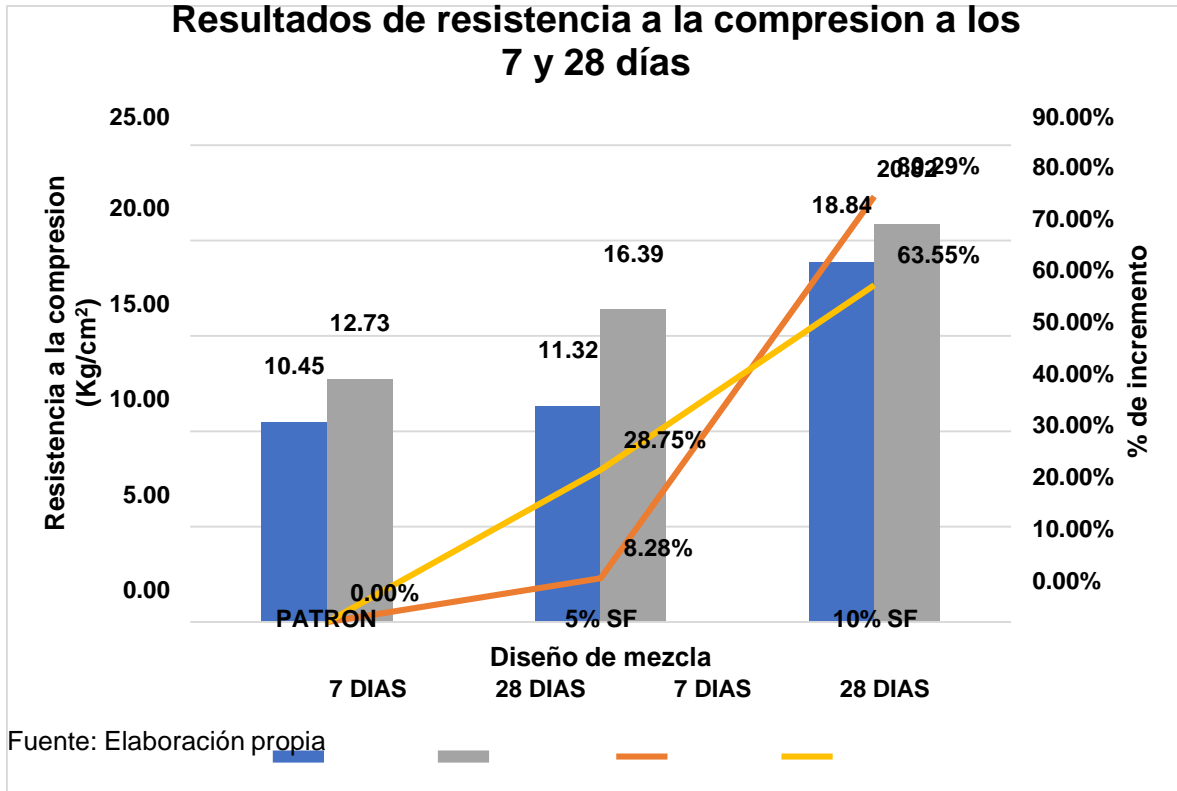
Tabla 15. Resultados de resistencia promedio del ensayo a compresión ASTM C-495 según la edad

Tipo de mezcla	7 días		28 días	
	Resistencia promedio (kg/cm ²)	P. diseño (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	P. diseño (%)
Patrón	10.45	0.00%	12.73	0.00%
5% SF	11.32	8.28%	16.39	28.75%
10% SF	18.84	80.29%	20.82	63.55%

Fuente: Elaboración propia

En la figura 17, se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos luego de haber realizado la rotura de probetas de concreto celular de baja densidad para 7 y 28 días de curado:

Figura 17. Representación gráfica de los resultados obtenidos de resistencia a compresión a los 7 y 28 días



En la figura 17, se muestra los resultados obtenidos de laboratorio de las probetas de concreto celular de baja densidad tomando en consideración la norma ASTM C-495 para determinar la resistencia a la compresión, los cuales fueron desarrollados para 7 y 28 días de curado para concreto patrón, con adición de 5% humo de sílice y 10% humo de sílice como reemplazo en peso de cemento, los resultados muestran incrementos de resistencia en relación al concreto patrón con las variaciones de incremento de 5% y 10% los cuales obtuvieron 8.28% y 80.29% para 7 días de curado, por el contrario los valores obtenidos para 28 días de curados fueron obtenidos a 28.75% y 63.55% mostrando el incremento para 5% y 10% con relación al concreto patrón.

Ensayo de resistencia a la tracción

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó siguiendo los parámetros establecidos según la norma ASTM C-496 para concreto celular de baja densidad, así mismo los ensayos realizados fueron hechos a los especímenes producidos de los diseños de mezcla patrón, con 5% de adición SF y 10% de SF; como se muestra en la tabla 16.

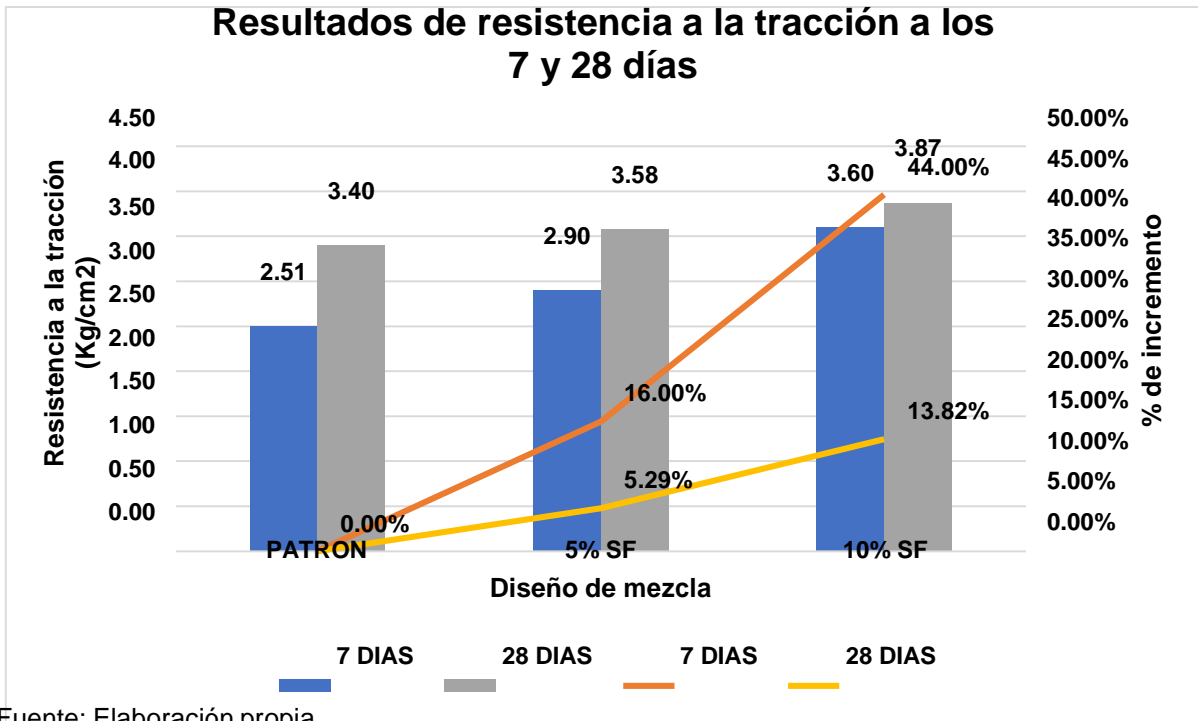
Tabla 16. Resultados de resistencia promedio del ensayo a tracción ASTM C-496 según la edad

Tipo de mezcla	7 días		28 días	
	Resistencia promedio (kg/cm ²)	P. diseño (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	P. diseño (%)
Patrón	2.51	0.00%	3.40	0.00%
5% SF	2.90	16.00%	3.58	5.29%
10% SF	3.60	44.00%	3.87	13.82%

Fuente: Elaboración propia

En la figura 18, de la gráfica se puede visualizar los resultados obtenidos para las muestras ensayadas a los 7 y 28 días de curado, luego de proceder a la realizar la rotura en los días indicados, se presenta la siguiente grafica resultados tomando en consideración la norma ASTM C-496 para resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad:

Figura 18. Representación gráfica de los resultados obtenidos de resistencia a la tracción a los 7 días y 28 días



Fuente: Elaboración propia

La figura 18, muestra los resultados obtenidos de las probetas de concreto celular de baja densidad el cual han sido curados a los 7 y 28 días para concreto patrón, con adición de 5% de humo de sílice y por ultimo 10% de humo de sílice, dichos resultados han mostrados una relación directamente proporcional tanto en incremento de resistencia en relación a la variación creciente del humo de sílice. Para los 7 días de curado, la relación de incremento de 5% de adición de humo de sílice comparando con el concreto patrón, hay un incremento del 16% y 44% relacionado a la adición de 10% de humo de sílice, y para la rotura de 28 días, las variaciones de incremento en relación al patrón con 5% y 10% de humo de sílice fueron de 5.29% y 13.82%.

Análisis estadístico e interpretación de los resultados

Se realiza el análisis de varianza (ANOVA) de un factor con la finalidad de comparar la igualdad de medias de 3 o más grupos independientes de distribución normal en una variable cuantitativa.

Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a los 7 días

Se realizó el análisis de varianza de un factor (ANOVA) con los datos obtenidos de los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días según el tipo de diseño de la mezcla de concreto celular de baja densidad, usando el rango múltiple Tukey para contrastar la diferencia estadística entre los diseños realizados. A continuación, se presentan las tablas de los resultados:

Tabla 17. *Análisis de la varianza de la resistencia a la compresión a los 7 días.*

Resistencia								
Tipo de mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Patrón	4	10.4518	.18411	.09206	10.1588	10.7447	10.23	10.66
5% SF	4	11.3178	.34510	.17255	10.7686	11.8669	10.98	11.77
10% SF	4	18.8440	.55630	.27815	17.9588	19.7292	18.22	19.49
Total	12	13.5378	3.95221	1.14091	11.0267	16.0489	10.23	19.49

Fuente: Elaboración propia

Característica estadística del análisis de varianza (ANOVA) ($0.01 < P < 0.05$), con significancia estadística alta, ya que el ANOVA ($P < 0.01$), gl (Grados de libertad) y F (F obtenido).

Tabla 18. Medias de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 7 días.

ANOVA					
Resistencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	170.432	2	85.216	552.801	.000
Dentro de grupos	1.387	9	.154	-	-
Total	171.820	11	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 18 se contrastan los intervalos de confianza a los 95% de confiables, usa las medias para cada tipo de diseño del concreto celular, en el cual los límites de confiabilidad muestran que a los 95% de certeza se obtendrán las resistencias de un testigo.

Tabla 19. Agrupación de la información de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 7 días usando el método Tukey con un factor de confianza de 95%.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Diseño de mezcla	(J) Diseño de mezcla	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Patrón	5% SF	-.86600*	.27763	.030	-1.6411	-.0909
	10% SF	-8.39225*	.27763	.000	-9.1674	-7.6171
5% SF	Patrón	.86600*	.27763	.030	.0909	1.6411
	10% SF	-7.52625*	.27763	.000	-8.3014	-6.7511
10% SF	Patrón	8.39225*	.27763	.000	7.6171	9.1674
	5% SF	7.52625*	.27763	.000	6.7511	8.3014

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Medias en subconjuntos homogéneos para la resistencia a la compresión del concreto celular de los 7 días.

Resistencia				
HSD Tukey ^a				
Diseño de mezcla	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Patron	4	10.4518		
5% SF	4		11.3178	
10% SF	4			18.8440
Sig.		1.000	1.000	1.000
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.				
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4.000.				

Fuente elaboración propia

Los resultados del análisis de la varianza de un factor (ANOVA) demuestra que la diferencia de las medias da como resultado una alta variación estadística, es decir que las diferencias estadísticas de las medias de la resistencia a la compresión a los 7 días del concreto celular patrón, concreto celular con 5% de humo de sílice y concreto celular con 10% de humo de sílice, tiene una alta diferencia conforme a las diferentes proporciones de mezcla. De acuerdo a la categoría múltiple de Tukey los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de los 3 grupos del concreto celular de baja densidad son estadísticamente diferentes entre ellos. Según la Tabla 20 la proporción que resultó mayor diferencia estadística en relación a la resistencia a la compresión fue el diseño de concreto celular de baja densidad 10% SF, siguiéndole el diseño 5% SF y el diseño patrón.

Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a los 28 días

Se realizó el análisis de varianza de un factor (ANOVA) con los datos obtenidos de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días según el tipo de diseño de la mezcla de concreto celular de baja densidad, usando el rango múltiple Tukey para contrastar la diferencia estadística entre los diseños realizados. A continuación, se presentan las tablas de los resultados:

Tabla 21. Análisis de la varianza de la resistencia a la compresión a los 28 días.

Resistencia								
Tipo de mezcla	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Patrón	10	12.7311	.56754	.17947	12.3251	13.1371	12.19	14.13
5% SF	10	15.5720	2.73234	.86404	13.6174	17.5266	11.03	19.40
10% SF	10	20.6450	.77194	.24411	20.0928	21.1972	19.09	22.12
Total	30	16.3160	3.69952	.67544	14.9346	17.6975	11.03	22.12

Fuente elaboración propia

Característica estadística del análisis de varianza (ANOVA) ($0.01 < P < 0.05$), con significancia estadística alta, ya que el ANOVA ($P < 0.01$), gl (Grados de libertad) y F (F calculado).

Tabla 22. Medias de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 28 días.

ANOVA					
Resistencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	321.453	2	160.726	57.514	.000
Dentro de grupos	75.453	27	2.795	-	-
Total	396.906	29	-	-	-

Fuente elaboración propia

En la Tabla 22 se visualizan los intervalos de confianza a los 95% de confiables, usa las medias para cada tipo de diseño del concreto celular, en el cual los límites de confiabilidad muestran que a los 95% de certeza se obtendrán las resistencias a la compresión del concreto celular de un testigo de cada tipo de diseño de mezcla.

Tabla 23. Agrupación de la información de la resistencia a la compresión del concreto celular a los 28 días usando el método Tukey con un factor de confianza de 95%.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Diseño de mezcla	(J) Diseño de mezcla	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Patrón	5% SF	-2.84090*	.74760	.002	-4.6945	-.9873
	10% SF	-7.91390*	.74760	.000	-9.7675	-6.0603
5% SF	Patrón	2.84090*	.74760	.002	.9873	4.6945
	10% SF	-5.07300*	.74760	.000	-6.9266	-3.2194
10% SF	Patrón	7.91390*	.74760	.000	6.0603	9.7675
	5% SF	5.07300*	.74760	.000	3.2194	6.9266

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Fuente elaboración propia

Tabla 24. Medias en subconjuntos homogéneos para la resistencia a la compresión del concreto celular de los 28 días.

Resistencia				
HSD Tukey ^a				
Diseño de mezcla	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Patrón	10	12.7311		
5% SF	10		15.5720	
10% SF	10			20.6450
Sig.		1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 10.000.

Fuente elaboración propia

El resultado del análisis de la varianza de un factor (ANOVA) demuestra que la diferencia de las medias da como resultado una alta variación estadística, es decir que las diferencias estadísticas de las medias de la resistencia a la compresión a los 28 días del concreto celular patrón, concreto celular con 5% de humo de sílice y concreto celular con 10% de humo de sílice, tiene una alta diferencia conforme a las

diferentes proporciones de mezcla. De acuerdo a la categoría múltiple de Tukey los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de los 3 grupos del concreto celular de baja densidad son estadísticamente diferentes entre ellos. Según la Tabla 24 la proporción que demostró mayor diferencia estadística en relación a la resistencia a la compresión fue el diseño de concreto celular de baja densidad 10% SF, siguiéndole el diseño 5% SF y el diseño patrón.

Análisis estadístico de la resistencia a la tracción a los 7 días

Se realizó el análisis estadístico de varianza ANOVA proveniente de los datos obtenidos de laboratorio de tres tipos de mezcla ensayado para evaluar la resistencia a la tracción diametral del concreto celular de baja densidad a los 7 días de curado, así mismo se aplicó el rango múltiple Tukey para determinar la diferencia y comparación con los grupos de control, a continuación, se muestra los resultados:

Tabla 25. *Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción a los 7 días.*

Resistencia								
	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Patrón	4	2.5050	.33907	.16953	1.9655	3.0445	2.01	2.77
5% SF	4	2.9000	.30299	.15149	2.4179	3.3821	2.57	3.20
10% SF	4	3.6000	.63498	.31749	2.5896	4.6104	2.84	4.20
Total	12	3.0017	.62450	.18028	2.6049	3.3985	2.01	4.20

Fuente: Elaboración propia

Con un análisis ANOVA de ($001 < P < 0.05$); así mismo con una alta significancia estadística en el ANOVA ($P < 0.01$); teniendo con gl (Grados de libertad) y F (F obtenido del cálculo).

Tabla 26. Medias de la resistencia a la tracción del concreto a los 7 días.

ANOVA					
Resistencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2.460	2	1.230	6.050	.022
Dentro de grupos	1.830	9	.203	-	-
Total	4.290	11	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla 26, se visualiza los intervalos de confianza obtenidos con 95% de confiabilidad, así como las medias obtenidas de cada diseño de mezcla. Los rangos de confiabilidad corresponden a los rangos que a los 95% de certeza corresponde a una probeta de cada diseño de mezcla elegido al azar.

Tabla 27. Agrupación de la información de resistencia a la tracción del concreto celular a los 7 días utilizando el método Tukey con un factor de confianza del 95%.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Diseño de mezcla	(J) Diseño de mezcla	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Patrón	5% SF	-.39500	.31884	.462	-1.2852	.4952
	10% SF	-1.09500*	.31884	.018	-1.9852	-.2048
5% SF	Patrón	.39500	.31884	.462	-.4952	1.2852
	10% SF	-.70000	.31884	.125	-1.5902	.1902
10% SF	Patrón	1.09500*	.31884	.018	.2048	1.9852
	5% SF	.70000	.31884	.125	-.1902	1.5902

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Medias en subconjuntos homogéneos en la resistencia a la tracción a los 7 días

Resistencia			
HSD Tukey ^a			
Diseño de mezcla	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
Patrón	4	2.5050	
5% SF	4	2.9000	2.9000
10% SF	4		3.6000
Sig.		.462	.125
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.			
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4.000.			

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos del análisis estadístico ANOVA demostró una alta variación estadística, ello significa que la diferencia estadística de las medias obtenidas de la resistencia a la tracción a los 7 días tuvo una diferencia en relación a las diferentes proporciones de las mezclas obtenidas. Según el análisis Tukey realizado a los tres tipos de mezclas ha mostrado una diferencia estadística de medias, como se muestra en la tabla 28 el diseño de mezcla que mostro un mayor valor en relación a las otras es con 10% de SF, seguidamente el 5% de SF y finalmente la muestra Patrón.

Análisis estadístico de la resistencia a la tracción a los 28 días

Se realizó en análisis estadístico de varianza ANOVA que se obtuvo de los datos de laboratorio de los diseños de mezcla de la resistencia a la tracción diametral a los 28 días, aplicando el rango múltiple Tukey para obtener la diferencia estadística de los grupos propuestos, a continuación, se presenta los siguientes resultados:

Tabla 29. Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción a los 28 días.

Resultados								
	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Patrón	10	6.0630	.13392	.04235	5.9672	6.1588	5.93	6.39
5% SF	10	6.6850	.59690	.18876	6.2580	7.1120	5.65	7.49
10% SF	10	7.7250	.14509	.04588	7.6212	7.8288	7.43	8.00
Total	30	6.8243	.78036	.14247	6.5329	7.1157	5.65	8.00

Fuente: Elaboración propia

Con carácter estadístico ANOVA ($0.01 < P < 0.05$); con alta significación estadística en el ANOVA ($P < 0.01$); así como gl (grados de libertad); F (F obtenido de calculado).

Tabla 30. Medias de la resistencia a la tracción del concreto celular a los 28 días.

ANOVA					
Resistencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	14.102	2	7.051	53.516	.000
Dentro de grupos	3.558	27	.132	-	-
Total	17.660	29	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30 se muestra en intervalo de confianza, así como las medias obtenidas para los tres diseños de mezcla propuestos. El límite de confiabilidad que se muestra al rango de 95% será obtenido de cada tipo de diseño de mezcla elegido al azar.

Tabla 31. Agrupación de información de la resistencia a la tracción del concreto celular a los 28 días haciendo uso del método Tukey con factor de confianza de 95%.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Diseño de mezcla	(J) Diseño de mezcla	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Patrón	5% SF	-.62200*	.16233	.002	-1.0245	-.2195
	10% SF	-1.66200*	.16233	.000	-2.0645	-1.2595
5% SF	Patrón	.62200*	.16233	.002	.2195	1.0245
	10% SF	-1.04000*	.16233	.000	-1.4425	-.6375
10% SF	Patrón	1.66200*	.16233	.000	1.2595	2.0645
	5% SF	1.04000*	.16233	.000	.6375	1.4425

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Medias en subconjuntos homogéneos de resistencia a la tracción a los 28 días

Resistencia				
HSD Tukey ^a				
Diseño de mezcla	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Patrón	10	6.0630		
5% SF	10		6.6850	
10% SF	10			7.7250
Sig.		1.000	1.000	1.000
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.				
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 10.000.				

Fuente: Elaboración propia

El resultado del análisis estadístico de varianza ANOVA ha mostrado que la diferencia entre los tres diseños de mezcla propuesto a base concreto celular con

adición de 5% y 10% de humo de sílice mostro una alta variación estadística, tuvo una importante diferencia estadística en las medias obtenidas de la resistencia a la tracción a los 28 días de los diferentes grupos. Así mismo, según el rango Tukey aplicado a la resistencia a la tracción de los tres grupos de concreto celular propuesto a determinado que los datos estadísticos son diferentes entre sí. Según se muestra en la tabla 32 la mayor proporción que mostro una mejor respuesta en relación a la resistencia a la tracción es el tipo de mezcla con 10% de SF, continuando con 5% de SF y finalmente con el diseño Patrón.

V. DISCUSIÓN

DG: AHMAD, Muhammad, CHEN, Bing y SHAH, Syed (2020), llega a comprobar en sus resultados que al reemplazar el cemento con 5% y 10% se humo de sílice (SF) mejora las propiedades mecánicas (Compresión y tracción) del concreto celular de baja densidad, de la misma manera se logra cumplir en la presente investigación demostrando que se da mayor crecimiento de 63.55% en compresión y 13.82% en tracción para la mezcla con 10% de humo de sílice (SF) en relación al concreto patrón, todos ellos al realizar la prueba de rotura en el laboratorio a los 28 días.

DE1: AHMAD et al. (2020), logra comprobar en sus resultados de su investigación que el reemplazo de humo de sílice (SF) en porcentajes en peso del cemento mejora la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad (800 kg/m^3), alcanzando hasta 44.6% más que la mezcla patrón, usando 10% de SF, de la misma manera la presente investigación demuestra un crecimiento de 80% para la mezcla con 10% de humo de sílice al realizar la prueba de rotura de compresión a los 7 días, con respecto a la mezcla patrón; y a los 28 días de haber realizado la rotura de compresión se observa un incremento de 28.75% cuando se reemplaza el cemento con 5% de humo de sílice, también se demuestra un incremento de 63.55% cuando se reemplaza el cemento con 10% de humo de sílice todos ellos con respecto al concreto al diseño de concreto patrón.

DE2: AHMAD et al. (2020), comprobó en los resultados de su artículo de investigación que el reemplazo del humo de sílice (SF) en porcentajes del peso de cemento (5% y 10%), mejora la resistencia a la tracción del concreto celular en 32% y 50% con respecto al concreto patrón; en el caso de la presente investigación el resultado a los 7 días de prueba en el laboratorio muestra la misma tendencia de creciente de 16% cuando se reemplaza el cemento con 5% de humo de sílice y un crecimiento de 44% cuando se reemplaza el cemento con 10% de humo de sílice,

todos ellos en relación con el diseño de la mezcla patrón. Y los resultados a los 28 días de prueba de tracción diametral en el laboratorio muestra un incremento de 5.29% cuando se usa 5% de humo de sílice (SF) y un incremento de 13.82% cuando se utiliza 10% de humo de sílice (SF) todos ellos con respecto al diseño del concreto patrón.

VI. CONCLUSIONES

Del diseño de mezcla del concreto celular de baja densidad con peso específico de 818 kg/m^3 , en el cual se reemplaza el cemento en peso con 5% y 10% de humo de sílice, se llega a la siguiente conclusión:

CG: El humo de sílice (SF) mejora las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad, en la resistencia mecánica de compresión el incremento es de 63.6% cuando se reemplaza el cemento con 10% de humo de sílice (SF) con respecto al diseño del concreto patrón, y en la resistencia mecánica de tracción diametral, el humo de sílice (SF) mejora en 13.8% cuando se reemplaza el cemento por 10% de humo de sílice con respecto al diseño del concreto patrón.

CE1: El humo de sílice (SF) incrementa la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad en 28.8% cuando se reemplaza el cemento con 5% de humo de sílice y un incremento de 63.6% cuando se reemplaza el cemento con 10% de humo de sílice, todo ello con respecto al concreto patrón.

CE2: El humo de sílice (SF) incrementa la resistencia a la tracción en 5.3% con respecto al diseño del concreto patrón cuando se usa 5% de humo de sílice (SF), e incrementa en 13.8% cuando se reemplaza el cemento con 10% de humo de sílice (SF) con respecto al diseño del concreto patrón.

VII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso de este tipo de concreto celular en unidades de albañilería de tipo NP que de acuerdo a la Norma Técnica E.070 albañilería, la resistencia a compresión es de 20 kg/cm^2 , el cual se cumple con el reemplazo de 10% de humo de sílice (SF).
2. Se recomienda utilizar este tipo de concreto celular de baja densidad como unidades de tabiquería de cierre y divisiones de construcciones aporticadas en el cual su función no es reforzar el edificio.
3. Se recomienda el uso de este tipo de concreto celular de baja densidad en bloque de losas aligeradas.
4. Se recomienda realizar investigaciones con mayor porcentaje de reemplazo de humo de sílice (SF) en peso del cemento, para observar la evolución con mayor exactitud de la resistencia a la compresión y tracción diametral del concreto celular de baja densidad.

REFERENCIAS

AHMAD, Muhammad, CHEN, Bing y SHAH, Syed. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and building Materials* [en línea]. 28 de mayo 2019. Vol. 220. [fecha de consulta: 5 de mayo de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171>

BINDIGANAVILE, Vivek y HOSEINI, Meghdad. Foamed concrete. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* [en línea]. 2019. [fecha de consulta: 30 de abril de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00016-2>

CHAO, Sun, et al. Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete. *Construction Building Materials*, [en línea]. Mayo-agosto 2018. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.019>

CHICA, Lina y ALZATE, Albert. Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, [en línea]. Octubre-diciembre 2018. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>

D. Panesar. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction Building Materials*, [en línea]. Febrero-abril 2013. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>

Diseño y Control de Mezclas de Concreto por Kosmatka, Steven [*et al.*]. [en línea]. Mexico, 2004 [Fecha de consulta: 6 de mayo de 2020]. Disponible en: [https://www.academia.edu/download/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto - PCA.pdf](https://www.academia.edu/download/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf)

ISBN: 0893122335

FUAT, Koksai, OSMAN, Gencal, y MEHMET, Kaya. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction Building Materials*, [en línea]. Marzo-abril 2015. [Fecha de consulta: 2 de mayo de 2020].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021>

GÓMEZ, Sergio. Metodología de la Investigación. México: Red Tercer Milenio, 2012. 88 pp.

ISBN: 9786077331490

HAMAD, Ali. Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review. *International Journal of Materials Science and Engineering*, [en línea]. Diciembre 2014, vol. 2, n.º 2 [Fecha de consulta: 02 de mayo de 2020].

Disponible

https://www.academia.edu/download/61836689/gas_concrete_info20200120-80070-1bqtihl.pdf

HARMSSEN, Teodoro. Diseño de estructuras de concreto armado. 3ra ed. Fondo editorial: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2002. 679 pp.

HERNANDEZ, Roberto. Metodología de la investigación. 6 ta ed. México: McGrawHill, 2014. 634 pp.

ISBN: 9781456223960

J. Esfandiari and P. Loghmani. Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement* [en línea]. Abril-julio 2019. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.074>

LOZADA Arraya, Jaime. Diseño de concreto celular para diferentes densidades, análisis de sus propiedades y sus aplicaciones. Tesis (Ingeniero Civil). Arequipa. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017.

MEHTA, Ankur y KUMAR, Deepankar. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering* [en línea]. Mayo 2020. Vol. 29 [fecha de consulta: 5 de mayo de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100888>

ISSN: 2352-7102

PEÑA, Cecilia y ZAMBRANO, Fulton. Hormigón celular con la utilización de materiales locales. Tesis (Ingeniero Civil). Ecuador. Escuela Superior Politécnica, 2001.

RAFAT, Siddique. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*. [en línea]. Marzo-junio 2011. [Fecha de consulta: 5 de mayo de 2020].

Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>

SANCHEZ, Hugo. Metodología y Diseño en la Investigación Científica. Edit. Mantaro, Lima-Perú. 1998

SHE, Wei [et al]. Application of organic- and nanoparticle- modified foams in foamed concrete: reinforcement and stabilization mechanisms. *Investigación de cemento y concreto* [en línea]. Abril 2019. Vol. 106 [Fecha de consulta: 29 de abril 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.020>

SHERONG, Zhan, et al. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction Building Materials* [en línea]. Agosto-diciembre 2019. [Fecha de consulta: 4 de mayo de 2020].

Disponible en

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>

Silica Fume and Nanosilica Effects on Mechanical and Shrinkage Properties of Foam Concrete of Structural Application por Jianqing Gong, [et al.]. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 20 [en línea]. Enero-abril 2020, [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2020/3963089>

SWAPNADARSHI, Sritam, RANJANI, Indu y KHWAIRAKPAM, Selija. State-of-the-Art Review on the Characteristics of Surfactants and Foam from Foam Concrete Perspective. *J. Inst. Eng. India Ser. A*, [en línea]. Noviembre-febrero 2018, [Fecha de consulta: 30 de abril de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0288-5>

TANYILDIZI, Harun y COSKUN Ahmet. Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperatura. *Construction and Building Materials* [en línea]. 21 de julio 2007. Vol. 22 [fecha de consulta: 5 de mayo de 2020]. Disponible en www.sciencedirect.com

ISSN: 0950-0618

WANG, Xin [et al]. Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete. *Construction and Building Materials* [en línea]. 28 de septiembre 2019, vol. 237. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117514>

YOUM, Kwang-Soo [et al]. Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Costruction and Building Materials* [en línea]. 30 de enero 2016. Vol. 114 [fecha consulta: 4 de mayo de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.165>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia

Influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad Lima-2020						
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Operacionalización de variables			Diseño metodológico
¿Cuál es la influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad?	Determinar la influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad.	El humo de sílice mejora las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad.	VI: Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	Método
			Humo de sílice	Dosificación	Humo de Sílice (0% 5% y 10%)	Científico
				Propiedades Químicas	85-95% óxido de Silicio SiO ₂	Enfoque
				Propiedades Físicas	-Densidad -Tamaño de partícula -Superficie específica	Cuantitativo
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicos				Tipo
¿Cuál es el efecto del humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad?	Determinar el efecto del humo de sílice en la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad.	El humo de sílice incrementa la resistencia a la compresión del concreto celular de baja densidad.	VD: Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Aplicada
						Experimental
¿Cuál es la influencia del humo de sílice en la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad?	Determinar la influencia del humo de sílice en la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad.	El humo de sílice incrementa la resistencia a la tracción del concreto celular de baja densidad.	Propiedades mecánicas del concreto celular	Compresión	Capacidad de carga según norma ASTM C-495	Nivel
				Tracción	Carga máxima aplicada según norma ASTM C-496	Explicativo
						Diseño
						Experimental Tipo Cuasi-experimental
						Instrumento
						Ficha de recolección
						Población
						Indeterminada
						Muestra: 78 probetas
						Muestreo: No probabilístico

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Matriz de Operacionalización de Variables

Variable (VI)	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Humo de Sílice	El humo de sílice se obtiene a partir de la quema de cuarzo, leña o carbón a temperaturas de 2000 °C, debido a ello es un residuo industrial ultra fino no biodegradable que tiene forma esférica, de color gris o blanco, posee 75% de sílice en su estructura es conocido también como micro sílice (Siddique, 2011)	Se realizara los procedimientos establecidos según la norma ASTM 1240 para entender las aplicaciones del Humo de sílice en el concreto celular.	Dosificación	Porcentaje de humo de sílice (0%, 5%, 10%)	porcentaje
			Propiedades Químicas	85 a 96% de óxido de silicio (SiO ₂)	porcentaje
			Propiedades físicas	Densidad	Kg/m ³
				Densidad específica	kg/m ²
			Tamaño de partícula	micra	
Variable (VD)	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Propiedades mecánicas del concreto celular	Las propiedades que lo caracterizan son una mejorar capacidad de deformación por tracción, coeficiente de expansión térmica mínima, así como una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico producto de la estructura de poros (Hamad, 2014)	Se realizara los procedimientos establecidos según la norma ASTM C-495 y ASTM C-496 para comprender el comportamiento del concreto celular en cuanto a su resistencia a la compresión y tracción.	Compresión	Capacidad de Carga según la Norma ASTM C-495	kg/cm ²
			Tracción	Capacidad máxima aplicada según Norma ASTM C-496	kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Diseño de mezcla patrón

INSUMO	NOMENCLATURA	UNIDAD	PRUEBA	METRADO
			Kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (Kg/m ³)	Kg	590.00	11.182
Agua	w (Kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (Kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice (SF)	SF (g/m ³)	Kg	0.00	0.000
Ratio 1	w/c		0.30	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Diseño de mezcla con adición de 5% de humo de sílice

DISEÑO DE MEZCLA CON 5% DE HUMO DE SÍLICE				
INSUMO	NOMENCLATURA	UNIDAD	PRUEBA	METRADO
			Kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (Kg/m ³)	Kg	560.50	10.623
Agua	w (Kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (Kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice (SF)	SF (g/m ³)	Kg	29.50	0.559
Ratio 1	w/c		0.30	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Diseño de mezcla con adición de 10% de humo de sílice

DISEÑO DE MEZCLA CON 10% DE HUMO DE SÍLICE				
INSUMO	NOMENCLATURA	UNIDAD	PRUEBA	METRADO
			Kg/m ³	0.019
Cemento Andino Tipo I	c (Kg/m ³)	Kg	531.00	10.064
Agua	w (Kg/m ³)	Kg	177.00	3.355
Foamin C	f (Kg/m ³)	Kg	50.88	0.964
Humo de sílice	SF (g/m ³)	Kg	59.00	1.118
Ratio 1	w/c		0.30	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Ficha de recolección de datos Peso Unitario ASTM C-138

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
--

OBRA	Influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad Lima-2020
SOLICITANTE	
RESPONSABLE	
UBICACIÓN	
FECHA DE EMISIÓN	

PESO UNITARIO DEL CONCRETO NORMA ASTM C-138
--

Item	Descripción	Und	Identificación			Pomedio
			P.	P.5%	P.10%	
A	PESO DEL RECIPIENTE+PESO DEL CONCRETO	(gr.)	874.00	868.00	855.00	865.67
B	PESO DEL RECIPIENTE	(gr.)	56.00	56.00	56.00	56.00
C	VOLUMEN INTERNO DEL RECIPIENTE	(l)	1.000	1.000	1.000	1.00
D	PESO DEL CONCRETO=A-B	(gr.)	818.00	812.00	799.00	809.67
E	PESO UNITARIO=D/C	(gr/l)	818.00	812.00	799.00	809.67
	PESO UNITARIO	(Kg/m ³)	818.00	812.00	799.00	809.67

OBSERVACIONES:

Anexo 7. Ficha de recolección de datos Ensayo de asentamiento ASTM C-1611

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS
--

OBRA	Influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad Lima-2020
SOLICITANTE	
RESPONSABLE	
UBICACIÓN	
FECHA DE EMISIÓN	

ENSAYO DE ASENTAMIENTO NORMA ASTM C-1611

Tipo de concreto celular	Cantidad de SF	Slump		Valor promedio	
		Centímetros	Pulgadas	Centímetros	Pulgadas
Concreto Patrón	0.00 kg	63.50	25.00	63.25	24.90
		63.00	24.80		
Concreto con 5% de SF	0.590 kg	62.00	24.41	62.05	24.43
		62.10	24.45		
Concreto con 10% de SF	1.180 kg	60.50	23.82	60.85	23.96
		61.20	24.09		

Anexo 8. Ficha de recolección de datos humo de sílice ASTM C-1240

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
--

OBRA	Influencia del humo de sílice relacionado a las propiedades mecánicas del concreto celular de baja densidad Lima-2020
SOLICITANTE	
RESPONSABLE	
UBICACIÓN	
FECHA DE EMISIÓN	

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS HUMO DE SÍLICE NORMA ASTM C-1240

NOMBRE DEL FABRICANTE:

Descripción	Unidad	Norma	Fabricante
Contenido de SiO ₂ min.	%	85.00	-
Contenido de humedad máx.	%	3.00	-
Pérdida por ignición máx.	%	6.00	-
De gran tamaño,% retenido 45 µm máx.	%	10	-
Densidad aparente	Kg/m ³	-	-
Densidad	Kg/m ³	-	-
Índice de actividad de fuerza puzolánica acelerada	-	-	-
Superficie específica min.	m ² /g	min 15	-
Alcalis disponibles, como Na ₂ O equivalente	%	-	-

Anexo 9. Detalle fotográfico de la preparación de Concreto Celular

Figura 19. Materiales utilizados para elaborar Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Pesaje de humo de sílice



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Pesaje de cemento



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Máquina de control para generar espuma



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Espuma preformada



Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Características de la espuma preformada



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Preparación de mortero



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Mezcla de mortero con espuma preformada



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Ensayo de trabajabilidad de Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Determinación del diámetro generado por el Concreto Celular auto-consolidante



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Determinación del peso unitario del Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Llenado de los moldes



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Testigos de Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Curado de testigos de Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

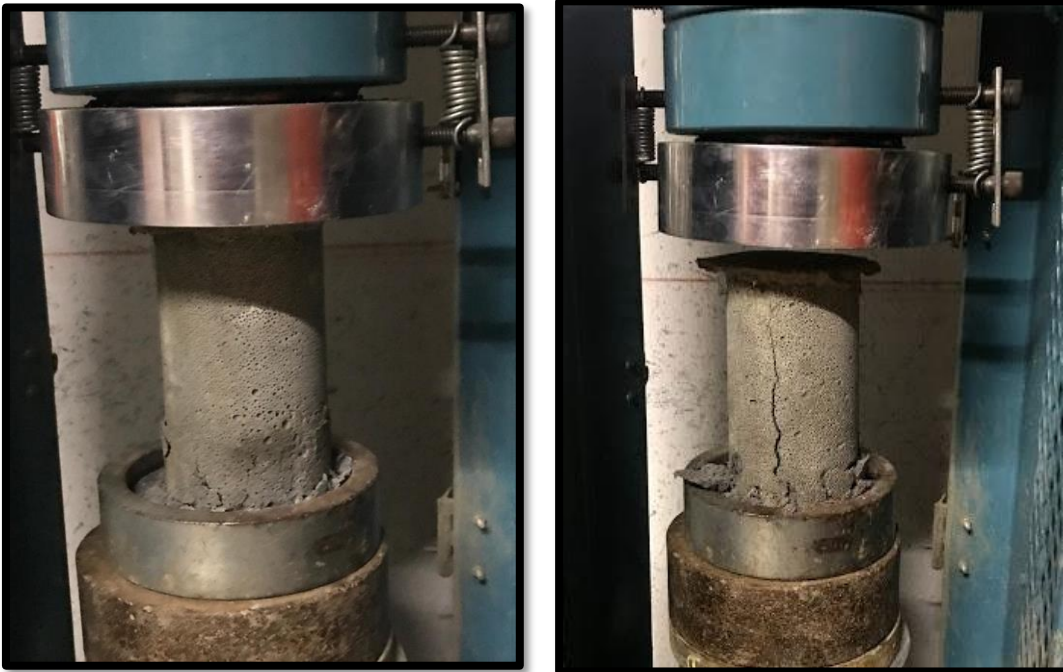
Anexo 10. Ensayo de compresión y tracción diametral a los 7 días

Figura 33. Probetas de Concreto Celular curado a 7 días



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Ensayo de resistencia a la compresión de probetas de Concreto Celular



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Rotura de probetas a compresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Ensayo de Resistencia a la Tracción



Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Ensayo de Resistencia a la Tracción



Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Probetas ensayadas en laboratorio para resistencia a la compresión y tracción.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Ensayo de compresión y tracción diametral a los 28 días

Figura 39. Ensayo de resistencia a tracción



Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Resultados del ensayo de resistencia a la tracción a los 7 días



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

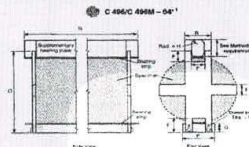
www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	FORMATO	Código	AE-FO-125
	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO CILÍNDRICO	Versión	01
		Fecha	30-04-2016
		Página	1 de 1

TESIS	: Influencia del Humo de Silicio relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020		
SOLICITANTE	: De la Cruz Llocila, Luis David/ Mucho Ticona, Edson Jhimmy	REALIZADO POR	: P. Tasyco
CÓDIGO DE PROYECTO	: ---	REVISADO POR	: D. Cooto
UBICACIÓN DE PROYECTO	: Lima	FECHA DE ENSAYO	: 21/09/2020
FECHA DE EMISIÓN	: 21/09/2020	TURNOS	: Diurno
Tipo de muestra	: Concreto endurecido		
Presentación	: Especímenes Cilíndricos		
Fc de diseño	: 50 kg/cm2		

RESISTENCIA A LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE CONCRETO ENDURECIDO ASTM C496

IDENTIFICACIÓN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD	DIAMETRO (CM)	CARGA (KG)	RESISTENCIA (KG/CM2)
10%-T1	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	502.2	3 kg/cm2
10%-T2	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	713.3	4 kg/cm2
10%-T3	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	586.6	3 kg/cm2
10%-T4	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	742.0	4 kg/cm2
P-T1	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	455.8	3 kg/cm2
P-T2	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	356.0	2 kg/cm2
P-T3	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	490.1	3 kg/cm2
P-T4	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	470.1	3 kg/cm2
5%-T1	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	480.0	3 kg/cm2
5%-T2	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	565.0	3 kg/cm2
5%-T3	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	550.0	3 kg/cm2
5%-T4	14/09/2020	21/09/2020	7 días	7.5	454.0	3 kg/cm2



OBSERVACIONES:

- * Muestras elaboradas y curadas por el personal técnico de MTL GEOTECNIA.
- * Las muestras cumplen con las dimensiones dadas en la norma de ensayo.
- * Prohibida la reproducción total o parcial del presente documento sin la autorización escrita de MTL GEOTECNIA.

Elaborado por: 	Revisado por: MTL GEOTECNIA S.A.C Suelos Concreto Asfalto Eimer Moreno Huaman INGENIERO CIVIL C. P. N. 210596	Aprobado por: MTL GEOTECNIA SAC CONTROL DE CALIDAD
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 13. Resultados de los ensayos de resistencia a la tracción a los 28 días



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	FORMATO	Código	AE-FO-125
	MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE ESPECIMENES DE CONCRETO CILINDRICO	Versión	01
		Fecha	30-04-2018
		Página	1 de 1

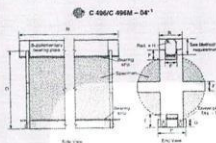
TEBIS : Influencia del Humo de Silice relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020

SOLICITANTE : De la Cruz Llodia, Luis David/ Mucho Ticona, Edson Jimmy REALIZADO POR : P. Tassayo
 CÓDIGO DE PROYECTO : --- REVISADO POR : D. Cocio
 UBICACIÓN DE PROYECTO : Lima FECHA DE ENSAYO : 12/10/2020
 FECHA DE EMISIÓN : 12/10/2020 TURNO : Duño

Tipo de muestra : Concreto endurecido
 Presentación : Especímenes Cilíndricos
 Fc de diseño : 50 kg/cm²

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE CONCRETO ENDURECIDO ASTM C496

IDENTIFICACIÓN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD	DIAMETRO (CM)	CARGA (KG)	RESISTENCIA (KG/CM ²)
P1	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	626.2	4 kg/cm ²
P2	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	557.1	3 kg/cm ²
P3	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	574.0	3 kg/cm ²
P4	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	642.7	4 kg/cm ²
5.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	612.0	3 kg/cm ²
5.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	640.0	4 kg/cm ²
5.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	646.7	4 kg/cm ²
5.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	635.0	4 kg/cm ²
10.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	711.9	4 kg/cm ²
10.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	616.4	3 kg/cm ²
10.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	800.1	5 kg/cm ²
10.0%	14/09/2020	12/10/2020	28 días	7.5	607.7	3 kg/cm ²



OBSERVACIONES:

- Muestras elaboradas y curadas por el personal técnico de MTL GEOTECNIA.
- Las muestras cumplen con las dimensiones dadas en la norma de ensayo.
- Prohibida la reproducción total o parcial del presente documento sin la autorización escrita de MTL GEOTECNIA.

Elaborado por: 	Revisado por: 	Aprobado por:
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 14. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	CC-MTL
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio
SOLICITANTES	: De la Cruz Lloclla, Luis David/ Mucho Ticona, Edson Jhimmy
TESIS	: Influencia del Humo de Silice relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020
UBICACIÓN	: Lima
	Fecha de emisión: 21/09/2020

IDENTIFICACIÓN DE ESPECIMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F _c Diseño kg/cm ²	% F _c
10%-C1	14/09/2020	21/09/2020	7	805.0	44.2	18.2	50.0	36.4
10%-C2	14/09/2020	21/09/2020	7	861.0	44.2	19.5	50.0	39.0
10%-C3	14/09/2020	21/09/2020	7	821.0	44.2	18.6	50.0	37.2
10%-C4	14/09/2020	21/09/2020	7	843.0	44.2	19.1	50.0	38.2
P-C1	14/09/2020	21/09/2020	7	471.0	44.2	10.7	50.0	21.3
P-C2	14/09/2020	21/09/2020	7	459.0	44.2	10.4	50.0	20.8
P-C3	14/09/2020	21/09/2020	7	485.0	44.2	10.5	50.0	21.1
P-C4	14/09/2020	21/09/2020	7	452.0	44.2	10.2	50.0	20.5
5%-C1	14/09/2020	21/09/2020	7	520.0	44.2	11.8	50.0	23.5
5%-C2	14/09/2020	21/09/2020	7	485.0	44.2	11.0	50.0	22.0
5%-C3	14/09/2020	21/09/2020	7	492.0	44.2	11.1	50.0	22.3
5%-C4	14/09/2020	21/09/2020	7	503.0	44.2	11.4	50.0	22.8

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material referentante
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de MTL GEOTECNIA

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 15. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días de concreto patrón



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO	Código	FOR-LAB-CO-009
	COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Revisión	2
		Aprobado	CC-MTL
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio
SOLICITANTES	: De la Cruz Lloclla, Luis David/ Mucho Tricona, Edson Jhimmy
TESIS	: Influencia del Humo de Sílice relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020
UBICACIÓN	: Lima Fecha de emisión: 12/10/2020

IDENTIFICACIÓN DE ESPECÍMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F'c Diseño kg/cm ²	% F'c
PATRÓN-C1	14/09/2020	12/10/2020	28	538.4	44.2	12.2	50.0	24.4
PATRÓN-C2	14/09/2020	12/10/2020	28	624.1	44.2	14.1	50.0	28.3
PATRÓN-C3	14/09/2020	12/10/2020	28	558.5	44.2	12.6	50.0	25.3
PATRÓN-C4	14/09/2020	12/10/2020	28	541.7	44.2	12.3	50.0	24.5
PATRÓN-C5	14/09/2020	12/10/2020	28	580.6	44.2	13.1	50.0	26.3
PATRÓN-C6	14/09/2020	12/10/2020	28	544.3	44.2	12.3	50.0	24.6
PATRÓN-C7	14/09/2020	12/10/2020	28	552.9	44.2	12.5	50.0	25.0
PATRÓN-C8	14/09/2020	12/10/2020	28	559.2	44.2	12.7	50.0	25.3
PATRÓN-C9	14/09/2020	12/10/2020	28	556.4	44.2	12.6	50.0	25.2
PATRÓN-C10	14/09/2020	12/10/2020	28	568.3	44.2	12.9	50.0	25.7

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material referentante
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de MTL GEOTECNIA

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 16. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días con adición de 5% de SF



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	CC-MTL
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio	
SOLICITANTES	: De la Cruz Uoclla, Luis David/ Mucho Ticona, Edson Jhimmy	
TESIS	: Influencia del Humo de Silice relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020	
UBICACIÓN	: Lima	Fecha de emisión: 12/10/2020

IDENTIFICACIÓN DE ESPECIMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F _c Diseño kg/cm ²	% F _c
5%+SF-C1	14/09/2020	12/10/2020	28	549.5	44.2	12.4	50.0	24.8
5%+SF-C2	14/09/2020	12/10/2020	28	601.3	44.2	13.6	50.0	27.2
5%+SF-C3	14/09/2020	12/10/2020	28	487.4	44.2	11.0	50.0	22.1
5%+SF-C4	14/09/2020	12/10/2020	28	625.2	44.2	14.2	50.0	28.3
5%+SF-C5	14/09/2020	12/10/2020	28	690.3	44.2	15.6	50.0	31.3
5%+SF-C6	14/09/2020	12/10/2020	28	760.6	44.2	17.2	50.0	34.4
5%+SF-C7	14/09/2020	12/10/2020	28	793.0	44.2	17.9	50.0	35.9
5%+SF-C8	14/09/2020	12/10/2020	28	857.1	44.2	19.4	50.0	38.8
5%+SF-C9	14/09/2020	12/10/2020	28	1171.8	44.2	26.5	50.0	53.0
5%+SF-C10	14/09/2020	12/10/2020	28	704.1	44.2	15.9	50.0	31.9

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material referente
- * Prohíbese la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de MTL GEOTECNIA

Elaborado por: 	Revisado por: MTL GEOTECNIA S.A.C. Ingeniero de Suelos y Pavimentos Elmer Moreno Huaman INGENIERO CIVIL C.P. N° 210906	Aprobado por: MTL GEOTECNIA SAC CONTROL DE CALIDAD
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 17. Resultado de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días con adición de 10% de SF



(511) 457 2237 / 989 349 903
 Jr. La Madrid 264 Asociación Los Olivos,
 San Martín de Porres - Lima
 informes@mtlgeotecniasac.com

www.mtlgeotecniasac.com

LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES	CERTIFICADO DE ENSAYO COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO	Código	FOR-LAB-CO-009
		Revisión	2
		Aprobado	CC-MTL
		Fecha	16/03/2020

LABORATORIO DE CONCRETO Y AGREGADOS
 ASTM C39-07 / NTP 339.034-11

REFERENCIA	: Datos de laboratorio		
SOLICITANTES	: De la Cruz Uoclla, Luis David/ Mucho Ticona, Edson Jhimmy		
TESIS	: Influencia del Humo de Silice relacionado a las propiedades Mecánicas del Concreto Celular de baja Densidad Lima-2020		
UBICACIÓN	: Lima	Fecha de emisión:	12/10/2020

IDENTIFICACIÓN DE ESPECÍMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD EN DÍAS	FUERZA MÁXIMA kgf	ÁREA cm ²	ESFUERZO kg/cm ²	F _c Diseño kg/cm ²	% F _c
10%-C1	14/09/2020	12/10/2020	28	917.0	44.2	20.8	50.0	41.5
10%-C2	14/09/2020	12/10/2020	28	941.9	44.2	21.3	50.0	42.6
10%-C3	14/09/2020	12/10/2020	28	896.9	44.2	20.3	50.0	40.6
10%-C4	14/09/2020	12/10/2020	28	977.4	44.2	22.1	50.0	44.2
10%-C5	14/09/2020	12/10/2020	28	843.5	44.2	19.1	50.0	38.2
10%-C6	14/09/2020	12/10/2020	28	898.2	44.2	20.3	50.0	40.6
10%-C7	14/09/2020	12/10/2020	28	908.6	44.2	20.5	50.0	41.0
10%-C8	14/09/2020	12/10/2020	28	912.3	44.2	20.7	50.0	41.3
10%-C9	14/09/2020	12/10/2020	28	920.4	44.2	20.8	50.0	41.7
10%-C10	14/09/2020	12/10/2020	28	908.9	44.2	20.6	50.0	41.1

EQUIPO DE ENSAYO

Capacidad máxima 250 000 Lb, división de escala 0.1 kN

OBSERVACIONES:

- * No se observaron fallas atípicas en las roturas
- * El ensayo fue realizado haciendo uso de almohadillas de neopreno como material referentante
- * Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita del área de Calidad de MTL GEOTECNIA

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
Jefe de Laboratorio	Ingeniero de Suelos y Pavimentos	Control de Calidad MTL GEOTECNIA

Anexo 18. Certificado de calibración de la prensa



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP 150 / IEC 17025:2017

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN TC-1597-2020

PROFORMA : 2543A Fecha de emisión : 2020 - 07 - 30 Página : 1 de 2

SOLICITANTE : MTL GEOTECNIA S.A.C.
Dirección : Cal. La Madrid Nro. 264 Apc. Los Olivos Lima - Lima - San Martín De Porres

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : PRENSA DE CONCRETO
 Marca : FORNEY
 Marca del indicador : ELE Internacional
 Modelo del indicador : ADR TOUCH
 N° Serie del indicador : 1887-1-00074
 Intervalo de indicación : 120000 kgf
 Resolución : 0,1 kgf
 Procedencia : United States
 Código de identificación : No indica
 Ubicación : Laboratorio
 Fecha de Calibración : 2020 - 07 - 28

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025.

TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes.

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Instalaciones de MTL GEOTECNIA S.A.C.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

METODO DE CALIBRACIÓN
La calibración se efectuó por comparación directa utilizando el PIC-023 "Procedimiento para la Calibración de Prensas, celdas y análisis de carga".

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados de acuerdo al uso.

CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA	19,5°C	20,5°C
HUMEDAD RELATIVA	62,0%	66,0%

Los resultados en el presente documento no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueden ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar
Gerente Técnico
C.F.P. N° 0316



J. Condessa de Lemos Nº117
San Miguel, Lima

(01) 262 9536
(01) 988 901 085

informes@testcontrol.com.pe
www.testcontrol.com.pe

TRAZABILIDAD

Patrón de Referencia	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Balanza de Precisión Clase de Exactitud 0,005 DM/NACAL	Manómetro de 0 bar a 700 bar Clase de Exactitud 0,05	LFP-C-040-2020

RESULTADOS							
INDICACIÓN DEL EQUIPO BAJO CALIBRACIÓN		INDICACIÓN PROMEDIO DEL PATRON		ERROR		INCERTIDUMBRE	
(%)	kgf	(%)	kgf	(%)	kgf	(%)	kgf
0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0	0,01	7,32
0,1	120,0	0,1	126,2	-0,01	-6,2	0,01	7,56
0,2	232,4	0,2	239,6	-0,01	-7,4	0,01	8,20
0,9	1022,9	0,9	1037,6	-0,01	-14,7	0,01	8,96
11,6	13880,6	11,6	13892,5	-0,01	-11,9	0,01	9,76
23,3	28000,6	23,3	28019,2	-0,02	-18,6	0,01	10,56
41,7	50007,2	41,7	50027,5	-0,02	-20,3	0,01	12,66
62,5	75005,0	62,5	75027,8	-0,02	-22,8	0,01	16,66
75,0	90010,0	75,0	90033,6	-0,02	-23,6	0,02	18,76
81,7	96000,1	81,7	96036,2	-0,03	-36,1	0,02	20,26

Valor Convencionalmente Verdadero = Indicación del Equipo a calibrar - error

OBSERVACIONES.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con el número de certificado.

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre (tipo de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO



Anexo 19. Norma ACI 523. Guide for Cast-in-Place Low-Density Cellular Concrete

ACI 523.1R-06

Guide for Cast-In-Place Low-Density Cellular Concrete

Reported by ACI Committee 523

Edward M. "Ned" Ghyason
Chair

Ronald E. Barnell
Secretary

Felipe Sabbitt
Bill T. Dye
Fouad H. Fouad
Dean M. Golden
Warner H. Gumpertz

Wanyi Hu
Keith Izler
Richard E. Klingner
Leo A. Logabasi
Daniel L. Little

Francis A. McNeal-Page
Ali M. Memari
Elgar Nasser
Caijun Shi

Konstantin Sobolev
Jennifer H. Tanner
Peter T. Yen
Ronald F. Zofke

This guide provides information on the materials, properties, design, proper handling, and applications of cast-in-place low-density cellular concrete having oven-dry densities of 50 lb/ft³ (800 kg/m³) or less. Roof deck systems and geotechnical applications often incorporate these low-density cellular concretes.

Keywords: cellular concrete; engineered fill; foaming agent; geotechnical fill; insulating concrete; insulating concrete roof decks; low-density cellular concrete; low-density controlled low-strength material (LD-CLSM); preformed foam.

CONTENTS

Chapter 1—General, p. 523.1R-2

- 1.1—Definition of cellular concrete
- 1.2—Definition of low-density, controlled low-strength material (LD-CLSM)

Chapter 2—Materials, p. 523.1R-2

- 2.1—Cement
- 2.2—Water
- 2.3—Preformed foam
- 2.4—Aggregates
- 2.5—Admixtures
- 2.6—Nonstandard materials
- 2.7—Fiber reinforcement

Chapter 3—Physical properties, p. 523.1R-4

- 3.1—As-cast density
- 3.2—Oven-dry density
- 3.3—Compressive strength
- 3.4—Drying shrinkage
- 3.5—Thermal expansion
- 3.6—Walkability
- 3.7—Mechanical attachment
- 3.8—Thermal conductivity
- 3.9—Fire resistance
- 3.10—Permeability
- 3.11—Freezing-and-thawing resistance

Chapter 4—Proportioning and testing, p. 523.1R-6

- 4.1—Proportioning
- 4.2—Ingredient compatibility
- 4.3—Cast density
- 4.4—Physical properties

Chapter 5—Batching, mixing, placing, finishing, and curing, p. 523.1R-7

- 5.1—Storage of materials
- 5.2—Batching
- 5.3—Mixing
- 5.4—Placing
- 5.5—Finishing
- 5.6—Curing
- 5.7—Placement in cold-weather conditions
- 5.8—Placement in hot-weather conditions

Chapter 6—Design considerations for roof decks, p. 523.1R-8

- 6.1—Form systems

ACI Committee Reports, Guides, Standard Practices, and Commentaries are intended for guidance in planning, designing, executing, and inspecting construction. This document is intended for the use of individuals who are competent to evaluate the significance and limitations of its content and recommendations and who will accept responsibility for the application of the material it contains. The American Concrete Institute disclaims any and all responsibility for the stated principles. The Institute shall not be liable for any loss or damage arising therefrom.

Reference to this document shall not be made in contract documents. If items found in this document are desired by the Architect/Engineer to be a part of the contract documents, they shall be restated in mandatory language for incorporation by the Architect/Engineer.

ACI 523.1R-06 supersedes ACI 523.1R-02 and became effective August 15, 2006. Copyright © 2006, American Concrete Institute. All rights reserved including rights of reproduction and use in any form or by any means, including the making of copies by any photo process, or by electronic or mechanical device, printed, written, or oral, or recording for sound or visual reproduction or for use in any knowledge or retrieval system or device, unless permission in writing is obtained from the copyright proprietor.

- 6.2—Roofing readiness
- 6.3—Load-carrying capacity
- 6.4—Expansion and contraction joints
- 6.5—Relief of vapor pressure
- 6.6—Standard roofing details

Chapter 7—Geotechnical applications, p. 523.1R-10

- 7.1—Backfill
- 7.2—Roadway bases
- 7.3—Pipeline and culvert fills
- 7.4—Void fills
- 7.5—Tank fills
- 7.6—Insulation and isolation fills

Chapter 8—References, p. 523.1R-12

- 8.1—Referenced standards and reports
- 8.2—Cited references

CHAPTER 1—GENERAL

1.1—Definition of cellular concrete

Low-density cellular concrete (Fig. 1.1) is defined as concrete made with hydraulic cement, water, and preformed foam to form a hardened material having an oven-dry density of 50 lb/ft³ (800 kg/m³) or less. These mixtures may include aggregate and other material components including, but not limited to, fly ash and chemical admixtures.

This guide provides data and techniques pertaining to the properties and applications of cast-in-place low-density cellular concrete. Common applications of cast-in-place low-density cellular concrete are on roof decks and geotechnical applications. On roof decks, the material provides roofing base, thermal insulation, and drainage slope for flat-roofed industrial and commercial buildings (Fig. 1.2).

In geotechnical applications, the material is applied in thick sections of cellular concrete with low compressive strengths (Fig. 1.3) for the replacement of poor soils, fills for abandoned structures (pipelines), and cellular concrete fills designed, mixed, and placed to meet specific job conditions and functional requirements.

1.2—Definition of low-density, controlled low-strength material (LD-CLSM)

Controlled low-strength material (CLSM) is a cementitious material that is in a flowable state at the time of placement, and that has a specified compressive strength of 1200 psi (8.3 MPa) or less at the age of 28 days. This material is discussed further in ACI 229R. Low-density CLSM (LD-CLSM) meets this definition, and has a cast density that is controllable from 20 to 50 lb/ft³ (320 to 800 kg/m³). The quantity of preformed foam in the mixture determines the mixture's final density.

CHAPTER 2—MATERIALS

The basic materials in low-density cellular concrete are cement, water, and preformed foam. Because the main ingredient by volume of a low-density cellular concrete mixture is preformed foam, it is critical that all admixtures be compatible with the preformed foam within the specific

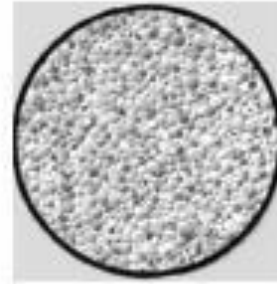


Fig. 1.1—Typical cell structure of cellular concrete.



Fig. 1.2—Roof deck application (click on picture to view video).



Fig. 1.3—Geotechnical application (click on picture to view video).

mixture. Trial mixture tests are needed to determine compatibility and the resulting physical properties. Low-density cellular concrete mixtures may also include supplementary cementitious materials.

2.1—Cement

The cement should meet the requirements of ASTM C 150 (portland cement), C 595 (blended cement), or C 1157 (hydraulic cement). Blended cements include cement containing combinations of portland cement, pozzolans, slag, other hydraulic cement, or some combination of these. Blended cement may result in lower rates of early strength

development and should be tested for specific applications. High-early-strength (Type III or HE) cement produces cellular concrete with higher rates of early strength development.

2.2—Water

Mixing water for concrete should be clean and free from detrimental amounts of oils, acids, alkalis, salts, organic materials, or other substances deleterious to concrete or reinforcement. Any nonpotable water should be tested for hardness, pH, suspended solids, total salt content, and other characteristics that might affect the preformed foam, the setting time, and the strength of the low-density cellular concrete.

2.3—Preformed foam

Preformed foam is created by diluting a liquid foam concentrate with water in predetermined proportions (Fig. 2.1) and passing this mixture through a foam generator. Meter the preformed foam directly into the cement-water slurry at the job site (Fig. 2.2). The density of the preformed foam is typically between 2.5 and 4.0 lb/ft³ (40 and 65 kg/m³).

The foam concentrate should have a chemical composition capable of producing and maintaining stable air cells within the concrete mixture. The air cells should be able to resist the physical and chemical forces imposed during mixing, pumping, placing, and setting of the cellular concrete. If the cellular (air-cell) structure is not stable, it may break down under these forces, resulting in an increased concrete density. Most common proprietary formulations of foam concentrates contain protein hydroxylates or synthetic surfactants. ASTM C 796 provides a standard method for laboratory measurement of the performance of a foaming chemical to be used in producing foam (air cells) for making cellular concrete. ASTM C 869 is a standard specification that covers foaming agents specifically formulated for making preformed foam for use in the production of cellular concrete. This specification provides the means for evaluating the performance of a specific foaming agent. Further information concerning these formulations and the procedures for using them is available from foam manufacturers.

2.4—Aggregates

Low-density cellular concrete may include lightweight aggregates such as vermiculite or perlite meeting the requirements of ASTM C 332 Group 1 to lower the slump to achieve steeper roof slopes, and to maintain moisture in dry climates. Wilson (1981) provides additional information on the use of lightweight aggregates used in cellular concrete. Any proposed aggregates should be tested for physical properties, pumpability, and compatibility in trial mixtures.

2.5—Admixtures

2.5.1 Chemical admixtures—Chemical admixtures, such as water-reducing admixtures and set accelerators, are used with cellular concretes. Water-reducing admixtures can improve compressive strength for special mixtures or applications. Hot water, high-early-strength (Type III or HE) cement, and chemical accelerators can be used singly or in combination



Fig. 2.1—Diluting foam concentrate in water (click on picture to view video).



Fig. 2.2—Metering preformed foam into cement-water slurry (click on picture to view video).

to accelerate setting. Accelerators containing chloride ions should not be used in cellular concrete placed in contact with steel. Chemical admixtures should conform to ASTM C 494 and be used at dosages recommended by the manufacturer or determined by trial mixtures.

Not all chemical admixtures are compatible for use in foamed cellular concrete. Individual manufacturers of foam concentrate should be contacted for information about the compatibility of specific admixtures with their foam concentrates, and trial batches should be used to determine the resulting mixture characteristics.

2.5.2 Supplementary cementitious materials—In the production of cellular concrete, supplementary cementitious materials such as fly ash, silica fume, high reactivity metakaolin, or ground-granulated blast-furnace slag (slag cement) are included to reduce bleeding and segregation and to increase strength. Trial batches should be used to confirm the compatibility of the selected foam concentrate with other admixtures, and to help determine the proper admixture dosages and resulting physical properties. Various mineral admixtures may differ considerably in composition, fineness, and other properties. The user should review major fly ash properties—loss on ignition (LOI), cementing activity, and



Fig. 2.3—Typical fiber types.

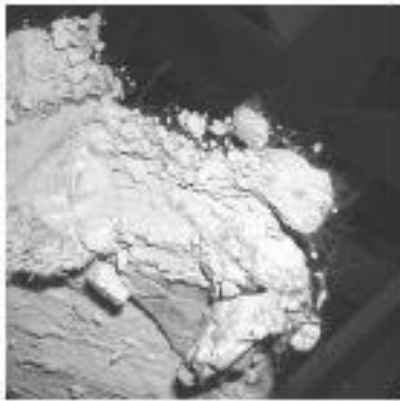


Fig. 2.4—Fibers in cellular concrete.

water demand of the fly ash—before including fly ash in a low-density cellular concrete mixture. The first of these properties (LOI) is addressed in ASTM C 618. A fly ash with a high LOI (carbon content) may adversely affect the preformed foam by causing an increase in density and loss of yield. If cementing activity is low, the concrete may set too slowly, resulting in a lower strength and a higher density. High water demand may require that the water-cementitious material ratio (*w/cm*) be adjusted to achieve the desired strength.

2.6—Nonstandard materials

Special cements, supplementary cementitious materials, and aggregates may be included as nonstandard materials. Some mine-fill applications may use local materials as aggregates or fillers in low-density cellular concrete to extend the mixture when transportation of materials to remote areas is difficult. The user should pretest nonstandard mixtures for proper development of the desired fill properties.

2.7—Fiber reinforcement

Low-density cellular concrete may include commercially available fibers, such as nylon, polypropylene, polyester, and alkali-resistant glass, as reinforcing materials (Fig. 2.3). The choice of fiber type depends on performance requirements. Cellular concrete's flexural and tensile strength,



Fig. 3.1—Measuring as-cast density (click on picture to view video).

impact resistance, fatigue limit, energy absorption, and spalling resistance can be enhanced through the use of fibers that are known to be sufficiently durable under the expected service conditions. Zollo and Hays (1998) address the material and engineering properties of fiber-reinforced cellular concrete. Fibers can also help control plastic shrinkage cracking (Fig. 2.4).

CHAPTER 3—PHYSICAL PROPERTIES

3.1—As-cast density

The as-cast density at the point of placement should be determined by calculating the density of samples using a container of known volume and empty weight, as prescribed in applicable sections of ASTM C 796 (Fig. 3.1). Monitoring the as-cast density of the cellular concrete is an important job-site quality-assurance tool for controlling the uniformity and density of the mixture at the point of placement. Procedures for sampling and testing hardened insulating cellular concrete are given in ASTM C 513.

3.2—Oven-dry density

Oven-dry density, evaluated using ASTM C 796 and C 495, determines the unit weight used to define low-density cellular concrete, which by definition has a maximum oven-dry density of 50 lb/m^3 (800 kg/m^3).

3.3—Compressive strength

The relationship between compressive strength and as-cast density is an important indicator of the quality of cellular concrete (Kearsley and Wainwright 2002b). The compressive strength of cellular concrete should be evaluated in accordance with ASTM C 796 and C 495. Compressive strength specimens should not be oven-dried. When it is necessary to determine oven-dry density, it is necessary to make companion specimens for this test in addition to those specimens for compressive strength testing. The user should relate compressive strength to the oven-dry density of cellular concrete as indicated in Table 3.1. Table 3.1 is a guideline only, based on Type I cement, no cement substitution, and using local materials. The user should test specific local materials to determine these properties.

For geotechnical applications, the cast density of the material is usually the most significant property and is more important than bearing capacity (unconfined compressive

Table 3.1—Possible ranges of compressive strength and modulus of elasticity versus oven-dry density for cellular concrete in roof deck applications

Oven-dry density	Usual range of compressive strength at 28 days				Modulus of elasticity	
	lb/ft ³	kg/m ³	psi	MPa	10 ³ psi	GPa
20 to 25	320 to 400	70 to 125	0.48 to 0.86	30 to 52	0.21 to 0.36	
25 to 30	400 to 480	125 to 225	0.86 to 1.55	52 to 89	0.36 to 0.61	
30 to 35	480 to 560	225 to 350	1.55 to 2.41	89 to 135	0.61 to 0.93	
35 to 40	560 to 640	350 to 450	2.41 to 3.10	135 to 183	0.93 to 1.26	
40 to 50	640 to 800	450 to 750	3.10 to 5.17	183 to 328	1.26 to 2.21	

Table 3.2—Physical properties for geotechnical (Engineered Fill 2001)

Maximum cast density		Minimum compressive strength		Bearing capacity	
lb/ft ³	kg/m ³	lb/in. ²	MPa	ton/ft ²	MPa
24	385	10	0.07	0.7	0.07
30	480	40	0.28	2.9	0.28
36	575	80	0.55	5.8	0.56
42	675	120	0.83	8.6	0.82
50	800	160	1.10	11.5	1.10

strength). As a result, these densities and compressive strengths are lower than those for roof deck applications (Table 3.2). If standard materials are used, the density of the low-density cellular concrete has properties that fall within ranges specified by the manufacturer of the foam concentrate. If nonstandard materials are used, special test batches may be required to confirm specific properties. To define the general relationship between cast density and compressive strength for specific applications, one manufacturer has divided the cast density into convenient ranges.

Because the need for controlled low-density fill is usually the main reason for using low-density cellular concrete, compressive strengths and ultimate bearing capacities require only minimum values. For specialized low-density cellular concrete geotechnical applications, other physical properties may be required.

Cellular concrete with a compressive strength below 70 psi (0.48 MPa) has proven satisfactory for special applications such as pipe and wall insulation, tunnel and mine fills, energy absorption or shock mitigation, and backfills in sewer and highway construction per ACI SP-29 (ACI Committees 213 and 523 1971).

3.4—Drying shrinkage

Drying shrinkage is not usually critical in cellular concrete used for roof deck insulation or geotechnical applications. The reason for this is that when cellular concrete is used to insulate roof decks, it is not considered to contribute structurally; and when it is used in geotechnical applications, any shrinkage cracking that it might undergo does not significantly reduce bearing capacity. Drying shrinkage is typically 0.30 to 0.60% after 6 months at 50% relative humidity and 73 °F (23 °C), and increases with decreasing density. Some of the effects of drying shrinkage can be mitigated by adding

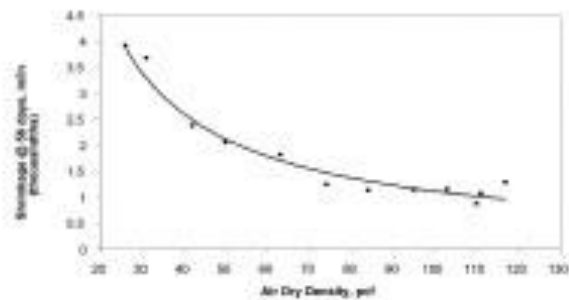


Fig. 3.2—Drying shrinkage versus air-dry density (1 in. = 25.4 mm; 1 lb/ft³ = 16.0 kg/m³).

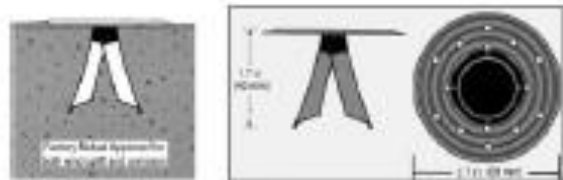


Fig. 3.3—Typical base-sheet nail.

fibers to the mixture (Section 2.7). Figure 3.2 relates drying shrinkage at 56 days to the air-dry density of cellular concrete (ASTM C 157).

3.5—Thermal expansion

The coefficient of thermal expansion for cellular concrete varies directly with density, and is typically 5.0 to 7.0 × 10⁻⁶ per °F (9.0 to 12.6 × 10⁻⁶ per °C) as evaluated using a linear thermal expansion test with strain gauges. The designer should consider thermal expansion in applications with significant variation in placing temperatures, operating temperatures, or both. These conditions could occur in applications such as roof decks, power plants, ovens, and steam lines.

3.6—Walkability

Walkability, a term developed to describe the ability of low-density concrete to sustain normal construction foot traffic without damage, is best judged by examining surface distress. Walkability improves with increased density. When heavy construction traffic is expected (such as from wheelbarrows, scaffolds, material storage, or pathways), the surface of the roof deck should be protected with wooden boards or by a similar method.

3.7—Mechanical attachment

For roof deck applications, the roofing base sheet should be mechanically attached to the low-density cellular concrete roof deck using specifically designed nails or screws (Fig. 3.3). Fastening within 2 to 7 days of concrete placement is possible if the fastener can be installed without shattering or spalling the cellular concrete and if an installed fastener has a minimum specified withdrawal resistance of 40 lb (180 N), which is consistent with required wind-uplift resistance and typical nailing patterns (such as three rows,

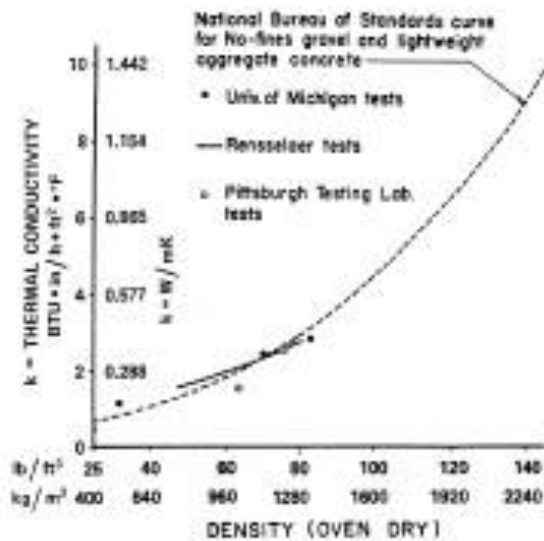


Fig. 3.4—Thermal conductivity versus oven-dry density (National Bureau of Standards 1955).

uniformly spaced over the width of each base sheet, and using a nail spacing of 7-1/2 in. [190 mm] in each row). Because no consensus standard exists, nailing patterns are generally qualified by product- and pattern-specific testing, and are published in evaluation-service reports (ANSI/SPIR1 FX-1-2001 2001).

3.8—Thermal conductivity

The thermal conductivity of cellular concrete should be measured using the guarded hot plate (ASTM C 177) or the heat flow meter (ASTM C 518) methods. A full-scale assembly is measured by a hot box apparatus (ASTM C 1363). Table 3.3 lists typical thermal conductivity values. These values follow the curve of Fig. 3.4, originally produced by the National Bureau of Standards (1955).

3.9—Fire resistance

The fire resistance of cellular concrete in a building system is determined by a fire test, during which the cellular concrete element must support its design load, remain within the temperature increase specified by the test standard, and withstand the transmission of flame or hot gasses per ASTM E 119. Information on the demonstrated fire resistance of slabs with cellular concrete and charts for estimating the fire resistance of various two-course roofs is available (Abrams and Gustaferro 1969; Gustaferro et al. 1970).

Fire-resistance tests have been conducted on wall, floor, and roof assemblies of cellular concrete cast over concrete (precast or cast-in-place), galvanized steel, and wood substrates. Some of these assemblies contain expanded polystyrene insulation board sandwiched within the cellular concrete. Recognized laboratories, such as Underwriters Laboratories, Inc., publish construction details for the tested assemblies, including fire ratings in hours evaluated using ASTM E 119.

Table 3.3—Typical thermal conductivity values for oven-dry cellular concrete

Oven-dry density		Thermal conductivity, K	
lb/ft ³	kg/m ³	BTU-in. (h × ft ² × °F)	w/(m × K)
20	320	0.79	0.11
30	480	0.91	0.13
40	640	1.11	0.16
50	800	1.36	0.20

3.10—Permeability

Generally, low-density cellular concrete has a low coefficient of permeability k that is constant throughout the low-density ranges (Kearsley and Wainwright 2001a). The coefficient of permeability is inversely related to the effective confining pressure on the sample. Because low-density cellular concrete is a rigid material rather than a yielding soil, its permeability is measured using a modified triaxial-type test including a confining pressure to prevent direct passage of water (short-circuiting) along the interface between the specimen and the confining membrane. A constant head should be maintained during the test. Reported values range from 1×10^{-4} to 1×10^{-3} mm/s (4×10^{-6} to 4×10^{-7} in./s) (ASTM D 2434).

3.11—Freezing-and-thawing resistance

Freezing-and-thawing resistance of low-density cellular concrete is evaluated using Procedure B (rapid freezing and thawing) of ASTM C 666, with a modified cycling protocol involving a longer thawing period. This modification is necessary because the insulating properties of low-density cellular concrete prevent rapid lowering and raising of the temperatures at the interior of the specimen, and thus prevent completion of a freezing-and-thawing cycle in the originally prescribed maximum 4-hour time period.⁹ Low-density cellular concrete intended for exterior exposure should have a relative dynamic modulus of elasticity E at least 70% of its original value after 120 cycles when tested according to Procedure B of the modified ASTM C 666. Because the freezing-and-thawing resistance of low-density cellular concrete increases with increasing density, cellular concrete within 2 to 3 ft (0.6 to 1 m) of a surface subjected to cycles of freezing and thawing while exposed to water must have a density of at least 36 lb/ft³ (575 kg/m³). MacDonald et al. (2004) provide an evaluation of the freezing-and-thawing performance and testing of cellular concrete.

CHAPTER 4—PROPORTIONING AND TESTING

4.1—Proportioning

Guidance for mixture proportioning is generally available from the manufacturer of foam concentrates. The mixture proportion specifies the range of proportions of the various ingredients needed to attain the desired physical properties (density and compressive strength). The user should test mixture proportions when nonstandard materials or special applications are involved.

⁹Personal correspondence from D. L. Bidwell, University of Illinois, to Clarified Copy of America, and report, "Freeze-Thaw Testing of Low Density," *Aluminum Lightweight Concrete*, Apr. 2, 1975.

4.2—Ingredient compatibility

Each ingredient that does not meet standard specifications for mixture compatibility should have the cellular concrete physical properties checked in actual mixtures according to ASTM C 796 and C 869. Cements may have significant strength variations within standard specification limits. Mill reports and test batches are useful for reviewing the product differences between cement and fly ash sources. Kearsley and Wainwright (2002a) demonstrate how to optimize fly ash content for strength.

4.3—Cast density

Measuring the cast density at the point of placement is the simplest and most convenient test for monitoring the quality of the placed material. Cylinder specimens for compressive strength tests, usually measuring 3 x 6 in. (76 x 150 mm), should be cast at the same time that periodic density tests are performed. These samples should be covered and stored in a protected area for at least 24 hours before they are transported to the testing laboratory for testing in accordance with ASTM C 796.

4.4—Physical properties

For standard mixtures made from standard materials, cast density determines the physical properties of the cellular concrete. It is not necessary to repeat the specialized tests of materials for each project. These specialized tests include permeability and freezing-and-thawing resistance; they may require up to 3 months to complete. Strength and density determinations are often sufficient. If unique applications or nonstandard materials are used, special tests may be required. A special test is one related to the performance of the material in the specialized application. Legatski (1994) provides a detailed review of testing the properties of cellular concrete.

CHAPTER 5—BATCHING, MIXING, PLACING, FINISHING, AND CURING

5.1—Storage of materials

All materials should be stored in a manner to prevent deterioration and contamination by foreign matter.

5.2—Batching

Materials for low-density cellular concrete are typically proportioned and batched on site, directly into a specialized mixer. The cement, fly ash, and other dry materials are weighed on a calibrated scale, and the mixing water is metered. The preformed foam is metered into the mixture through a calibrated nozzle. The accuracy of each batching device is critical to the final mixture density and its subsequent reproducibility. Each batching device (scales, water meter, foam-generating nozzle) should be calibrated before starting a project, and during a project if there is a reason to believe it is necessary.

5.3—Mixing

Mechanically mixing cellular concrete produces a uniform distribution of materials with a suitable consistency at the specified as-cast density. Excessive mixing should be avoided, as it may cause changes in density and consistency.

In batch mixing, the mixer should be charged with mixture water and dry ingredients, followed by special admixtures and the preformed foam. The as-cast density should be monitored at the point of placement every 30 to 60 minutes based on consistency of results. Allowance should be made for any density changes that result from placing methods or conditions, such as pumping distances and extreme weather conditions. Ingredients should be added in the proper proportions and sequence during continuous mixing operations. This is necessary to ensure reasonable uniformity and achieve the required as-cast density at the point of placement.

Standard concrete mixing equipment is normally not acceptable for low-density cellular concrete mixtures because the action of the mixer does not combine the ingredients with the correct speed and mixing action. A high-speed paddle mixer is preferable because it properly combines the ingredients and blends the preformed foam rapidly and efficiently to produce a uniformly consistent low-density cellular concrete mixture. Other mixers and processes that produce uniform mixtures include high-shear mixers.

5.4—Placing

Cellular concrete should be placed by a progressive-cavity pump or a peristaltic pump. The pump hose should be large enough in diameter (usually 2 to 2.5 in. [51 to 64 mm]) to ensure uniform delivery of cellular concrete at the point of placement without damage to the structure or substrate. Low-density cellular concrete can be pumped over long distances (over 1500 ft [460 m]). This is a major advantage for low-density cellular concrete over other materials and placing methods, and is important on large, congested projects with difficult access.

5.5—Finishing

For roof deck applications, cellular concrete should be finished to the slope and thickness specified on the project drawings. A minimum slope for proper roof drainage is 2% (equivalent to 1/4 in./ft [21 mm/m]). It is possible to place this material on steeper slopes. The cellular concrete surface is usually finished with a darby or screeded to the specified slope (Fig. 5.1). The surface should be smooth and free from ridges, projections, and depressions that might adversely affect the roofing membrane.

For geotechnical applications, lift thicknesses ranging from 2 to 4 ft (0.6 to 1.2 m) are typical. The lift thickness is job-specific and related to the project layout and casting procedure. A greater lift thickness is acceptable for specific job conditions. The heat of hydration developed within the mass, the material density, the cement content, and the ambient temperature also influence the lift thickness. Thinner castings reduce the heat buildup from hydration of the cement. It is desirable to cast material in a formed area within 1 or 2 hours to permit an undisturbed setting. In general, low-density cellular concrete should be cast to final grade with a tolerance of 0.1 ft (0.03 m). It is not necessary to scarify intermediate lift surfaces. A darby finish is acceptable for the final lift.

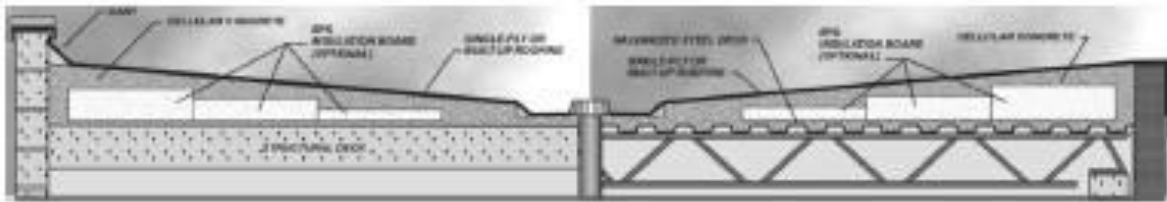


Fig. 5.1—Typical roof deck cross sections.

5.6—Curing

Water curing or use of a curing compound is advisable for roof deck applications when rapid drying is anticipated. Curing compounds should be compatible with the final roofing system. Traffic should not be permitted on freshly placed cellular concrete roof decks until adequate walkability (Section 3.6) is demonstrated. Check with the manufacturer of foaming agent for specific recommendations to ensure compatibility with subsequent roofing membrane material.

5.7—Placement in cold weather conditions

When ambient temperatures below 32 °F (0 °C) are predicted within 8 hours after placement, special precautions should be taken, including the use of Type III (high early-strength) cement or Type I cement with heated mixing water to increase the initial internal temperature of the concrete and accelerate the setting time. Because of the relatively high cement content and insulation properties of cellular concrete, these precautions are usually adequate. Cellular concrete should not be mixed or placed during freezing weather, rain, or snow, or when standing water, snow, or ice is present on the deck. The foaming agent manufacturer should be consulted for specific cold weather placement recommendations.

5.8—Placement in hot weather conditions

When expecting ambient temperatures above 100 °F (38 °C) during casting, the following special precautions should be considered:

- Casting before dawn will avoid the heat of the day;
- Vermiculite or perlite aggregate may be used as an additive to maintain moisture in the mixture;
- Fiber reinforcement may be incorporated in the mixture to minimize plastic-shrinkage cracking;
- The roof deck may be moist-cured by fogging after casting; and
- The roofing membrane may be installed as soon as the moisture content is deemed acceptable for the roofing application. The installation may begin as soon as 2 days after casting.

The foaming agent manufacturer should be consulted for specific hot weather application recommendations.

CHAPTER 6—DESIGN CONSIDERATIONS FOR ROOF DECKS

6.1—Form systems

A common application of cellular concrete is as insulation for concrete roof deck fills. The cellular concrete is cast over the structural deck system of the building. Typical deck

types include corrugated or fluted steel, structural concrete, and wood.

6.1.1 Steel—Casting cellular concrete against permanent, uncoated structural metal formwork is not good concrete construction practice. Steel embedded in cellular concrete should be protected from corrosion in a manner consistent with its service environment (refer to ACI 222R).

Corrugated or fluted steel deck should be galvanized, coated, or both to meet the requirements of ASTM A 653. Steel decks are designed for gravity loads by selecting an appropriate steel gauge and deck profile, depending on the load and the span. The deck should be attached to the framing by welds or mechanical fasteners according to the deck manufacturer's recommendations and as required to resist the specified loadings, as determined by the designer with due consideration to diaphragm strength, uplift, and other structural design requirements. The steel sheets should be vented, with bottom slots having an open area of at least 0.5% of the plan area (Fig. 6.1). Side-lap embossments improve bond, which is important under seismic loading and wind uplift.

6.1.2 Structural concrete—A structural concrete base for cellular concrete (Fig. 6.2), whether cast-in-place or precast, may require venting for moisture relief that can be achieved with unsealed joints between precast structural concrete elements or by venting (refer to Fig. 6.3).

6.1.3 Wood—Cellular concrete is cast over structural wood roof decks to produce the proper slope for drainage and for thermal insulation (Fig. 6.4). A waterproof membrane, such as an asphalt-saturated felt, should be securely fastened to the wooden deck with the edges sealed before the cellular concrete fill is placed.

6.2—Roofing readiness

A roof membrane can generally be installed 2 to 5 days after a cellular concrete roof deck has been cast if the moisture content is deemed to be acceptable for roofing membrane application. The surface hardness of the cellular concrete should be adequate to withstand foot traffic and other light roofing operations without damage. The screeded surface of the cellular concrete should be smooth and free from ridges or depressions that would adversely affect the integrity of the roofing membrane. Ridges should be scraped flat. Roofing base sheets are commonly attached to the roof deck by nailing. The roofing membrane is commonly attached to the base sheet by mopping or torch-heating. Other roofing-attachment systems should be compatible with



Fig. 6.1—Casting cellular concrete over vented steel deck.



Fig. 6.2—EPS insulation board placed in cellular concrete slurry over structural concrete deck.

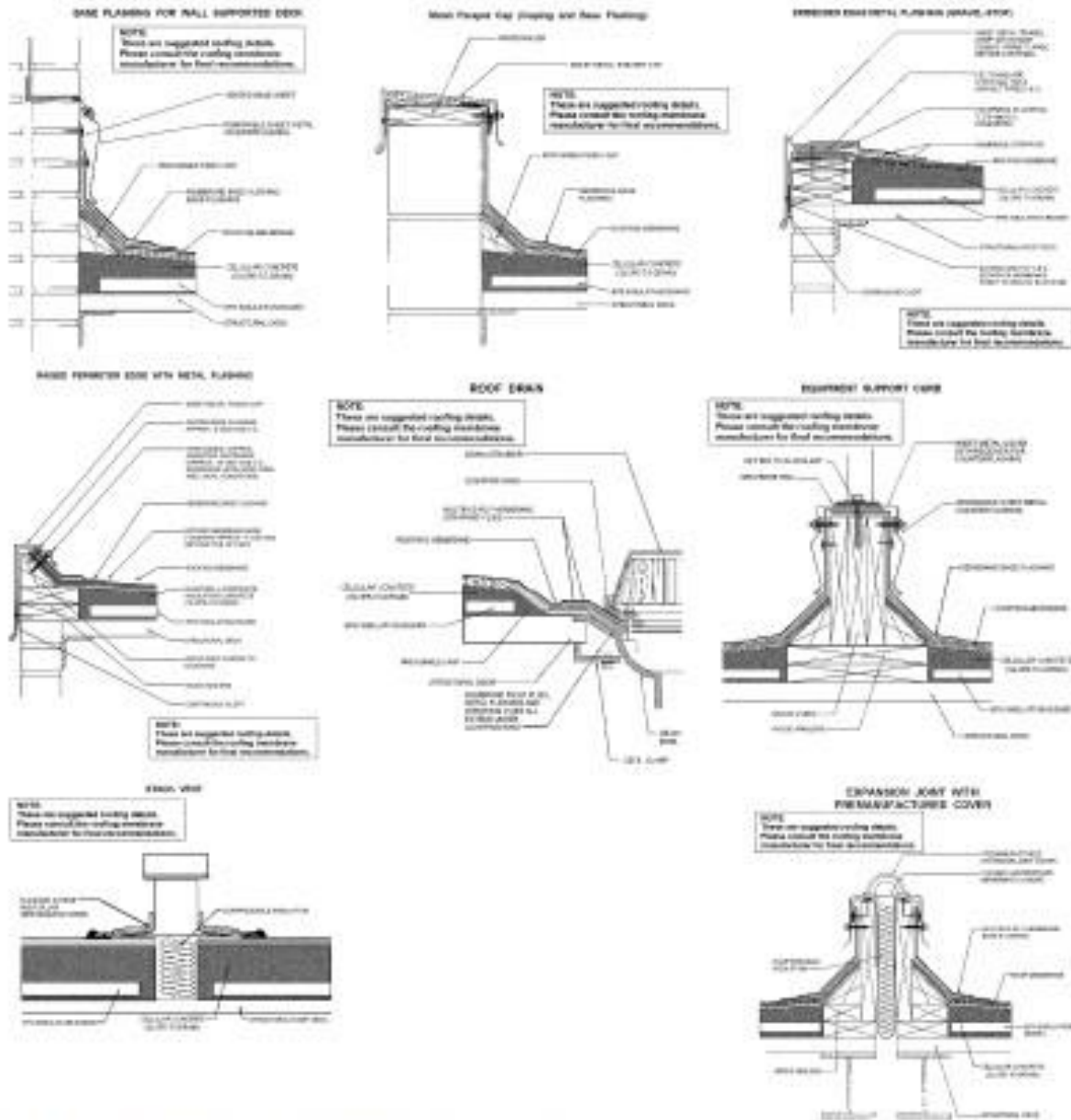


Fig. 6.3—Typical roofing details for cellular concrete roof decks.



Fig. 6.4—Wood frame roof deck substrate from below.

the cellular concrete and with the substrate (the structure that provides the required wind uplift resistance).

6.3—Load-carrying capacity

Specific structural design requirements for cellular concrete depend on the type of substrate used. The most common substrates are galvanized steel and precast or cast-in-place concrete. Although cellular concrete is not designed for composite action with the substrate, it provides additional stiffness. Designers should obtain information from substrate manufacturers regarding the ultimate flexural capacities and in-plane stiffness and strength characteristics of various systems.

6.4—Expansion and contraction joints

Cellular concrete exhibits drying shrinkage when placed in large monolithic placements such as roof decks. Because shrinkage of cellular concrete is much greater than its thermal expansion, expansion joints are generally not necessary. Expansion joints are required, however, in a cellular-concrete roof deck at expansion joints in the structural system, and at changes in the direction or type of substrate material.

6.5—Relief of vapor pressure

Under certain temperature conditions, moisture in cellular concrete or moisture intruding from external sources may cause undesirably high vapor pressure under roofing membranes covering a roof deck system. The vapor pressure can be reduced by postponing the application of the roofing membrane until the cellular concrete moisture content is at an acceptable level. A nailed base sheet, combined with perimeter venting at the intersection detail between the edge flashing and the counter-flashing, also helps reduce the vapor pressure.

The rate of drying of cellular concrete is a function of placing conditions, density and thickness, substrate, venting, and environmental conditions. The overall roof deck system, building use, and climatic conditions should be evaluated before specific recommendations regarding venting are made. This evaluation is especially important in re-roofing applications where dry portions of the existing roof



Fig. 7.1—Geotechnical application under a bridge structure with mechanically stabilized earth (MSE) containment walls.



Fig. 7.2—Geotechnical application at bridge widening approach.

membrane and insulation can be left in place and the cellular concrete cast over it.

6.6—Standard roofing details

For information on generally accepted roofing details (Fig. 6.3), refer to *NRCA Roofing and Waterproofing Manual* (The National Roofing Contractors Association 2001).

CHAPTER 7—GEOTECHNICAL APPLICATIONS

In most applications, the major advantage of cellular concrete is its low density. Other advantages include ease of excavation (a requirement in some applications) and more controllable strength as compared with standard CLSM.

7.1—Backfill

Low-density cellular concrete placed around and next to structures such as bridge abutment and retaining and building walls significantly reduces the dead load over poor soils (Fig. 7.1 and 7.2).

Once low-density cellular concrete sets, it does not exert active lateral pressure against the wall structure, as does standard granular backfill. Because low-density cellular

concrete is cementitious, it does not require compaction, and because it has low density, settlement is minimal.

Bridge approach applications may often be from 10 to 40 ft (3.0 to 12 m) or more in height. A low-density fill that does not require compaction is often a preferred alternative to heavy, compacted fill.

Most of the fill thickness of cellular concrete should be cast at a density of 30 lb/ft³ (480 kg/m³). The top 2 to 3 ft (610 to 910 mm) is usually 42 lb/ft³ (675 kg/m³) cellular concrete, which has excellent resistance to freezing and thawing and provides a solid base for an approach slab or pavement structure.

7.2—Roadway bases

Low-density cellular concrete is often used for a roadway base over poor soil. The use of the material becomes even more important when raising or widening the roadway over poor soil, and added weight and settlement are concerns for the designer (Fig. 7.3). These designs often involve load-balancing and buoyancy calculations. Specific site conditions may require the development of special drainage details.

When constructing a roadway over poor soil, a geotextile fabric should be placed after the excavation is complete. The low-density cellular concrete should be cast directly onto the geotextile fabric. This fabric acts as a tension skin and, in conjunction with the low-density cellular concrete, can span localized settlements up to 3.2 ft (1 m).

7.3—Pipeline and culvert fills

Low-density cellular concrete is often a supporting fill in pipeline applications over poor soils or a containment fill cast around these drainage structures to provide support and stability. Compaction is not necessary as it would be with a granular fill.

Culvert applications include concrete box culverts, segmented or pipe sections, and metal culvert systems including multi-plate culverts of significant size (Fig. 7.4).

Low-density cellular concrete reduces the dead weight on the culvert. The cementitious nature of all CLSM mixtures provides erosion control, which is an advantage over standard granular fills that erode when subjected to moving water. These mixtures may need to be evaluated for freezing-and-thawing resistance.

Placing low-density cellular concrete on both sides of the culvert simultaneously minimizes eccentric loading. In addition to supporting the culvert from below, the low-density cellular concrete cast around these drainage structures provides lateral support because compaction is not necessary.

7.4—Void fills

Low-density cellular concrete is commonly used as a void fill when the reduction of dead load is critical. It is also applicable to mass structures where access may be limited and flowability is important. Void-fill applications include pipeline abandonment, filling around excavations, annular space fills between slip-lined pipes, and structures that are to be abandoned rather than demolished (Fig. 7.5).



Fig. 7.3—Geotechnical roadway base at bridge approach.



Fig. 7.4—Geotechnical fill around steel culvert under existing bridge.



Fig. 7.5—Filling abandoned swimming pool with low-density concrete.

Because every void-fill application is unique, each one should be examined for special conditions. To contain the easy-flowing low-density cellular concrete, the entire fill area should be sealed, including pipes, drains, and structural discontinuities such as holes in walls or under footings. Lift heights for void fills may be greater than normal if the low-



Fig. 7.6—Filling abandoned underground fuel- or oil-storage tank with cellular concrete (click on picture to view video).



Fig. 7.7—Cellular concrete as wall fill with stay-in-place forms.

density cellular concrete can be reasonably contained by earth, forms, or a structure.

7.5—Tank fills

An acceptable abandonment alternative to the excavation and removal of underground fuel- or oil-storage tanks required by many agencies is a low-density cellular concrete tank fill (Fig. 7.6). Federal regulations refer to low-density cellular concrete fills as an “inert substance.”

7.6—Insulation and Isolation fills

The discrete air-cell structure within the cementitious matrix of low-density cellular concrete provides thermal-insulation and physical shock-mitigation properties to this material for applications such as walls (Fig. 7.7), roofs, and other similar structures. Giannakou and Jones (2004) describe the use of cellular concrete to thermally insulate foundations and slabs.

CHAPTER 8—REFERENCES

8.1—Referenced standards and reports

The standards and reports listed below were the latest editions at the time this document was prepared. Since frequent revisions occur with some of these documents, the reader is advised to contact the appropriate sponsoring group for reference to the latest version.

American Concrete Institute

- 222R Protection of Metals in Concrete Against Corrosion
229R Controlled Low-Strength Materials

ASTM International

- A 653 Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process
C 150 Specification for Portland Cement
C 157 Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
C 177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus
C 332 Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete
C 494 Specification for Chemical Admixtures for Concrete
C 495 Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete
C 513 Test Method for Securing, Preparing, Obtaining and Testing Specimens of Hardened Lightweight Insulating Concrete for Compressive Strength
C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements
C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
C 666 Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
C 796 Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam
C 869 Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete
C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars
C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement
C 1240 Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures
C 1363 Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus
D 2434 Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)

E 119 Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials

The above publications may be obtained from:

American Concrete Institute
38800 Country Club Drive
Farmington Hills, MI 48331
www.concrete.org

ASTM International
100 Barr Harbor Drive
West Conshohocken, PA 19428-2959
www.astm.org

9.2—Cited references

Abrams, M. S., and Gustaferra, A. H., 1969, "Fire Endurance of Two-Course Floors and Roofs," *ACI JOURNAL, Proceedings* V. 66, No. 2, Feb., pp. 92-102.

ACI Committees 213 and 523, 1971, *Lightweight Concrete*, SP-29, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 321 pp.

ANSI/SPIR1 FX-1-2001, 2001, "Standard Field Test Procedure for Determining the Withdrawal Resistance of Roofing Fasteners."

Engineered Fill, 2001, "Elastizell EF (Engineered Fill) Geotechnical Applications," Elastizell Corp., 16 pp.

Giannakou, A., and Jones, M. R., 2004, "Thermally Insulating Foundations and Ground Slabs Using Highly-Foamed Concrete," *ASTM Special Technical Publication* No. 1459, pp. 100-112.

Gustaferra, A. H.; Abrams, M. S.; and Litvin, A., 1970, "Fire Resistance of Lightweight Insulating Concretes," *Research and Development Bulletin* No. RD004B, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 12 pp.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J., 2001a, "Porosity and Permeability of Foamed Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 5, May, pp. 805-812.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J., 2001b, "The Effect of High Fly Ash Content on the Compressive Strength of Foamed Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 1, Jan., pp. 105-112.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J., 2002a, "Ash Content for Optimum Strength of Foamed Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 2, Feb., pp. 241-246.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J., 2002b, "The Effect of Porosity on the Strength of Foamed Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 2, Feb., pp. 233-239.

Legatski, L. A., 1994, "Chapter 49—Cellular Concrete," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP 169C, ASTM International, West Conshohocken, Pa.

MacDonald, W.; Pospisil, J.; and Tikalsky, P. J., 2004, "A Method for Assessment of the Freeze-Thaw Resistance of Preformed Foam Cellular Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 5, May, pp. 889-893.

National Bureau of Standards, 1955, "Thermal Conductivity Versus Oven-Dry Density," *Technical News*, V. 39, Bulletin 39, No. 3, Mar., U. S. Department of Commerce.

National Roofing Contractors Association, 2001, *The NRCA Roofing and Waterproofing Manual*, 5th Edition, Rosemont, Ill.

Wilson, H. S., 1981, "Lightweight Aggregates—Vermiculite, Perlite, Pumice—for Insulating Concretes," *CANMET Report* No. 81-15E, Energy Mines and Resources Canada, Ottawa, 28 pp.

Zollo, R. P., and Hays, C. D., 1998, "Engineering Material Properties of a Fiber-Reinforced Cellular Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 5, Sept.-Oct., pp. 631-635.

Anexo 20. Norma ASTM C-138. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete



Designation: C 138/C 138M - 01a

American Association of State Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T121

Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 138/C 138M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the density (see Note 1) of freshly mixed concrete and gives formulas for calculating the yield, cement content, and air content of the concrete. Yield is defined as the volume of concrete produced from a mixture of known quantities of the component materials.

1.2 The values stated in either inch-pound or SI units shall be regarded separately as standard. The SI units are shown in brackets. The values stated might not be exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other.

Note 1—Unit weight was the previous terminology used to describe the property determined by this test method, which is mass per unit volume.

1.3 The text of this test method references notes and footnotes that provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables) shall not be considered as requirements of this test method.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 29/C 29M Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate²
- C 150 Specification for Portland Cement³
- C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete³
- C 188 Test Method for Density of Hydraulic Cement³
- C 231 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method³
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials³

3. Terminology

3.1 Symbols:

- A = air content (percentage of voids) in the concrete
- C = actual cement content, lb/yd³ or kg/m³
- C_d = mass of cement in the batch, lb or kg
- D = density (unit weight) of concrete, lb/ft³ or kg/m³
- M = total mass of all materials batched, lb or kg (see Note 3)
- M_c = mass of the measure filled with concrete, lb or kg
- M_m = mass of the measure, lb or kg
- R_p = relative yield
- γ' = theoretical density of the concrete computed on an airfree basis, lb/ft³ or kg/m³ (see Note 2)
- Y = yield, volume of concrete produced per batch, yd³ or m³
- Y_d = volume of concrete which the batch was designed to produce, yd³ or m³
- Y_f = volume of concrete produced per batch, ft³
- V = total absolute volume of the component ingredients in the batch, ft³ or m³
- V_m = volume of the measure, ft³ or m³

Note 2—The theoretical density is, customarily, a laboratory determination, the value for which is assumed to remain constant for all batches made using identical component ingredients and proportions. It is calculated from the following equation:

$$Y = MV' \quad (1)$$

The absolute volume of each ingredient in cubic feet is equal to the quotient of the mass of that ingredient divided by the product of its specific gravity times 62.4. The absolute volume of such ingredient in cubic meters is equal to the mass of the ingredient in kilograms divided by 1000 times its specific gravity. For the aggregate components, the bulk specific gravity and mass should be based on the saturated, surface-dry condition. For cement, the actual specific gravity should be determined by Test Method C 188. A value of 3.15 may be used for cements manufactured to meet the requirements of Specification C 150.

Note 3—The total mass of all materials batched is the sum of the masses of the cement, the fine aggregate in the condition used, the coarse aggregate in the condition used, the mixing water added to the batch, and any other solid or liquid materials used.

4. Apparatus

4.1 *Balance*—A balance or scale accurate to 0.1 lb [45 g] or to within 0.3 % of the test load, whichever is greater, at any point within the range of use. The range of use shall be

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.00 on Fresh Concrete Testing.

Current edition approved Mar. 10, 2001. Published May 2001. Originally published as C 138 - 36 T. Last previous edition C 138 - 01.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19380-2959, United States.

considered to extend from the mass of the measure empty to the mass of the measure plus its contents at 160 lb/ft³ [2600 kg/m³].

4.2 *Tamping Rod*—A round, straight steel rod, ¼ in. [16 mm] in diameter and approximately 24 in. [600 mm] in length, having the tamping end rounded to a hemispherical tip the diameter of which is ¼ in.

4.3 *Internal Vibrator*—Internal vibrators may have rigid or flexible shafts, preferably powered by electric motors. The frequency of vibration shall be 7000 vibrations per minute or greater while in use. The outside diameter or the side dimension of the vibrating element shall be at least 0.75 in. [19 mm] and not greater than 1.50 in. [38 mm]. The length of the shaft shall be at least 24 in. [600 mm].

4.4 *Measure*—A cylindrical container made of steel or other suitable metal (see Note 4). The minimum capacity of the measure shall conform to the requirements of Table 1 based on the nominal size of aggregate in the concrete to be tested. All measures, except for measuring bowls of air meters which are also used for Test Method C 138 tests, shall conform to the requirements of Test Method C 29/C 29M. When measuring bowls of air meters are used, they shall conform to the requirements of Test Method C 231, and shall be calibrated for volume as described in Test Method C 29/C 29M. The top rim of the air meter bowls shall be smooth and plane within 0.01 in. [0.3 mm] (see Note 5).

Note 4—The metal should not be readily subject to attack by cement paste. However, reactive materials such as aluminum alloys may be used in instances where as a consequence of an initial reaction, a surface film is rapidly formed which protects the metal against further corrosion.

Note 5—The top rim is satisfactorily plane if a 0.01-in. [0.3-mm] feeler gage cannot be inserted between the rim and a piece of ¼-in. [6-mm] or thicker plate glass laid over the top of the measure.

4.5 *Strike-Off Plate*—A flat rectangular metal plate at least ¼ in. [6 mm] thick or a glass or acrylic plate at least ½ in. [12 mm] thick with a length and width at least 2 in. [50 mm] greater than the diameter of the measure with which it is to be used. The edges of the plate shall be straight and smooth within a tolerance of ¼ in. [2 mm].

4.6 *Mallet*—A mallet (with a rubber or rawhide head) having a mass of 1.25 ± 0.50 lb [600 ± 200 g] for use with measures of 0.5 ft³ [14 L] or smaller, and a mallet having a mass of 2.25 ± 0.50 lb [1000 ± 200 g] for use with measures larger than 0.5 ft³.

5. Sample

5.1 Obtain the sample of freshly mixed concrete in accordance with Practice C 172.

dance with Practice C 172.

6. Procedure

6.1 Base the selection of the method of consolidation on the slump, unless the method is stated in the specifications under which the work is being performed. The methods of consolidation are rodding and internal vibration. Rod concretes with a slump greater than 3 in. [75 mm]. Rod or vibrate concrete with a slump of 1 to 3 in. [25 to 75 mm]. Consolidate concretes with a slump less than 1 in. by vibration.

Note 6—Nonplastic concrete, such as is commonly used in the manufacture of pipe and unit masonry, is not covered by this test method.

6.2 *Rodding*—Place the concrete in the measure in three layers of approximately equal volume. Rod each layer with 25 strokes of the tamping rod when nominal 0.5-ft³ [14-L] or smaller measures are used, 50 strokes when nominal 1-ft³ [28-L] measures are used, and one stroke per 3 in.² [20 cm²] of surface for larger measures. Rod the bottom layer throughout its depth but the rod shall not forcibly strike the bottom of the measure. Distribute the strokes uniformly over the cross section of the measure and for the top two layers, penetrate about 1 in. [25 mm] into the underlying layer. After each layer is rodded, tap the sides of the measure 10 to 15 times with the appropriate mallet (see 4.6) using such force so as to close any voids left by the tamping rod and to release any large bubbles of air that may have been trapped. Add the final layer so as to avoid overfilling.

6.3 *Internal Vibration*—Fill and vibrate the measure in two approximately equal layers. Place all of the concrete for each layer in the measure before starting vibration of that layer. Insert the vibrator at three different points for each layer. In compacting the bottom layer, do not allow the vibrator to rest on or touch the bottom or sides of the measure. In compacting the final layer, the vibrator shall penetrate into the underlying layer approximately 1 in. [25 mm]. Take care that the vibrator is withdrawn in such a manner that no air pockets are left in the specimen. The duration of vibration required will depend upon the workability of the concrete and the effectiveness of the vibrator (see Note 7). Continue vibration only long enough to achieve proper consolidation of the concrete (see Note 8). Observe a constant duration of vibration for the particular kind of concrete, vibrator, and measure involved.

Note 7—Usually, sufficient vibration has been applied as soon as the surface of the concrete becomes relatively smooth.

Note 8—Overvibration may cause segregation and loss of appreciable quantities of intentionally entrained air.

6.4 On completion of consolidation the measure must not contain a substantial excess or deficiency of concrete. An excess of concrete protruding approximately ¼ in. [3 mm] above the top of the mold is optimum. A small quantity of concrete may be added to correct a deficiency. If the measure contains a great excess of concrete at completion of consolidation, remove a representative portion of the excess concrete with a trowel or scoop immediately following completion of consolidation and before the measure is struck-off.

6.5 *Strike-Off*—After consolidation, strike-off the top surface of the concrete and finish it smoothly with the flat strike-off plate using great care to leave the measure just level

TABLE 1 Capacity of Measures

Nominal Maximum Size of Coarse Aggregate		Capacity of Measure ^a	
in.	mm	ft ³	L
1	25.0	0.2	6
1½	37.5	0.4	11
2	50	0.5	14
3	75	1.0	28
4½	112	2.5	70
6	150	3.5	100

^aThe indicated size of measure shall be used to test concrete containing aggregates of a nominal maximum size equal to or smaller than that listed. The actual volume of the measure shall be at least 95 % of the nominal volume listed.

full. The strike-off is best accomplished by pressing the strike-off plate on the top surface of the measure to cover about two thirds of the surface and withdrawing the plate with a sawing motion to finish only the area originally covered. Then place the plate on the top of the measure to cover the original two thirds of the surface and advance it with a vertical pressure and a sawing motion to cover the whole surface of the measure and continue to advance it until it slides completely off the measure. Several final strokes with the inclined edge of the plate will produce a smooth finished surface.

6.6 Cleaning and Weighing—After strike-off, clean all excess concrete from the exterior of the measure and determine the mass of the concrete and measure to an accuracy consistent with the requirements of 4.1.

7. Calculation

7.1 Density (Unit Weight)—Calculate the net mass of the concrete in pounds or kilograms by subtracting the mass of the measure, M_m , from the mass of the measure filled with concrete, M_c . Calculate the density, D , ft^3 or yd^3 , by dividing the net mass of concrete by the volume of the measure, V_m , as follows:

$$D = (M_c - M_m) / V_m \tag{2}$$

7.2 Yield—Calculate the yield as follows:

$$Y(\text{yd}^3) = M / (D \times 27) \tag{3}$$

or

$$Y(\text{m}^3) = M / D \tag{4}$$

7.3 Relative Yield—Relative yield is the ratio of the actual volume of concrete obtained to the volume as designed for the batch (see Note 9) calculated as follows:

$$R_y = Y / Y_d \tag{5}$$

Note 9—A value for R_y greater than 1.00 indicates an excess of concrete being produced whereas a value less than this indicates the batch to be “short” of its designed volume. In practice, a ratio of yield in cubic feet per cubic yard of design concrete mixture is frequently used, for example, 27.3 ft^3/yd^3 .

7.4 Cement Content—Calculate the actual cement content as follows:

$$C = C_s / F \tag{6}$$

7.5 Air Content—Calculate the air content as follows:

$$A = [(T - D) / T] \times 100 \tag{7}$$

or

$$A = [(V_f - V) / V] \times 100 \text{ (inch-pound units)} \tag{8}$$

or

$$A = [(T - V) / T] \times 100 \text{ (SI units)} \tag{9}$$

8. Precision and Bias

8.1 The following estimates of precision for this test method are based on a collection of data from various locations by the National Ready Mixed Concrete Association.⁴ The data represent concrete mixtures with slump ranging from 3 to 6 in. [75 to 150 mm] and density ranging from 115 to 155 lb/ft^3 [1842 to 2483 kg/m^3] and included air-entrained and non air-entrained concrete. The study was conducted using 0.25 ft^3 [7-L] and 0.5 ft^3 [1+L] measures.

8.1.1 Single-Operator Precision—The single operator standard deviation of density of freshly mixed concrete has been found to be 0.65 lb/ft^3 [10.4 kg/m^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted by the same operator on the same sample of concrete should not differ by more than 1.85 lb/ft^3 [29.6 kg/m^3] (2s).

8.1.2 Multi-Operator Precision—The multi-operator standard deviation of density of freshly mixed concrete has been found to be 0.82 lb/ft^3 [13.1 kg/m^3] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests by the two operators on the same sample of concrete should not differ by more than 2.31 lb/ft^3 [37.0 kg/m^3] (2s).

8.2 Bias—This test method has no bias since the density is defined only in terms of this test method.

9. Keywords

9.1 air content; cement content; concrete; relative yield; unit weight; yield

⁴Mullings, G. M., NRMCA/NAA Joint Research Lab Study “Series D 324 Accuracy of Concrete Density Test,” Feb. 17, 2000.

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of changes to this test method that have been incorporated since the last issue.

- (1) Designation was revised.
- (2) Title was revised.
- (3) Paragraphs 1.1 and 1.2 were revised.
- (3) Note 1 and paragraph 1.3 were added. Subsequent notes were renumbered.
- (4) Section 2 was updated.
- (5) Section 3 was renamed “Terminology” and revised.
- (6) Paragraphs 4.1-4.6 were revised.
- (7) Paragraphs 6.1-6.6 were revised.
- (8) Equations in Section 7 were revised.
- (9) Paragraphs 7.1-7.5 were revised.
- (10) Paragraph 8.1 was revised.

Anexo 21. Norma ASTM C-495. Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete



Designation: C 495 – 99a

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
1105 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19380
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete¹

This standard is issued under the broad designation C 495; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the preparation of specimens and the determination of the compressive strength of lightweight insulating concrete having an oven-dry weight not exceeding 50 lb/ft³ (800 kg/m³) as determined by the procedure described herein. This test method covers the preparation and testing of molded 3 by 6-in. (75 by 150-mm) cylinders.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 39 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens²
- C 88 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate²
- C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)³
- C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete³
- C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens²
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²

3. Significance and Use

3.1 This test method provides standardized requirements for sampling, molding, curing, and testing lightweight insulating concretes for the purpose of determining compliance with compressive strength and density specifications.

4. Apparatus

4.1 *Testing Machine*—Use a testing machine as prescribed in Test Method C 39.

4.2 *Scales and Weights*—Use scales and weights in weighing specimens that conform to those specified in the Apparatus Section of Test Method C 109.

4.3 *Drying Oven*—Use an oven as specified in Test Method C 88.

4.4 *Molds*—Use molds made of nonabsorbent materials or of materials treated to reduce absorption, that are watertight, and not subject to distortion of more than $\frac{1}{16}$ in. (1.6 mm) in any dimension during molding and early curing of specimens. Coat all mold surfaces that will be in contact with concrete except single use plastic molds with wax or mineral oil, prior to use. Use molds having a diameter of $3 \pm \frac{1}{16}$ in. (75 ± 1.6 mm) and a length of $6 \pm \frac{1}{8}$ in. (150 ± 3 mm).

5. Sampling

5.1 Sample fresh lightweight insulating concrete in accordance with applicable provisions of Practice C 172, with the following exceptions:

5.1.1 *Sampling from Pump Equipment*—Fill a bucket of approximately 10-qt (9-dm³) capacity by passing through the discharge stream of the concrete pump hose being used to place the concrete, at the point of placement of the concrete. Exercise care to ensure that the sample is representative of the pour, avoiding the beginning or ending of the discharge from the equipment. Prepare the test specimens as described in Section 6, by filling them with a scoop of lightweight insulating concrete dipped from the bucket.

5.1.2 *Remixing Sample*—Do not remix the sample.

6. Test Specimens

6.1 *Size and Shape*—Use cylindrical test specimens $3 \pm \frac{1}{16}$ in. (75 ± 1.6 mm) in diameter and $6 \pm \frac{1}{8}$ in. (150 ± 3 mm) in length, with the base of each specimen perpendicular to the longitudinal axis within the limits prescribed in 6.8.

6.2 *Number*—Obtain at least four test specimens for compressive strength tests from each sample of lightweight insulating concrete.

6.3 *Molding*—In molding the specimens, place the concrete in two approximately equal layers. Tap the sides of the mold

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.21 on Lightweight Aggregates and Concrete.

Current edition approval Feb. 10, 1999. Published May 1999. Originally published as C 495 – 62T. Last previous edition C 495 – 99.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

lightly with a rubber mallet after placing each layer until the surface of the layer has subsided approximately to a plane. Over fill the mold when placing the second layer. Do not rod the concrete.

6.4 Finishing Surface—Strike off the specimens immediately after filling the molds. Cover them in such a manner as to prevent evaporation without marring the surface (Note 1). If desired, cover the filled mold with a glass or metal plate to obtain a surface that will be suitable for testing without capping and with a minimum of grinding.

Note 1—It is desirable to place the filled mold in a moist room if one is available. If this is done, protect the surface from dripping water.

6.5 Removal from Molds—Do not remove specimens from molds until danger of damage to the specimens is past. In any event, remove specimens from the molds within 7 days after molding.

6.6 Curing—For the first 24 h after molding, maintain the specimens at a temperature of $70 \pm 10^\circ\text{F}$ ($21.1 \pm 5.5^\circ\text{C}$). After 24 ± 2 h, store the specimens in a moist condition (Note 2) at a temperature of $73.4 \pm 3^\circ\text{F}$ ($23.0 \pm 1.7^\circ\text{C}$) (Note 3). Do not expose specimens to a stream of running water nor store in water, unless a saturated lime (calcium hydroxide) solution is used. After 7 days, store the specimens at a temperature of $70 \pm 10^\circ\text{F}$ and a relative humidity of $50 \pm 30\%$ for 18 days. Twenty-five days after molding, dry the specimens in an oven at $140 \pm 5^\circ\text{F}$ ($60 \pm 2.8^\circ\text{C}$) for 3 days (Note 4). Cool specimens to room temperature and test for compressive strength at an age of 28 days.

Note 2—A moist condition is that in which free water is maintained on the surfaces of the specimens at all times.

Note 3—The temperature within damp sand and under wet burlap or similar materials will always be lower than the temperature in the surrounding atmosphere if evaporation takes place.

Note 4—Caution must be observed in loading the oven so that the moisture content of the specimen at time of test does not exceed 5% of the oven-dry weight determined in accordance with 8.1.

6.7 Preparation for Testing—Check the surfaces of the specimen that will be in contact with the bearing surfaces of the testing machine within 0.02 in. (0.5 mm). If the bearing surfaces depart from a plane more than 0.02 in. (0.5 mm), grind them to conform to this tolerance or cap in accordance with Practice C 617. Cap surfaces to be plane within 0.002 in. (0.05 mm). Check the planeness of the bearing surface of the specimen by means of a straightedge and feeler gage, making a minimum of three measurements on different diameters of the specimen. Make sure the surface of the specimen in contact with the lower bearing block of the testing machine does not depart from perpendicularity with the longitudinal axis of the cylinder by more than 1° (approximately equivalent to 0.1 in. in 6 in. (2.5 mm in 150 mm)) or the combined departure of the two bearing surfaces from perpendicularity by more than 3° .

6.8 Measurement of Specimen—Determine the diameter of the specimens to the nearest 0.01 in. (0.3 mm) by averaging two diameters measured at right angles to each other at about midheight of the specimen. Use these dimensions in computing the cross-sectional areas. Determine the height of the specimen to the nearest 0.01 in.

7. Procedure

7.1 Placing of Specimen—Wipe clean the bearing faces of the upper and lower bearing blocks of the compression test machine and of the test specimen and place the test specimen on the lower bearing block. Carefully align the axis of the specimen with the center of thrust of the spherically seated block. As the spherically seated block is brought to bear on the specimen, gently rotate its movable portion by hand so that uniform seating is obtained.

7.2 Rate of Loading—Continuously apply the load without shock at a constant rate such that the maximum load will be reached in 65 ± 15 s. Record the maximum load sustained by the specimen. Note the type of failure and the appearance of the concrete.

8. Calculation

8.1 Calculate the unit compressive strength of the concrete by dividing the maximum load by the average cross-sectional area and record to the nearest 10 psi (69 kPa).

9. Oven-Dry Weight

9.1 When the oven-dry unit weight is desired, mold two companion specimens for this purpose at the same time as the compressive strength specimens. Cure the companion specimens the same as the compressive strength specimens, except dry the companion specimens at the age of 28 days in an oven at $230 \pm 18^\circ\text{F}$ ($110 \pm 10^\circ\text{C}$) and weigh at 24-h intervals until the loss in weight does not exceed 1% in a 24-h period. Determine the weight and dimensions of the oven-dry specimens and calculate the weight per cubic foot from the average data obtained.

10. Report

10.1 For each specimen tested report the following information where applicable:

- 10.1.1 Identification number,
- 10.1.2 Dimensions of test specimen, in inches (millimetres),
- 10.1.3 The cross-sectional area in square inches (square centimetres),
- 10.1.4 Type of cap,
- 10.1.5 Maximum load, in pounds-force (or kilonewtons),
- 10.1.6 Unit compressive strength in pounds-force per square inch (or kilopascals),
- 10.1.7 Type of fracture and appearance of the concrete following determination of compressive strength,
- 10.1.8 Defects in either specimen or caps,
- 10.1.9 Age of specimen, in days,
- 10.1.10 Calculated oven-dry density, if determined,
- 10.1.11 Average ambient temperature and average relative humidity at which specimens were stored during the 18-day curing period, and
- 10.1.12 Summation of tests of specimens from same sample with average of test results. This summation shall be shown on the report of the last specimen tested and should be referenced in reports of other specimens.

11. Precision and Bias

11.1 Precision:

- 11.1.1 The single operator standard deviation for a test

result (where a test result is, as defined in this test method, the average of four separate compressive strength measurements) has been found to be 21 psi (Note 5). Therefore, results of two properly conducted tests (each consisting of the average of four individual measurements) by the same operator on concrete samples from the same batch should not differ by more than 59 psi (Note 5). The range (difference between highest and lowest) of the four individual measurements used in calculating the average should not exceed 155 psi (Note 6).

11.1.2 The multilaboratory standard deviation for a test result has been found to be 29 psi (Note 5). Therefore, results of two properly conducted tests (each consisting of the average of four individual measurements) by two different laboratories

on concrete samples from the same batch should not differ by more than 83 psi (Note 5).

Note 5—These numbers represent, respectively, the (1s) and (2s) limits as described in Practice C 670.

Note 6—Calculated as described in 3.4.3 of Practice C 670.

11.2 *Bias*—The bias of this test method cannot be determined because compressive strength can only be defined in terms of this test method.

12. Keywords

12.1 compressive strength; density; lightweight insulating concrete; oven-dry weight

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either approved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19380.

Anexo 22. Norma ASTM C-496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens



Designation: C 496/C 496M – 04

Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C 496/C 496M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, such as molded cylinders and drilled cores.

1.2 The values stated in either inch-pound or SI units are to be regarded separately as standard. The SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

1.4 The text of this standard references notes that provide explanatory material. These notes shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents:

2.1 *ASTM Standards:*²

C 31/C 31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field

C 39/C 39M Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

C 42/C 42M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawn Beams of Concrete

C 192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

¹This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.01 on Testing Concrete for Strength.

Current edition approved Feb. 1, 2004. Published March 2004. Originally approved in 1962. Last previous edition approved in 1996 as C 496 – 96.

²For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

3. Summary of Test Method

3.1 This test method consists of applying a diametral compressive force along the length of a cylindrical concrete specimen at a rate that is within a prescribed range until failure occurs. This loading induces tensile stresses on the plane containing the applied load and relatively high compressive stresses in the area immediately around the applied load. Tensile failure occurs rather than compressive failure because the areas of load application are in a state of triaxial compression, thereby allowing them to withstand much higher compressive stresses than would be indicated by a uniaxial compressive strength test result.

3.2 Thin, plywood bearing strips are used to distribute the load applied along the length of the cylinder.

3.3 The maximum load sustained by the specimen is divided by appropriate geometrical factors to obtain the splitting tensile strength.

4. Significance and Use

4.1 Splitting tensile strength is generally greater than direct tensile strength and lower than flexural strength (modulus of rupture).

4.2 Splitting tensile strength is used in the design of structural lightweight concrete members to evaluate the shear resistance provided by concrete and to determine the development length of reinforcement.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—The testing machine shall conform to the requirements of Test Method C 39/C 39M and be of a type with sufficient capacity that will provide the rate of loading prescribed in 7.5.

5.2 *Supplementary Bearing Bar or Plate*—If the diameter or the largest dimension of the upper bearing face or the lower bearing block is less than the length of the cylinder to be tested, a supplementary bearing bar or plate of machined steel shall be used. The surfaces of the bar or plate shall be machined to within ± 0.001 in. [0.025 mm] of planeness, as measured on any line of contact of the bearing area. It shall have a width of at least 2 in. [50 mm], and a thickness not less than the distance

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

from the edge of the spherical or rectangular bearing block to the end of the cylinder. The bar or plate shall be used in such manner that the load will be applied over the entire length of the specimen.

5.3 *Bearing Strips*—Two bearing strips of nominal 1/4 in. [3.2 mm] thick plywood, free of imperfections, approximately 1 in. [25 mm] wide, and of a length equal to, or slightly longer than, that of the specimen shall be provided for each specimen. The bearing strips shall be placed between the specimen and both the upper and lower bearing blocks of the testing machine or between the specimen and supplemental bars or plates, when used (see 5.2). Bearing strips shall not be reused.

6. Test Specimens

6.1 The test specimens shall conform to the size, molding, and curing requirements set forth in either Practice C 31/C 31M (field specimens) or Practice C 192/C 192M (laboratory specimens). Drilled cores shall conform to the size and moisture-conditioning requirements set forth in Test Method C 42/C 42M. Moist-cured specimens, during the period between their removal from the curing environment and testing, shall be kept moist by a wet burlap or blanket covering, and shall be tested in a moist condition as soon as practicable.

6.2 The following curing procedure shall be used for evaluations of light-weight concrete: specimens tested at 28 days shall be in an air-dry condition after 7 days moist curing followed by 21 days drying at 73.5 ± 3.5°F [23.0 ± 2.0°C] and 50 ± 5 % relative humidity.

7. Procedure

7.1 *Marking*—Draw diametral lines on each end of the specimen using a suitable device that will ensure that they are in the same axial plane (see Fig. 1, Fig. 2 and Note 1), or as an alternative, use the aligning jig shown in Fig. 3 (Note 2).

Note 1—Figs. 1 and 2 show a suitable device for drawing diametral lines on each end of a 6 in. by 12 in. [150 mm by 300 mm] cylinder in the same axial plane. The device consists of three parts as follows:

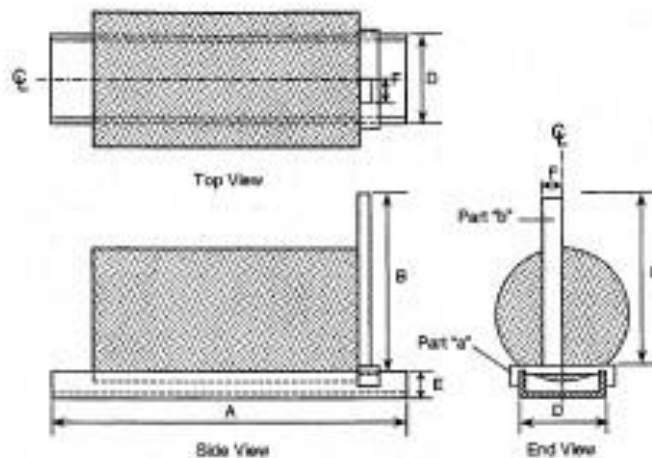
- (1) A length of 4-in. [100-mm] steel channel, the flanges of which have been machined flat,
 - (2) A section, part a, that is grooved to fit smoothly over the flanges of the channel and that includes cap screws for positioning the vertical member of the assembly, and
 - (3) A vertical bar, part b, for guiding a pencil or marker.
- The assembly (part a and part b) is not fastened to the channel and is positioned at either end of the cylinder without disturbing the position of the specimen when marking the diametral lines.

Note 2—Fig. 4 is a detailed drawing of the aligning jig shown in Fig. 3 for achieving the same purpose as marking the diametral lines. The device consists of:

- (1) A base for holding the lower bearing strip and cylinder,
- (2) A supplementary bearing bar conforming to the requirements in Section 5 as to critical dimensions and placement, and
- (3) Two uprights to serve for positioning the test cylinder, bearing strips, and supplementary bearing bar.

7.2 *Measurements*—Determine the diameter of the test specimen to the nearest 0.01 in. [0.25 mm] by averaging three diameters measured near the ends and the middle of the specimen and lying in the plane containing the lines marked on the two ends. Determine the length of the specimen to the nearest 0.1 in. [2 mm] by averaging at least two length measurements taken in the plane containing the lines marked on the two ends.

7.3 *Positioning Using Marked Diametral Lines*—Center one of the plywood strips along the center of the lower bearing block. Place the specimen on the plywood strip and align so that the lines marked on the ends of the specimen are vertical and centered over the plywood strip. Place a second plywood strip lengthwise on the cylinder, centered on the lines marked on the ends of the cylinder. Position the assembly to ensure the following conditions:



A	B	C	D	E	F
16 in.	8 1/2 in.	6 in.	4 in.	1 1/2 in.	1 in.
400 mm	205 mm	200 mm	100 mm	32 mm	26 mm

FIG. 1 General Views of a Suitable Apparatus for Marking End Diameters Used for Alignment of Specimen in Testing Machine

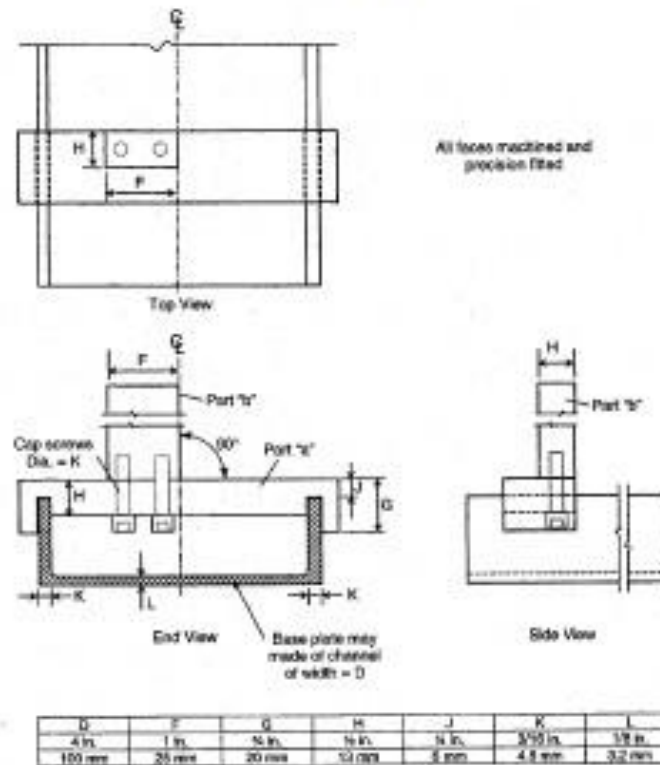


FIG. 2 Detailed Plans for a Suitable Apparatus for Marking End Diameters Used for Aligning the Specimen

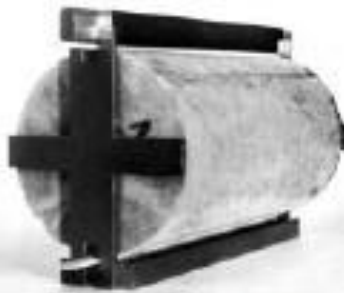


FIG. 3 Jig for Aligning Concrete Cylinder and Bearing Strips

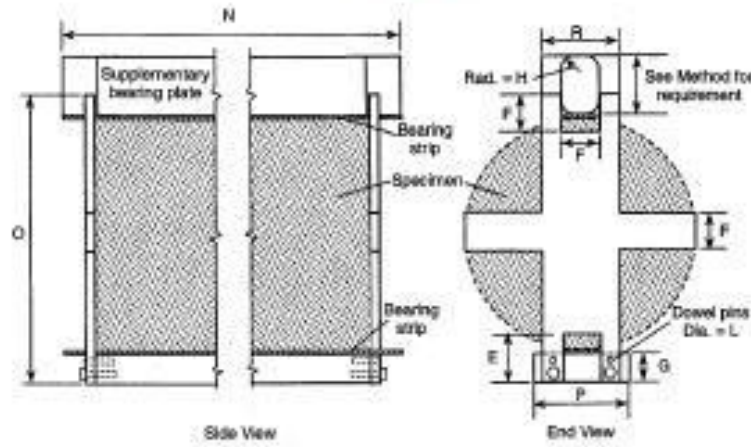
7.3.1 The projection of the plane of the two lines marked on the ends of the specimen intersects the center of the upper bearing plate, and

7.3.2 The supplementary bearing bar or plate, when used, and the center of the specimen are directly beneath the center of thrust of the spherical bearing block (see Fig. 5).

7.4 *Positioning by Use of Aligning Jig*—Position the bearing strips, test cylinder, and supplementary bearing bar by means of the aligning jig as illustrated in Fig. 3 and center the jig so that the supplementary bearing bar and the center of the specimen are directly beneath the center of thrust of the spherical bearing block.

7.5 *Rate of Loading*—Apply the load continuously and without shock, at a constant rate within the range 100 to 200 psi/min [0.7 to 1.4 MPa/min] splitting tensile stress until failure of the specimen (Note 3). Record the maximum applied load indicated by the testing machine at failure. Note the type of failure and the appearance of the concrete.

Note 3—The relationship between splitting tensile stress and applied load is shown in Section 8. The required loading range in splitting tensile stress corresponds to applied total load in the range of 11 300 to 22 600 lbf [50 to 100 kN]/min for 6 by 12-in. [150 by 300-mm] cylinders.



N	O	P	R	E	F	G	H	L
15 in.	7 1/2 in.	2 1/2 in.	2 in.	1 1/2 in.	1 in.	1/2 in.	1/2 in.	1 1/2 in.
375 mm	190 mm	65 mm	50 mm	38 mm	25 mm	12 mm	12 mm	38 mm

FIG. 4 Detailed Plans for a Suitable Aligning Jig for 6 by 12 in. (150 by 300 mm) Specimen

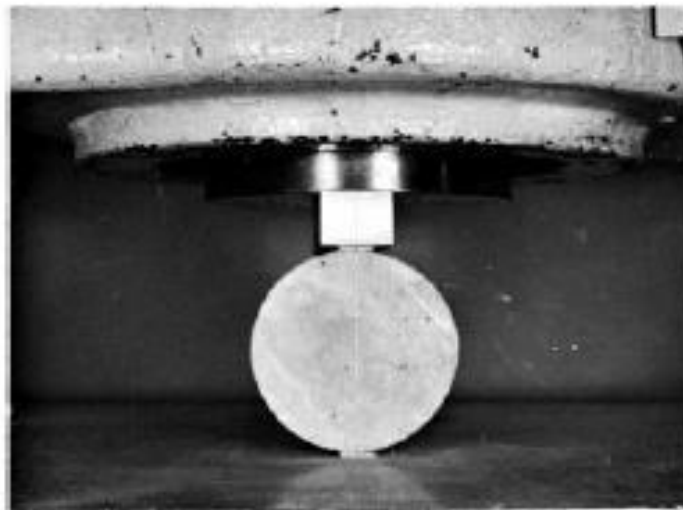


FIG. 5 Specimen Positioned in a Testing Machine for Determination of Splitting Tensile Strength

8. Calculation

8.1 Calculate the splitting tensile strength of the specimen as follows:

$$T = 2P/\pi dl \quad (1)$$

where:

T = splitting tensile strength, psi [MPa],

P = maximum applied load indicated by the testing machine, lbf [N],
 l = length, in. [mm], and
 d = diameter, in. [mm].

9. Report

- 9.1 Report the following information:
 - 9.1.1 Identification number,
 - 9.1.2 Diameter and length, in. [mm],
 - 9.1.3 Maximum load, f_{bf} [N],
 - 9.1.4 Splitting tensile strength calculated to the nearest 5 psi [0.05 MPa],
 - 9.1.5 Estimated proportion of coarse aggregate fractured during test,
 - 9.1.6 Age of specimen,
 - 9.1.7 Curing history,
 - 9.1.8 Defects in specimen,
 - 9.1.9 Type of fracture, and
 - 9.1.10 Type of specimen.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—An interlaboratory study of this test method has not been performed. Available research data,³

however, suggests that the within batch coefficient of variation is 5% (see Note 4) for 6 × 12-in. [150 × 300-mm] cylindrical specimens with an average splitting tensile strength of 405 psi [2.8 MPa]. Results of two properly conducted tests on the same material, therefore, should not differ by more than 14% (see Note 4) of their average for splitting tensile strengths of about 400 psi [2.8 MPa].

Note 4—These numbers represent, respectively, the (1s) and (2s) limits as defined in Practice C 670.

10.2 *Bias*—The test method has no bias because the splitting tensile strength can be defined only in terms of this test method.

11. Keywords

11.1 cylindrical concrete specimens; splitting tension; tensile strength

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 496 - 96, that may impact the use of this test method. (Approved February 1, 2004)

- | | |
|--|---|
| (1) Revised 1.2. | (5) Revised Section 4. |
| (2) Added 1.4. | (6) Revised 3.2 and 5.3. |
| (3) Revised 5.1, 6.1, Section 2, and Note 1 to correct references. | (7) Revised Note 2. |
| (4) Revised 5.2, 6.2, 7.2, 7.5, 10.1, and Note 4 by metrication rules. | (8) Figs. 1, 2, and 4 were revised and redrawn. |

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2999, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

Anexo 23. Norma ASTM C-1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures



Designation: C 1240 – 03a

Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures¹

This standard is issued under the fixed designation C 1240; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted letter (e) indicates an editorial change since the last revision or approval.

1. Scope*

1.1 This specification covers silica fume for use in concrete and other systems containing hydraulic cement.

1.2 In the cases of shirred or densified silica fume, perform the tests on the raw silica fume from which these products have been made.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 The following safety hazards caveat pertains only to the test methods portions, Sections 10-19, of this specification: *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Read the material safety data sheets for materials used.*

1.5 The text of this standard references notes and footnotes that provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables) shall not be considered as requirements of this standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards

- C 109/C 109M Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)²
- C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement²
- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates²
- C 137/C 137M Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete³
- C 183 Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement²

C 185 Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar²

C 219 Terminology Relating to Hydraulic Cement²

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete³

C 430 Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve²

C 441 Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction³

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials³

C 1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements²

C 1012 Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution²

C 1069 Test Method for Specific Surface Area of Ahmima or Quartz by Nitrogen Adsorption⁴

C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement²

C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *silica fume*—very fine pozzolanic material, composed mostly of amorphous silica produced by electric arc furnaces as a byproduct of the production of elemental silicon or ferro-silicon alloys (also known as condensed silica fume and microsilica).

3.1.2 Other terms in this specification are defined in Terminologies C 125 and C 219.

4. Ordering Information

4.1 The purchaser shall specify any optional chemical or physical requirements.

5. Chemical Composition

5.1 Silica fume shall conform to the requirements for chemical composition prescribed in Table 1.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Supplementary and Cementitious Materials.

Current edition approved Aug. 10, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1995. Last previous edition approved in 2003 as C 1240-03.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

TABLE 1 Chemical Requirements

SiO ₂ , min, %	85.0
Moisture content, max, %	3.0
Loss on ignition, max, %	6.0

6. Physical Requirements:

6.1 Silica fume shall conform to the physical requirements prescribed in Table 2. Optional physical requirements are given in Table 3.

7. Sampling

7.1 When the purchaser desires that the silica fume be sampled and tested to verify compliance with this specification, perform the sampling and testing in accordance with Practice C 183, modified as described in 7.3.

Note. 1—Exercise caution in the interpretation of Practice C 183, since there is a difference between the continuous manufacture of hydraulic cement and the generation and collection of silica fume. To a great extent, storage is dictated by the design of the silica-fume collection system. The design of silica-fume collection systems may not have provided for sampling points and practices.

7.2 Practice C 183, as modified, is not designed for manufacturing quality control and is not required for manufacturer's certification.

7.3 The following modification of Practice C 183 is necessary to render it applicable to silica fume.

7.3.1 Replace the words "hydraulic cement" and "cement" with the words "silica fume" every time that they appear in the text.

7.3.2 All samples, whether grab or composite, shall have a mass of at least 1 kg (2 lb).

7.3.3 When compliance verification tests of silica fume are required to be made at a laboratory other than that of the silica-fume manufacturer or marketer, coordinate the silica-fume sampling schedule, sample transportation time, and sample testing schedule among the purchaser, manufacturer, and testing laboratory so that the test results will be available when the decision to accept or reject the silica fume must be made.

7.3.4 The section entitled "Sampling" is modified as follows:

7.3.4.1 Take two grab samples or two composite samples for the first 100 Mg (110 tons) of silica fume. Take a grab sample or a composite sample for each subsequent 100 Mg

TABLE 2 Physical Requirements

Oversize:	
Percent retained on 45- μ m (No. 325), max, % ^a	10
Percent retained on 45- μ m (No. 325), max variation from average, percentage points ^b	5
Accelerated pozzolanic strength activity index:^c	
With portland cement at 7 days, min percent of control	105
Specific surface, min, m ² /g	15

^a Exercise care to avoid retaining agglomerations of extremely fine material.
^b The average shall consist of the ten preceding tests or all of the preceding tests if the number is less than ten.

^c Accelerated pozzolanic strength activity index is not to be considered a measure of the compressive strength of concrete containing the silica fume. This is a measure of the reactivity of a given silica fume with a given cement and may vary with the source of both the silica fume and the cement.

TABLE 3 Optional Physical Requirements^a

Uniformity requirements:	
When air-entraining concrete is specified, the quantity of air-entraining agent required to produce air content of 18.0 vol % of mortar shall not vary from the average established by the ten preceding tests or by all preceding tests if less than ten, by more than, %	20
Reactivity with cement alkalis:^b	
Reduction of mortar expansion at 14 days, min, %	80
Sulfate resistance expansion:^c	
(moderate resistance) 6 months, max, %	0.10
(high resistance) 6 months, max, %	0.05
(very high resistance) 1 year, max, %	0.05

^a Will be made only at the request of the purchaser.
^b The indicated tests for reactivity with cement alkalis shall not be requested unless the material is to be used with an aggregate that is regarded as deleteriously reactive with alkalis in hydraulic cement. The test for reduction of mortar expansion may be made using any high-alkali cement in accordance with Test Methods C 311, if the cement to be used in the work is not known or is not available at the time of the test. The test for mortar expansion should be performed by each of the high-alkali cements to be used in the work.
^c Only one limit shall be specified.

(110 tons) of silica fume, but not less than two samples shall be taken in any sampling program.

7.3.4.2 *From Bulk Storage at Points of Discharge*—Withdraw silica fume from the discharge openings in a steady stream until sampling is completed. In sampling bulk storage at points of discharge, while the silica fume is flowing through the openings, take samples at such intervals so that, at a minimum, the sampling requirements of 7.3.4.1 are met.

7.3.5 The section entitled "Amount of Testing" is modified by deleting the first paragraph, "General."

8. Frequency of Tests:

8.1 Make all chemical determinations and physical tests on composite samples representing no more than 400 Mg (440 tons) each. Prepare each composite sample by combining portions from the samples representing each 100 Mg (110 tons), so that each 100 Mg is represented equally.

8.2 Test for specific surface and accelerated pozzolanic strength activity index using composite samples that represent 3200 Mg (3520 tons) or 3 months of production, whichever gives the highest frequency. Prepare each composite sample by combining portions from the samples representing each 400 Mg (440 tons) or 1 month, whichever gives the highest frequency, so that each sample is represented equally.

9. Preparation of Sample

9.1 Prepare composite samples for tests, as required in Section 8, by arranging all test samples in groups, with each group representing the number of megagrams required by the test or tests for which the composite sample is intended. From each of the samples in a group, take equal portions, sufficient in amount to form a composite sample large enough to permit making the required physical or chemical determinations.

9.2 Prior to testing, mix grab samples and composite samples thoroughly. A clean and dry laboratory concrete drum mixer provides adequate mixing for this purpose. Take care to limit the volume of silica fume in the drum mixer to the range of 10 to 50 % of the drum's total capacity. If necessary, secure a sheet of polyethylene film on the drum with an elastic tiedown to keep the material in the drum. Limit the mixing action to 5 \pm 1 min.

9.2.1 When a small sample size precludes the use of a concrete mixer, use a heavy plastic bag, of a capacity at least five times larger than the sample volume, to mix the sample thoroughly. After placing the sample in the bag, close the bag by tying the bag opening tightly, and mix the material by rolling the bag around for 5 ± 1 min.

9.3 Take material for specific tests from a thoroughly mixed sample by using a sampling device (sampling tube, scoop, etc.) of appropriate size to make a test specimen. Make this test specimen from at least six random subsamples.

TEST METHODS—CHEMICAL ANALYSIS

10. Silicon Dioxide and Total Alkalies

10.1 *Reference Method*—Use the reference method in Test Methods C 114 for cements with insoluble residue greater than 1%. Analysts performing sodium oxide and potassium oxide determinations shall observe the precautions outlined in the applicable section of Performance Specification C 1157 (refer to the section on Test Methods). Most pozzolans dissolve completely in lithium borate fluxes.

11. Moisture Content and Loss on Ignition

11.1 Follow the applicable provisions of Test Methods C 311.

TEST METHODS—PHYSICAL TESTS

12. Density

12.1 *Equipment:*

12.1.1 *Two 500-mL Volumetric Flasks, Class A.*

12.1.2 *Balance, with an accuracy of at least 0.01 g.*

12.1.3 *Constant Temperature Bath, capable of being regulated within $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (1.0°F).*

12.2 *Deionized Water.*

12.3 *Procedure:*

12.3.1 Determine the density of the material as received, unless otherwise specified, as follows. If density determination on an ignited sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in the applicable section given in Test Methods C 114.

12.3.2 Determine the mass (W_1) of a 500-mL volumetric flask, to an accuracy of 0.01 g. Add 30 g of silica fume. Determine the mass of the flask and the contents (W_2) to the nearest 0.01 g. Add water to the flask to fill it one-half full, and shake it to ensure thorough wetting of the material. Fill to the mark with water. Remove air bubbles by shaking the flask at 15-min intervals until the liquid is free of air or by applying a vacuum to the flask. After all of the air bubbles are removed, place the flask in a constant temperature bath at $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ until the flask and its contents reach a constant temperature. Remove the flask from the water bath; immediately add or remove water, at the same temperature, to the flask to get the meniscus on the mark. Wipe dry the exterior of the flask and determine the mass of the flask and its contents (W_3).

12.3.3 Empty, clean, and determine the mass of the 500-mL volumetric flask, used above, filled to the mark with water (W_4) stabilized at $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

12.4 *Calculation:*

$$D_w = \frac{(W_3 - W_1)}{500 \text{ mL} - [(W_2 - W_1)/D_s]} \quad (1)$$

where:

D_s = density of silica fume, Mg/m^3 ,

W_1 = mass of 500-mL volumetric flask, g,

W_2 = mass of 500-mL volumetric flask plus approximately 30 g of silica fume, g,

W_3 = mass of 500-mL volumetric flask plus silica fume plus water to the mark, g,

W_4 = mass of 500-mL volumetric flask plus water to the mark, g, and

D_w = $(W_3 - W_1)/500\text{-mL}$, Mg/m^3 .

12.5 Report the average of two density determinations.

13. Oversize, Amount Retained When Wet-Sieved on a 45- μm (No. 325) Sieve

13.1 Use Test Method C 430. Calibrate the sieves in accordance with Test Method C 430.

Note 2—Oversize is used to determine the amount of contaminating material retained on the 45- μm sieve. See Appendix X2.

14. Specific Surface

14.1 Determine the specific surface by the BET, nitrogen adsorption method, in accordance with Test Method C 1069.

Note 3—Manufacturers and examples of nitrogen adsorption instrumentation include Horiba Instruments, Inc., Irvine, CA, SA-9600; Micromeritics Instrument Corporation, Norcross Georgia, FlowSorb-II 2300; Quantachrome Corporation, Boynton Beach, FL, Quantasorb Jr.; and RWWE Labogeräte Service GmbH, Korchenbroich, Germany, Strochlein AREAster II.

15. Air Entrainment of Mortar

15.1 Follow the applicable provisions of Test Methods C 311, except use the following test mixture and equation for W_s :

	Test Mixture
Portland cement, g	300
Silica fume, g	30
20-30 Standard Ottawa sand, g	1170
Water, mL, sufficient to give a flow of 80 to 95 %	Y
Neutralized Vinsol resin solution, mL, sufficient to produce an air content of 18 \pm 3 %	Z

$$W_s = \frac{300 + 1170 + 30 + (300 \times P \times 0.01)}{300(2.15 + 1170(2.65 + (300Z)) + [(300 \times P \times 0.01)Y]} \quad (2)$$

Then calculate:

$$\text{Air content, volume \%} = 100[1 - (W/W_s)]W_s - W/400 \quad (3)$$

where:

W_s = actual mass per unit of volume of mortar as determined by Test Method C 185, g/mL ,

W = mass of the specified 400 mL of mortar (see Test Method C 185), g,

W_c = theoretical mass per unit volume, calculated on an air-free basis and using the values for density and quantities of the materials in the mixture, g/mL ,

P = percent of mixing water plus Vinsol resin solution based on mass of cement, and

D = density of silica fume used in the mixture, Mg/m^3 .

15.2 Determine the flow in accordance with the applicable provisions of Test Method C 109/C 109M.

16. Accelerated Pozzolanic Strength Activity Index with Portland Cement

16.1 Use the applicable section on strength activity index with portland cement of Test Methods C 311, except change to reflect testing at constant water to cementitious materials ratio. Prepare test specimens from the batch proportions below, molding three cubes from both the control mix and the test mix.

16.1.1 Control Mixture:

- 16.1.1.1 500 g of portland cement,
- 16.1.1.2 1375 g of graded standard sand, and
- 16.1.1.3 242 mL of water.

16.1.2 Test Mixture:

- 16.1.2.1 450 g of portland cement,
- 16.1.2.2 50 g of silica fume,
- 16.1.2.3 1375 g of graded standard sand, and
- 16.1.2.4 242 mL of water.
- 16.1.2.5 *N* grams of dry high-range water reducer, meeting ASTM C 494 Type F, required to produce a flow of 100 to 115 %. Add the high-range water reducer directly to the mixing water in the mixing bowl. Then add the cement or the cement-silica fume mixture and start the mixing cycle.

16.1.3 Determine the flow in accordance with the applicable provisions of Test Method C 1437.

16.1.4 *Storage of Specimens*—After 24 h of initial curing in the moist room ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ and relative humidity of not less than 95 %), place the cubes in airtight glass containers and store at $65 \pm 2^\circ\text{C}$ for six days.

16.1.5 Determine the compressive strength, as specified in Test Method C 109/C 109M, of the three specimens of the control mixture and the three specimens of the test mixture at 7 days after molding.

17. Reactivity with Cement Alkalies

17.1 Determine the reduction of mortar expansion in accordance with Test Method C 441, except that the amount of silica fume in the test mixture shall be 10 % by mass of cementitious material.

18. Sulfate Resistance

18.1 Determine sulfate resistance according to Test Method C 1012, except that the amount of silica fume used in the test mixture is 10 % by mass of cementitious material.

19. Bulk Density

19.1 The bulk density of silica fume is defined as the mass of a unit volume of loose silica fume.

19.2 This test method covers determination of the bulk density of silica fume, as silica fume is transferred from one container to another with controlled minimum compaction. Its particular usefulness is in connection with identifying material form (as produced or densified), silo or truck storage capacity, material handling and transportation characteristics.

19.3 Equipment:

19.3.1 *Balance*, meeting Specification C 1005, with a sensitivity of 0.1 g.

19.3.2 *Vibrating Table*⁵, Table top, electromagnetic vibrating table, with a controlled low-amplitude that does not exceed 1 mm linear vibration. Approximate deck size is 175 × 250 mm with a 5 kg capacity. The amplitude of the vibration shall be capable of being regulated to suit the characteristics of the material being handled.

19.3.3 *Stainless Steel Beaker*, of known volume, not less than 1 L calibrated to the nearest ± 1 mL. Without a spout.

19.4 Procedure:

19.4.1 Determine the mass of the clean dry beaker to the nearest 1 g.

19.4.2 Fill the beaker with silica fume and compact by use of the vibrating table at a mid-range setting for 15 s, adding material as needed.

19.4.3 Screed or strike off the measure, with a straight edge or spatula, to produce a flat, even surface, that is level with rim or edge of the beaker. Wipe off any excess silica fume that may adhere to the sides.

19.4.4 Place the filled measure on the balance and determine the mass of the silica fume to the nearest 1 g.

19.5 Calculation:

19.5.1 Divide the net mass of the silica fume in grams by the volume of the container in milliliters. Multiply by 1000 to express the density in kilograms per cubic meter. To convert the value in kilograms per cubic meter to pounds per cubic foot, divide by 16.01846.

20. Report

20.1 Report the following information:

- 20.1.1 SiO₂ content, %
- 20.1.2 Moisture content, %
- 20.1.3 Loss on ignition, %
- 20.1.4 Overfine, % retained,
- 20.1.5 Bulk density, kg/m³,
- 20.1.6 Density, Mg/m³,
- 20.1.7 Name of manufacturer and brand, if applicable,
- 20.1.8 Accelerated Pozzolanic Strength Activity Index,
- 20.1.9 Specific surface, m²/g, and
- 20.1.10 Available alkalies, as equivalent Na₂O, %.

20.2 Report the following information when specifically requested by the purchaser:

- 20.2.1 The quantity of air-entraining agent compared to the 10 preceding tests, %
- 20.2.2 Reduction of mortar expansion, %, and
- 20.2.3 Sulfate resistance expansion, %.

21. Precision and Bias

21.1 Precision:

- 21.1.1 *Accelerated Pozzolanic Strength Activity Index Test*:
 - 21.1.1.1 *Single-Operator Precision*—The precision of this test will be evaluated using Practice C 670.
 - 21.1.1.2 *Multilaboratory Precision*—The precision of this test will be evaluated using Practice C 670.

21.1.2 Density Test:

⁵ A suitable vibrating table is the Syntron Paper Jigger, Model J-1, manufactured by F.M.C. Corp., 57 Cooper Ave., Honesdale, PA 17748.

21.1.2.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation among single test results (a test result is defined in this specification as the average of two separate measurements) has been found to be 0.035 Mg/m³.⁶ Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator should not differ by more than 0.099 Mg/m³ on the same silica fume.

21.1.2.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation among single test results (a test result is defined in this specification as the average of two separate measurements) has been found to be 0.047 Mg/m³.⁶ Therefore, results of two properly conducted tests in different laboratories on the same silica fume should not differ by more than 0.132 Mg/m³ of their average.⁶

21.1.3 *Bulk Density:*

21.1.3.1 *Precision*—The precision of this test method will be evaluated using Practice C 670.

21.1.3.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

21.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for the procedures for measuring the accelerated pozzolanic strength activity index and the density, no statement on bias is being made.

⁶ These measurements represent, respectively, the (1s) and (2s) limits in accordance with Practice C 670.

22. *Rejection and Retesting*

22.1 The purchaser has the right to reject material that fails to conform to the requirements of this specification. Rejection shall be reported to the producer or supplier promptly and in writing. In case of dissatisfaction with the results of the tests, the producer or supplier is not prohibited from making a claim for retesting.

23. *Certification*

23.1 When specified in the purchase order or contract, the purchaser shall be furnished certification that samples have been tested as directed in this specification and the specified requirements have been met. When specified in the purchase order or contract, a report of the test results shall be furnished.

24. *Packaging and Package Marking*

24.1 When silica fume is delivered in packages, the name, and brand, if applicable, of the manufacturer or distributor and the mass of the silica fume contained therein shall be marked plainly on each package. Similar information shall be provided in the shipping invoices accompanying the shipment of packaged or bulk silica fume in dry or shrouded forms. All packages shall be in good condition at the time of inspection.

25. *Storage and Inspection*

25.1 Silica fume shall be stored in such a manner as to permit easy access for the proper inspection and identification of each shipment. Facilities for inspection and sampling shall be provided at the point from which the material is to be shipped.

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. SILICA CONTENT

X1.1 Since the quantity of silica in the amorphous state is one of the primary characteristics that determines the amount of activity of silica fume, the chemical analysis for silica content is important. At the present time, there are no National Institute of Standards and Technology (NIST) SRMs of silica fume, and reference silicon dioxides (SiO₂) are therefore the only materials available for instrumental standards. Since silica in this specification is limited to 85 % SiO₂ or higher, silica flour (99.9 %), or silica brick (93.94 %), etc. is adequate for flame atomic absorption (AA) analysis. At the present time, there are problems using inductively coupled plasma (ICP) for the analysis of solutions with high percentages of silica as well

as problems with borate clogging the nebulizer. Another problem is that when a lithium borate fusion is dissolved in HCl, some of the silica returns to a solid phase and can be filtered out. This will affect the total silica analysis by any instrumental method that uses this method of fusion. Energy dispersive X-ray (EDX) is the technique most likely to be used with the X-ray based methods. This technique needs a similar material, a silica fume, for comparison. The "wet method," sodium carbonate fusion, in which silica is recovered gravimetrically as SiO₂, is the only method, at the present, that requires no standard and yields accurate results.

Anexo 24. Norma ASTM C-1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete

WSDOT FOP for ASTM C 1611

Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete

1. Scope

- 1.1 This test method covers the determination of slump flow of self-consolidating concrete.
- 1.2 The values stated in either inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.
- 1.3 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (**Warning:** Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.)
- 1.4 The text of this standard references notes and footnotes that provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

- 2.1 ASTM Standards
 - C 143/C 143M
Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
 - C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
 - C 173/C 173M
Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
 - C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- 2.2 AASHTO Standards
 - T 119M/T 119
Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
 - T 347 Slump Flow of Self-Consolidating Concrete (SCC)
- 2.3 WAQTC Standards
 - TM 2 Sampling Freshly Mixed Concrete

3. Terminology

- 3.1 Definitions of terms specific to this standard:
 - 3.1.1 *halo, n* – An observed cement paste or mortar ring that has clearly separated from the coarse aggregate, around the outside circumference of concrete after flowing from the slump cone.
 - 3.1.2 *spread, n* – The distance of lateral flow of concrete during the slump-flow test.
 - 3.1.3 *stability, n* – The ability of a concrete mixture to resist segregation of the paste from the aggregates.
 - 3.1.4 *viscosity, n* – Resistance of a material to flow under an applied shearing stress.

4. Summary of Test Method

- 4.1 A sample of freshly mixed concrete is placed in a mold shaped as the frustum of a cone. The concrete is placed in one lift without tamping or vibration. The mold is raised, and the concrete allowed to spread. After spreading ceases, two diameters of the concrete mass are measured in approximately orthogonal directions, and slump flow is the average of the two diameters.

5. Significance and Use

- 5.1 This test method provides a procedure to determine the slump flow of self-consolidating concrete in the laboratory or the field.
- 5.2 This test method is used to monitor the consistency of fresh, unhardened self-consolidating concrete and its unconfined flow potential.
- 5.3 It is difficult to produce self-consolidating concrete that is both flowable and nonsegregating using coarse aggregates larger than 1 in (25 mm). Therefore, this test method is considered applicable to self-consolidating concrete having coarse aggregate up to 1 in (25 mm) in size.

6. Apparatus

- 6.1 **Mold** – The mold used in this test method shall conform to that described in FOP for AASHTO T 119.
- 6.2 **Base Plate** – The base plate on which the mold rests shall be nonabsorbent, smooth, rigid, and have a minimum diameter of 36 in (915 mm).

Note 1: Field experience and results from the round robin test program have shown that base plates made from sealed/laminated plywood, acrylic plastic, or steel are suitable for performing this test.
- 6.3 **Strike-off Bar** – As described in FOP for WAQTC T 152.

7. Sample

- 7.1 The sample of concrete from which test specimens are made shall be representative of the entire batch. Sample in accordance with FOP for WAQTC TM 2.

8. Procedure

- 8.1 The slump-flow test shall be performed on a flat, level, nonabsorbent base plate. Position and shim the base plate so it is fully supported, flat, and level.
- 8.2 Filling the Mold – WSDOT requires the use of Procedure B.
- 8.2.1 Filling Procedure B (Inverted Mold) – Dampen and place the mold, with the smaller opening of the mold facing down, in the center of a flat, moistened base plate or concrete surface. Using a suitable container, fill the entire mold continuously (Note 2). The mold shall be held firmly in place during filling. Do not rod or tamp the SCC. Slightly overfill the mold.
- Note 2:* Filling the mold with concrete by using multiple scoops or by pouring from a bucket or similar container has been found to be acceptable.
- 8.3 Strike off the surface of the concrete level with the top of the mold by a sawing motion of the strike-off bar. Remove concrete from the area surrounding the base of the mold to preclude interference with the movement of the flowing concrete. Remove the mold from the concrete by raising it vertically. Raise the mold a distance of 9 ± 3 in (225 ± 75 mm) in 3 ± 1 seconds by a steady upward lift with no lateral or torsional motion. Complete the entire test from start of the filling through removal of the mold without interruption within an elapsed time of $2\frac{1}{4}$ minutes.
- 8.4 Wait for the concrete to stop flowing and then measure the largest diameter of the resulting circular spread of concrete to the nearest $\frac{1}{4}$ in (5 mm). When a halo is observed in the resulting circular spread of concrete, it shall be included as part of the diameter of the concrete. Measure a second diameter of the circular spread at an angle approximately perpendicular to the original measured diameter.
- 8.5 If the measurement of the two diameters differs by more than 2 in (50 mm), the test is invalid and shall be repeated.

9. Calculation

- 9.1 Calculate the slump flow using Eq 1:

$$\text{Slump flow} = \frac{(d^1 + d^2)}{2}$$

where:

d^1 = the largest diameter of the circular spread of the concrete, and

d^2 = the circular spread of the concrete at an angle approximately perpendicular to d^1

- 9.2 Record the average of the two diameters to the nearest $\frac{1}{4}$ in (5 mm).

10. Report

- 10.1 Report the slump flow to the nearest $\frac{1}{4}$ in (5 mm).
- 10.2 Report results on concrete delivery ticket (i.e., Certificate of Compliance).
- 10.3 The name of the tester who performed the field acceptance test is required on concrete delivery tickets containing test results.

11. Precision and Bias

See ASTM C1611/C 1611M for precision and bias.

Anexo 25. Norma ASTM C-796. Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam



Designation: C 796 – 97

Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam¹

This standard is issued under the front designation C 796; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method furnishes a way of measuring, in the laboratory, the performance of a foaming chemical to be used in producing foam (air cells) for making cellular concrete.

1.2 This test method includes the following:

1.2.1 Manufacture of laboratory quantities of cellular concrete.

1.2.2 Determination of the air content of the freshly prepared cellular concrete and of the hardened concrete after handling in conventional machinery.

1.2.3 Determination of the following properties of the hardened concrete: compressive strength, tensile splitting strength, density, and water absorption. It may not be necessary to study all of the above properties in all cases, depending on the proposed use of the material.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.4 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

1.5 The text of this standard references notes and footnotes which provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 88 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate²
- C 150 Specification for Portland Cement²
- C 192 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²
- C 495 Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete²

C 496 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens²

C 511 Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes²

C 869 Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *cellular concrete*—a lightweight product consisting of portland cement, cement-silica, cement-pozzolan, lime-pozzolan, or lime-silica paste, or paste containing blends of these ingredients and having a homogeneous void or cell structure, attained with gas-forming chemicals or foaming agents (for cellular concrete containing binder ingredients other than, or in addition to portland cement, autoclave curing is usually employed).³ In cellular concrete the density control is achieved by substituting macroscopic air cells for all or part of the fine aggregate. Normal-weight coarse aggregate is usually not used but lightweight aggregates, both fine and coarse, are often utilized in cellular concrete.

3.2 Symbols:

- D_{ac1} = experimental density of the concrete before pumping, lb/ft³(kg/m³)
- D_{ac2} = experimental density of the concrete after pumping, lb/ft³(kg/m³)
- D_p = theoretical density of the plastic mix based on absolute volume, lb/ft³(kg/m³)
- D_g = design density of the test mixture, lb/ft³(kg/m³)
- SG^*C = specific gravity of cement = 3.15
- T = time required to overfill the container, min
- T_f = time required to generate 1 ft³(1 m³) of foam, min
- V = volume of foam container, ft³(m³)
- V_a = volume of air required in the test batch, ft³(m³)
- V_c = volume of test specimen (cylinder), ft³(m³)
- V_f = volume of foam in the test batch, ft³(m³)

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.23 on Chemical Admixtures.

Current edition approved Nov. 10, 1997. Published October 1998. Originally published as C 796 – 74 T. Last previous edition C 796 – 87a (1993).

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ ACI Committee 116, "Cement and Concrete Terminology," American Concrete Institute, Publication SP-19, 1967, p. 144.

- V_w = volume of water absorbed by test specimen in 24 h, $\text{ft}^3(\text{m}^3)$
- W_1 = net weight of foam in overfilled container before striking off, lb (kg)
- W_2 = net weight of foam in container after striking off, lb (kg)
- W_c = weight of cement in the test batch, lb (kg)
- W_f = weight of foam in the test batch, lb (kg)
- W_{TW} = total weight of water in the test batch, including weight of foam, lb (kg)
- W_{fd} = density of foam, $\text{lb/ft}^3(\text{kg/m}^3)$
- W_w = weight of water added to test batch at mixer, lb (kg)

4. Summary of Test Method

- 4.1 This test method includes the following:
 - 4.1.1 Manufacture of laboratory quantities of cellular concrete.
 - 4.1.2 Determination of the air content of freshly prepared cellular concrete and of hardened concrete after handling in conventional machinery.
 - 4.1.3 Determination of the following properties of hardened concrete: compressive strength, tensile splitting strength, density, and water absorption. It may not be necessary to study all of the above properties in all cases, depending on the proposed use of the material.

5. Significance and Use

5.1 This test method is used to develop data for comparison or compliance with the requirements of Specification C 869.

6. Apparatus

- 6.1 *Mixer*—The mixer shall be a power-driven paddle-type mixer with a capacity of at least 4 $\text{ft}^3(0.12 \text{ m}^3)$, an operating speed of 40 to 45 r/min (0.24 to 0.27 kHz), and equipped with rubber wiper blades.
- 6.2 *Foam Generator*—The foam generator shall be a laboratory-sized generator approved by the manufacturer of the foam being used and shall be similar to the type used in the field.
- 6.3 *Pump*—The pump shall be an open or closed throat-type pump⁴ and shall be run at 450 r/min (2.7 kHz). The pump shall be equipped with a 4.5- $\text{ft}^3(0.13 \text{ m}^3)$ "feed" reservoir and 50 ft (15 m) of open-end 1-in. (25-mm) inside diameter rubber hose on the pump discharge, the exit end of the hose being at the same height as the pump.
- 6.4 *Curing Cabinet*—The curing cabinet shall be as described in Specification C 511.
- 6.5 *Molds*—The cylindrical molds for compression test specimens shall be as described in the Apparatus section of Test Method C 495. The molds for all other test specimens shall conform to the cylinder molds in the Apparatus section of Method C 192.
- 6.6 *Strike-Off Plate for Molds*—A 1/4-in. (6-mm) thick, flat steel plate at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the mold.

6.7 *Scales*—Scales and weights shall be accurate to within 0.1 % of the weight of the material being measured.

6.8 *Compression Machines*—Compression testing machines used for compressive strength tests and tensile-splitting strength tests shall conform to the requirements of Test Methods C 495 and C 496, respectively.

6.9 *Drying Oven*—The drying oven shall be as described in Test Method C 88.

6.10 *Compressed Air*—A source of compressed air capable of maintaining pressures in the range of 60 to 100 psi (0.4 to 0.7 MPa) to ± 1 psi (± 0.007 MPa).

6.11 *Weighting Container for Concrete*—A machined-steel container of 0.5 $\text{ft}^3(0.014 \text{ m}^3)$ volume with a flat smooth rim.

6.12 *Strike-Off Plate for Weighting Container*—A 1/4-in. (6-mm) thick, flat steel plate, at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the rim of the weighting container.

6.13 *Stop Watch*—A stop watch graduated in seconds and minutes.

6.14 *Calipers*—Calipers to span 3, 6, and 12 in. (76, 152, and 305 mm).

6.15 *Foam Weighting Container*—A lightweight vessel of approximately 2 $\text{ft}^3(0.06 \text{ m}^3)$ capacity, with a smooth rim for striking off.

6.16 *Strike-Off Plate for Foam Weighting Container*—A 1/4-in. (6-mm) thick, flat steel plate at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the rim of the container.

6.17 *Small Tools*—Small tools such as a rubber-headed hammer and a trowel shall be provided.

7. Materials and Proportions

7.1 *Cement*—The cement used shall be Type I or Type III portland cement meeting the requirements of Specification C 150.

7.2 *Water-Cement Ratio*—The water requirement will vary with the type and source of cement. For the purpose of these tests, $w/c = 0.58$ for Type I cement and $w/c = 0.64$ for Type III cement shall be used. However, if a particular cement or foaming agent used with these values of w/c does not produce a satisfactory mix, a trial mix or mixes may be made using the cement and foaming agent in question. Pump the trial mix (see 8.7.1) and revise the w/c if D_{act} , the unit weight of the concrete after pumping, is more than 10 % different from the design unit weight of 40 $\text{lb/ft}^3(641 \text{ kg/m}^3)$.

7.3 *Batch Quantities*—The quantities of materials described in Table 1 shall be used in the test batch.

7.3.1 The foaming solution in the foam will be considered as part of the total mixing water. The quantities listed in Table 1 will produce concrete weighing 40 $\text{lb/ft}^3(641 \text{ kg/m}^3)$. The batch yield will be 3.95 $\text{ft}^3(0.112 \text{ m}^3)$ for the batch using Type I cement. Using the quantities for Type III cement, the yield will be 4.1 $\text{ft}^3(0.116 \text{ m}^3)$.

TABLE 1 Materials for the Test Batch

Type of Cement	Cement, lb (kg)	Total Water, lb (kg)	Foam, $\text{ft}^3(\text{m}^3)$
I	100.0 (45.36)	58.0 (26.31)	150.33(02.4 - W_{fo})(71.0/1000 - W_{fo})
II	100.0 (45.36)	64.0 (29.03)	150.33(02.4 - W_{fo})(73.0/1000 - W_{fo})

⁴ The Moyno Type CDR, Frame 2XC4 or 2L6 pump, or equivalent, has been found satisfactory for this purpose.

7.3.2 The density and the yields stated in Table 1 are based on the assumption that no accidentally entrapped air and no change in foam volume from the calculated value exist.

Note 1—The equation for foam volume required for the test batch may be derived as shown in Appendix X1.

8. Procedure

8.1 Make an aqueous solution of the foaming agent in the dilution specified by the manufacturer. If the dilution is not specified, preliminary tests are necessary to determine the required dilution. A suggested starting point for such tests is 40 parts water to 1 part foaming agent, by volume.

8.2 Charge the foam generator with the amount of foaming solution suggested by the manufacturer of the generator.

8.3 Connect the generator with the source of compressed air, adjusting the pressure to that recommended by the manufacturer of the foaming agent being tested.

8.4 Using the stop watch, calibrate the generator as follows. Weigh the empty foam container and determine its volume. Overfill the container with foam, measuring the time required using a stop watch then weigh. Strike off the excess foam, holding the strike-off plate in a horizontal position (plane of the plate horizontal) and moving it across the top of the container with a sawing action. Again weigh. Calculate the time required per cubic foot (or cubic metre) of foam using the following equation:

$$T_1 = (T \times W_s) / (W_f \times V) \quad (1)$$

8.4.1 Calculate also the unit weight of the foam as follows:

$$W_{fo} = W_f / V \quad (2)$$

8.4.2 Calculate the length of time required to generate the required volume of foam, $V_f T_1$, as follows:

$$V_f T_1 = 62.4 V_f T_1 / (62.4 - W_{fo}) \quad (V_f T_1 = 1000 V_f T_1 / (1000 - W_{fo})) \quad (3)$$

8.4.3 Calculate the weight, W_s , of the required volume of foam, $V_f W_{fo}$.

Note 2—The weight of the foam will usually range from 2 to 4 lb/ft³ (32 to 64 kg/m³) depending on the foam chemical used. Adjust the unit weight of foam, W_{fo} , to the manufacturer's recommendation if the foam generator is adjustable.

8.4.3.1 If Type I cement is used, weigh out 58.0 - W_f lb (26.31 - W_f kg) of water, W_w , and 100.0 lb (45.36 kg) of Type I cement.

8.4.3.2 If Type III cement is used, weigh out 64.0 - W_f lb (29.03 - W_f kg) of water, W_w , and 100.0 lb (45.36 kg) of Type III cement.

8.5 Wet the mixer with water and drain. Add the water, W_w , and start the mixer. Gradually add the cement (over a period of 1/2 min). With a trowel, break up any lumps of undispersed cement. Mix for 5 min.

8.6 While still mixing, add V_f ft³(m³) of foam. The required foam time is $V_f T_1$. Mix for 2 min after all the foam has been added. Discharge the mixer into the pump feed reservoir. Immediately, proceed to 8.7.

8.7 *Weighting*—Fill a tared weighing container with a representative sample of the concrete in the reservoir. Before taking the sample, carefully mix the concrete in the reservoir to assure better uniformity without entrapping large air bubbles in

the mix. Use a paddle of proper size to reach the bottom of the reservoir. Use a scoop to transfer the concrete to the container and tap the sides of the container briskly with the rubber hammer during the filling operation. Overfill the container and strike off the excess concrete, holding the strike-off plate in a horizontal position (plane of plate horizontal) and moving it across the top of the container with a sawing motion. Wipe the surface of the container free of spilled concrete with a cloth. Weigh the full container. Calculate the density of the concrete and record as the density before pumping (D_{bc}).

8.7.1 Pump the batch of concrete through the 50-ft (15-m) hose, discharging it into a sampling basin. From the sampling basin, take a second density sample as in 8.7, weigh, and record as the density after pumping (D_{ac}).

8.8 *Molding*—Immediately, fill the cylinder molds with concrete from the sampling basin. Tap the sides of the mold with the rubber hammer while the mold is being filled. The minimum number of specimens required is four cylinders, 3 by 6 in. (76 by 152 mm) and ten cylinders 6 by 12 in. (152 by 305 mm).

8.8.1 As soon as possible after casting, strike off the top surface of each specimen and cover the specimen with a plastic bag to prevent evaporation, without marring the surface.

8.9 *Removal from Molds and Curing*—Follow the applicable requirements of the Test Specimen section of Test Method C 495. Do not oven dry specimens that are to be load-tested.

8.10 *Compressive Strength*—Test four 3 by 6-in. (76 by 152-mm) cylinders for compressive strength in accordance with Test Method C 495.

8.11 *Tensile Splitting Strength*—Test four 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders for tensile splitting strength at age 28 days in accordance with Test Method C 496, for lightweight concrete.

8.12 *Oven-Dry Weight*—Determine the oven-dry density in accordance with the section on Oven-Dry Weight of Test Method C 495. Use three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders from 7.9 at age 28 days.

8.13 *Water Absorption*:

8.13.1 Take three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) specimens from 8.9 at age 28 days. Take the dimensions with calipers as described in the Test Specimen Section of Test Method C 495.

8.13.2 Submerge the specimens in water for 24 h. Remove from water, allow excess water to run off (30 s) and weigh. This is the wet weight of the specimen.

9. Calculation

9.1 *Air Content*:

9.1.1 Determine the experimental density of the freshly mixed concrete at the mixer, D_{mix} , and at the pump discharge (end of hose), D_{ac} , by dividing the net weights of the samples from 8.7 and 8.7.1 by the volume of the container. Record to the nearest 0.5 lb/ft³ (8 kg/m³).

9.1.2 Determine the experimental density of the specimens from 8.12 before and after drying from the weights and volumes of the specimens. Use three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders. Record to the nearest 0.5 lb/ft³ (8 kg/m³).

9.1.3 Determine the air content of the freshly mixed concrete from the experimental densities, before and after pumping, and the theoretical density, D_{th} , based on the absolute volume. Record the air content to the nearest 1 %. Calculate the theoretical density in lb/ft^3 (kg/m^3) as follows:

Inch-Pound Units:

$$D_{th} = (W_w + W_s + W_f)(W_c/62.4) + (W_A/SOC \times 62.4) + (W/62.4) \quad (4)$$

SI Equivalents:

$$D_{th} = (W_w + W_s + W_f)(W_c/1000) + (W_A/SOC \times 1000) + (W/1000) \quad (5)$$

9.1.3.1 Calculate the air content before pumping or the percent of air at the mixer as follows:

$$\text{Air content before pumping} = 100 [1 - (D_{wet}/D_{th})] \quad (6)$$

9.1.3.2 Calculate the air content after pumping, or the percent of air at end of hose as follows:

$$\text{Air content after pumping} = 100 [1 - (D_{wet}/D_{th})] \quad (7)$$

Note 3—Using the prescribed procedure and assuming the specific gravity of cement is 3.15 and that the total water used is 58.0 lb (26.31 kg) for Type I cement, the theoretical density is 109.9 lb/ft^3 (1361 kg/m^3). Similarly, for Type III cement the total water is 64.0 lb (29.03 kg) and the theoretical density is 106.9 lb/ft^3 (1342 kg/m^3).

9.1.4 Calculate the loss of air during pumping as the difference between the air content before and after pumping. Record to the nearest 1 %.

$$\text{Loss of air, \% by volume} = 100 [(D_{wet} - D_{mi})/D_{th}] \quad (8)$$

9.1.5 Calculate the design density (D_d) of the test mixture in lb/ft^3 (kg/m^3) as follows:

Inch-Pound Units:

$$D_d = (W_w + W_s + W_f)[(W_c/62.4) + (W_A/SOC \times 62.4) + V_A] \quad (9)$$

SI Equivalents:

$$D_d = (W_w + W_s + W_f)[(W_c/1000) + (W_A/SOC \times 1000) + V_A] \quad (10)$$

9.2 *Water Absorption:*

9.2.1 Find the average weight of water absorbed by the cylinders by subtracting the average dry weight of cylinders (see 8.12) from the average wet weight of cylinders (see 8.13). Record to the nearest 0.1 lb (or 0.05 kg).

9.2.2 Find the average volume of water absorbed by dividing the average weight of water absorbed by the density of water in lb/ft^3 (kg/m^3). Determine the water absorption using the following equation:

$$\text{absorption, \% by volume} = (V_w/V_c) \times 100 \quad (11)$$

Record absorption to the nearest 0.5 %.

10. Report

10.1 Using the degrees of precision specified in Section 9, report the following:

10.1.1 Identification of chemical tested, including manufacturer's name, brand, and lot number.

10.1.2 Water to cement ratio and type of cement used.

10.1.3 Air content before and after pumping.

10.1.4 Oven-dry density.

10.1.5 Water absorption, % by volume.

10.1.6 Compressive strength.

10.1.7 Loss of air during pumping, %.

10.1.8 Tensile splitting strength, and

10.1.9 Difference between design density and experimental densities before and after pumping.

11. Precision and Bias

11.1 This test method uses results obtained from other ASTM test methods listed in the Referenced Documents section. These documents are to be referred to for their respective precision and bias statements.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. DERIVATION OF FORMULA FOR FOAM VOLUME

X1.1 The formula for foam volume required for the test batch may be derived as follows:

X1.1.1 Knowing the wet density, 40 lb/ft^3 (641 kg/m^3), calculate the volume of air required as follows:

Inch-Pound Units:

$$\text{Wet density, } 40 \text{ lb/ft}^3 = (W_{TW} + W_A) / [(W_{TW}/62.4) + (W_A/3.15 \times 62.4) + V_A] \quad (X1.1)$$

SI Equivalents:

$$\text{Wet density, } 641 \text{ kg/m}^3 = (W_{TW} + W_A) / [(W_{TW}/1000) + (W_A/3.15 \times 1000) + V_A] \quad (X1.2)$$

X1.1.2 Solving for the volume of air required in cubic feet

(or cubic metres):

Inch-Pound Units:

$$V_A = (0.359 W_{TW} + 0.7965 W_A) / 40 \text{ ft}^3 \quad (X1.3)$$

SI Equivalents:

$$V_A = (0.359 W_{TW} + 0.7965 W_A) / 641 \text{ m}^3 \quad (X1.4)$$

X1.2 The air volumes required for the test batches are as follows:

Type of Cement	V_A , ft^3 (m^3)
Type I	2.51 (0.071)
Type II	2.57 (0.073)

X1.3 Treating the diluted foam chemical as water ($\rho = 1$) the following relationships between air volume and

foam volume may be stated:

$$V_f = V_s + (W_f/62.4)ft^3 \quad \text{or} \quad V_f = V_s + (W_f/1000)m^3 \quad (X1.5)$$

X1.4 If W_{sf} is the unit weight of foam, then $W_f = W_{sf} \times V_f$ and the equation in X1.3 may be stated in the following manner:

$$V_f - (W_{sf}/62.4) = V_s \text{ ft}^3 \quad \text{or} \quad V_f - (W_{sf}/1000) = V_s \text{ m}^3 \quad (X1.6)$$

$$\frac{V_f}{V_c} = \frac{V_s}{V_c} [1 - (W_{sf}/62.4)]ft^3 \quad \text{or} \\ = \frac{V_s}{V_c} [1 - (W_{sf}/1000)]m^3, \quad \text{and} \quad (X1.7)$$

$$V_f = 62.4 V_s / (62.4 - W_{sf})ft^3 \quad \text{or} \quad V_f = 1000 V_s / (1000 - W_{sf})m^3 \quad (X1.8)$$

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either approved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additions/standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-632-8555 (phone), 610-632-8555 (fax), or service@astm.org (e-mail), or through the ASTM website (<http://www.astm.org>).

Anexo 26. Norma ASTM C-869. Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete



Designation: C 869 – 91 (Reapproved 1999)

Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 869; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

1. Scope

1.1 This specification covers foaming agents specifically formulated for making preformed foam for use in the production of cellular concrete.

1.2 The function of this specification is to provide the means for evaluating the performance of a specific foaming agent. This is accomplished by using the foaming agent in making a standard cellular concrete test batch (see Test Method C 796) from which test specimens are cast. Then, significant properties of the concrete are determined by tests and compared with the requirements of Section 3.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 796 Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam²

3. Performance Requirements

3.1 The test batch shall conform to the requirements prescribed in Table 1.

4. Test Methods

4.1 The foaming agent being tested shall be used in making the test specimens required.

TABLE 1 Physical Requirements

Property	Requirement
Density—The density shall satisfy either of the following:	
Density after pumping (see Method C 796)	40 ± 3 lb/ft ³ (641 ± 40 kg/m ³)
Oven dry density ^a (see Method C 796)	
For Type I cement	30.4 ± 2.5 lb/ft ³ (487 ± 40 kg/m ³)
For Type II cement	29.3 ± 2.5 lb/ft ³ (469 ± 40 kg/m ³)
Compressive Strength (see Method C 796), min	200 psi (1.4 MPa)
Tensile Splitting Strength (see Method C 796), min	25 psi (0.17 MPa)
Water Absorption (see Method C 796), max	25 % by volume
Loss of Air During Pumping (see Method C 796), max ^b	4.5 % by volume

^a For this comparison, the calculated oven-dry density of the test batch may be determined by assuming that the water of hydration is 20 % of the weight of the cement. Then the oven-dry density = $\frac{W_c + (0.2 W_c)}{V_{\text{batch}}}$, where W_c = weight of cement; and V_{batch} = volume of batch.

For example: using the test batch specified in Method C 796, for Type I cement ($W_c = 100$ lb; $W_{\text{water}}/W_c = 0.50$, where W_{water} = total weight of water), the total weight of materials is $100 + 0.50 \times 100 = 150$ lb (71.67 kg). For a wet density, after pumping, of 40 lb/ft³ (641 kg/m³), the batch volume is $150/40 = 3.75$ ft³ (0.11105 m³). The calculated oven-dry density is then $(100 + 0.2 \times 100) / 3.75 = 30.4$ lb/ft³ or $(45.36 + 0.2 \times 45.36) / 0.11105 = 487$ kg/m³. Finally, the oven-dry density as determined by Method C 796 shall be 30.4 ± 2.5 lb/ft³ (487 ± 40 kg/m³).

^b The loss of air during pumping includes air that is accidentally entrapped during mixing of the concrete.

4.2 For each of the properties listed in Table 1, the test procedure, the number and type of test specimens, and the method of molding, curing, and testing shall be as described in Test Method C 796.

5. Keywords

5.1 cellular concrete; foaming agents

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates, and is the direct responsibility of Subcommittee C09.21 on Chemical Admixtures.

Current edition approved Dec. 23, 1991. Published February 1992. Originally published as C 869 – 77. Last previous edition C 869 – 80 (1986).

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.