



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CENIZA DE SARGAZO
COMO MATERIAL CEMENTANTE SUPLEMENTARIO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

ING. LAURA GUADALUPE ROSADO MENA

DIRECTOR:

DR. JULIO CÉSAR CRUZ ARGÜELLO

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MEXICO 2025



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa tan significativa en mi vida, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta tesis y fueron un pilar fundamental en este camino.

En primer lugar, agradecimientos a Dios, fuente infinita de la fortaleza, la perseverancia y la sabiduría. Su guía ha iluminado cada paso de este proceso, brindando calma en los momentos difíciles y renovando mis fuerzas para de culminar este proyecto.

Agradecimientos a mi amado esposo Santiago F. C., por su apoyo incondicional, por alentarme cuando dudé y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Tu confianza en mí ha sido mi mayor motivación para seguir adelante.

Agradecimientos a mi familia en general, en especial a mis mamás, Patty y Nelia, por su cariño y ánimo que siempre me brindan para continuar. A mi difunto padre, Melchor, por ser ejemplo, guía y motivación para cada etapa de mi vida.

Agradecimientos a mis amigos, que me motivan, me apoyan y oran por mí para continuar.

Agradecida por esta bendecida red de apoyo en esta etapa de retos, enfermedad e incertidumbre.

Agradecimientos al TECNM por el proyecto 20031.24-P “Estudio potencial de la ceniza de sargazo como material cementante suplementario en la industria de la construcción segunda etapa” y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento brindado, así como a los asesores asignados, en especial al Dr. Julio César Cruz Argüello, por su invaluable orientación, y cada docente que compartió su sabiduría y experiencia, así como cada espacio de aprendizaje que me permitió crecer tanto académicamente como personalmente.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CONTENIDO

Introducción	8
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Planteamiento del problema.....	11
1.3. Marco teórico	12
1.3.1 Cemento portland	12
1.3.2 Ceniza.....	13
1.3.3 Sargazo	14
1.3.4 Materiales cementantes suplementarios	14
1.3.5 Técnicas de caracterización en esta investigación	15
1.4. Justificación	16
1.5. Hipótesis	17
1.6. Objetivos	17
1.6.1 Objetivo General	17
1.6.2 Objetivos específicos	17
1.7. Metas.....	17
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1 Metodología	18
2.2 Diseño experimental	19
CAPÍTULO 3. Trabajo de campo y/o laboratorio	21
3.1 Trabajo de campo.....	21
3.2 Trabajo de laboratorio.....	23



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANALISIS	24
Conclusiones	44
Recomendaciones	47
Referencias.....	48
Anexos	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Volumen de material ASTM C 109.....	20
Tabla 2. Contenido de Metales Pesados en el Sargazo (mg/kg).....	24
Tabla 3. Pesaje de la arena.....	30
Tabla 4. Límites inferiores y superiores ASTM C 33.	30
Tabla 5. Peso de la arena para mezcla.	32
Tabla 6. Datos de resistencia a la compresión y fluidez.....	33
Tabla 7. Resultados Índice de Actividad Mecánica (SAI)	37

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. TGA/DTG muestra de Sargazo con lavado térmico A1H.	26
Gráfica 2. TGA/DTG muestra de Sargazo con lavado térmico de NaOH.	27
Gráfica 3. XRD muestra de Sargazo con lavado térmico.....	28
Gráfica 4. XRD muestra de Sargazo con lavado térmico de NaOH.	29
Gráfica 5. Granulometría de la arena inicial.....	31
Gráfica 6. Granulometría de la arena ajuste.	32
Gráfica 7. Resistencia y peso de los especímenes.	35



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Gráfica 8. Resistencia a la compresión de los especímenes.	36
---	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Macro y micro ubicación del punto de recolección.....	21
Ilustración 2. Sargazo recolectado en la costa de Mahahual.	21
Ilustración 3. Zona de recolección de sargazo.....	22
Ilustración 4. Secado al aire libre posterior a lavados térmicos.	22
Ilustración 5. Colado de especímenes 5cm*5cm*5cm.	35
Ilustración 6. Puntos de extracción de las piezas de los especímenes.	39
Ilustración 7. Extracción de las piezas de los especímenes.	39
Ilustración 8. Porcentaje de grietas promedio.	40
Ilustración 9. Muestra con sustitución del 5% por microscopía óptica.	41
Ilustración 10. Muestra con sustitución del 10% por microscopía óptica.	41
Ilustración 11. Muestra con sustitución del 15% por microscopía óptica.	42
Ilustración 12. Muestra con sustitución del 20% por microscopía óptica.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología.	18
-----------------------------	----



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



RESUMEN

La producción mundial de cemento es la tercera fuente más grande de emisiones de dióxido de carbono por lo cual se han estudiado distintas alternativas para que el proceso sea menos perjudicial medioambientalmente. Una de ellas, es el uso de los llamados Materiales cementantes suplementarios (SCM) los cuales implican el uso de residuos industriales (también denominados biochar). La ceniza de sargazo es un residuo obtenido a partir de la incineración de la biomasa de sargazo. En la siguiente investigación se estudiará el uso de ceniza de sargazo como posible material cementante suplementario, caracterizándola elementalmente, determinando su actividad puzolánica y evaluándola mecánicamente. Como parte de la metodología se realiza la detección de metales pesados antes y después del lavado con NaOH, análisis termogravimétrico y SEM-EDS. De acuerdo con los resultados de la detección de metales pesados después del proceso de lavado, la ceniza de sargazo cumple con la normativa NMX-AA-164-SCFI-2013.

Palabras clave: Sargazo, ceniza, cemento, SCM.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



ABSTRACT

Global cement production is source of carbon dioxide emissions, which is why different alternatives have been studied to make the process less environmentally harmful, Supplementary Cementitious Materials (SCM), which involve the use of industrial waste (biochar). Sargassum ash is a waste obtained from the incineration of sargassum biomass. In the present work, physical-chemical characterization sargassum ash pre-treated with thermal wash and NaOH wash, was conducted by SEM-EDS, XRD, TGA and detection of heavy metals by means of atomic absorption spectroscopy (AAS). According to the AAS results, the sargassum ash complied with the NMX-AA-164-SCFI-2013 regulation. The results of this study provided the basis for considering sargassum ash as a partial replacement in cement-based composites. This feature makes it possible to use this material in a variety of construction applications to reduce carbon dioxide emissions.

Keywords: Sargassum spp., ashes, SCM



Introducción

Como alternativa para contrarrestar esta plaga ecológica, se usa la biomasa sargazo como biocombustible, teniendo como subproducto y residuo de la metodología, ceniza de sargazo. (Leal Bautista, R., Tapia Tussell, R., y Alzate Gaviria, L., 2020). Esto da paso a la siguiente investigación en la cual se estudiará el uso de ceniza de sargazo como posible material cementante suplementario, caracterizándolo elementalmente, determinando su actividad puzolánica y evaluándolo mecánicamente.

La producción mundial de cemento ha crecido, después de los combustibles fósiles y el cambio de uso de la tierra, es la tercera fuente más grande de emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (Andrew, 2018). En consecuencia, la utilización de concreto y mortero, tiene un elevado impacto ambiental que debe ser mitigado desde el diseño del material, su producción y hasta su aplicación en las construcciones. (Villas, 1995)

En 2016, la producción mundial de cemento generó alrededor de 2.200 millones de toneladas de CO₂, equivalente al 8% del total mundial (Rodgers, 2018). Debido a que las calcinaciones de materias primas para producir cemento y la quema de combustibles necesarios para mantener las altas temperaturas de los hornos la industria del cemento, es de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Brasil, México y Argentina, son los principales países productores de cemento de América Latina (Lim et al., 2020). La composición del cemento principalmente consta de óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y magnesio, además de pequeñas cantidades de otros óxidos, durante el proceso productivo, son estos óxidos los que se combinarán en el horno para producir las distintas composiciones del cemento, lo cual lleva consigo una gran cantidad de los GEI como emisiones de dióxido de carbono. (Bondar et al., 2011) En los últimos tiempos, uno de los objetivos más importantes de la agenda ambiental global, es la reducción de GEI para proteger el patrón climático de la tierra y desarrollar nuevas estrategias constructivas. (Ali, M. B., 2011)

El uso de subproductos industriales para sustituir el uso del cemento, es uno de los métodos de construcción más sostenibles, conocidos comúnmente como materiales cementantes suplementarios (Supplementary Cementitious Materials, SCM, por sus siglas en inglés).



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



(Mehta, Monteiro, 2014) Implica el uso de residuos industriales cuya eliminación ya es un problema para las unidades industriales concernientes. El vertido de estos residuos industriales a cielo abierto crea problemas de vertedero que conducen a la tierra, el agua y el aire, contaminación. Sin embargo, su uso en la industria de la construcción es muy relevante, debido a la mejora de propiedades físicas y mecánicas de los compuestos cementantes, en etapa de fraguado y endurecimiento, los cuales pueden ser modificadas con una correcta proporción de materiales. (Chand, 2021)

Los SCM son una fuente de ahorro para la industria de la construcción, debido a la estructura de mercado en la que opera la industria del cemento, se puede considerar como un oligopolio ya que impera un producto homogéneo y las empresas son interdependientes para fijar la producción o los precios en las obras de infraestructura en México demandan grandes cantidades de cemento para realizarse, esto propicia la competencia para abastecer, por la alta composición del capital para producirlo y el costo de transporte para llevarlo hasta el consumidor final, la industria cementera se encuentra dominada por sólo algunas empresas, es decir, tiene capacidad de manipular los precios. (De la Garza, Arteaga García, 2011)



CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS

1.1 Antecedentes

Existen estudios que han implementado cenizas de diferentes fuentes aplicados en la industria de la construcción. Algunos ejemplos son los siguientes:

Choi W.C., et al. (2012), presentan los resultados experimentales de la mezcla de cemento con ceniza de madera dura implementados en morteros. A partir de este hecho se determinó que es posible sustituir hasta un 5% de cemento con la ceniza de madera dura, sin que haya una disminución significativa en la resistencia a la compresión en comparación con un mortero sin la sustitución. Del mismo modo, el estudio indica que los morteros que contienen el biochar, muestran una mejor retención de agua.

Restuccia L. y Ferro, G. A., (2016), analizaron el efecto de biochars como sustituto de cemento. Los biochars que se analizaron procedían de residuos de comida agropecuaria, café en polvo y cáscara de avellanas. Demuestran que el café en polvo y la cáscara de avellana, con sustituciones de 0.5% y 0.8%, respectivamente, mejoran la resistencia a la compresión, así como la resistencia a la flexión y la dureza de los compuestos cementantes. Particularmente, el café en polvo presentó un desarrollo más rápido en el proceso de hidratación de los compuestos, presentando los mismos resultados a 7 días de curado que a 28 días.

El sargazo ha propiciado los siguientes empleos en la industria:

Como sustituto del agregado fino (Zavala Arceo, A. y col., 2019) analizaron las propiedades de un mortero con agregado de sargazo tratado de tipo fluitans y natans, en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20%. Los resultados mostraron que el sargazo arribado corresponde solamente a un 11% del volumen recolectado después de ser tratado, existe una similitud en la granulometría con el agregado fino, una diferencia en pesos a favor del sargazo, sin embargo, su retención de agua es mayor. En las características térmicas a mayor material de sargazo, menor es la transferencia de calor; al aumentar el calor específico se determinó que el sargazo requiere una mayor energía para calentarse. En conclusión, es posible utilizar el sargazo como sustituto del agregado fino, teniendo como porcentaje ideal el de 5%, en el cual la resistencia es aceptable y el mejoramiento térmico es notable.



Como sustituto del cemento (Chahbi, M., et al 2022) utilizaron sargazo de tipo muticum, un alga parda japonesa, sin previo tratamiento biológico, como reemplazo parcial del cemento Portland al 5 %, 10 %, 15 % y 20 %. Los resultados mostraron que la adición del 10 % de polvo de algas a la pasta de cemento aumento en la resistencia a la compresión y cuando la adición aumentó al 20 %, las propiedades comenzaron a disminuir.

El sargazo se ha utilizado como material aditivo en los pavimentos, en comparación con otras biomásas tales como estiércol animal, paja de cultivo, residuos de aceite vegetal, aceite de cocina usado, etc., las algas también tienen las ventajas de una alta eficiencia fotosintética, el biobetún de algas tiene ventajas sobre otras biomásas para sustituir betún de petróleo clásico. (Li J., et al, 2019).

Se ha comercializado el sargazo como blocks de construcción de dos tipos, el tipo industrial es compactado mecánicamente a una compresión de 112 kilogramos sobre centímetro cuadrado a una velocidad de 435 piezas por hora, y el tipo artesanal es compactado manualmente de forma individual y dejando secar al sol por un periodo de 10 días; ambos tipos de blocks tienen una sustitución del 40-60% de sargazo. (Sargablock, 2021)

En la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) desarrollaron una metodología para producir biogás, primero se recolecta el sargazo en la playa, se eliminar la arena y sal, después se deshidrata para ponerlo en contacto con el hongo (*Trametes hirsuta*), un microorganismo local aislado de la madera en putrefacción y que es capaz de degradar la lignina en estas algas, posteriormente pasa a un reactor en el que con ayuda de condiciones climáticas y de un inóculo (consorcio bacteriano) convertirán el sargazo en gas metano. Se han obtenido alrededor de 104 litros de gas por kilogramo de sólido volátil de sargazo (compuestos ya degradados, ceniza de sargazo) (Comunicación Institucional CICY, 2018) (Leal Bautista, y col., 2020).

1.2 Planteamiento del problema

La industria de la construcción en México demanda grandes cantidades de cemento, y se consume dicho producto a costos altos variables. Este producto es versátil y se usa en concretos y en morteros, sin embargo, debido a las calcinaciones de materias primas para producirlo, es probable que la participación de la producción de cemento en las emisiones



globales de dióxido de carbono aumente sustancialmente del 8 % al 25 % o más para el año 2050 (Snellings,2016). Por lo cual, en los últimos tiempos, se ha priorizado la reducción de emisiones para proteger el patrón climático de la tierra, una manera efectiva de lograrlo es reducir la cantidad de cemento en los compuestos cementantes usados en la industria de la construcción. (Ali, M. B., 2011) El incremento en la demanda de cemento conlleva un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual contribuye significativamente al cambio climático y al calentamiento global, generando impactos directos sobre la dinámica de los ecosistemas.

Como fue el caso del caribe mexicano a finales del año 2014, en el cual arribaron afluencias masivas y atípicas de sargazo pelágico, principalmente de las especies *S. fluitans* y *S. natans*. Los impactos negativos asociados con estos flujos incluyen la mortalidad de la flora y la fauna bénticas cercanas a la costa, la erosión de las playas, la contaminación, la disminución del turismo y los altos costos de gestión. (Chávez, V. et al, 2020; López, L. B. et al, 2020) La afluencia masiva se considera una plaga ecológica que tiene impactos adversos en los ecosistemas costeros, la pesca y el turismo industria, que es la base de la economía de la región (Shah, K.U. y McNeil, P., 2022) Este fenómeno ambiental se incrementará en los próximos años y puede seguir produciendo afectaciones significativas en sectores como el turismo y las pesquerías de importancia económica en las regiones del Caribe. (Torres y Martínez, 2020)

De acuerdo con la literatura, el fenómeno ambiental, los altos costos de adquisición del cemento y las emisiones que genera la industria, van en aumento. (Mannan y Ganapathy, 2004) Como alternativa para disminuir la plaga ecológica se propone el uso de remplazos parciales del cemento (SCM), entre los que destacan aquellos que resultan de la incineración de biomasas para la generación de energía. (Mannan y Ganapathy, 2004) Lo cual propicia la presente investigación.

1.3. Marco teórico

1.3.1 Cemento portland

En 1824, Joseph Aspdin un constructor de Leeds Inglaterra, calcinó en un horno una mezcla formada por tres partes de caliza y una de arcilla, la cual molió y pulverizó dando lugar al



primer cemento Portland. En el año 1845, Isaac Johnson introdujo un aumento de la temperatura del proceso de calcinación. Sin embargo, el uso del cemento no crecería significativamente hasta más adelante. A partir del año 1900 se extiende el uso masivo del cemento en edificaciones y obras de ingeniería, debido a diferentes experimentos con los que se mejoraba la calidad del cemento, así como la introducción de los hornos rotatorios para la calcinación y el horno tubular para la molienda. (OCW UPCT, s.f; Garcia,2021)

En efecto las mejoras al proceso del cemento hicieron que la producción incrementara ya que la importancia que tiene como material radica en su versatilidad. (Ceballos, 2016) Posee actividad puzolánica al endurecer se caracteriza por su resistencia a la compresión, conforme a lo señalado en la literatura, el fenómeno ambiental, el incremento en los costos asociados a la adquisición del cemento y las emisiones derivadas de su producción, presentan una tendencia ascendente. Como alternativa para disminuir la huella de carbono se utilizan cenizas como remplazos parciales del cemento. (Mannan y Ganapathy, 2004)

1.3.2 Ceniza

La biomasa es una fuente de energía renovable investigada recientemente (Manzano, F. et al, 2013) La biomasa consumida por México proviene de especies de árboles y arbustos disponibles localmente, mientras que los recursos de cuerpos acuáticos rara vez han sido explorados. En este sentido, la exploración de recursos y/o residuos con potencial bioenergético permitirá conferir valor agregado, contribuir a generar fuentes de energía sustentables y ayudar a construir escenarios para la seguridad energética a nivel local. (López, L. B. et al, 2020) El ambiente marino está ocupado principalmente por microbios, principalmente bacterias y protistas, que representan el 70% de la biomasa marina total. El 30% restante se compone principalmente de artrópodos y peces. El subsuelo profundo contiene 15% de la biomasa total en la biosfera. (Bar-On, Y. et al, 2018)

Para gestionar residuos orgánicos es el uso de procesos termoquímicos como el pirólisis o la gasificación ya que permiten medir la capacidad energética de la biomasa recuperados, a su vez, estos procesos generan cenizas, un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de la biomasa en un ambiente bajo en oxígeno, o más bien, un residuo carbonoso del proceso de conversión termoquímica. Las cenizas obtenidas de la pirólisis o



combustión de biomasas como material cementante suplementario tiene el potencial de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en aproximadamente 870 kg de CO₂ por tonelada de materia prima seca. (Suarez Riera et al., 2020)

Además de una reducción en la huella de carbono, se ha demostrado una mejora en algunas propiedades en comparación a los cementos convencionales. Por otro lado, las principales desventajas o problemas del uso de materiales alternativos son la limitada disponibilidad de estos materiales en algunos lugares, la alteración de las propiedades con resultados negativos para el cemento, los cambios en el método del proceso y la aceptación económica del mercado (Jin y Chen, 2013)

1.3.3 Sargazo

Una biomasa ilimitada en los últimos años ha sido el sargazo, en septiembre de 2015, el volumen promedio de *Sargassum* spp. fue estimado en $\sim 2.4 \times 10^3 \text{ m}^3$ por kilómetro de playa (Rodríguez, R. E. et al, 2016) Volúmenes masivos se registraron en esta costa en 2018, 2019 y 2020. (Chávez, V. et al, 2020) La afluencia masiva se considera una plaga ecológica que incrementará en los próximos años. (Torres y Martínez, 2020)

El uso de la biomasa de sargazo es de alto riesgo en la industria de la construcción debido a su estructura orgánica, causando fisuras a largo plazo por la degradación del mismo. De igual manera, la contaminación del elemento debido a los metales pesados que absorbe el sargazo en su arribo a las costas. Sin embargo, el tratamiento de reducción de metales pesados y el proceso de calcinación de sargazo mantiene una estructura inorgánica lo cual incentiva la durabilidad, logrando un prospecto de material cementante suplementario.

1.3.4 Materiales cementantes suplementarios

Los Materiales Cementantes Suplementarios (o SCM, por sus siglas en inglés). Se clasifican por su origen, su composición y su reactividad con la matriz cementante. Por lo tanto, existen tres grandes categorías de SMC's: los de potencial puzolánico, los de comportamiento hidráulico latente (cementantes) y los de potencial filler. (Snellings, 2016)



SMC's de potencial puzolánico cumplen con las especificaciones de la ASTM C618 en cuanto al acumulado de su contenido de óxidos reactivos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$), entre las especificaciones relacionadas a su comportamiento en la prueba Índice de Contribución a la Resistencia (SAI, por sus siglas en inglés) deben demostrar su contribución a la resistencia de la matriz cementante. SCM's de comportamiento hidráulico latente no poseen un contenido de óxidos suficiente para calificar como puzolana ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$, $< 50\%$) poseen cualidades cementantes, a través de su contenido de óxidos de calcio. (Anastasiou, 2021; Sivakumar et al., 2021) SCM's de potencial filler rellenan vacíos en la microestructura de la pasta de cemento y estimulan físicamente la hidratación del cemento en las primeras horas de curado (Zhu, J. et al, 2019; Bezerra, A. C. S. et al, 2017) estos materiales aportan beneficios de densificación a la matriz cementante (Tavares et al., 2020).

1.3.5 Técnicas de caracterización en esta investigación

Existen múltiples técnicas para caracterizar los materiales cementantes, destacan: calorimetría, análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés), dispersión de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés), resonancia magnética nuclear de alta resolución (HNMR, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), poro simetría por intrusión de mercurio (MIP, por sus siglas en inglés), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), técnicas de adsorción de gas (BET), entre otras. (Scrivener, Snellings, et al., 2016)

La técnica usada para determinar la pérdida de masa en función del aumento de la temperatura del sargazo es el análisis termogravimétrico (TGA). El TGA consiste en medir la variación de masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo, bajo una atmósfera controlada, este método permite identificar pérdidas de masa asociadas a procesos de deshidratación, descomposición térmica o reacciones de oxidación y reducción. (Skoog et al., 2007)

La técnica usada para caracterizar la estructura del sargazo es la difracción de rayos X (XRD). El XRD se basa en la interacción de un haz de rayos X con la red cristalina de un material, cuando los rayos inciden sobre un sólido cristalino, se produce un patrón característico que



permite identificar fases minerales, determinar estructuras cristalinas y analizar la composición de materiales cementantes. (Cullity, Stock, 2001)

La técnica usada para evaluar la actividad puzolánica de la ceniza de sargazo es el Método de Chapelle, con base la normativa ASTM C618. El método normado evalúa la actividad puzolánica de un material suplementario al medir la cantidad de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) fijado por la muestra tras un tratamiento de calentamiento en condiciones específicas, cuanto mayor sea la cantidad de hidróxido de calcio consumido, mayor es la actividad puzolánica del material. (ASTM, 2019)

La técnica usada para determinar la cantidad de metales pesados en la ceniza de sargazo es la prueba de Espectroscopía por Absorción Atómica (ASS). Esta técnica mide la concentración de elementos químicos en una muestra a partir de la absorción de radiación en longitudes de onda específicas por átomos libres en estado gaseoso, se emplea comúnmente para cuantificar metales pesados en materiales. (Welz, Sperling, 2008)

1.4. Justificación

La demanda en la industria del Cemento, como se ha planteado anteriormente, trajo consigo un incremento en los costos del producto y una elevada emisión de gases de efecto invernadero, por lo que es necesario emplear alternativas para mitigar las emisiones. Por otro lado, darle una revalorización al residuo que se ha generado de implementar alternativas para disminuir las masas de sargazo que arriban en la costa, la presente investigación busca aportar en el área de la construcción sustentable, mediante la disminución de cemento con sustituciones parciales de la ceniza de sargazo.

La aportación promueve líneas de investigación, sirve de sustento e innova en la industria de la construcción, beneficiando en el aspecto social al recuperar el turismo de la región afectada por el arribo de sargazo lo que con lleva a una mejora en la economía. Así mismo, una alternativa accesible económicamente para una construcción sustentable, logrando la disminución de las emisiones al medio ambiente.



1.5. Hipótesis

La ceniza de sargazo tendrá características idóneas para ser calificada como material cementante suplementario, debido que incrementará las propiedades físicas y mecánicas en morteros, al sustituirse hasta un 20 % por peso de cemento Portland.

1.6. Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento físico y mecánico del mortero con sustitución parcial del cemento Portland por peso de ceniza de sargazo, con un límite del 20% en peso.

1.6.2 Objetivos específicos

Determinar la temperatura de calcinación del sargazo mediante TGA/DTG.

Caracterizar fisicoquímicamente la ceniza de sargazo mediante ASS y XRD.

Determinar la actividad puzolánica mediante el índice de actividad mecánica.

Evaluar propiedades físicas y resistencia a la compresión de morteros con el 0%, 5% y 20% de sustitución en peso de cemento portland ordinario por ceniza de sargazo, a la edad de 28 días.

Analizar mediante microscopio óptico los morteros con sustitución en peso de cemento portland ordinario por ceniza de sargazo para referencias de áreas de cavidades y grietas.

1.7. Metas

- Calcinar el sargazo a la temperatura óptima.
- Determinar comportamiento térmico del sargazo.
- Evaluar la actividad puzolánica de la ceniza de sargazo
- Determinar la composición química de la ceniza de sargazo.
- Determinar la estructura de la ceniza de sargazo.
- Determinar la resistencia a la compresión de morteros adicionados con ceniza de sargazo.



CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Metodología

La metodología se divide en tres etapas como se puede observar en la figura 1, donde la etapa 1 detalla el trabajo realizado al sargazo en su estado orgánico iniciando con la recolección en las costas del caribe. Posteriormente, un lavado con sodio (NaOH) e hidróxido de calcio (CaOH). Se realizó la detección de metales pesados antes y después del lavado con NaOH y CaOH y el análisis termogravimétrico (TGA). La etapa 2 detalla el trabajo realizado al sargazo en su estado inorgánico iniciando en la calcinación en la temperatura optima, posteriormente la evaluación de su actividad puzolánica, el cribado por la malla #325 para obtener el tamaño de grano igual al cemento, finaliza en el diseño de mezclas con sustituciones de 0% a 20% con incrementos de 2.5%. La etapa 3 detalla el trabajo realizado al sargazo en el mortero el cual contiene cemento, ceniza, arena y agua, se inicia evaluando la fluidez de la mezcla en relación a la cantidad de agua en el rango de 105 a 115, la mezcla que presente la fluidez adecuada procede a colarse, se desmolda al finalizar 24 horas y se cura durante 28 días, el día 29 se evalúa la resistencia a la compresión y la estadística del índice de resistencia, finalmente se analiza ópticamente los fragmentos de mortero.

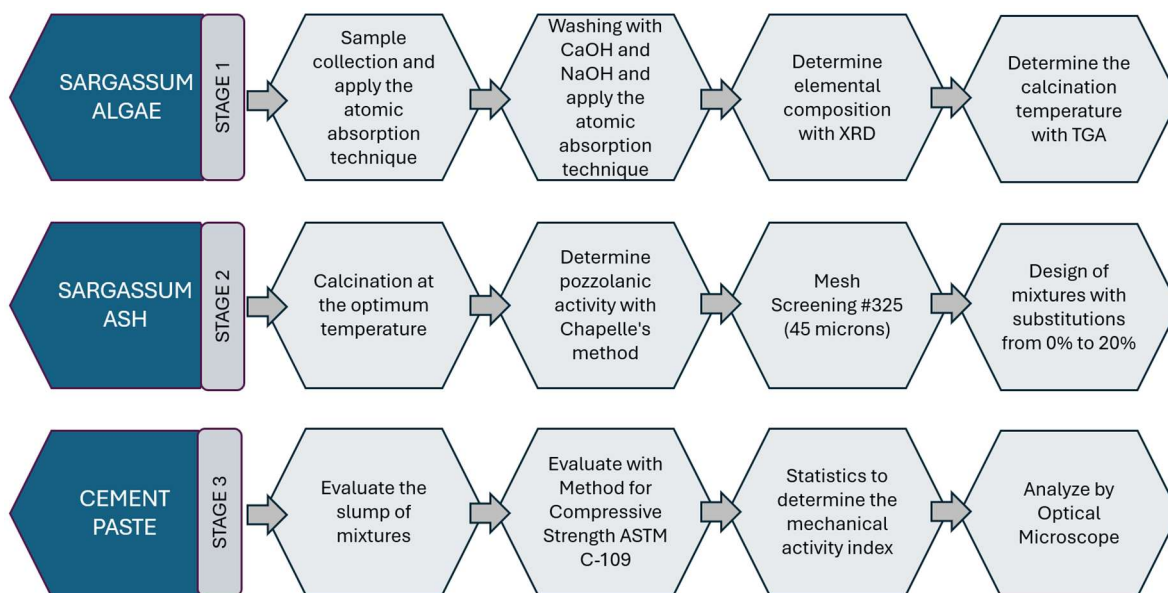


Figura 1. Metodología.



2.2 Diseño experimental

El objetivo de este diseño experimental es caracterizar y evaluar la ceniza de sargazo a través de la sustitución parcial de cemento con ceniza. Se buscó determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas de los morteros, específicamente su resistencia a la compresión a los 28 días de curado. Se basa en un diseño de mezclas derivado de cemento, siguiendo las normas NMX-C-414-ONNCCE para cemento y NMX-C-061-ONNCCE para arena graduada. Se elaboran 9 mezclas con porcentajes de sustitución de 0% a 20% con incrementos del 2.5%, con 6 muestras por cada mezcla evaluada con rango de fluidez entre 105 y 115 según ASTM C-1437, posterior al curado se evalúan a compresión según la norma ASTM C-109-05.

Variable independiente: El porcentaje de sustitución de ceniza de sargazo por peso (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%).

Variable dependiente: La resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días de curado, medida según la norma ASTM C-109-05.

Variable controlada: La fluidez de la mezcla, situada dentro del rango especificado de 105 a 115, indicado en ASTM C-1437.

Materiales

- Cemento portland compuesto con las especificaciones de la NMX-C-414-ONNCCE.
- Arena graduada que cumpla con los parámetros indicados por la NMX-C-061-ONNCCE.
- Sargazo calcinado a 600°C de temperatura, durante dos horas dentro de un horno de materiales orgánico.

Procedimiento

El procedimiento se divide en tres etapas principales explicadas en la metodología:

Etapas 1: Trabajo con sargazo en su estado orgánico.

Etapas 2: Trabajo con sargazo en su estado inorgánico.

Etapas 3: Diseño y evaluación de la pasta cementante.



El diseño de las mezclas se llevó a cabo de acuerdo con ASTM C-109-05 mezcla para 6 especímenes con una fluidez de 110 ± 5 , con base a la norma ASTM C-1437.

Tabla 1. Volumen de material ASTM C 109.

ASTM C-109-05	6 MUESTRAS
Cemento	500gr
Agua	242ml
Arena	1375gr
Fluidez	105 - 115

Cada familia de especímenes tiene un porcentaje de sustitución de ceniza de sargazo, empezando por 0% hasta 20% con incrementos de 2.5%. Transcurridos los 28 días de curado, los especímenes se retiran de la pila y se ensayan de inmediato, con la tolerancia de tiempo de ± 12 horas que se especifica en ASTM C 109.



CAPÍTULO 3. Trabajo de campo y/o laboratorio

3.1 Trabajo de campo

El trabajo de campo se centra en la etapa uno de la metodología con el sargazo en su estado orgánico en la recolección. Se recolectó el sargazo en las costas del caribe, a 2 metros de la orilla en Mahahual, Quintana Roo, México.

El punto de recolección se ubica en el Puerto de Mahahual que pertenece al municipio de Othón Pompeyo Blanco en el estado de Quintana Roo, que se localiza en la región conocida como “Costa Maya” en latitud $18^{\circ}43'58''$ N y longitud $87^{\circ}41'31''$ W.

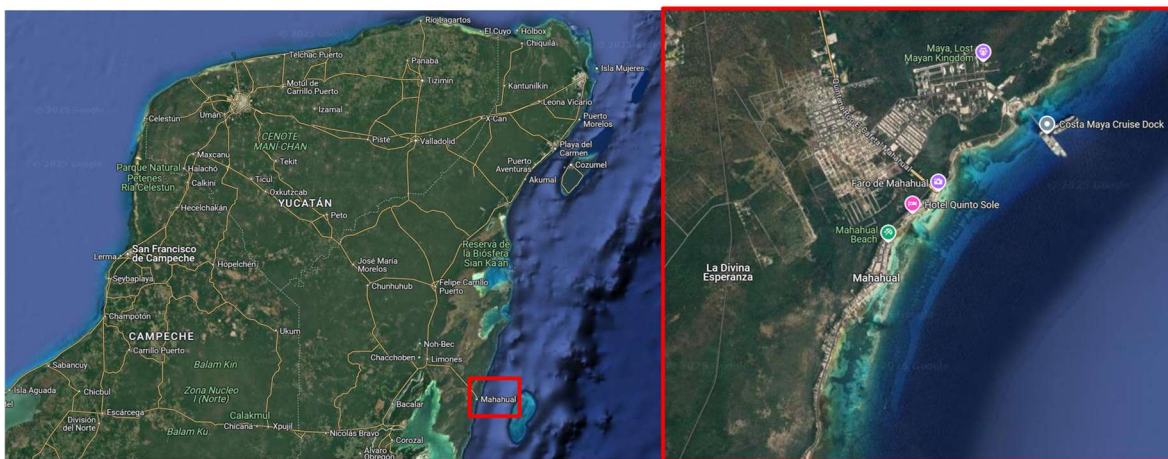


Ilustración 1. Macro y micro ubicación del punto de recolección.

El sargazo recolectado en la costa del puerto de Mahahual y escurrido al aire libre presenta visualmente la contaminación e impurezas debido al arribo masivo y el estancamiento en la costa. (Chávez, V. et al, 2020; López, L. B. et al, 2020)



Ilustración 2. Sargazo recolectado en la costa de Mahahual.

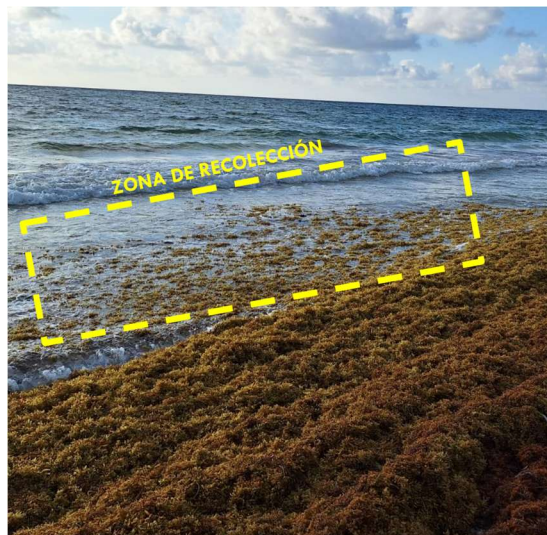


Ilustración 3. Zona de recolección de sargazo.

Posteriormente se transportó al Instituto Tecnológico de Chetumal y se realizó un lavado térmico 90°C por 15 minutos para eliminar impurezas, después de escurrir, se realizó un lavado termoquímico con hidróxido de Calcio (CaOH) y otra con muestra con hidróxido de Sodio (NaOH), en una solución de 40gr por litro de agua, finalmente un extendió al aire libre para un secado natural por 3 días.

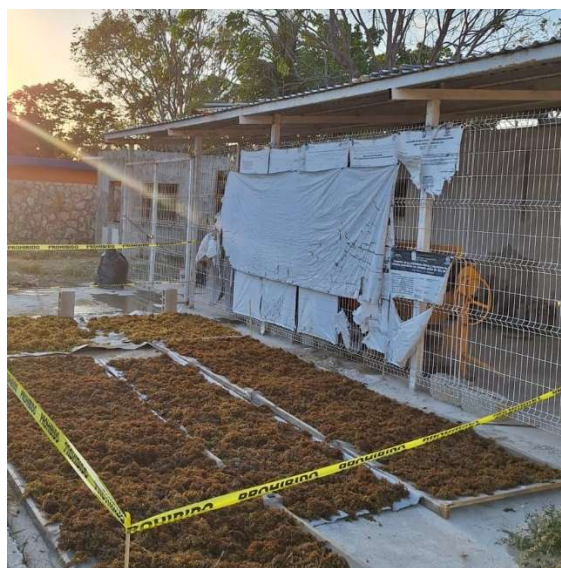


Ilustración 4. Secado al aire libre posterior a lavados térmicos.



3.2 Trabajo de laboratorio

La etapa uno de la metodología con sargazo en su estado orgánico prosigue en lavados térmicos de 15min a 90°C para eliminar impurezas, así mismo se procedió a lavar dos muestras una con el hidróxido de Calcio (CaOH) y otra con el hidróxido de Sodio (NaOH), en solución de 40 gramos de hidróxido por litro. Para los análisis de caracterización, las muestras del lavado se analizaron previamente mediante el método de absorción atómica para determinar metales pesados. Posteriormente, se realizó el Análisis Termo Gravimétrico (TGA) del Sargazo y el Análisis de las fases cristalinas del Sargazo mediante Difracción de Rayos X (XRD).

Se determinó el grado optimo de calcinación y posteriormente se realizó la calcinación del sargazo con lavado de hidróxido de calcio a 600°C durante 2 horas en el horno del laboratorio.

Concluido el proceso de la calcinación se realizó el cribado de la muestra por la malla #325 (45 micras) para obtener el tamaño de grano de un cementante, así mismo la caracterización del agregado fino mediante la norma NMX-C-061-ONNCCE, la ejecución del diseño de mezclas mediante la norma ASTM C-109-05, la prueba de fluidez mediante la norma ASTM C 1437, el curado de los especímenes y la prueba de resistencia a la compresión mediante la norma ASTM C 109 fueron elaboradas y probadas en el laboratorio.

Finalizando el trabajo con la selección de nueve puntos de extracción de cada uno de los especímenes previamente probados en resistencia a la compresión, para obtener referencias de cavidades y grietas, mediante el microscopio óptico, con muestras extraídas de un centímetro cuadrado de área y un grosor no mayor a un milímetro.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANALISIS

Se presentan los resultados obtenidos a partir del trabajo de campo y laboratorio realizados a la ceniza de sargazo como material cementante suplementario.

Posterior a los lavados térmicos para eliminar impurezas, se presentan los resultados de la técnica de absorción atómica para la determinación de metales pesados en la muestra, la cual permite cuantificar la concentración utilizando la absorción de radiación electromagnética por parte de los átomos metálicos en estado gaseoso, para evaluar el cumplimiento de los límites establecidos por las normativas pertinentes NOM-147-SEMARNAT-2004 con los requisitos de seguridad para no presentar riesgo en la salud humana y el medio ambiente.

La NOM-147-SEMARNAT-2004 establece el límite de Arsénico (As) en 20 mg/kg y el límite de Sodio (Na) en 500 mg/kg, en la tabla 4 disminuye un 92.55% el As de una manera notable al lavar con hidróxido de Sodio. Sin embargo, presenta en relación un aumento en su metal pesado (Na) con el lavado térmico (H_2O) presenta un 99.15% de disminución del Sodio (Na). Sin embargo, al inducir el elemento aumentan los mg/kg y presenta un porcentaje del 71.18%, con una diferencia de 27.97% en Sodio (Na), los metales de Potasio (K), Fósforo (P) y Hierro (Fe), se mantienen estables y no considera la normativa un riesgo en dichas concentraciones.

Tabla 2. Contenido de Metales Pesados en el Sargazo (mg/kg).

Muestra	As	Na	K	P	Fe
H_2O	10.25	4.26	7.37	0.51	-
H_2O 700	1.84	33.93	14.67	0.74	0.52
Na	3.84	45.31	1.11	0.20	-
Na 700	1.49	144.08	5.17	0.10	0.30

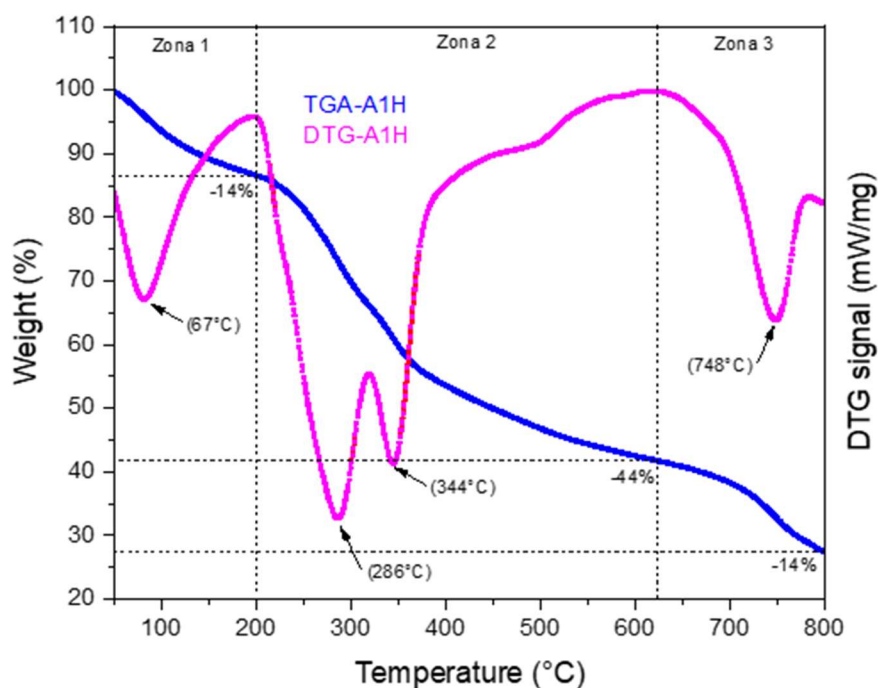
Para fines de la continuación del proyecto, se optó por realizar los lavados térmicos únicamente con hidróxido de Calcio ($CaOH$) para la eliminación de impurezas debido a sus propiedades en la formación de compuestos insolubles que facilitan la eliminación de contaminantes, formando complejos con metales pesados como el Plomo (Pb) y Cadmio (Cd), formando insolubles y reduciendo las concentraciones de metales (Zhang J., et al, 2016), en comparación el hidróxido de Sodio ($NaOH$) es igual de efectivo para eliminar



impurezas, sin embargo puede afectar las propiedades físicas de los materiales orgánicos. (Tse, D. et al, 2014)

Concluyendo con la etapa uno de la metodología se realizó el Análisis Termogravimétrico (TGA) para identificar el grado óptimo de calcinación y para fines de caracterización del sargazo se optó por realizar Difracción de Rayos X (XRD) para identificar los compuestos presentes en la muestra de sargazo calcinada a 600°C, 700°C y 800°C.

La gráfica 1 representa el TGA y su derivada (DTG) de la muestra de sargazo lavada térmicamente con agua sin Hidróxido de Sodio (NaOH), la curva de color azul representa el TGA y la curva de color rosa representa la DTG, la muestra estudiada es del sargazo con lavado térmico (A1H). El proceso de descomposición se divide en tres zonas, en la zona 1 se observa una pérdida de masa asociada a la evaporación de agua y la eliminación de compuestos volátiles, en la zona 2 se presenta la mayor degradación con picos de pérdida de 286°C y 344°C atribuibles a la descomposición de los compuestos orgánicos, y en la zona 3 se observa una pérdida final por la descomposición de residuos carbonosos. El comportamiento de la muestra en la zona 1 es eliminación de agua residual y humedad absorbida (Pachapur V., et al, 2020), la degradación de los componentes orgánicos (celulosa y hemicelulosa) se presenta en el rango de 200°C a 400°C en las macroalgas marinas (Mahmood H., et al, 2021), por último, la pérdida de masa en la zona 3 es la conversión de los residuos carbonosos en cenizas a partir de los 700°C. (Méndez A., et al, 2019)

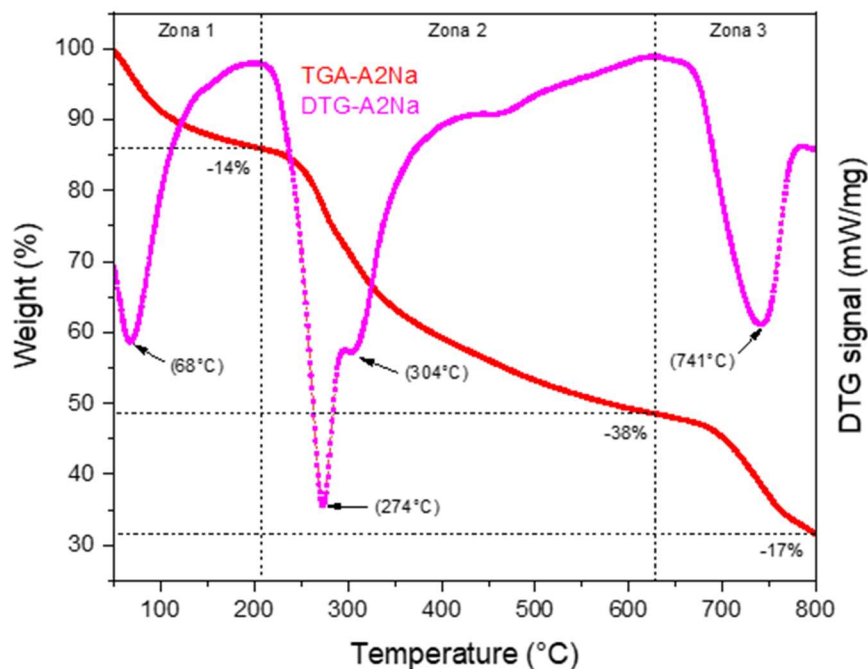


Gráfica 1. TGA/DTG muestra de Sargazo con lavado térmico A1H.

La gráfica 2 representa el TGA y su derivada (DTG) de la muestra de sargazo lavada térmicamente con Hidróxido de Sodio (NaOH), la curva de color rojo representa el TGA y la curva de color rosa representa la DTG, la muestra estudiada es del sargazo con lavado térmico de NaOH (A2Na). El proceso de descomposición se divide en tres zonas, en la zona 1 se observa una pérdida de masa asociada a la evaporación de agua y la eliminación de compuestos volátiles con un pico a los 68°C, en la zona 2 se presenta la mayor degradación con picos de pérdida a los 274°C y 304°C significativamente menores en comparación con la gráfica 1 (286°C y 344°C) atribuibles a la descomposición de los compuestos orgánicos, y en la zona 3 se observa una pérdida final por la descomposición de residuos carbonosos a los 741°C. El comportamiento de la muestra de sargazo con NaOH presenta diferencias con respecto a la tratada únicamente con agua, la reacción en la zona 2 se debe a la degradación de los compuestos orgánicos (celulosa y hemicelulosa) a temperaturas más bajas por la disolución parcial de sus estructuras de hemicelulosa y lignina en el lavado (Mahmood H., et al, 2021). El lavado térmico con hidróxido promueve una descomposición más rápida de los componentes orgánicos, obteniendo el grado óptimo de calcinación a los 600°C.

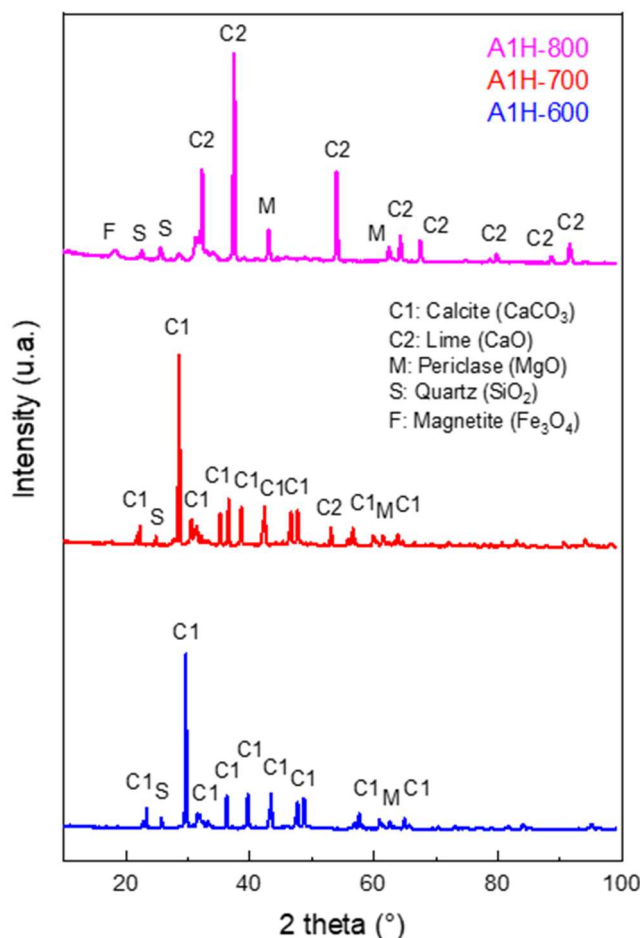


Se presentan así mismo los resultados de la caracterización del sargazo por Difracción de Rayos X (XRD) para identificar los compuestos presentes en el rango optimo de calcinación a 600°C, 700°C y 800°C.



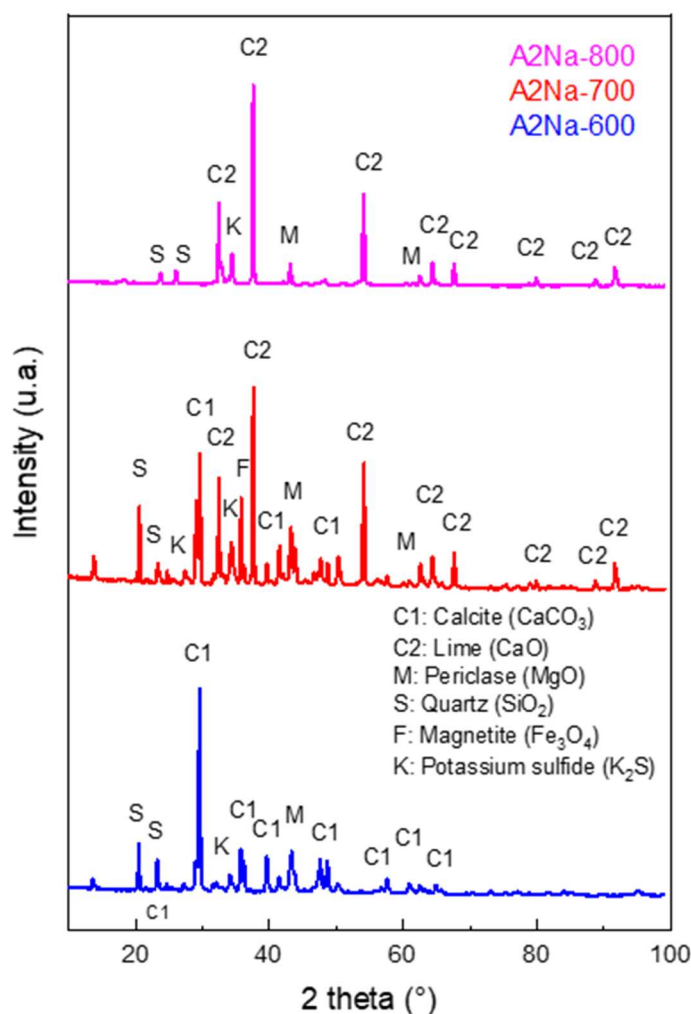
Gráfica 2. TGA/DTG muestra de Sargazo con lavado térmico de NaOH.

La gráfica 3 representa el XRD de la muestra de sargazo lavada térmicamente con agua sin Hidróxido de Sodio (NaOH), de color azul a 600°C, de color rojo a 700°C y en color rosado 800°C, la muestra estudiada es del sargazo con lavado térmico (A1H). En el eje x se representa el ángulo de difracción dos theta y en el eje y se representa la intensidad relativa, se identifica la Calcita como la fase dominante en la muestra a 600°C con pequeñas apariciones de Cuarzo y Periclase, la Calcita continúa siendo dominante en la muestra a 700°C con aparición del Óxido de Calcio debido a la descomposición de la Calcita, a los 800°C la Calcita se ha transformado en Óxido de Calcio en su totalidad. La presencia de Cuarzo y Periclase indican componentes inorgánicos presentes en la biomasa marina como el Sílice y el Hierro (Méndez A., et al, 2019), la descomposición de la Calcita comienza alrededor de los 600°C y se intensifica a temperaturas superiores a los 700°C, generando Óxido de Calcio como fase principal. (Mahmood H., et al, 2021)



Gráfica 3. XRD muestra de Sargazo con lavado térmico.

La gráfica 4 representa el XRD de la muestra de sargazo lavada térmicamente con Hidróxido de Sodio (NaOH), de color azul a 600°C , de color rojo a 700°C y en color rosado 800°C , la muestra estudiada es del sargazo con lavado térmico de NaOH (A2Na). En el eje x se representa el ángulo de difracción dos theta y en el eje y se representa la intensidad relativa, se identifica la Calcita como la fase dominante en la muestra a 600°C con apariciones de Cuarzo, la Calcita a 700°C es transformada a Óxido de Calcio debido a la descomposición, a los 800°C se encuentra Óxido de Calcio en su mayoría. El incremento en la intensidad de los picos S, K y M a partir de los 600°C se asocia al sargazo por el comportamiento similar reportado en otras macroalgas. (Pachapur V., et al, 2020). El XRD confirma que el lavado térmico no solo elimina impurezas, sino que también induce transformaciones en los componentes del sargazo a temperaturas de calcinación óptima de 600°C a 800°C .



Gráfica 4. XRD muestra de Sargazo con lavado térmico de NaOH.

En la etapa dos del proyecto se determinó como grado óptimo de calcinación a 600°C, debido a que la materia orgánica presente en la biomasa se descompone sin llegar a la degradación excesiva de sus componentes, lo cual en clave en aplicaciones de adsorción (Pachapur V., et al, 2020), y la mayor parte de sus compuestos orgánicos se eliminan entre 200°C y 600°C, dejando una estructura porosa ideal para la adherencia. (Mahmood H., et al, 2021)

Definido el grado de calcinación, se caracterizó el sargazo ahora en ceniza, según la norma ASTM C 618, la cual indica el rango de consumo de portlandita para considerar puzolánico a un material, el cuál es de mínimo 25%, para esta investigación se utilizó la norma francesa Chapelle 2-1 y los resultados determinaron que no se puede considerar el sargazo calcinado a 600°C como un material puzolánico, por lo cual se consideró como un filler.



Se continuó el proceso de la calcinación para obtener un gramaje de ceniza de sargazo para el diseño de mezclas con sustituciones parciales, se realizó el cribado de la ceniza por la malla #325 (45 micas) para obtener el tamaño de grano de un cementante.

Se realizó la prueba de análisis granulométrico a la arena con una muestra de 500 gramos, siguiendo los parámetros establecidos por la NMX-C-061-ONNCCE. Esta norma mexicana especifica los requisitos y métodos para la clasificación de los agregados finos, los cuales son esenciales para determinar la calidad y la idoneidad de la arena.

Tabla 3. Pesaje de la arena.

Muestra:	500grs	Peso de la muestra retenida (GRS)					
Malla	apertura en mm	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	PROMEDIO
4	4.750	5	5	5	5	5	5
8	2.360	85	70	85	75	80	79
16	1.180	135	120	125	100	130	122
30	0.600	65	65	60	50	70	62
50	0.300	45	55	55	65	45	53
100	0.150	60	65	65	80	60	66
200	0.075	35	40	40	40	40	39

Posteriormente al pesaje de la muestra de arena, se procedió a verificar los límites inferiores y superiores de la normativa ASTM C 33.

Tabla 4. Límites inferiores y superiores ASTM C 33.

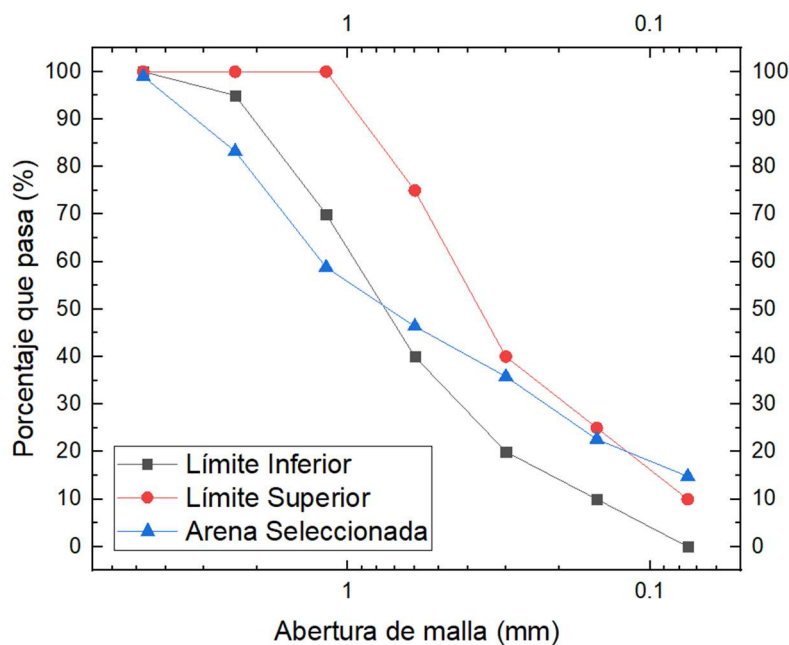
ASTM C 33			
Malla	apertura en mm	límite inf.	límite sup.
4	4.750	100	100
8	2.360	95	100
16	1.180	70	100
30	0.600	40	75
50	0.300	20	40
100	0.150	10	25
200	0.075	0	10

Así mismo se calculó el módulo de finura mediante su fórmula basada en los porcentajes acumulados de material en las mallas, para esta muestra el rango es de 2.5 a 3.0.



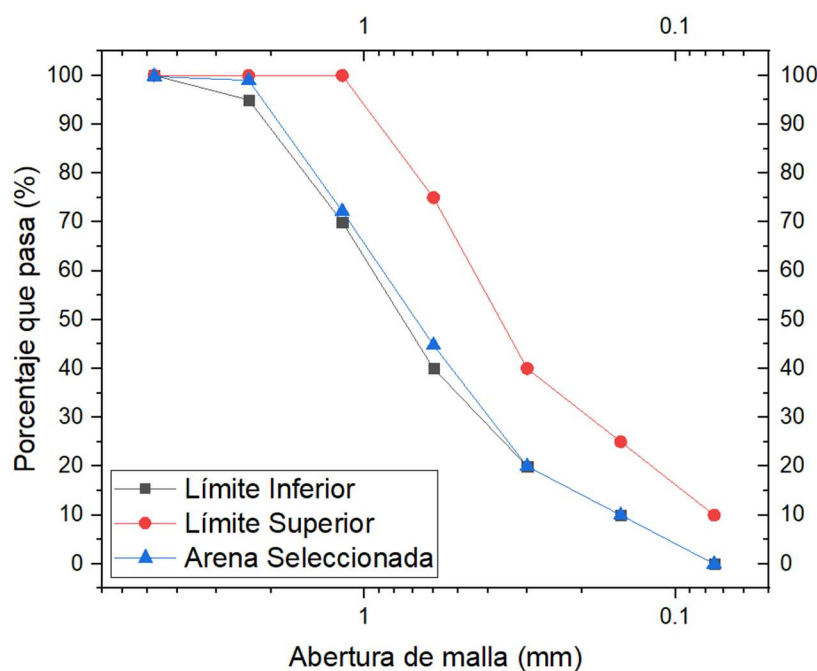
En la Grafica 5 se puede apreciar que en la granulometría de la arena inicial no pasan los porcentajes de material, en la malla #4 pasa el 99.00% y los limites son de 100-100, en la malla #8 pasa el 83.20% y los limites son de 95-100, en la malla #16 pasa el 58.80% y los limites son de 70-100; y en la última malla #200 pasa el 14.80% y los limites son de 0-10.

El módulo de finura de la granulometría inicial fue de 2.54, sin embargo, no está dentro de los límites establecidos por la normativa ASTM C 33.



Gráfica 5. Granulometría de la arena inicial.

Debido al alto contenido de finos, se realizó un ajuste y nuevamente los cálculos pertinentes. En la Grafica 6 se aprecia que los porcentajes pasan los límites de la normativa después del ajuste, el módulo de finura es de 2.54 y se encuentra dentro del rango.



Gráfica 6. Granulometría de la arena ajuste.

Finalizando con la etapa dos de la metodología, con los resultados de la granulometría se procedió a realizar el diseño de mezclas con la normativa ASTM C 109-05, para 6 cubos de 5*5*5 cm, con 500 gramos de Cemento, 242 mililitros de Agua, 1375 gramos de arena y una fluidez en un rango de 110 ± 5 , en la Tabla 5 se presenta los resultados de las proporciones de la arena con su referencia del ajuste.

Tabla 5. Peso de la arena para mezcla.

MALLA	PESO ARENA (gr)
8	11
16	368.5
30	376.75
50	341
100	137.5
200	140.25

Se presentan los resultados de la etapa tres de la metodología, para fines de esta investigación las sustituciones se realizaron del pesaje de Cemento en las proporciones de 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%, a cada mezcla se le realizó la prueba de fluidez según



la normativa ASTM C 1437, para constatar que las mezclas sean favorables, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6. Datos de resistencia a la compresión y fluidez.

MUESTRA	ESPECIMEN	PESO	PESO PROM	RESISTENCIA	RESISTENCIA PROM	FLUIDEZ 105-115
TESTIGO	1	260	258	174.8	206	114.57
	2	255		197.2		
	3	255		227.6		
	4	255		208		
	5	260		278		
	6	260		150.8		
2.50%	1	262.66	264	270.8	242	112.6
	2	266.31		238.8		
	3	261.6		200.8		
	4	265.63		262.8		
	5	264.56		240.16		
	6	264.49		239.92		
5%	1	261.33	262	208.4	225	112.11
	2	263.63		236		
	3	260.23		221.2		
	4	261.25		232.8		
	5	261.8		242.8		
	6	263.51		208		
7.50%	1	260	259	183.2	201	110.63
	2	256.43		213.2		
	3	260.32		207.6		
	4	256.09		198		
	5	258.88		191.6		
	6	259.61		212.8		
10%	1	258.4	256	166	169	111.37
	2	254.66		184.8		
	3	255.11		174.8		
	4	256.38		160		
	5	256.08		164		
	6	255.74		162		



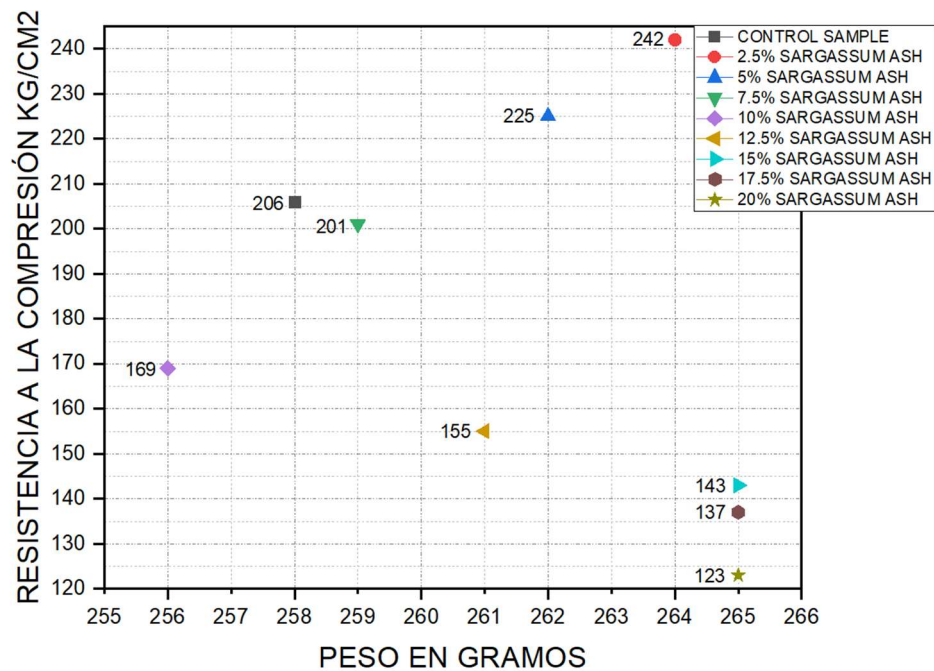
12.50%	1	261.48	261	158	155	108.17
	2	260		152		
	3	260		159.6		
	4	261.9		157.2		
	5	262.06		156.4		
	6	262.45		148		
15%	1	264.81	265	144.4	143	108.42
	2	261.57		136.4		
	3	267.07		146		
	4	265.72		138		
	5	267.1		146		
	6	265.42		146.4		
17.50%	1	263.63	265	142.4	137	110.14
	2	265.89		137.6		
	3	265.84		122.8		
	4	264.93		138.4		
	5	265.99		140.8		
	6	266.04		142		
20%	1	266.79	265	120.4	123	112.6
	2	263.46		117.2		
	3	265.74		130		
	4	266.22		127.6		
	5	264.06		122.4		
	6	263.1		121.6		

La fluidez es la capacidad del mortero para deformarse y llenar los espacios sin segregarse, una fluidez adecuada facilita la colocación y compactación, lo cual es esencial para lograr una densidad uniforme y minimizar la presencia de vacíos en los especímenes, obteniendo como resultado una resistencia a la compresión óptima. Un mortero con baja fluidez puede presentar una compactación insuficiente y por otro lado una fluidez excesiva puede provocar segregación de los materiales, ocasionando una mezcla no homogénea y por ende disminución de la resistencia a la compresión. (Dspace UNITRU, s.f.)



Ilustración 5. Colado de especímenes 5cm*5cm*5cm.

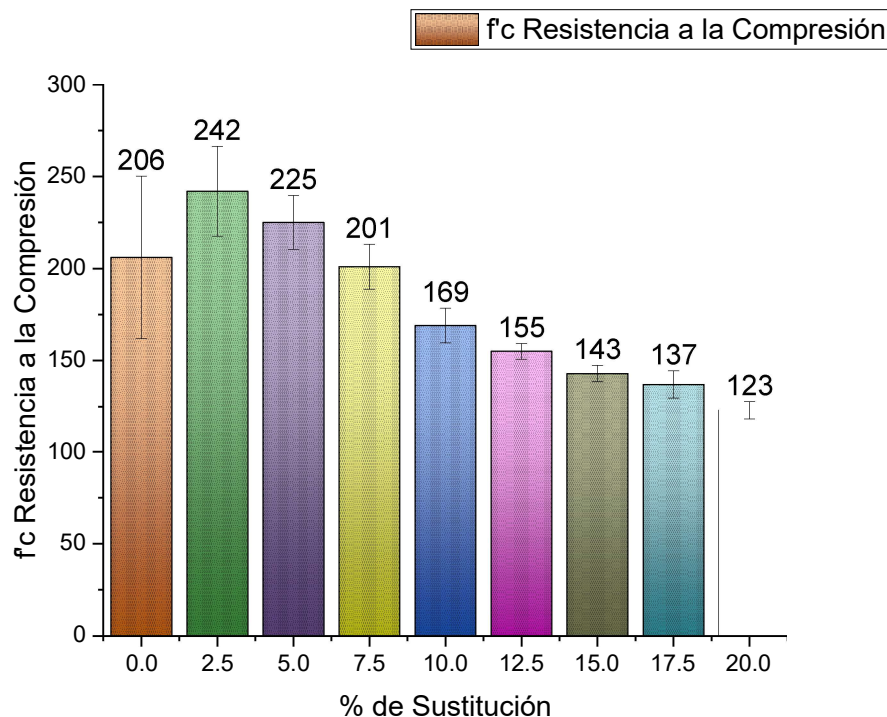
En la Gráfica 7 se observa la estadística del índice de resistencia mecánica, las sustituciones de 2.5% y 5% obtienen mayor resistencia que la muestra control, así mismo más peso propio a medida que aumenta el porcentaje y las sustituciones de 15%, 17.5% y 20% mantienen el mismo peso propio, pero a medida que aumenta el porcentaje de sustitución pierden resistencia a la compresión.



Gráfica 7. Resistencia y peso de los especímenes.



En la Gráfica 8 se observa la resistencia a la compresión de los especímenes con los porcentajes de sustitución de cemento por ceniza de sargazo, las sustituciones de 2.5% y 5% obtienen mayor resistencia que la muestra control, las sustituciones de 17.5% y 20% disminuyen considerablemente.



Gráfica 8. Resistencia a la compresión de los especímenes.

Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de las familias de especímenes con los porcentajes de sustitución de cemento por ceniza de sargazo se representan en la Gráfica 8. Se identificaron como óptimos los porcentajes de 2.5 y 5, dado que en estos rangos se logra una resistencia mecánica superior en comparación con porcentajes mayores. Este comportamiento se debe principalmente al rol que desempeña la ceniza de sargazo como material cementante suplementario tipo filler, un aditivo inerte de granulometría fina que se incorpora a la mezcla no para participar en reacciones químicas a gran escala, si no para mejorar propiedades físicas como la densificación de la microestructura. (Mehta, Monteiro, 2014)



Finalizando con la caracterización de la ceniza de sargazo se presenta los resultados del índice de actividad mecánica (Strength Activity Index, SAI, por sus siglas en inglés), evalúa la contribución a la resistencia comparando la muestra testigo ($f_{control,28}$ en la formula) con la muestra con sustitución parcial ($f_{test,28}$ en la formula), según ASTM C618 para caracterizar materiales de índole ceniza, exige un SAI mínimo de 75% transcurridos 28 días de curado (subíndice 28 en la formula), para aprobar el material cementante suplementario como filler (ASTM C 618, 2019) para fines del cálculo se procedió a utilizar la Tabla 6 (Datos de resistencia a la compresión y fluidez) con $f_{control,28}$ de sustitución de 0% y $f_{test,28}$ de sustituciones 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%, los resultados se presentan en la siguiente tabla. Cálculos en Anexos.

Tabla 7. Resultados Índice de Actividad Mecánica (SAI)

MUESTRAS SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZA DE SARGAZO	$SAI = \frac{f_{test,28}}{f_{control,28}} \times 100\%$	CRITERIO ASTM C618 $SAI \leq 75\%$
2.5%	117.5	CUMPLE
5%	109.2	CUMPLE
7.5%	97.6	CUMPLE
10%	82.0	CUMPLE
12.5%	75.2	CUMPLE
15%	69.4	NO CUMPLE
17.5%	66.5	NO CUMPLE
20%	59.7	NO CUMPLE

En porcentajes menores del 5% de sustitución, la ceniza actúa rellenando eficientemente los espacios vacíos entre las partículas de cemento y los agregados, lo cual reduce la porosidad y mejora la compacidad del mortero, esta optimización de la microestructura interna contribuye directamente a la mejora en la resistencia, dado que se favorece una mayor cohesión entre los componentes de la mezcla (Neville, 2012). En contraste, a medida que el porcentaje de sustitución supera el 5%, se observa una disminución significativa con relación a la familia de especímenes testigo (0% de sustitución) con sustitución de 7.5% disminuye un 2.43% de resistencia, con sustitución de 10% disminuye un 17.96% de resistencia, con sustitución de 12.5% disminuye un 24.76% de resistencia, con sustitución de 15% disminuye



un 30.58% de resistencia, con sustitución de 17.5% disminuye un 33.50% de resistencia, y con sustitución de 20% de ceniza de sargazo, disminuye el 40.29% la resistencia a la compresión: esto debido a que la ceniza de sargazo no posee propiedades puzolánicas relevantes, por lo que su capacidad de participar en el proceso de hidratación del cemento es limitada, en consecuencia, al incrementar su proporción en la mezcla, se reduce la cantidad de cemento disponible a reaccionar, lo que se traduce en un fraguado más lento y una menor formación de productos de hidratación (Juenger, Siddique, 2015).

En sustituciones elevadas al 5%, el exceso de material inerte tiende a inducir una distribución heterogénea de las partículas, aumentando la porosidad y reduciendo la cohesión general del compuesto cementante esto deteriora no sólo la resistencia mecánica, sino también la durabilidad del elemento (Scrivener, et al, 2018). Por lo tanto, en los porcentajes 2.5 y 5, se representa un equilibrio eficaz, donde el efecto filler de la ceniza de sargazo mejora la densidad de la mezcla sin comprometer de forma significativa el fraguado y sus propiedades mecánicas, los porcentajes de sustitución deben mantenerse dentro de los límites para evitar impactos negativos en el desempeño del elemento.

Posterior a la prueba de resistencia a la compresión, se seccionó los especímenes en nueve puntos con el fin de obtener fotografías con microscopio óptico para referencias de áreas de cavidades y grietas, en la ilustración 6 se representan dichos puntos de los cuales se extrae una pieza de dimensiones de un centímetro cuadrado con grosor no mayor a un milímetro, en la ilustración 7 se muestra la extracción.

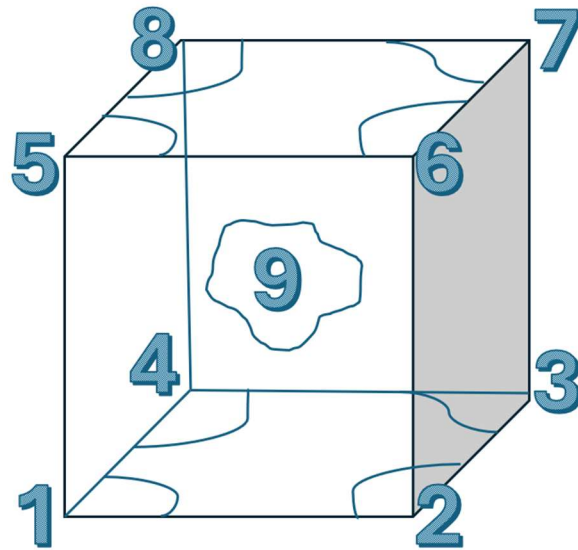


Ilustración 6. Puntos de extracción de las piezas de los especímenes.



Ilustración 7. Extracción de las piezas de los especímenes.

En la ilustración 8 se presentan las imágenes de las muestras de 12.5% posterior a la prueba de compresión y a la extracción de las piezas, la primera fotografía (izquierda) corresponde a la pieza 6.8 (especimen 6 punto 8), la fotografía segunda corresponde a la pieza 6.9 y la última fotografía corresponde a la pieza 1.5.



Las fotografías están referenciadas en nanómetros cuadrados, para fines de la ilustración en centímetros cuadrados. El porcentaje de grietas de la pieza 6.9 es alto debido al punto (zona central) ya que es ahí donde se aplica la fuerza axial en la prueba de compresión, actuando en última instancia las esquinas del espécimen. Las imágenes por microscopía óptica presentan datos visuales relevantes como grietas y cavidades a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de la ceniza de sargazo, con una representación física en la prueba de resistencia a la compresión, dichos resultados están relacionados y corresponden al comportamiento físico de los materiales cementantes suplementarios tipo filler (López, A., Pérez J., 2021).

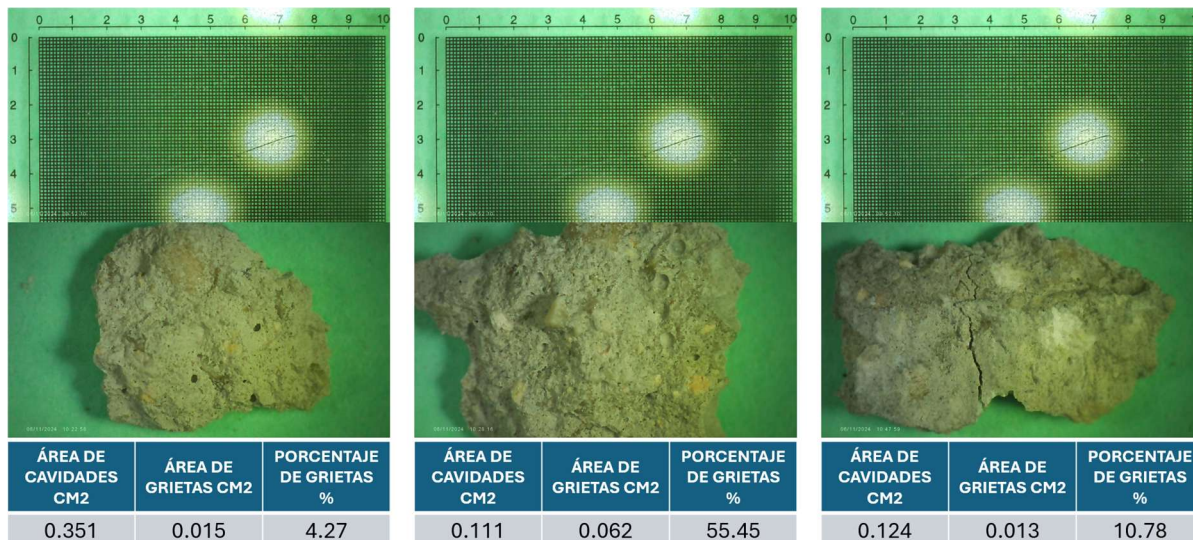


Ilustración 8. Porcentaje de grietas promedio.

En la ilustración 9 se presentan las imágenes de las muestras de 5% de sustitución posterior a la prueba de compresión y a la extracción de las piezas, se observa una menor casi nula cantidad de grietas, las cavidades observadas son relacionadas al proceso de elaboración de la muestra posterior a la prueba de fluidez, y cimbrado de los especímenes debido al apisonamiento de la mezcla.

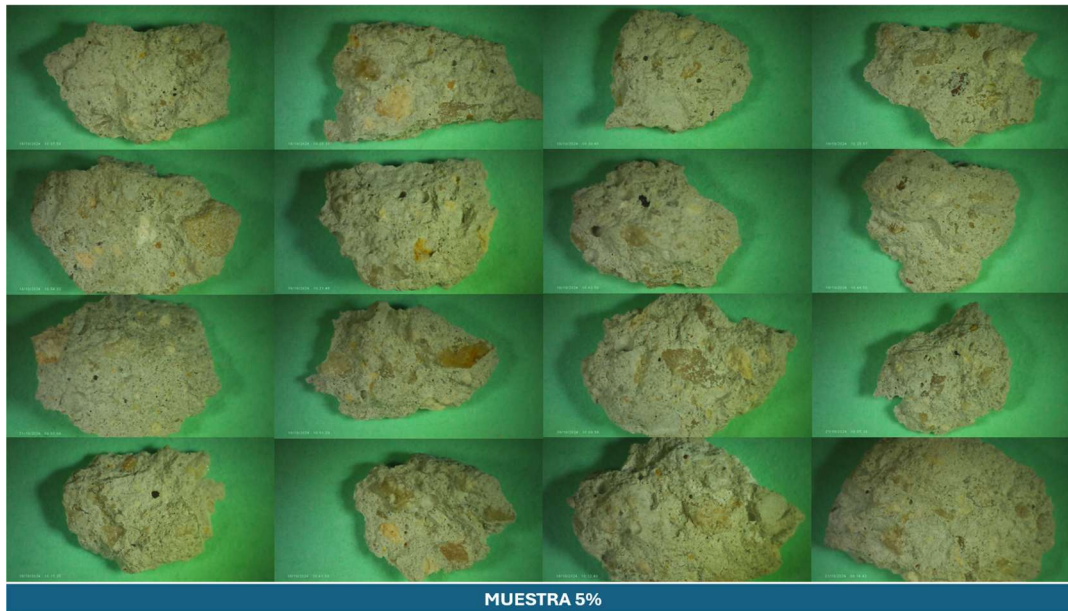


Ilustración 9. Muestra con sustitución del 5% por microscopía óptica.

En la ilustración 10 se presentan las imágenes de las muestras de 10% de sustitución posterior a la prueba de compresión y a la extracción de las piezas, en comparación con la ilustración 5 se observa una cantidad de grietas ligeramente mayor, las cavidades más profundas, así mismo se observa áreas de color blancuzcas las cuales son relacionadas con el agregado fino de índole calizo el cuál se encuentra cristalizado debido a los procesos de fraguado de la mezcla.



Ilustración 10. Muestra con sustitución del 10% por microscopía óptica.



En la ilustración 11 se presentan las imágenes de las muestras de 15% de sustitución posterior a la prueba de compresión y a la extracción de las piezas, en comparación con la ilustración 5 y 6, se observa una alta porosidad, mayores de grietas de diferentes grosores, las cavidades de mayor área y cercanas, enmarcando la baja resistencia en este porcentaje.

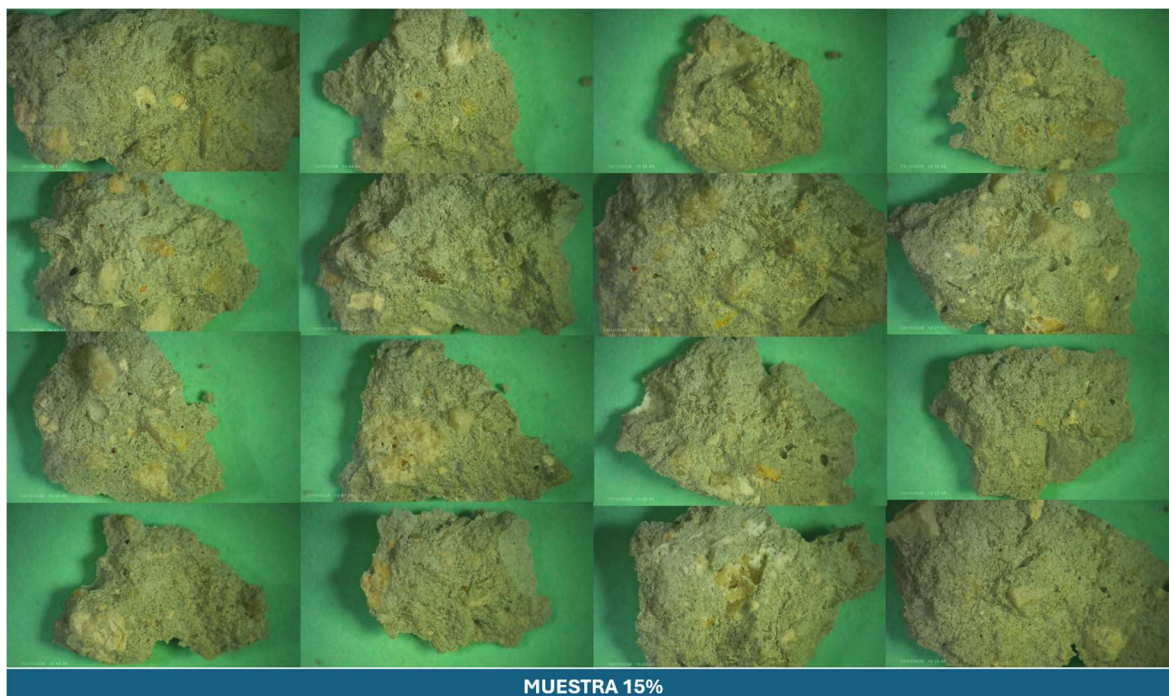


Ilustración 11. Muestra con sustitución del 15% por microscopía óptica.

En la ilustración 12 se presentan las imágenes de las muestras de 20% de sustitución posterior a la prueba de compresión y a la extracción de las piezas, en comparación con la ilustración 7, se observa más porosidad, mayores de grietas de diferentes grosores, las cavidades de mayor área ya no se presentan cercanas, se presentan unidas formando túneles en la microestructura del espécimen, el desprendimiento de las áreas blancuzcas (agregado fino) representan baja adherencia, enmarcando de igual manera la baja resistencia en este porcentaje, haciéndolo potencialmente peligroso para su uso en un medio constructivo.

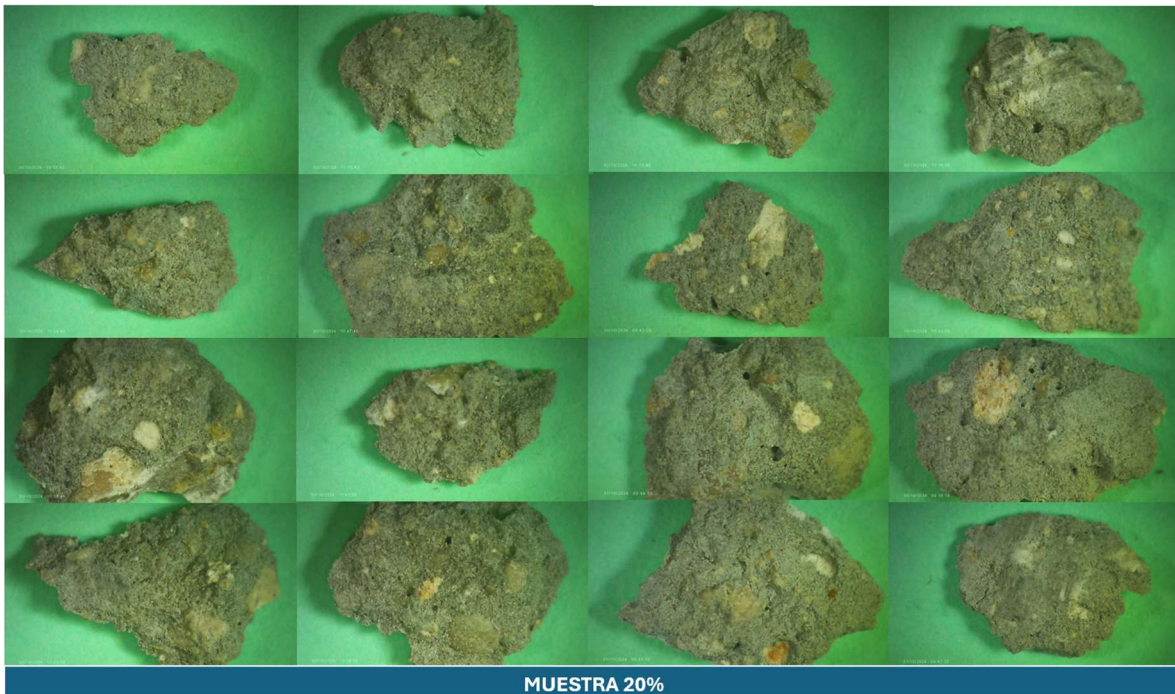


Ilustración 12. Muestra con sustitución del 20% por microscopía óptica.

Las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica evidencian una disminución en la resistencia a la compresión de los especímenes, atribuida a la incorporación del material en las mezclas. Las grietas y cavidades conforman una red que debilita la estructura del espécimen, generando una pérdida progresiva de resistencia conforme aumenta el porcentaje de sustitución.



Conclusiones

Los resultados de absorción atómica muestran que los lavados químicos y térmicos generan modificaciones sustanciales en la concentración de metales pesados presentes en la muestra. La reducción de Arsénico en un 92.55% mediante el uso de NaOH confirma la efectividad del proceso de purificación, aunque el aumento relativo de Sodio (71.18%) constituye un factor de riesgo, dado que su incorporación puede inducir microfisuras y mayor porosidad en la matriz cementicia, con el consecuente detrimento de la resistencia a la compresión (NOM-147-SEMARNAT, 2004). En contraste, los lavados con agua evidencian una disminución de hasta 99.15% en el contenido de Na, lo cual representa un beneficio en términos de estabilidad iónica, pero con menor efectividad en la remoción de As (Pachapur, et al., 2020). Considerando estos resultados, y con el propósito de equilibrar la reducción de impurezas sin comprometer la integridad mecánica del material, se justifica la decisión de continuar el proyecto con lavados térmicos a base de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ya que este reactivo ofrece la doble ventaja de mantener bajo control las concentraciones de metales regulados y de favorecer la formación de fases cementantes estables, optimizando así la resistencia a la compresión de los especímenes (Mahmood H., et al., 2021).

El análisis térmico (TGA/DTG) mostró que la muestra de sargazo lavada con agua (A1H) presentó tres zonas de descomposición: pérdida de agua y compuestos volátiles, degradación de compuestos orgánicos (celulosa y hemicelulosa) entre 200 y 400 °C, y descomposición final de residuos carbonosos (Pachapur et al., 2020; Mahmood H., et al., 2021). En el lavado con NaOH (A2Na), la degradación de los compuestos orgánicos se desplazó a temperaturas más bajas (274–304 °C) debido a la disolución parcial de hemicelulosa y lignina, lo que favorece un grado óptimo de calcinación a 600 °C (Mahmood H., et al., 2021). Este comportamiento térmico indica que la estabilidad de la matriz y la microestructura de los especímenes dependen del tratamiento y condiciona directamente la resistencia a la compresión.

El XRD evidenció que la Calcita es la fase predominante en A1H a 600–700 °C, transformándose completamente en Óxido de Calcio (CaO) a 800 °C (Pachapur et al., 2020). En A2Na, la transición hacia CaO ocurre de manera más eficiente y temprana, con incremento de picos asociados a S, K y Mg propios del sargazo (Pachapur et al., 2020),



confirmando que el NaOH no solo elimina impurezas, sino que induce transformaciones mineralógicas que favorecen la reactividad del material. La presencia de CaO incrementa la capacidad de formación de fases cementantes durante la hidratación, aunque la limitada actividad puzolánica observada mediante la prueba Chapelle indica que la ceniza debe considerarse un filler (ASTM C 618, 2019; Chapelle, 2-1).

Se optó por realizar los lavados únicamente con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) debido a que este reactivo permite un balance óptimo entre la eliminación de impurezas y la preservación de la integridad mecánica del sargazo calcinado. Los resultados de absorción atómica mostraron que los lavados con NaOH reducen eficientemente el arsénico, pero generan un aumento significativo en el contenido de sodio, lo que puede inducir microfisuras y porosidad en la matriz cementicia, comprometiendo la resistencia a la compresión (NOM-147-SEMARNAT, 2004; Pachapur et al., 2020).

La granulometría de la arena ajustada según ASTM C 33 y el cribado de la ceniza a malla #325 aseguraron un módulo de finura adecuado (2.54), permitiendo mezclas homogéneas y densas, mientras que la prueba de fluidez (ASTM C 1437) confirmó que las pastas mantienen trabajabilidad suficiente para una correcta consolidación de los especímenes (Mehta y Monteiro, 2014; Neville, 2012).

La mezcla cementante adicionada con ceniza de sargazo obtenida, en estado fresco, tuvo una fluidez y trabajabilidad apropiada para fines constructivos. También, fue posible observar que esta mezcla cementante presenta un aumento en la demanda de agua a medida que se adiciona mayores porcentajes de ceniza de sargazo y se disminuye la resistencia a la compresión. Los porcentajes de sustitución óptimos son 2.5% y 5%, debido que la ceniza funge como un filler, rellenando las cavidades y proporciona una cantidad menor de vacíos, haciendo de la muestra un espécimen más compacto.

Las imágenes obtenidas de la microscopía óptica exponen el decrecimiento en la resistencia a la compresión de los especímenes debido al material inducido en las mezclas. Estas grietas y cavidades se presentan como una red que debilita el espécimen, que se traduce a una menor resistencia a medida que el porcentaje de sustitución crece, haciendo que los morteros se vuelvan más poroso y las partículas no se distribuyen de manera homogénea y esto disminuye



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



la cohesión de los materiales de la mezcla. Todo lo antes mencionado impacta directamente en su resistencia y durabilidad del elemento, en porcentajes de 2.5% y 5% se obtiene una mejor distribución y una microestructura más compacta, lo cual se alinea con los valores óptimos de resistencia a la compresión, dicho comportamiento de la ceniza de sargazo es clasificado como material cementante suplementario tipo filler (relleno) ya que son materiales finos que se incorporan en la mezcla para mejorar algunas propiedades del mortero, como la trabajabilidad y la resistencia debido al relleno de vacíos en la microestructura de la mezcla, a mayor porcentaje el material sigue trabajando en su característica de filler pero impacta en los procesos de fraguado de la mezcla.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Recomendaciones

Los resultados y conclusiones corroboran que la ceniza de sargazo no es un material puzolánico y funge como un material cementante suplementario tipo filler, relleno de los vacíos con porcentajes máximos de sustitución de 2.5% y 5% para no debilitar la estructura de la pasta cementante, dado que no se cuenta con literatura para el material específico empleado y la sustitución empleada con los procesos para reducción de metales pesados e impurezas, se propone revisar la granulometría del material pétreo para evitar adiciones extraordinarias de agua y no diseñar mezclas cementantes con sustituciones mayores a los porcentajes antes mencionados, con el fin de mantener la seguridad, y durabilidad aparente.

Se recomienda una línea de investigación que indague en la durabilidad de mezclas con sustituciones parciales de ceniza de sargazo, con el fin de obtener referencias de durabilidad.



Referencias

- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). *A review on emission analysis in cement industries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2252-2261.
- Anastasiou, E. K. (2021). *Effect of high calcium fly ash, ladle furnace slag, and limestone filler on packing density, consistency, and strength of cement pastes*. Materials, 14(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma14020301>
- Andrew, R. M. (2018). *Global CO₂ emissions from cement production*. Earth System Science Data, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- ASTM International. (2019). ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International.
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., y Milo, R. (2018). *The biomass distribution on Earth*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(25), 6506-6511.
- Bezerra, A. C. S. et al. (2017). *Efect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars*. Rev. Mater. 22, 20. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0117>
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., & Ramezaniapour, A. A. (2011). *Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete*. ACI Materials Journal, 108 (1), 64-72.
- Ceballos Arana, M. A. (2016). *El concreto, material fundamental para la infraestructura*. Voz del Experto, 24-25. IMCYC. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/agosto2016/experto.pdf>
- Chahbi, M., Mortadi, A., El Moznine, R., Monkade, M., Zaim, S., Nmila, R., & Rchid, H. (2022). *A new approach to investigate the hydration process and the effect of algae powder on the strength properties of cement paste*. Australian Journal of Mechanical Engineering, 1-10.



- Chand, G. (2021). *Microstructural study of sustainable cements produced from industrial by-products, natural minerals, and agricultural wastes: A critical review on engineering properties*. Cleaner Engineering and Technology, 4, 100224. doi: 10.1016/j.clet.2021.100224
- Chávez, V.; Uribe-Martínez, A.; Cuevas, E.; Rodríguez-Martínez, R.E.; van Tussenbroek, B.I.; Francisco, V.; Estévez, M.; Celis, L.B.; Monroy-Velázquez, L.V.; Leal-Bautista, R.; et al. (2020). *Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities*. Water 2020, 12, 2908.
- Choi W.C, Yun H.D., Lee, J.Y. (2012). *Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char From Pyrolysis*. Proceeding of the Korea Society of Structural Diagnostic and Maintenance Engineers, 67-74. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.3.067>
- Comunicación Institucional CICY. (2018). *Científicos del CICY producen biogás a partir de sargazo*. CICY Noticias y Eventos. Boletín 45. <https://www.cicy.mx/noticias-y-eventos/boletin-45-cientificos-del-cicy-producen-biogas-a-partir-de-sargazo>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction* (3^a ed.). Prentice-Hall. ISBN: 0-201-01174-3.
- De la Garza Garza, Ó. J., & Arteaga García, J. C. (2011). *Análisis de la competencia en la industria cementera en México*. EconoQuantum, 8(1-2), 73–89. <https://doi.org/10.18381/eq.v8i12.130>
- Dspace UNITRU. (s.f.). *Influencia del tiempo de almacenamiento y tipo de cemento en la fluidez, fraguado y compresión de morteros de asiento*. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/167a8185-fb25-4783-8062-b0223ef69858>
- García, F., & Martínez, R. (2020). *Análisis de la influencia de los materiales suplementarios en las propiedades del concreto*. Revista Internacional de Materiales de Construcción, 45(2), 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.matbuild.2020.01.017>



- Jin, R., & Chen, Q. (2013). *An investigation of current status of “green” concrete in the construction industry*. In 49th ASC annual international conference proceedings (pp. 1-8).
- Juenger, M., & Siddique, R. (2015). *Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 78, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Leal Bautista, R., Tapia Tussell, R., y Alzate Gaviria, L. (2020). *Usos potenciales del sargazo*. *Revista Ciencia*. Volumen 71 número 4. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/71_4/PDF/11_71_4_1286_Sargazo_Potencial.pdf
- Li J., Zhang F., Muhammad Y., Liu Y., Wei Y., Chen H. (2019). *Fabrication and properties of wide temperature domain pavement seaweed modified bio-bitumen*. *Construction and Building Materials*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117079>
- Lim, C., Jung, E., Lee, S., Jang, C., Oh, C., & Nam Shin, K. (2020). *Global Trend of Cement Production and Utilization of Circular Resources*. *Journal of Energy Engineering*, 29(3), 57–63. <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.3.057>
- López, A., & Pérez, J. (2021). *Efecto de los fillers en la microestructura y propiedades mecánicas del concreto*. *Journal of Cement and Concrete Research*, 75, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.02.003>
- Mahmood, H., Moniruzzaman, M., & Yusup, S. (2021). *Thermal degradation and kinetic study of seaweed biomass using thermogravimetric analysis*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105108. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105108>
- Mannan, M. A. & Ganapathy, C. (2004). *Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS)*. *Building and Environment*, 39, 441-448
- Manzano-Agugliaro, F.; Alcayde, A.; Montoya, F.G.; Zapata-Sierra, A.; Gil, C. (2013). *Scientific production of renewable energies worldwide: An overview*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 18, 134–143.



Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials (4th ed.)*. McGraw-Hill Education.

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>

Méndez, A., Fidalgo, B., Guerrero, F., & Gasco, G. (2019). *Characterization and pyrolysis behavior of algae biomass to produce biochar for soil amendment*. *Renewable Energy*, 135, 1082-1090. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.073>

Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete (5th ed.)*. Pearson Education.
<https://dokumen.pub/properties-of-concrete-5nbsped-0273755803-9780273755807.html>

OCW UPCT (s.f.). *Historia del Hormigón*. Escuela de Ingeniería Técnica Civil. Arquitectura Técnica. Materiales II.
https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6202/mod_resource/content/1/Hormigon_01._Historia.pdf

Pachapur, V. L., Bui, T., & Brar, S. K. (2020). *Thermal degradation of macroalgal biomass: Kinetics and product characterization*. *Bioresource Technology*, 302, 122893. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122893>

Restuccia, L., y Ferro, G. A. (2016). *Promising low cost carbon-based materials to improve strength and toughness in cement composites*. *Construction and Building Materials*, 126, 1034–1043. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.101

Rodgers, L. (2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

Sargablock. (2021). *SargaBLOCK*. Obtenido de <https://sargablock.com.mx/productos/>

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>



- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b19074>
- Shah, K. U. y McNeil, P. (2022). *Management of a Changing Natural Environment: The Impact of Sargassum Seaweed in the Caribbean Using the Institutional Analysis and Design Framework*. Bethell-Bennett, I., Rolle, S.A., Minnis, J. and Okumus, F. (Ed.) *Pandemics, Disasters, Sustainability, Tourism*, Emerald Publishing Limited, Bingley, pp. 145-162. <https://doi.org/10.1108/978-1-80382-105-420221010>
- Sivakumar, P. P., Matthys, S., de Belie, N., & Gruyaert, E. (2021). *Reactivity assessment of modified ferro silicate slag by R3 method*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app11010366>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2007). *Principles of Instrumental Analysis* (6^a ed.). Cengage Learning. <https://doi.org/10.1021/ed069pA224.1>
- Snellings, R. (2016). *Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials*. RILEM Technical Letters, 1, 50.
<https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.12>
- Tavares, L. R. C., Junior, J. F. T., Costa, L. M., da Silva Bezerra, A. C., Cetlin, P. R., & Aguilar, M. T. P. (2020). *Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement*. *Scientific Reports*, 10(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w>
- Torres Conde, E. G., y Martínez Daranas, B. (2020). *Análisis espacio-temporal y oceanográfico de las arribazones de Sargassum pelágico en las playas del este de la Habana, Cuba*. *Revista de Investigaciones Marinas*. Volumen 40. pp.22-41.
<http://hdl.handle.net/1834/17768>
- Tse, D., Lee, S., & Chan, P. (2014). *Chemical treatments for organic waste valorization in cement mortars*. *Environmental Chemistry Letters*, 12(3), 351-359.
<https://doi.org/10.1007/s10311-014-0503-6>



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Villas, B. R. C. (1995). *Sustainable Development and the Advanced Materials*. Johnson Editor, Brazil.

Welz, B., & Sperling, M. (2008). *Atomic Absorption Spectrometry* (3^a ed.). Wiley-VCH.

Zavala Arceo, A., Cruz Argüello, J. C., Figueroa Torres, M. Z., Yeladaqui Tello, A. (2019). *Determinación de las propiedades térmicas de un mortero modificado con sargazo como material alternativo en construcción*. Revista de Ingeniería Civil, Volumen 3 Numero 10 con ISSN: 2523-2428. EORFAN-Mexico, S.C. Holding Republic of Peru. DOI: 10.35429/JCE.2019.10.3.1.9.

https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Civil/vol3num10/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_Civil_V3_N10_1.pdf

Zhang, J., Wang, W., & Li, X. (2016). *Impact of calcium-based chemicals on metal removal in wastewater treatment processes*. Water Research, 99, 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.019>

Zhu, J., Zhang, R., Zhang, Y. & He, F. (2019). *The fractal characteristics of pore size distribution in cement-based materials and its effect on gas permeability*. Sci. Rep. 9, 1-12



Anexos

Para fines de esta investigación las sustituciones se realizaron del pesaje de Cemento en las proporciones de 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%, a cada mezcla se le realizó la prueba de fluidez según la normativa ASTM C 1437, los resultados se presentan a continuación.

MUESTRA: TESTIGO
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 8 DE MAYO
FECHA DE CURADO: JUEVES 9 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} = 10.16		F= 105-115	
INTENTO:			1					
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	22		
CEMENTO	500	GR	75	500	D2=	21.5	F= 114.57	
AGUA	242	ML		317	D3=	21.5		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	22.2		
					D _{PROM} =	21.80		

MUESTRA: 2.5%
FECHA DE COLADO: MARTES 14 DE MAYO
FECHA DE CURADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} = 10.16		F= 105-115	
INTENTO:			1					
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	22		
CEMENTO	500	GR	158	500	D2=	21.7	F= 112.60	
AGUA	242	ML		400	D3=	21.2		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	21.5		
					D _{PROM} =	21.60		

MUESTRA: 5%
FECHA DE COLADO: MARTES 14 DE MAYO
FECHA DE CURADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} =	10.16	F=	105-115
INTENTO:					1			
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	19.5		



CEMENTO	500	GR	158	500	D2=	18.6	F= 86.02
AGUA	242	ML		400	D3=	19.2	
ARENA	1375	GR		1375	D4=	18.3	
					D _{PROM} =	18.90	

CÁLCULO DE FLUIDEZ				D _{INICIAL} = 10.16			
INTENTO:				2			
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	22	
CEMENTO	500	GR		500	D2=	21.1	F= 112.11
AGUA	400	ML	20	420	D3=	21.7	
ARENA	1375	GR		1375	D4=	21.4	
					D _{PROM} =	21.55	

MUESTRA: 7.5%
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO
FECHA DE CURADO: JUEVES 16 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ				D _{INICIAL} = 10.16			
INTENTO:				1			
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	20.2	
CEMENTO	500	GR		500	D2=	20.2	F= 99.06
AGUA	242	ML	138	380	D3=	20	
ARENA	1375	GR		1375	D4=	20.5	
					D _{PROM} =	20.23	

CÁLCULO DE FLUIDEZ				D _{INICIAL} = 10.16			
INTENTO:				2			
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.3	
CEMENTO	500	GR		500	D2=	21.4	F= 110.63
AGUA	380	ML	10	390	D3=	21.4	
ARENA	1375	GR		1375	D4=	21.5	
					D _{PROM} =	21.40	

MUESTRA: 10%
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO
FECHA DE CURADO: JUEVES 16 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ				D _{INICIAL} = 10.16			
INTENTO:				1			



CONSTANTES			UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.3	
CEMENTO	500		GR		500	D2=	21.5	F= 111.37
AGUA	242		ML	138	380	D3=	21.6	
ARENA	1375		GR		1375	D4=	21.5	
						D _{PROM} =	21.48	

MUESTRA: 12.5%
FECHA DE COLADO: JUEVES 16 DE MAYO
FECHA DE CURADO: VIERNES 17 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ
INTENTO:

CONSTANTES			UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	19.3	
CEMENTO	500		GR		500	D2=	19.9	F= 95.13
AGUA	242		ML	98	340	D3=	20	
ARENA	1375		GR		1375	D4=	20.1	
						D _{PROM} =	19.83	

CÁLCULO DE FLUIDEZ
INTENTO:

CONSTANTES			UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.2	
CEMENTO	500		GR		500	D2=	21	F= 108.17
AGUA	340		ML	10	350	D3=	21.5	
ARENA	1375		GR		1375	D4=	20.9	
						D _{PROM} =	21.15	

MUESTRA: 15%
FECHA DE COLADO: JUEVES 16 DE MAYO
FECHA DE CURADO: VIERNES 17 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ
INTENTO:

CONSTANTES			UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	20	
CEMENTO	500		GR		500	D2=	20	F= 95.87
AGUA	242		ML	108	350	D3=	19.8	
ARENA	1375		GR		1375	D4=	19.8	
						D _{PROM} =	19.90	

CÁLCULO DE FLUIDEZ
INTENTO:

CONSTANTES			UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.7	
------------	--	--	--------	-----------	-------	-----	------	--



CEMENTO	500	GR		500	D2=	20.8	F=	108.42
AGUA	350	ML	10	360	D3=	20.9		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	21.3		
					D _{PROM} =	21.18		

MUESTRA: 17.5%
FECHA DE COLADO: VIERNES 17 DE MAYO
FECHA DE CURADO: SÁBADO 18 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} =	10.16	F=	105-115
INTENTO:			1					
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	19		
CEMENTO	500	GR	108	500	D2=	19.8	F=	90.94
AGUA	242	ML		350	D3=	18.8		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	20		
					D _{PROM} =	19.40		

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} = 10.16			
INTENTO:			2					
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.5		
CEMENTO	500	GR		500	D2=	21	F=	110.14
AGUA	350	ML	10	360	D3=	20.9		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	22		
					D _{PROM} =	21.35		

MUESTRA: 20%
FECHA DE COLADO: VIERNES 17 DE MAYO
FECHA DE CURADO: SÁBADO 18 DE MAYO

CÁLCULO DE FLUIDEZ					D _{INICIAL} = 10.16		F= 105-115	
INTENTO:			1					
CONSTANTES		UNIDAD	ADICIONES	TOTAL	D1=	21.6		
CEMENTO	500	GR	118	500	D2=	21.3	F=	112.60
AGUA	242	ML		360	D3=	21.7		
ARENA	1375	GR		1375	D4=	21.8		
					D _{PROM} =	21.60		



Posteriormente se aplicó la normativa ASTM C 39 para determinar la resistencia a la compresión de los especímenes en cada uno de los porcentajes de sustitución.

MUESTRA: TESTIGO
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 8 DE MAYO
FECHA DE CURADO: JUEVES 9 DE MAYO
FECHA RESISTENCIA: MIÉRCOLES 5 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	260.00	4370	174.8
2	255.00	4930	197.2
3	255.00	5690	227.6
4	255.00	5200	208
5	260.00	6950	278
6	260.00	3770	150.8
	258	5152	206

MUESTRA: 2.5%
FECHA DE COLADO: MARTES 14 DE MAYO
FECHA DE CURADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO
FECHA RESISTENCIA: MARTES 11 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	262.66	6770	270.8
2	266.31	5970	238.8
3	261.6	5020	200.8
4	265.63	6570	262.8
5	264.56	6004	240.16
6	264.49	5998	239.92
	264	6055	242



MUESTRA: 5%
FECHA DE COLADO: MARTES 14 DE MAYO
FECHA DE CURADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO
FECHA RESISTENCIA: MARTES 11 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	261.33	5210	208.4
2	263.63	5900	236
3	260.23	5530	221.2
4	261.25	5820	232.8
5	261.80	6070	242.8
6	263.51	5200	208
	262	5622	225

MUESTRA: 7.5%
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO
FECHA DE CURADO: JUEVES 16 DE MAYO
FECHA RESISTENCIA: MIÉRCOLES 12 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	260.00	4580	183.2
2	256.43	5330	213.2
3	260.32	5190	207.6
4	256.09	4950	198
5	258.88	4790	191.6
6	259.61	5320	212.8
	259	5027	201

MUESTRA: 10%
FECHA DE COLADO: MIÉRCOLES 15 DE MAYO



FECHA DE CURADO: JUEVES 16 DE MAYO

FECHA RESISTENCIA: MIÉRCOLES 12 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	258.4	4150	166
2	254.66	4620	184.8
3	255.11	4370	174.8
4	256.38	4000	160
5	256.08	4100	164
6	255.74	4050	162
	256	4215	169

MUESTRA: 12.5%

FECHA DE COLADO: JUEVES 16 DE MAYO

FECHA DE CURADO: VIERNES 17 DE MAYO

FECHA RESISTENCIA: JUEVES 13 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	261.48	3950	158
2	260.00	3800	152
3	260.00	3990	159.6
4	261.90	3930	157.2
5	262.06	3910	156.4
6	262.45	3700	148
	261	3880	155

MUESTRA: 15%

FECHA DE COLADO: JUEVES 16 DE MAYO

FECHA DE CURADO: VIERNES 17 DE MAYO

FECHA RESISTENCIA: JUEVES 13 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	264.81	3610	144.4
2	261.57	3410	136.4
3	267.07	3650	146
4	265.72	3450	138
5	267.10	3650	146
6	265.42	3660	146.4
	265	3572	143

MUESTRA: 17.5%

FECHA DE COLADO: VIERNES 17 DE MAYO



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



FECHA DE CURADO: SÁBADO 18 DE MAYO

FECHA RESISTENCIA: VIERNES 14 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	263.63	3560	142.4
2	265.89	3440	137.6
3	265.84	3070	122.8
4	264.93	3460	138.4
5	265.99	3520	140.8
6	266.04	3550	142
	265	3433	137

MUESTRA: 20%

FECHA DE COLADO: VIERNES 17 DE MAYO

FECHA DE CURADO: SÁBADO 18 DE MAYO

FECHA RESISTENCIA: VIERNES 14 DE JUNIO

MUESTRA	PESO	CARGA MÁX	RESISTENCIA 28 DÍAS
1	266.79	3010	120.4
2	263.46	2930	117.2
3	265.74	3250	130
4	266.22	3190	127.6
5	264.06	3060	122.4
6	263.1	3040	121.6
	265	3080	123



Finalizando con el cálculo del SAI según ASTM C618 transcurridos 28 días de curado, la muestra con sustitución parcial ($f_{test,28}$ en la formula) entre la muestra testigo ($f_{control,28}$ en la formula) x 100%, según la normativa, exige un SAI mínimo de 75% transcurridos 28 días de curado (subíndice 28 en la formula), para aprobar el material cementante suplementario como filler (ASTM C 618, 2019) para fines del cálculo se procedió a utilizar la Tabla 6 (Datos de resistencia a la compresión y fluidez) con $f_{control,28}$ de sustitución de 0% y $f_{test,28}$ de sustituciones 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% y 20%.

Formula: $SAI = \frac{f_{test,28}}{f_{control,28}} \times 100\%$

Muestra sustitución 2.5%: $SAI = \frac{242}{206} \times 100\% = 117.5\%$

Muestra sustitución 5%: $SAI = \frac{225}{206} \times 100\% = 109.2\%$

Muestra sustitución 7.5%: $SAI = \frac{201}{206} \times 100\% = 97.6\%$

Muestra sustitución 10%: $SAI = \frac{169}{206} \times 100\% = 82.0\%$

Muestra sustitución 12.5%: $SAI = \frac{155}{206} \times 100\% = 75.2\%$

Muestra sustitución 15%: $SAI = \frac{143}{206} \times 100\% = 69.4\%$

Muestra sustitución 17.5%: $SAI = \frac{137}{206} \times 100\% = 66.5\%$

Muestra sustitución 20%: $SAI = \frac{123}{206} \times 100\% = 59.7\%$