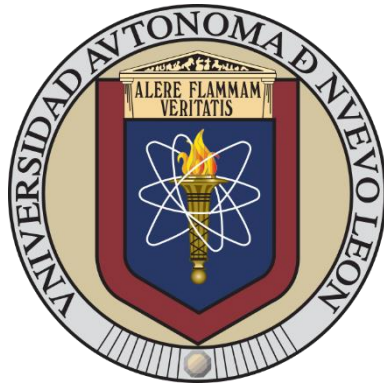


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“CONCRETOS VEGETALES CON AGREGADOS ORGÁNICOS PROVENIENTES
DE LOS RESIDUOS DE LA CÁSCARA DE CACAHUATE: ESTUDIO DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS, FÍSICAS Y TÉRMICAS”**

Por

DIEGO YOAV NUÑEZ HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación
en **Materiales de Construcción**

SEPTIEMBRE 2023

Contenido

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES	9
1.1. INTRODUCCIÓN	9
1.2. GENERALIDADES.....	10
1.2.1. Construcción sustentable	10
1.2.2. Generación de residuos orgánicos	12
1.2.3. Demanda de residuos orgánicos en la construcción	13
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	15
1.4. HIPÓTESIS	16
1.5. OBJETIVOS	16
1.5.1. General.....	16
1.5.2. Específicos	16
1.6. ANTECEDENTES	16
1.6.1. Bio-Agregados.....	17
1.6.2. Tratamiento para los Bio-Agregados	23
1.6.3. Materiales cementantes suplementarios	24
1.6.4. Efecto del Bio-Agregado y Materiales Cementantes en el concreto	25
1.7. CONCRETOS VEGETALES	26
1.7.1. Propiedades mecánicas	26
1.7.2. Propiedades Higrotérmicas	27
1.7.3. Durabilidad	28
CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO.....	29
2.1. CÁSCARA DE CACAHUATE	29
2.1.1. Producción de la cáscara de cacahuate	30
2.2. CEMENTO PORTLAND.....	32

2.3.	CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	35
2.4.	ADICIONES AL CONCRETO.....	37
2.4.1.	Aditivo reductor de agua.....	37
2.4.2.	Oxido de calcio.....	38
2.5.	RELACIÓN AGUA/CEMENTO.....	39
2.6.	TRABAJABILIDAD EN PASTAS DE CEMENTO.....	39
CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		41
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	41
3.2.	ETAPA 1: OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES.....	42
3.3.	ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	43
3.3.1.	Distribución de tamaño de partícula.....	43
3.3.2.	Densidad.....	45
3.3.3.	Absorción de agua.....	48
3.3.4.	Conductividad Térmica.....	49
3.3.5.	Composición química.....	50
3.3.6.	Difracción de rayos X (DRX).....	56
3.3.7.	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	57
3.3.8.	Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).....	57
3.3.9.	Termogravimetría (TGA).....	59
3.4.	ETAPA 3: TRATAMIENTOS AL BIO-AGREGADO.....	60
3.4.1.	Tratamiento de Hornificación.....	60
3.4.2.	Tratamiento con Cal Viva.....	61
3.4.3.	Tratamiento mixto.....	62
3.5.	ETAPA 4: FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES.....	62
3.5.1.	Dosificación de la mezcla.....	62

3.5.2.	Fabricación y colocación de la mezcla.	63
3.5.3.	Llenado de especímenes.....	64
3.5.4.	Curado.....	65
3.6.	ETAPA 5: REALIZACIÓN DE ENSAYOS A ESPECÍMENES	66
3.6.1.	Medición de fluidez.	66
3.6.2.	Densidad.	67
3.6.3.	Resistencia a compresión.....	67
3.6.4.	Conductividad térmica.	68
3.6.5.	Difracción de rayos X (DRX).....	68
3.6.6.	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	68
3.6.7.	Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)	69
3.6.8.	Termogravimetría (TGA).....	69
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		70
4.1.	CÁSCARA DE CACAHUATE.....	70
4.1.1.	Tamaño de partícula.....	70
4.1.2.	Densidad	71
4.1.3.	Absorción de agua.....	72
4.1.4.	Conductividad térmica	72
4.1.5.	Composición química	74
4.1.6.	FRX sobre la cáscara de cacahuete.....	75
4.1.7.	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	76
4.1.8.	Difracción de rayos X sobre la cáscara	77
4.1.9.	Termogravimetría de la cáscara	77
4.2.	CEMENTO PORTLAND.....	78
4.2.1.	Tamaño de partícula.....	78

4.2.2.	Densidad	79
4.2.3.	Fluorescencia de rayos x (FRX)	79
4.2.4.	Difracción de rayos X (DRX).....	80
4.2.5.	FTIR sobre el polvo de cemento.....	81
4.2.6.	TGA sobre el polvo de cemento	82
4.3.	CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.....	83
4.3.1.	Tamaño de partícula.....	83
4.3.2.	Densidad	83
4.3.3.	Fluorescencia de rayos X sobre la ceniza	84
4.3.4.	Difracción de rayos X sobre la CBCA	84
4.3.5.	FTIR sobre el polvo de CBCA.....	85
4.3.6.	TGA sobre la CBCA.....	86
4.4.	CONCRETO VEGETAL	87
4.4.1.	Fluidez	87
4.4.2.	Densidad	89
4.4.3.	Resistencia a la compresión	90
4.4.4.	Conductividad térmica	94
4.4.5.	Análisis de FRX sobre las muestras	95
4.4.6.	FTIR sobre las muestras de concreto.....	97
4.4.7.	DRX sobre las muestras de concreto	99
4.4.8.	TGA sobre las muestras de concreto	103
Capítulo 5:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
5.1.	CONCLUSIONES.....	106
5.2.	RECOMENDACIONES	106
Capítulo 6:	BIBLIOGRAFÍA	108

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de vida de los materiales.....	10
Figura 2. Emisiones de CO ₂ durante el proceso de fabricación del cemento.....	12
Figura 3. Clasificación de los Bio-Agregados y algunos ejemplos.	18
Figura 4. Morfología de la planta de cacahuete.	29
Figura 5. Producción mundial de cacahuete en 2019.	30
Figura 6. Cosecha de cacahuete.....	31
Figura 7. Estados de la República Mexicana productores de Cacahuete.	31
Figura 8. Almacén de Cáscara de Cacahuete.....	32
Figura 9. Vista esquemática de las reacciones en la formación del Clinker.....	33
Figura 10. Producción de Azúcar en México.....	36
Figura 11. a) Floculación de la partícula del cemento, b) Defloculación del cemento	38
Figura 12. Diagrama de desarrollo de investigación	41
Figura 13. a) Molino marca Azteca, b) Criba de 1".....	42
Figura 14. a) Tamices utilizados, b) Proceso de cuarteo	44
Figura 15. Molde usado para el cálculo de la densidad aparente.	46
Figura 16. Multipícnometro para el cálculo de densidades.....	47
Figura 17. Diferentes estados de saturación del agregado.	48
Figura 18. a) Centrifuga con bolsa permeable, b) Inmersión de BA a diferentes tiempos.	49
Figura 19. Proceso de medición de la cáscara de cacahuete.	50
Figura 20. a) Muestras en la mufla, b) Muestras después del proceso de calcinación	51
Figura 21. a) Muestras y cartuchos preparados, b) Equipo armado para la extracción, c) Disolvente acumulado	52
Figura 22. a) Muestra con ácido sulfúrico, b) Equipo montado a reflujo, c) Filtros secados	53
Figura 23. a) Muestras en baño termostatzado, b) Muestras en ácido glacial y clorito sódico, c) Filtrado de las muestras, d) Muestras secas.....	54
Figura 24. a) Muestras con NaOH, b) Proceso de filtrado a vacío, c) Muestras secas	56

Figura 25. Tipos de vibraciones en IR.....	58
Figura 26. Transmitancia (%) vs Número de onda cm^{-1}	59
Figura 27. Colocación de la cáscara en charolas.....	61
Figura 28. Presentación de especímenes a elaborar.....	64
Figura 29. Forma de apisonar el llenado de los cubos.....	65
Figura 30. Ensayo de los cubos.....	67
Figura 31. Medición de conductividad térmica.....	68
Figura 32. Granulometría de la cáscara de cacahuete.....	71
Figura 33. Absorción de agua en diferentes tiempos de sumergido.....	72
Figura 34. Conductividad térmica contra densidad aparente de la cáscara.....	73
Figura 35. Resultados de análisis FTIR sobre la cáscara.....	76
Figura 36. Difractograma de la cáscara de cacahuete.....	77
Figura 37. TGA comparativo entre las muestras tratadas.....	78
Figura 38. Tamaño de partícula del cemento (CPO40R).....	79
Figura 39. DRX al polvo de cemento (CPO40R).....	80
Figura 40. FTIR sobre el polvo de cemento.....	81
Figura 41. Resultados de TGA sobre el polvo de cemento.....	82
Figura 42. Grafica granulométrica al polvo de CBCA.....	83
Figura 43. Resultados de DRX sobre el polvo de ceniza.....	85
Figura 44. Resultado de FTIR de la CBCA.....	86
Figura 45. Resultados de TGA de la CBCA.....	87
Figura 46. Fluidez de las muestras elaboradas.....	88
Figura 47. Densidad de las muestras en estado endurecido.....	89
Figura 48. Resistencia a compresión a 28 días.....	91
Figura 49. Resistencia a compresión a 56 días.....	92
Figura 50. Resistencia a la compresión a 91 días.....	93
Figura 51. Análisis de conductividad térmica en las muestras.....	94
Figura 52. Resultados de FTIR sobre las muestras con 0% de CBCA.....	98
Figura 53. Resultados de FTIR sobre las muestras con 20% de CBCA.....	98
Figura 54. Resultados de FTIR sobre las muestras con 40% de CBCA.....	99
Figura 55. Fases encontradas por DRX en la muestra M/R.....	100

Figura 56. Análisis de DRX de acuerdo a las edades de ensayo en la muestra M/H.	101
Figura 57. Resultados DRX sobre las muestras con 0% de CBCA.....	101
Figura 58. Resultados DRX sobre las muestras con 20% de CBCA.....	102
Figura 59. Resultados DRX sobre las muestras con 40% de CBCA.....	103
Figura 60. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 0% de CBCA. ..	104
Figura 61. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 20% de CBCA.	104
Figura 62. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 40% de CBCA.	105

Índice de tablas

Tabla 1. Contenido de compuestos químicos en Bio-Agregados.....	19
Tabla 2. Propiedades Físicas de los Bio-Agregados.....	22
Tabla 3. Propiedades mecánicas de algunos Bio-Agregados investigados.	23
Tabla 4. Propiedades importantes de los Concreto Vegetales.....	27
Tabla 5. Principales fases mineralógicas del Clinker.	34
Tabla 6. Requisitos de composición estándar para cemento.	35
Tabla 7. Composición de la cal antes de calcinación.....	38
Tabla 8. Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a la compresión ..	39
Tabla 9. Dosificación para cada muestra por m ³ de mezcla.....	63
Tabla 10. Pasos y tiempo de mezclado.....	64
Tabla 11. Porcentajes retenido, acumulado y que pasa de cáscara.	70
Tabla 12. Densidad aparente de la cáscara con diversos tratamientos.	71
Tabla 13. Conductividad térmica de la cáscara con los tratamientos.....	73
Tabla 14. Comparativa de los resultados obtenido de composición química.....	74
Tabla 15. Resultados obtenidos por FRX.....	75
Tabla 16. Resultados de densidad al polvo de cemento.	79
Tabla 17. Resultados de FRX al polvo de cemento.	79
Tabla 18. Densidad promedio de la CBCA.....	83
Tabla 19. Resultados de FRX al polvo de CBCA.	84
Tabla 20. Densidad neta de piezas en estado seco.....	90
Tabla 21. Resistencia a compresión de algunos concretos ligeros.....	94
Tabla 22. Conductividad térmica de algunos concretos.....	95
Tabla 23. Porcentaje de compuestos encontrados en las muestras mediante FRX.	96

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XXI, empezó a nacer la preocupación por el medio ambiente en todo el mundo, esto se debió a que las acciones del hombre habían ocasionado un daño severo debido a la contaminación, incluso por la misma degradación del ambiente. De todo esto la industria de la construcción ha encabezado la producción de contaminantes, aunado a esto la industria agrícola genera contaminantes mediante la quema de cultivos y residuos orgánicos provenientes del proceso de cosecha. Para solucionar lo mencionado, se han utilizado varios componentes de los residuos orgánicos, para generar otros tipos de materiales con valor agregado aprovechando las nuevas tecnologías descubiertas.

El propósito de la investigación es aprovechar los residuos orgánicos para generar un concreto vegetal a base de cemento portland utilizando bio-agregado proveniente del cacahuate, para después analizar cómo funciona la sustitución de ciertos porcentajes de cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar. Para el desarrollo de esta investigación se empleó bio-agregado a base de cáscara de cacahuate proveniente de las empresas botaneras el cual es un residuo de la cadena de producción. Para desarrollar el diseño de la matriz, se realizaron a la cáscara pruebas fisicoquímicas para su caracterización tanto antes y después del tratamiento para disminuir la capacidad hidrofílica. Con los datos obtenidos se definieron los parámetros de relación agua/cemento y bio-agregado/cemento para así terminar calculando las proporciones y métodos a utilizar en la fabricación del concreto vegetal. Una vez fabricado y curado se procedió a determinar las propiedades microestructurales y físicas del concreto y ver la influencia en las propiedades mecánicas y térmicas.

Con la investigación, se encontró un material que puede llegar a ser competente en la construcción debido a los valores bajos de conductividad térmica y a su resistencia mecánica, que permitirán un ahorro energético, sin olvidar que el impacto ambiental se ve disminuido con el uso de los residuos orgánicos dentro de materiales de construcción convencionales como lo son el concreto y derivados.

1.2. GENERALIDADES

1.2.1. Construcción sustentable

La construcción sustentable es un esfuerzo por continuar realizando proyectos y edificaciones que sean amigables con el entorno y disminuyan el impacto ambiental, la priorización ha resultado en sabotaje por corporaciones que lo único que ven es el beneficio económico. Para poder hablar de sustentabilidad es necesario tomar en cuenta el ciclo de vida de los materiales y esto se puede observar en la figura 1, cada paso influye en el medio ambiente, así como en el bienestar de las personas.



Figura 1. Ciclo de vida de los materiales

Para que un material sea sustentable debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Consumir menos energía
- Reducir el uso de recursos naturales
- No tener impacto ambiental
- No fomentar las emisiones dañinas
- Residuos y reciclaje

- Sustituir productos convencionales
- Crear valor
- Ser incluyente
- Por regiones

Estos mismos parámetros podemos tenerlos en cuenta cuando se habla de construcción sustentable ya que los objetivos son los mismos. En el caso de materiales de construcción, el concreto es uno de los principales materiales cuando hablamos de construcción, esto se debe a que básicamente las edificaciones actuales están hechas de este material debido a su buena resistencia mecánica y rapidez con la que se fabrica, sin embargo, esto ha llevado a que la demanda incremente. El concreto tuvo una producción anual de 33 billones de toneladas en promedio, lo cual lleva a que la explotación de los minerales genere contaminantes, incluso se dañen otros recursos naturales[1]. La topografía, hidrografía e incluso el paisaje se ven dañados en los lugares donde se establecen las canteras que permiten la explotación de los minerales a utilizar en la fabricación del concreto.

Tanto es su momento de fabricación como en la extracción de los agregados provocan que se generen emisiones de CO₂. La demanda de los agregados provoca hoy en día que existan graves carencias de recursos naturales, esto ha llevado que se busquen progresivamente medidas sustentables[2]. Algunas de estas medidas han permitido crear infraestructuras teniendo como principales parámetros que sean amigables con el ambiente, resistentes al clima, rentables y sobre todo duraderas.

La importancia del tema recae en reducir en su mayoría las emisiones de dióxido de carbono mientras se aprovechan otros residuos y se crean también nuevos sistemas que generen menos emisiones, la industria del concreto es la encargada de generar del 5-10% a nivel global y se estima que para el año 2050 sea un tercio del total[3]. En la figura 2[4] se aprecia de donde provienen las emisiones de CO₂ durante el proceso de fabricación. Con lo anterior, se han propuesto algunas soluciones para hacer sustentable la construcción, como lo son: el uso de materiales reciclables, uso de madera sostenible y máquinas con bajas emisiones.

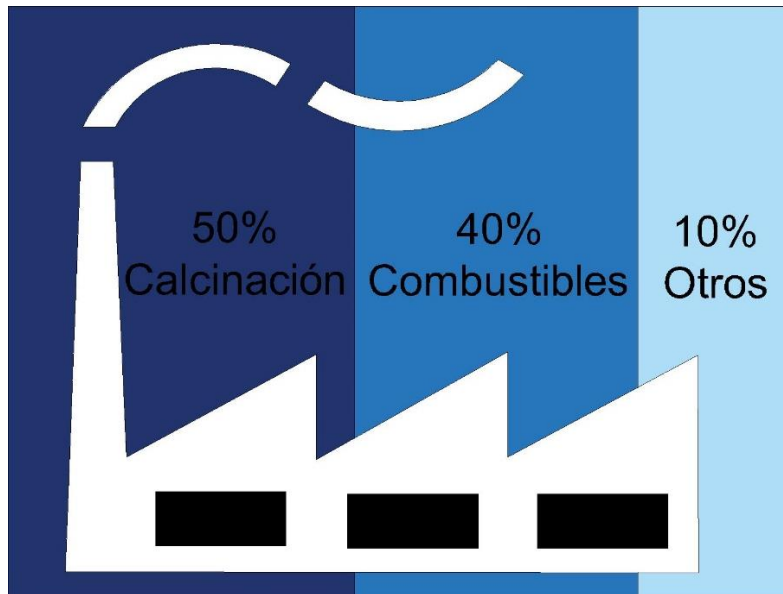


Figura 2. Emisiones de CO₂ durante el proceso de fabricación del cemento.

1.2.2. Generación de residuos orgánicos

Para entender la parte de generación de residuos orgánicos es importante definir a que se le denomina así, y por ello, los residuos orgánicos son todos los elementos que son desechos o residuos de origen animal y/o vegetal. La principal característica de los residuos orgánicos es que tienen la capacidad de degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. Alrededor del mundo se generan miles de millón de residuos, de los cuales un bajo porcentaje tienen otro destino que no sea la degradación, en México se generan anualmente cerca de 76 millones de toneladas de residuos orgánicos que se producen durante el ciclo de la cosecha de los diferentes cultivos que son sembrados, este proceso abarca los centros de acopio del cultivo y la industrialización, esto último recibe el nombre de Agroindustria. En la Agroindustria se generan un gran número de residuos con calidad no comercial que pueden ser aprovechados para la generación de alternativas renovables como los bioenergéticos. En la Agroindustria se generan como residuos primarios, hojas, tallos, vainas, puntas, pajas y cáscaras; y como secundarios están los bagazos, mazorcas, agaves y pulpas[5].

Los residuos se generan en forma de sólidos, líquidos o gaseosos provenientes de los procesos de transformación, este proceso genera también emisiones dióxido de

carbono causando problemas de contaminación e inclusive llegan a promover la transmisión de enfermedades[6]. Con los puntos anteriores mencionados, debe ser de vital importancia el manejo a nivel global, ya que puede impactar social, económica y ambientalmente.

Algunos de los destinos comunes de los residuos son, la quema, descargas en zonas no autorizadas, almacenamiento en silos y, por lo tanto, no es la mejor manera de disponer de ellos[7]. Aunque ya existen aplicaciones como lo son, la inserción de nuevo al suelo de modo que aportan energía y renueven los nutrientes, no todos son aptos para este fin, ya que pueden llegar a tardar demasiado en degradarse o causar daño debido a sus componentes químicos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado han nacido alternativas gracias a la aplicación de las nuevas tecnologías, donde los residuos orgánicos forman nuevos compuestos o materiales. Algunas de estas nuevas alternativas son, la creación de biomasas, fertilizantes, combustibles, bio-plásticos y materiales de construcción.

1.2.3. Demanda de residuos orgánicos en la construcción

Cuando iniciamos una obra, lo primordial es ver la disponibilidad de materiales, estos varían de acuerdo a la zona, por lo regular los materiales que se requieren son: arcillas, arenas, gravas, piedra triturada, etc. Generalmente, todas estas materias primas son minerales, su obtención afecta al paisaje, si nos paramos a observar cuando se va saliendo de una ciudad puedes encontrar cortes en las laderas o grandes cicatrices que no corresponden a la zona. En todas estas zonas donde los materiales eran adecuados, se han excavado extensas áreas, permitiendo que se extrajeran grandes volúmenes de formaciones rocosas[8].

Estos lugares de extracción reciben el nombre de canteras, las cuales tienen un permiso que les permite explotar el material, sin embargo, la regulación es ineficaz, sobre todo en países tercermundistas, permitiendo un daño a la topografía y a la dinámica hidrológica del lugar. Uno de los problemas es que los recursos explotados tardan millones de años en renovarse, aquí inicia la importancia de cuidarlos.

Con base a todo lo antes mencionado, los residuos orgánicos se están convirtiendo en una alternativa realmente llamativa para su aplicación en la construcción por su bajo costo, peso ligero y por ser una materia prima renovable.

La evolución de las viviendas ha sido constante, se buscaba que fueran mejores y ofrecieran beneficios en la construcción. Desde épocas prehispánicas se utilizaban materias orgánicas para la construcción de viviendas, utilizando pajas o creando adobes, esta era una tecnología avanzada para su época que sustituía a las viviendas hechas con palma o con caña, porque permitía una mejor resistencia contra el viento, era más durable y sobre todo permitía tener una temperatura estable dentro. La característica importante que permite que los residuos y materiales orgánicos resurjan, es que presentan propiedades mecánicas que, en algunas aplicaciones, son comparables con materiales de refuerzo sintéticos.

Bajo esa primicia, se introdujeron los bio-agregados en el diseño de materiales de construcción, que permiten resolver el impacto ambiental causado por la extracción de materiales y que permiten desarrollar compuestos con las mismas prestaciones que están establecidas. El uso de bagazo de caña, lino y otras plantas para sustituir los agregados minerales han sido de momento las soluciones más populares en la revolución de los bio-agregados[9, 10]. Los bio-agregados mejoran la resistencia, ductilidad y comportamiento post-fractura, estos como agregados, son generalmente maleables, alargados, con alta porosidad y baja densidad aparente.

El uso de los bio-agregados se ha vuelto tendencia en países como Francia y Brasil debido a que se generan grandes porcentajes de residuos de un solo cultivo o varios, por ende, la investigación es mucho más activa[10], han logrado crear concretos con propiedades mecánicas y térmicas equitativas a concretos convencionales, han dominado estas propiedades, permitiendo que el enfoque en la actualidad sea dirigido hacia a la durabilidad y la constante búsqueda de residuos que no hayan sido utilizados y se puedan aprovechar.

La elección de los residuos depende de la compatibilidad que tengan con el aglutinante mineral a utilizar, hay diversos parámetros que se pueden tomar en cuenta, estas decisiones van de la mano en cuanto a la factibilidad de obtención del residuo; la

ubicación es un factor importante, ya que se puede llegar a generar gastos extras por acarreo; factores ambientales, las emisión de dióxido de carbono que se genere; y cuestiones financieras, en la mayoría de los casos los bio-agregados no tienen un valor monetario, pero como bien sabemos si la demanda de algo aumenta esta hará que suba su valor.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Cuando hablamos de materiales de construcción sustentable el beneficio que se busca es con el medio ambiente, pero al final del día a quien, y como buscamos beneficiar, son aspectos importantes a considerar en el desarrollo de las investigaciones. El problema principal es la forma en que se deshacen de los residuos, ya que, no hay una cultura de reciclaje propia, las actuales pueden ser peligrosas y dañan el medio ambiente. Además, la constante demanda de agregados minerales que son extraídos de canteras termina dañando la topografía e hidrología de laderas, esto se debe en medida a la falta de supervisión e ineficientes leyes regulatorias.

Por eso con el uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la cáscara de cacahuate, se busca beneficiar a sectores poblacionales de bajos recursos ofreciendo un material con buenas prestaciones de construcción que ayuden en el confort y economía al tener buenas prestaciones térmicas, esto equivale a un ahorro energético en cuanto a refrigeración se trata. Generalmente el sustituir cemento y agregados permite reducir la explotación en canteras y uso de cemento, que disminuyen las emisiones de CO₂ que se generan en estas actividades.

El proyecto también impulsaría a que los recursos orgánicos obtengan un valor, impulsando a la economía gracias a la divulgación que trae la originalidad del uso de concretos vegetales sobre todo con recursos que no han sido explorados, la cáscara de cacahuate innova con su uso y permite reciclarlo, cabe mencionar que los beneficios mencionados aplican en las regiones donde estos subproductos agrícolas son generados.

1.4. HIPÓTESIS

La incorporación de un bio-agregado procedente de la cáscara de cacahuete como sustituto en una matriz cementante modificara las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de un concreto binario base cemento portland-ceniza de bagazo de caña de azúcar creando un material sustentable que pueda ser aplicado en la industria de la construcción.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. General

Evaluar la influencia del bio-agregado base cáscara de cacahuete pretratada en una matriz mineral conformada por cemento portland-ceniza de bagazo de caña de azúcar que posea propiedades mecánicas, físicas y térmicas que sean competitivas con otros materiales de construcción.

1.5.2. Específicos

- Investigar los niveles de producción de la cáscara de cacahuete en México para determinar donde es más factible su obtención económicamente.
- Caracterizar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de la cáscara de cacahuete para analizar y evaluar los tratamientos que se pueden aplicar para mejorar la compatibilidad con la matriz cementante.
- Diseñar las proporciones de la mezcla del concreto vegetal, que permita fabricarlo con el objetivo de que tenga un comportamiento mecánico, físico y térmico adecuado.
- Evaluar las propiedades mecánicas, físicas y térmicas del concreto vegetal resultante para realizar una comparativa con matrices cementantes convencionales que tienen un comportamiento térmico óptimo.

1.6. ANTECEDENTES

Como se mencionó en el apartado 1.4. los concretos con bio-agregados ya han sido desarrollados en varios países. Para tener una mejor comprensión es necesario definir el termino concretos vegetales, es importante primero, empezar con la definición de

concreto hidráulico, según la normativa mexicana[11], un concreto hidráulico es una combinación de cemento portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos.

Entonces similar a esto, la definición de concreto vegetal consiste en “Una mezcla entre granulados de origen vegetal provenientes directa o indirectamente de la agricultura con una densidad de volumen y un aglutinante mineral”[10]. El desarrollo de estos concretos se ha enfocado, gracias a las nuevas tecnologías, en el conocimiento a nivel microestructural, donde se busca optimizar las propiedades mecánicas, higrotérmicas, densidad y durabilidad tanto del bio-agregado como del concreto que se obtiene.

La tecnología ha permitido que los concretos vegetales se vayan desarrollando con el paso de los años, las principales propiedades que se han investigado son: mecánicas, higrotérmicas, densidad y durabilidad a partir de la investigación microestructural. Para entender estos concretos, es igual de importante primero comprender las propiedades de los agregados de origen vegetal, que son sobre todo lignocelulósicos o celulósicos.

1.6.1. Bio-Agregados

Se le conoce como bio-agregado (BA), a todo aquel que proviene de los residuos orgánicos que dejan la cosecha de las plantas y cultivos en cualquiera de sus formas y que, por lo tanto, se utilizaran en un matriz mineral para la creación de un nuevo material [5]. Este tipo de agregados son en su mayoría maleables, alargados, porosos y con baja densidad aparente, algo prácticamente muy diferente con los agregados minerales típicamente utilizados en la elaboración de concretos.

Clasificarlos es muy importante para entender las propiedades que pueden mostrar, esta clasificación se hace de acuerdo a la parte del cultivo que se utiliza, todos vienen de la parte vegetal que quedan como residuos al momento de cosecharlos. Como se puede observar en la figura 3, hay diferentes formas que adquieren los BA, se pueden obtener diferentes tamaños, texturas y composiciones y esto claramente tendrá un impacto al incorporarlo en la matriz mineral.

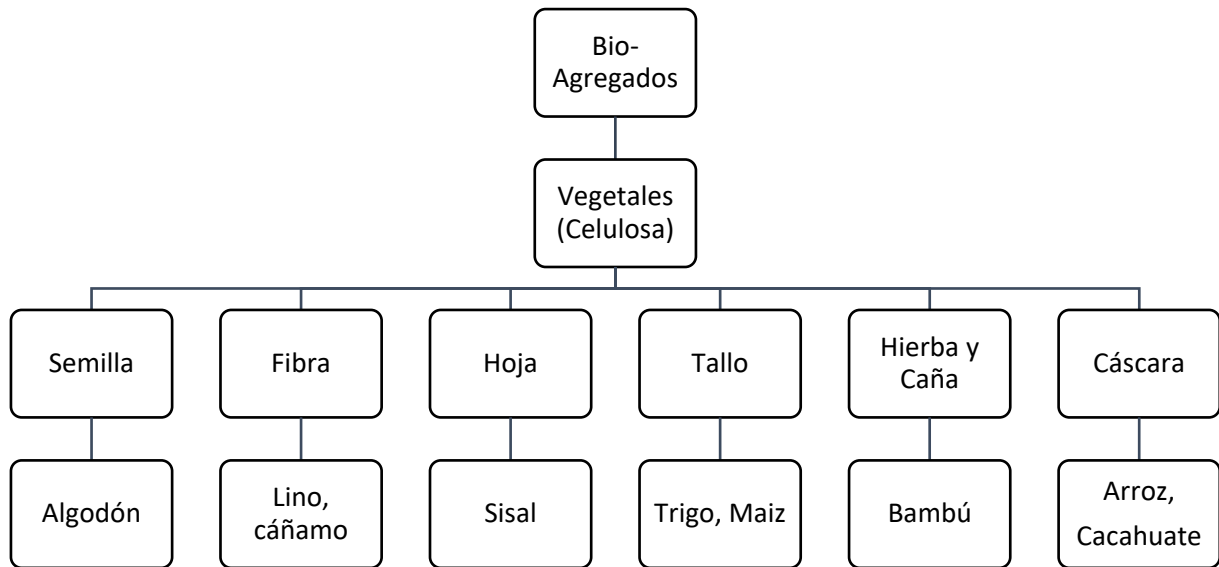


Figura 3. Clasificación de los Bio-Agregados y algunos ejemplos.

De la clasificación presentada en la figura 3, las fibras son las que han sido más utilizadas. Una de los residuos importantes que omite esta clasificación son las cenizas, debido a que se necesita de un proceso extra para que alcance ese estado, sin embargo, sigue manteniendo muchos de las similitudes con los que se obtienen de manera natural.

La composición de los BA al igual que los agregados minerales influye en las propiedades del concreto, los valores de los compuestos dependen de factores principalmente atribuidos a la composición del suelo en el que son plantados, químicos utilizados y el clima. Estos factores afectaran en la dureza, resistencia mecánica y durabilidad, a su vez cuando son mezcladas con el aglutinante mineral llegan afectar los mecanismos de hidratación que al mismo tiempo pueden impactar a las propiedades mecánicas, por eso diversos investigadores han puesto notoriedad en obtener las cantidades de compuestos que contienen los BA, así se obtiene un primer acercamiento de cómo se comportará el concreto que se busque desarrollar.

Los componentes químicos presentes en los BA, son en mayor presencia: celulosas, hemicelulosas y ligninas; y en su minoría: cenizas, pectinas, proteínas, ceras y otros extractos.

La importancia de saber el porcentaje de estos componentes, es como ya se dijo, para saber el impacto dentro de una matriz mineral; la celulosa es un componente que determina su capacidad estructural ya que se presenta en forma de microfibrillas cristalinas alineadas a lo largo de la longitud de la fibra, también es muy resistente a la hidrólisis y a agentes oxidantes, sin embargo puede degradarse rápido cuando es expuesta a ácidos; la hemicelulosa se disuelve fácilmente con ataques alcalinos y afecta la durabilidad del agregado; y la lignina es un polímero que resulta de la unión de alcoholes fenilpropílicos que brindan rigidez a la pared celular haciéndola resistente al impacto, flexión y ataques químicos, además, se encarga del transporte del agua [9, 12]. En la tabla 1, se observa el porcentaje de estos compuestos en diversos BA que se han investigado al momento.

Tabla 1. Contenido de compuestos químicos en Bio-Agregados.

Bio- Agregados	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Otros químicos (%)
Bagazo de cáñamo	34.0-62.5	9.0-37.0	4.0-28.0	5.5-28.0
Lino	44.6	24.41	21.0-22.0	7.6-22.8
Fibra de coco	34.9-52.1	0.3-33.7	29.8-45.8	10.2-26.8
Paja de cebada	37.7	26.7-34.9	5.5-5.8	-
Paja de Trigo	37.6-43.0	29.7-34.9	5.2-15.8	11.7-21.2
Corteza de girasol	38.6-47.4	9.4-30.0	3.5-18.6	8.9-26.4
Mazorca de maíz	32.3-48.1	37.2-40.7	3.3-14.7	7.0-19.8
Cáscara de arroz	25.0-35.0	18.0-21.0	26.0-31.0	17.0-30.0
Tallo de Bambo	52.8	29.0	24.1	5.4

Notas: Tomada de Laborel-Préneron et al. [9]

En los BA, se puede dar una variedad en cuanto a valores de propiedades físicas, higrotérmicas y mecánicas, y todas deben ser consideradas o al menos la mayoría para el diseño de una mezcla con aglutinantes minerales.

Para esto existen ya varios métodos de caracterización para el cálculo en este tipo de materiales, el más destacado es el que propone el RILEM, el protocolo TC-236-BBM[13], esta propuesto para el bagazo de caña de azúcar, sin embargo, dentro del

mismo se indica que se puede adaptar para otro tipo de BA. Con esto en mente, se definen las propiedades más comunes.

Propiedades Físicas:

Se relacionan con la afectación que pueden ocasionar en la mezcla, estabilizando el entorno, ayudando a la capacidad de absorción de agua o proporcionando un entorno destacable en su estado de servicio o llegando a afectar en la calidad final del material.

- **Microestructura:** La microestructura determina la porosidad y tamaño de poros que tiene un BA, y no es referencia a la cantidad de agua que es capaz de almacenar cuando se le agrega agua, también es un indicador sobre la densidad, es evidente que entre más poroso sea, más liviano será el BA. Aunque el RILEM propone varios métodos para el análisis de la microestructura de los bio-agregados, lo más común es utilizar métodos de imagen como lo sería el desarrollo de la microscopía electrónica de barrido (SEM) o una tomografía con rayos X, con algunas de las dos se puede saber qué tipo de microestructura tenemos y así realizar las primeras aproximaciones hacia el comportamiento. Además, si se tienen en cuenta los métodos de imagen, la porosimetría por intrusión de mercurio puede ser utilizada para averiguar los tamaños de poros de las partículas.
- **Tamaño y forma de partícula:** Esto ayuda a la cohesión dentro de la matriz, los BA con tamaños de forma más irregular se acomodan mejor, dejando menos espacios, de ahí la importancia de que haya diferentes tamaños. Existen dos métodos recomendados para el cálculo de esta propiedad, el primero es el más conocido y consta de realizar un tamizado ya sea mecánico o manual para saber la distribución de tamaños; y el segundo ha ganado más popularidad, se trata de un análisis de imagen, donde por medio de imágenes se analizan las partículas determinando si son más alargadas o redondas. La forma de tamaño afecta también a la distribución de partículas y esto termina impactando en la densidad.
- **Densidad:** En los BA se distinguen tres densidades, las cuales son: densidad aparente, real y densidad de esqueleto. Cuando vemos el desarrollo de matrices

minerales es necesario saber la densidad aparente para poder realizar la dosificación, esto se debe a que el acomodo del material también ocupa espacio y medir la densidad real implica un procedimiento extra, al igual que medir la densidad de esqueleto.

- Absorción de agua: La capacidad de absorción de agua del BA, es definida como, la cantidad de agua que puede ser absorbida por unidad de tiempo. Es un parámetro esencial cuando se mezcla con aglutinantes minerales, por que ocasiona que se genere una competencia por el agua ya que el aglutinante mineral también requiere de esta para iniciar el proceso de hidratación.

El RILEM[13], calcula el agua inicial (IRA, por sus siglas en ingles) y cómo se comporta en función del tiempo (K_1). Se ha comprobado que la cantidad de agua que absorben los BA influyen en las propiedades higrotérmicas.

En la tabla 2 se muestra un resumen, donde diversos autores han obtenido resultado en propiedades físicas para diversos BA buscando evaluar el uso de las mismas como material de construcción. Como se puede observar la mayoría de estos tienen un alto porcentaje de porosidad lo cual explica en parte la baja densidad aparente que tienen.

En cuanto a lo que se refiere a tamaño de partícula en realidad son valores con los cuales se pueden tener holgura, ya que es un proceso en el cual se muele o se corta, entonces si así se desea se pueden obtener tamaños más grandes o más chicos, claro, que esto implicara un gasto energético extra. Por último, la absorción de agua demuestra que los BA son capaces de absorber de 2 a 3 veces su peso en agua, lo cual en algunos casos puede ser perjudicial, ya que, al ser materiales orgánicos, esta agua tarde o temprano será liberada.

Tabla 2. Propiedades Físicas de los Bio-Agregados.

Bio-Agregados	Microestructura		Tamaño de partícula		Densidad			Absorción de agua	
	D.P. (μm)	P.P. (%)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	D.A. (kg/m^3)	D.R. (kg/m^3)	D.E. (kg/cm^3)	IRA (%)	K_1 ($\% \text{Log}(\text{min})^{-1}$)
Bagazo de cáñamo	5-60	72-83	0.7-30.0	0.25-5.0	70-163	250-320	1259-1500	122-218	19.5-50.0
Lino	15-33	71	5.5-20.0	0.5-4.1	90-141	374	1270-1342	-	-
Paja de cebada	2-100	-	7.6-35.0	2.0-2.5	47-107	-	870	247	19.4
Paja de Trigo	6-30	-	9.0-12.0	1.1-1.2	25-54	-	865-1478	-	-
Corteza de maíz	10-80	51-64	9.0-14.0	1.8-8.3	18	-	-	105-106	18.5-19.8
Médula de girasol	>100	-	9.0	6.0	14-20	35	-	-	-
Corteza de girasol	10-80	58-80	5.7-9.0	1.8-8.3	98-168	296	1540	141-148	17.8-18.5
Mazorca de maíz	20-80	-	3.6-5.0	2.6-3.7	112-497	-	1333	48	9.8
Cáscara de arroz	1-30	34-50	6.7	2.7	98-122	453	690-780	-	-
Paja de lavanda	7-60	-	-	-	-	-	-	-	-
Tallo de Bambú	-	-	6.8-8.8	0.5-1.0	298	500-780	-	-	-

Notas: D.P.= Diámetro de poro, P.P.= Porosidad de partícula, D.A.= Densidad aparente, D.R.= Densidad real, y D.E.= Densidad de esqueleto. Adaptada de Laborel-Préneron et al. [9]

Propiedades Térmicas:

Aunque estrictamente hablando es una propiedad física, Laborel-Préneron et al.[9] la considera como un parámetro aparte debido a su importancia en los Bio-Agregados.

- Conductividad térmica: Es un parámetro común usado para caracterizar el poder de conducción de materiales de construcción, de hecho, se ha usado para medir la cantidad de conductividad en volumen para rellenos en edificios. Los dos métodos más utilizados en varias literaturas son, el “Hot Wire” y “Hot Plate”, donde por medios de aparatos con sensores adaptados se mide el incremento

de temperatura y se hace una correlación con el tiempo. La conductividad térmica disminuye con la densidad de volumen porque significa que hay más espacios (porosidad) por donde se disipa el calor transmitido. Por lo tanto, valores altos en la densidad incrementaría la conductividad.

Propiedades mecánicas:

Los Bio-Agregados necesitan tener una muy buena resistencia mecánica dentro de la posibilidad de ser considerado como posible agregado en matrices minerales. Por ende, en los últimos años varios autores se han interesado en este tema realizando un gran número de investigaciones para clasificar los BA[14]. En la tabla 3 se presentan el módulo de elasticidad y resistencia última a tensión evaluadas.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de algunos Bio-Agregados investigados.

Bio-agregado	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia última a tensión (MPa)
Yute	26-32	250-350
Lino	100	1000
Bambú	33-40	350-500
Caña de azúcar	15-19	170-290
Sisal	13-26	280-568
Henequén	-	91-307
Pasto de elefante	5	178
Coco	19-26	120-200

Nota: Adaptada de Juárez [14]

1.6.2. Tratamiento para los Bio-Agregados

Aunque lo ideal al momento de usar BA es obtener buenos resultados por si solos, la presencia de compuestos químicos afecta el rendimiento, estos pueden afectar la durabilidad de la fibra por si sola, por ello, se utilizan tratamientos para proteger la fibra o deshacerse de los compuestos que impiden que el BA aporte su total rendimiento. Se han utilizado diversos tratamientos, ya sea en forma de recubrimientos o por medio de incorporación de químicos, la importancia recae en proteger al BA del medio alcalino que se forma dentro de una matriz mineral. En otros casos los tratamientos se

enfocan en hacer que el BA sea hidrofóbico y así no alterar el ciclo de hidratación del concreto.

Pretratamiento superficial: Los BA tiene la facilidad de absorber agua, este tipo de tratamientos busca repeler el agua, según Juárez[14], se utilizan recubrimientos de tal forma que no perjudiquen al concreto y que no sean tóxicos durante su manejo, además deben ser económicos y de fácil disposición. Algunas de las opciones usadas son: aceite de linaza, parafina, brea, sellador para madera y creosota.

Pretratamiento químico: Por medio de sustancias químicas se busca repeler parte del agua y mejorar la interface de conexión con la matriz cementante[15]. El pretratamiento más usado es a base de silicato de sodio, el cual permite reducir hasta un 75% la absorción del agua del bio-agregado, pero también impacta en la densidad y resistencia mecánica del concreto. Otro pretratamiento muy común es a base de óxido de calcio usado en incorporaciones del 12% respecto al volumen del Bio-Agregado. También se han utilizado sulfato de aluminio e hidróxido de sodio, incluso se ha utilizado una combinación de estos para presentar mejores resultados que si solo se usará uno.[15–17]

Pretratamiento de lavado: De acuerdo a Jácome et al. [18], resulta muy pertinente incurrir en lavar el BA ya que estos aún conservan sacarosas, lo que hace que se mantenga la humedad en estos desechos y dificulte la experimentación. Este lavado se puede realizar con el flujo continuo o dejándolo remojar ya sea solamente en agua o en una solución con detergente para liberar todo compuesto que haga que se presente moho en el concreto.

1.6.3. Materiales cementantes suplementarios

El cemento portland ordinario (CPO) es de los más utilizados a nivel mundial como material de construcción debido a su enorme campo de aplicación, esto se debe a que cualquier construcción lleva concreto, la rapidez con la que el material permite trabajar y la disponibilidad son factores a tomar en cuenta, a pesar de todas la ventajas que puede ofrecer, las emisiones de CO₂ que la fabricación de cemento produce son del 4-7%[19], podría parecer insignificante si solo nos fijamos en el número, pero en el mundo se produjeron 4100 millones de toneladas en CO₂ en 2022, esto hace que los

daños a la Tierra se incrementen y que el porcentaje mostrado tome más relevancia. De esta problemática es que viene la alternativa de usar sustitutos al cemento, de manera que sea sostenible su uso, donde lo que se busca hacer es conseguir las mismas ventajas que ofrece sin encarecerlo[20], con esto en mente se han encontrado soluciones adecuadas, las cuales se determinan de acuerdo a la actividad puzolánica que tengan, la Sociedad Americana de Ensayes y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define los MCS como materiales que poseen poco valor cementante, con una distribución de partículas finamente dividida y que en presencia de humedad puedan reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio para formar productos de hidratación. Las soluciones más populares son por lo general residuos de otra industria, ricos en Silicio y Aluminio que al sustituir cierta cantidad de cemento formen concretos compuestos o lo que se conoce como concreto binarios.

Diversos investigadores han utilizado ya varios MCS, entre ellos la escoria de alto horno, humo de sílice y ceniza volante, se siguen buscando más opciones para que no exista la dependencia hacia uno solo.

1.6.4. Efecto del Bio-Agregado y Materiales Cementantes en el concreto

Es bien sabido que los distintos materiales que usemos tienen diferentes efectos en el compuesto resultante, esto se debe a las diferentes propiedades que poseen. En el caso de los BA, se han obtenido resultados en los cuales las propiedades mecánicas, acústicas e higrotérmicas han mejorado, se debe que son materiales porosos y con baja densidad, esto depende de poder realizar una formulación óptima donde se aprovechen los parámetros que se buscan obtener[10]. Entre más BA se utilice, más se mejorarán las propiedades higrotérmicas, pero las propiedades mecánicas se verán afectadas, esto se debe a que el BA empieza a ocupar más espacio y absorbe más agua, dejando al cemento sin lo necesario para poder reaccionar.

Por otro lado, los MCS han permitido que los concretos fabricados tengan una mayor resistencia al ataque de cloruros y sulfatos, y ha resultado en ganancias altas de compresión sobre todo a edades mayores. Se recomienda que la cantidad de reemplazo de los MCS no sobrepase el 50%, esto es uno de los factores que afecta los beneficios que se obtienen, entre más sea la cantidad reemplazada se pueden

afectar los tiempos de fraguado, pudiendo empezar hasta los 5 días. Otros factores que intervienen son la relación agua/cemento que se utilice y el cuidado que se tenga al momento de curarlo, ya que, al haber menos cemento disponible, es menor la cantidad de hidróxido de calcio que se forma[21].

1.7. CONCRETOS VEGETALES

En el ámbito de los concretos vegetales se han investigado diversos BA en matrices minerales, como ya se mencionó en el apartado 1.6.1., los parámetros de elección son basados en la disposición y zona de proveniencia. En el desarrollo de los concretos vegetales lo que se busca obtener, en resumen, es una mejor capacidad térmica sin sacrificar las propiedades mecánicas. Con los avances tecnológicos en la actualidad, se profundiza en tener una mejor compatibilidad, se logra mantener las temperaturas durante las olas de calor, refrescando cualquier espacio y logrando consumir menos energía.

1.7.1. Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de los concretos vegetales está ligado a la naturaleza del cementante y del BA, esto hace que la relación entre esos dos tome más importancia y la densidad del concreto también toma relevancia. Los compuestos lignocelulósicos del BA pueden reaccionar con el cementante provocando en algunos casos una pérdida de dureza, retraso de tiempos de fraguados y disminución en resistencia a compresión, sin embargo, la alta flexibilidad del BA puede llegar a presentar una ausencia de fractura y marcada ductilidad con absorción de las deformaciones[10, 22]. La relación de BA que se utilice determina al final la densidad de la matriz mineral y esto se refleja con la resistencia a la compresión, en la tabla 4 se observa como en la mayoría de los BA que poseen una alta densidad se desarrolla más este parámetro debido, a que hay menos BA, lo ideal es encontrar un punto donde se siga desarrollando resistencia sin agregar demasiado BA.

Niyigena et al. [23] argumenta que la reducción de compresión se debe a que se incrementa el área superficial lo que hace que la interfaz entre el cementante y el BA sea débil. Otros factores como el grado de compactación y la forma de partícula influyen en el comportamiento que se obtenga.

1.7.2. Propiedades Higrotérmicas

El comportamiento higrotérmico del concreto vegetal, va de la mano de acuerdo al tamaño de partícula y porosidad que se contenga ya que esta permite el intercambio entre el vapor de agua y los ambientes dentro y fuera de la vivienda que provocan reducciones en la temperatura[9, 10], esto permite mantener un ambiente fresco, reduciendo los requerimientos de energía en la vivienda. El comportamiento térmico del concreto va de la mano con el del BA, pero no termina de definirlo en su totalidad, se ha encontrado que los resultados varían de acuerdo a la compresibilidad y comportamiento del BA con el agua una vez que se encuentran dentro del concreto vegetal[9].

Tabla 4. Propiedades importantes de los Concreto Vegetales

Material	RC (MPa)	Densidad (Kg/m³)	CT (W/mK)	Referencias
Tallo de maíz	1-5	900-1100	0.114-0.192	[24]
Cáñamo	0.4-1.6	400-700	0.080-0.160	[25, 26]
Lino	5-10	570-980	0.080-0.152	[27, 28]
Coco	2-8	750-1500	0.200-0.950	[29]
Bambú	0.5-1	1200-1300	--	[30]

Nota: RC = Resistencia a la compresión, CT = Conductividad Térmica

En la tabla 4 se observa cómo entre más densidad, mejor es la conductividad térmica, Ahmad et al.[24] verifico que al menos con el tallo de maíz la conductividad térmica aumentaba debido al bajo contenido de este permitiendo que se generaran más huecos de aire dentro del concreto, por otro lado, Arnaud y Gourlay[26] describen que también la orientación de las partículas influye en el comportamiento térmico del concreto, Khedari et al. [29] señala que debe haber un rango óptimo de cuanto BA se debe sustituir y confirma que el tamaño de partícula influye ya que este permite la generación de más huecos. Por lo tanto, se debe tener cuidado en la fabricación de los especímenes ya que se puede alterar los parámetros, lo correcto es definir el proceso de trabajo en cuanto a técnica y caracterización del BA.

1.7.3. Durabilidad

En los concretos vegetales donde la conductividad térmica se vuelve un parámetro importante, se hace necesario conservar esto durante el tiempo de vida útil del elemento que se construya. Se aborda el tema desde el punto de vista de que los agregados son de origen orgánico y por lo tanto tienden a degradarse, esto se debe a que su compuesto principal son polisacáridos y estos tienden a degradarse con el tiempo. En la construcción o en el ambiente siempre están presentes sustancias que atacan a las estructuras, como lo son los sulfatos o cloruros, por ende, es mucho más importante proteger a los BA de futuros ataques.

Sobre la primicia anterior se sigue discutiendo el tema, sobre todo en el hecho de cuanto BA se debe utilizar y que independientemente de los factores que afectan al concreto común, en los concretos vegetales la importancia recae en proteger al BA debido a la presencia de humedad, esto afecta que entre las reacciones de BA y el cemento se generen ataques por álcalis o que se generen ataques fúngicos en la planta.

Basado en esto, los últimos estudios se han enfocado en probar los concretos vegetales a diferentes ambientes variando la temperatura y humedad, acelerando las condiciones para tener edades representativas de cuando se presentaría el problema.

Delannoy et al. [31], sometió especímenes de Hempcrete a ciclos de humedecido y secado para simular situaciones de humedad durante dos años, los resultados indicaron que no se generaron presencia de organismos fungí, de hecho, se apreció como la conductividad térmica se vio mejorada sin presentar variaciones en las propiedades acústicas y mecánicas, concluyendo que el rendimiento mostrado debería mantenerse por varios años. En todo caso, el desarrollo de estos estudios apenas empieza, el enfoque actual se encuentra en el desarrollo de matrices implementando nuevos agregados, con la variación de cementantes utilizados.

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

2.1. CÁSCARA DE CACAHUATE

El cacahuate (*Arachis hypogaea*), es considerado como fruto seco, por ser una legumbre que se encuentra dentro de una vaina. Es una especie invaluable por sus cualidades excepcionales para la alimentación de áreas rurales, también es un cultivo resistente a sequias y conserva la fertilidad del suelo al incorporar nitrógeno atmosférico. Este llegó de América del Sur a México en épocas prehispánicas y luego fue encontrado por los españoles quienes se encargaron de comercializarlo por Europa y África. El cacahuate por sí solo ayuda al sistema nervioso central, combate enfermedades del corazón y mejora la salud de la piel.

Es una de las botanas más comunes y por ende su producción se da en magnitudes grandes, el cacahuate en si proviene de una planta, en la figura 4 se aprecia la morfología de la planta de cacahuate, lo que se aprecia con el nombre de vaina es donde la semilla se guarda hasta que esté lista para ser cosechada.

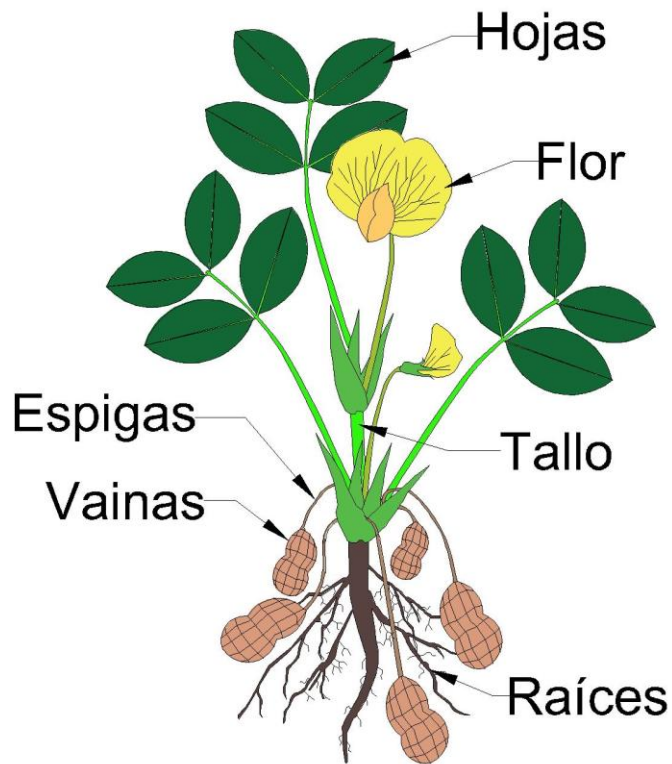


Figura 4. Morfología de la planta de cacahuate.

2.1.1. Producción de la cáscara de cacahuete

Para poder entender la producción de la cáscara, hay que explicar la producción mundial de cacahuete, datos del año 2019 indican que en el mundo se produjeron alrededor de 45 millones de toneladas, México ocupó el lugar número 33 produciendo 94 mil toneladas[32], esto se ilustra en la figura 5.

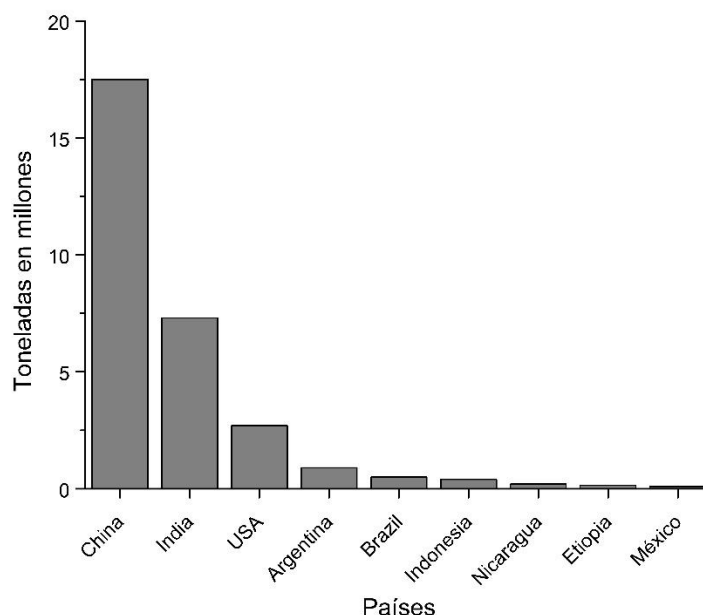


Figura 5. Producción mundial de cacahuete en 2019.

El cacahuete es un cultivo que se adapta a las condiciones de suelo, clima y manejo de los productores y aunque las superficies de siembra han variado en los últimos 15 años, el trópico seco de la vertiente del Océano Pacífico sigue siendo su mejor área de adaptación[33]. Por ende, México es un país donde este cultivo se da muy bien. Entre los principales productores destacan el estado de Chihuahua en primer lugar, seguida por Sinaloa, Chiapas, Puebla y Oaxaca[34], las 5 entidades se encargan del 84% del total anual. En la figura 6, se puede ver los campos de cultivos de cacahuete, donde se puede apreciar el proceso de cosechado sin ser llevado a las plantas de procesado.



Figura 6. Cosecha de cacahuete.

Hasta ahora se habló en términos de producción de cacahuete, cuando lo importante en realidad es la generación de la cáscara por cosecha, en este caso, el 25% de la cosecha queda como cáscara. En la figura 7, se puede apreciar el total de estados que se encargan de la producción de Cacahuete en México. Actualmente, este residuo no posee un uso alternativo, representando un inconveniente por los altos volúmenes que se generan por año[35].



Figura 7. Estados de la República Mexicana productores de Cacahuete.

Las productoras de cacahuate obtienen la semilla mediante maquinas que se encargan de separar la cáscara y la semilla, en la figura 8 se puede apreciar un almacén de cáscara, donde el destino de la cáscara es como forraje para animales donde se mezcla la cáscara con otro alimento. Otro uso que se le da, es la quema, la cual termina dañando el ambiente por las emisiones que genera de CO₂. Existen casos aislados donde, por ejemplo, se utiliza para rellenar orificios en caminos debido a lo tardado que puede llegar a ser su degradación. Sin embargo, ninguna de estas soluciones es la definitiva y no traen beneficios sociales o económicos.



Figura 8. Almacén de Cáscara de Cacahuate.

Debido a su composición fisicoquímica, al igual que otros residuos orgánicos, la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina es importante, son parámetros que determinan la resistencia mecánica, la absorción de agua y durabilidad del bio-agregado, lo cual termina siendo decisivo para el aprovechamiento de la cáscara de cacahuate. El suroeste de México es la región más productora que se encarga de alrededor del 50% y Chiapas se coloca como el primer productor de esta región.

2.2. CEMENTO PORTLAND

El cemento portland es el material con el cual se fabrica el concreto abarca entre el 10 y el 15% en peso del componente, el uso de este, aunque aporta muchos beneficios tiene un impacto negativo para el medio ambiente. Tan solo en 2020 se produjeron alrededor de 4.1 gigatoneladas y ocupó el segundo lugar en emisiones de CO₂[36]. La

contaminación proviene desde la fabricación, alrededor del 50% de las emisiones provienen de la calcinación de carbonato de calcio (CaCO_3), este pasa por temperaturas elevadas (1450 a 1600°C) para poder inducir ciertas reacciones químicas.

Los óxidos importantes que participan son CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , los cuales vienen de materiales calcáreos y arcillosos. Primero, se elimina el agua adsorbida y combinada desde los 100°C hasta los 700°C, para dar paso a la descarbonatación y a una combinación inicial de alúmina, óxido férrico y sílice con cal, donde debido a la precalcinación se pasa a formar espurrita y sulfoespurrita, de la descomposición de esta se forma belita presentándose de 900°C a 1200°C. A partir de los 1250°C aparece una fase líquida que promueve la reacción entre la belita y la cal libre para formar alita, como se muestra en la figura 9, la formación del C_3A y el C_4AF ocurren a partir de la solidificación de la fase líquida, llegando a los 1450°C inicia la etapa de enfriamiento, en algunos casos cuando el enfriamiento es lento la fase de C_3A puede disolverse nuevamente en la fase líquida y aparecer como belita secundaria[37, 38].

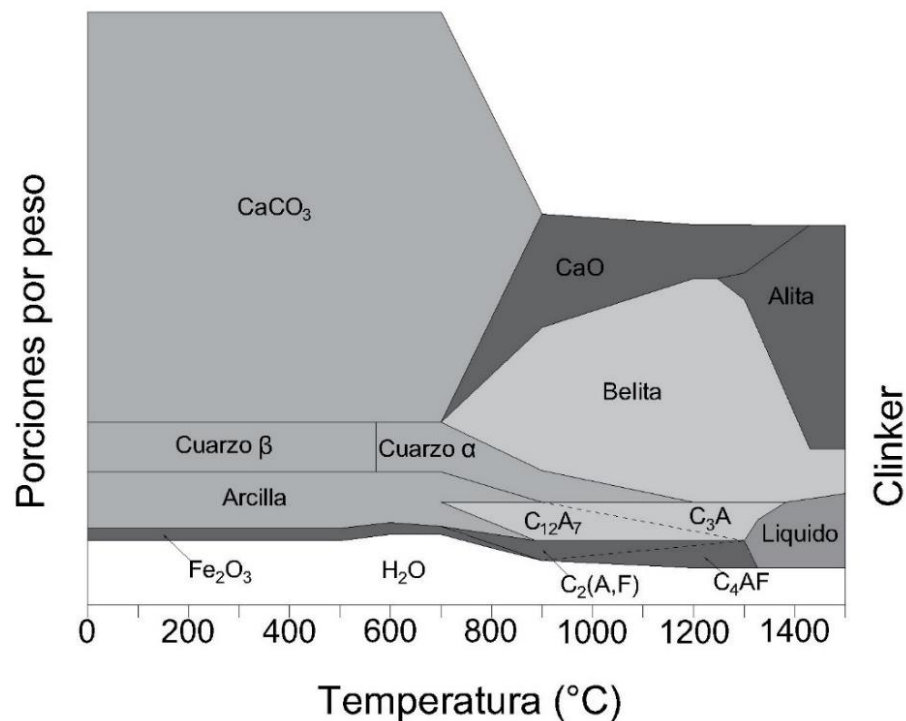


Figura 9. Vista esquemática de las reacciones en la formación del Clinker.

Todas estas reacciones de transformación de los constituyentes de la harina cruda a los minerales que conforman el Clinker, se dan por medio del fenómeno de difusión, lo cual influye en la velocidad de formación.

El Clinker consta de cuatro fases mineralógicas: Alita, Belita, Alúmina y Ferrita y se encuentra asociados entre sí. Es importante mencionar que las fases no se van a encontrar como tal puras, ya que hay presencia de otros óxidos extraños en las materias primas. Para una mejor comprensión en la tabla 5 se describe su composición y diferentes denominaciones.

Tabla 5. Principales fases mineralógicas del Clinker.

Fase Mineralógica Real	Compuesto Químico Puro	Fórmula Química	Notación Cementera	Composición Aproximada (%)
Alita	Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	40-70
Belita	Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	10-35
Alúmina	Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0-13
Ferrita	Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5-14

Nota: Adaptada de González[38]

Sobre todo, se debe tener cuenta que aparte de sus fases mineralógicas, hay diferentes tipos de cemento, y la ASTM C150[39] da parámetros que se pueden observar en la tabla 6 para que sea posible determinar qué tipo de cemento es de acuerdo al porcentaje de óxidos que contenga. Los tipos I son concretos con propiedades especiales, en los tipos II la resistencia moderada a sulfatos es deseada, los tipos III son de alta resistencia, los tipos IV son de bajo calor de hidratación y los tipos V son de alta resistencia a sulfatos. La A en los cementos indica un contenido de aire mayor deseado.

Tabla 6. Requisitos de composición estándar para cemento.

Tipo de cemento	I y	II y	II(MH) y	III y	IV	V
	IA	IIA	II(MH)A	IIIA		
Óxido de aluminio (Al_2O_3), máx., %	--	6.0	6.0	--	--	--
Óxido férrico (Fe_2O_3), máx., %	--	6.0	6.0	--	6.5	--
Óxido de magnesio (MgO), máx., %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de sulfuro (SO_3), máx., %						
Cuando (C_3A) es 8% o menos	3.0	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Cuando (C_3A) es más de 8%	3.5	NA	NA	4.5	NA	NA
LOI, máx., %	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0

Nota: Adaptada de ASTM C150[39]

Como en casi todo material, influyen factores como el proceso de fabricación, y composición química de las materias primas, estos dictan el comportamiento del material a diversos niveles, por ende, es importante determinar estos parámetros que permitirán obtener un panorama del material a desarrollar.

2.3. CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

La ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA), ha surgido como opción dentro de los materiales cementantes alternativos, debido a su rico contenido en silicio y aluminio, además es un material en abundancia que requiere un mínimo procesamiento y una actividad puzolánico superior. México produce azúcar en 15 entidades federativas, en la figura 10, se puede apreciar cada una de ellas, Veracruz encabeza el primer lugar con 37% de la producción anual[40]. Cada tonelada de caña de azúcar molida produce en promedio 270 kilogramos de bagazo y cada tonelada de bagazo quemado produce alrededor de 25 kilogramos de ceniza[41]. Se ha propuesto utilizar la CBCA como fertilizante, sin embargo, esta no aporta los nutrientes adecuados para este uso, por ende, esto facilita más su uso en la industria de la construcción.

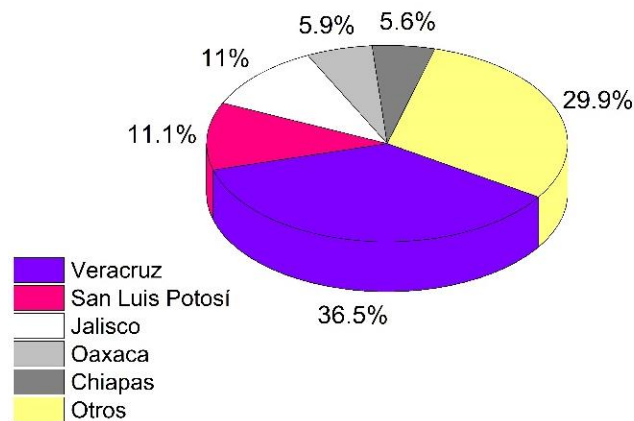


Figura 10. Producción de Azúcar en México

El principal tema es cuanto se puede reemplazar de cemento sin afectar las propiedades que otorgaría por sí solo como son la resistencia a la compresión. El uso de CBCA se ha popularizado debido a su alto contenido de SiO_2 , factores como la calcinación o el tiempo de molienda influyen en el grado de actividad puzolánica que se tiene, tamaños de partícula más pequeños aumentan este parámetro. La ASTM C618[42] indica que un buen material cementante alternativo debe retener menos del 34% en las $45\mu\text{m}$, por lo que la molienda es un factor importante. Del lado de la calcinación, se ha encontrado que se deben manejar temperaturas en rangos dentro de los 600°C y 800°C [19] para mantener la CBCA amorfa, ya que al elevar la temperatura esta se cristalizaría y se perdería actividad puzolánica.

Srinivasan y Sathiya [43] reemplazaron cantidades de 5%, 10%, 15% y 25% en peso y analizaron resistencia a compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, módulo de Young y densidad, demostraron que casi todos los parámetros se comparan con un concreto sin sustitución, teniendo como límite el 10%. Se observó que se mejora la trabajabilidad en estado fresco y también disminuye la densidad del elemento. Amin et al. [44] hizo las mismas incorporaciones de CBCA y se dieron cuenta que los tiempos de fraguado se incrementan hasta en un 20% respecto a las muestras de control que no contenían CBCA, esto se debe a que se retrasa el proceso de hidratación de la pasta de cemento. Por lo regular se llegan a esperar hasta 3 días para que suceda el fraguado, es un valor que depende de la cantidad que se sustituya y por lo tanto puede afectar de diferente manera.

2.4. ADICIONES AL CONCRETO

El reciente avance y demanda en el concreto han hecho que las tecnologías se involucren, con el principal objetivo de crecer, esto ha llevado a que se creen adiciones químicas que permiten la modificación de parámetros reológicos y de dureza de los materiales, esto se hace principalmente para casos donde se busca obtener mezclas con la mayor fluidez como lo es en el caso de los concretos auto-compactables o concreto bombeables. Estas adiciones son susceptibles a presentar segregación y cambios en la relación agua-cemento, los cuales pueden venir acompañados por lo que se conoce como sangrado en el concreto[45].

Los principales objetivos de las adiciones en el concreto es reducir los costos de producción, obtener ciertas propiedades de manera más efectiva, mantener la calidad del concreto durante etapas de mezclado y colado, superar cualquier emergencia que se presente desde la producción a la colocación. La eficiencia de las adiciones está condicionada a la marca, cantidad y forma de los agregados y sobre todo la proporción en que se usen.

2.4.1. Aditivo reductor de agua

Como ya se mencionó la necesidad de disminuir costos crea la necesidad de usar aditivos, uno de ellos son los aditivos reductores de agua o plastificantes, estos proporcionan reducciones de la cantidad de agua utilizada de por lo menos 5% siendo de esta forma, crear concretos con los mismos revenimientos disminuyendo la relación agua-cemento. Dentro de los reductores de agua se encuentran los reductores de alto rango, estos permiten disminuciones de agua del 12% hasta el 40%, la estructura química es principalmente lignosulfonatos, polisacáridos, sales condensadas de naftaleno sulfonato, melamina sulfonato y productos base de policarboxilato[46].

Cuando el cemento y agua son mezclados, las partículas finas del cemento en hidratación tienden a la floculación por la diferencia de polaridades, estos presentan una adhesión fuerte, haciendo que la estructura floculada permanezca intacta durante el proceso de mezclado. De esta forma, el concreto tendrá un exceso de agua para una misma trabajabilidad, la estructura floculada también disminuye el área específica de las partículas de cemento disponible para las reacciones de hidratación. En la figura

11 se aprecia que la función del aditivo es dispersar las partículas de cemento en hidratación permitiendo una mayor fluidez, esto lo hace mediante la repulsión entre partículas de cemento dando paso a la defloculación y permite que el agua entre a las partículas quedando libre aumentando la plasticidad.

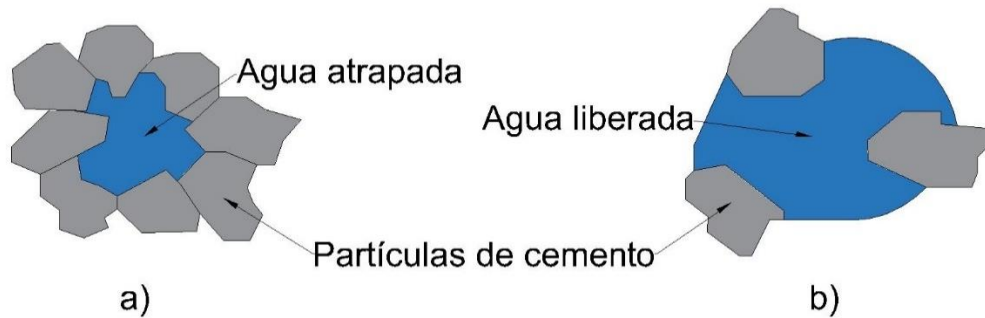


Figura 11. a) Floculación de la partícula del cemento, b) Defloculación del cemento

2.4.2. Óxido de calcio

El carbonato de calcio al ser calcinado queda como caliza de alta pureza, por lo regular se requiere de cantidades específicas de algunos compuestos, estas se muestran en la tabla 7, durante el proceso de calcinación el cual ocurre entre 900 y 1000°C, se libera anhídrido carbónico. De este proceso resulta óxido de calcio (CaO), de color blanco y muy cáustico, el cual contiene también óxido de magnesio, óxido de silicio y pequeñas cantidades de óxidos de aluminio y hierro[47]. Es de vital importancia mencionar que al estar en contacto con el agua se genera una reacción exotérmica, por lo tanto, puede ser peligroso.

Tabla 7. Composición de la cal antes de calcinación.

Compuestos	Cantidad
Carbonato de calcio	90-98%
Óxido de magnesio	<5%
Otras impurezas	<3%

Gatani [17], probó con la incorporación de cal viva a los BA y resultó que es posible mejorar las reacciones con el cemento permitiendo que se desarrolle más resistencia a compresión y a tracción, ya que se forma un derivado cálcico insoluble que no migraría, la cual hace que las hemicelulosas se vayan.

2.5. RELACIÓN AGUA/CEMENTO

En el concreto uno de los principales factores que determinan algunas de las propiedades principales es la relación agua/cemento, usualmente el agua determina la trabajabilidad y plasticidad, si se aumenta la relación, estos parámetros aumentan, sin embargo, se empieza a disminuir la resistencia debido a los espacios que se crean por el agua libre. Así, se puede afirmar que la resistencia del concreto depende altamente de la relación en peso entre el agua y el cemento[48], esto se aprecia en la tabla 8 cuanto más grande es la relación menor resistencia a compresión se desarrolla.

Tabla 8. Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a la compresión

A/C	f'c (kg/cm ²)
0.35	420
0.45	340
0.55	275
0.65	220
0.75	165

El cemento endurece al reaccionar con el agua, por las denominadas reacciones de hidratación. El silicato dicálcico y el tricálcico constituyen aproximadamente el 75% en peso del cemento, cuando estos reaccionan con el agua se hidratan. El silicato tricálcico endurece rápidamente y es el principal responsable de la temprana resistencia del cemento portland. Por lo tanto, según la extensión en que se completan las reacciones de hidratación, se determina la resistencia y durabilidad. En conclusión, la relación agua/cemento influye en la generación de poros los cuales tienen a generar microfisuras que impactan en la resistencia mecánica y permiten el paso de agua y agentes dañinos que impactan en la durabilidad.

2.6. TRABAJABILIDAD EN PASTAS DE CEMENTO

Para medir la trabajabilidad de una pasta de cemento, la fluidez es la medida de consistencia y se expresa en términos del incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un medio cono, después de sacudir un número determinado de

repeticiones. Esta estrictamente ligado a la relación agua/cemento ya que entre más alta sea, más agua habrá y por lo tanto la fluidez se incrementa, no hay que olvidar que también debe haber cohesión en la mezcla, así que, es recomendable tener un parámetro fijo. Estos parámetros vienen definidos en la normativa NMX-C-061-ONNCE[49] la cual indica que las pastas de cementos deben tener una fluidez de $110\pm 5\%$.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

La metodología indicará los pasos a seguir para el correcto desarrollo de la investigación, este propósito lleva a dividir por etapas la experimentación para que sea más fácil el trabajo, para realizar la siguiente etapa debió realizarse la anterior. La investigación se dividió en cinco etapas, el diagrama de flujo (figura 12) describe la primera etapa como obtención de materiales, la importancia de esta etapa es la necesidad de identificar puntos para el suministro constante de materiales y que la investigación no se estanque. La segunda etapa consiste en caracterizar los materiales para entender la composición y comportamiento hasta el punto de intentar predecir las posibles reacciones entre los materiales. La tercera etapa consiste en tratar los Bio-Agregados, la determinación del tratamiento a usar es importante para mejorar la compatibilidad y protección como ya se había mencionado anteriormente.

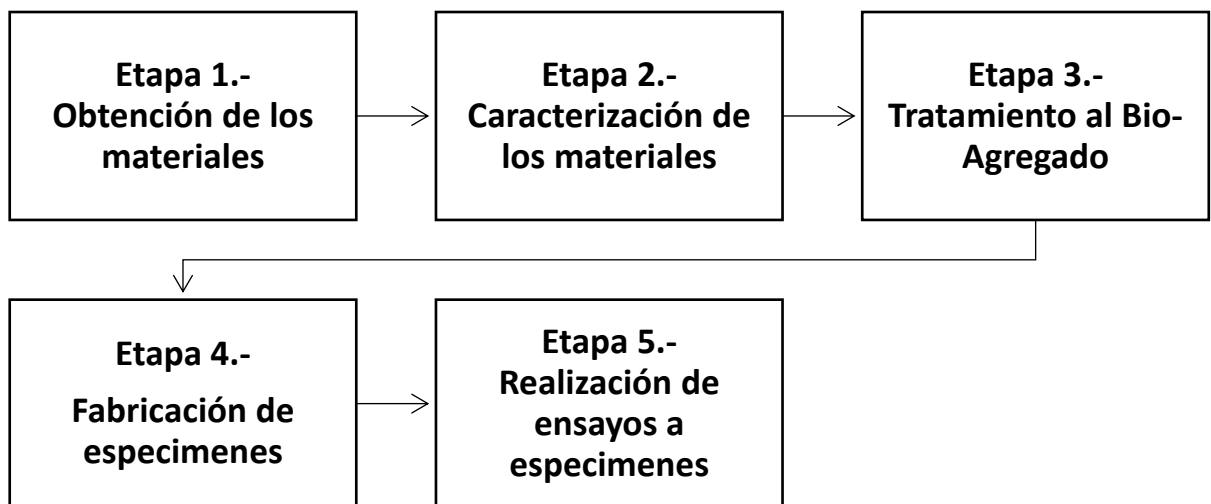


Figura 12. Diagrama de desarrollo de investigación

La etapa cuatro se enfoca en la determinación de la dosificación de los materiales a utilizar, así como las relaciones agua/cemento y bio-agregado/cemento, se presentan también condiciones de dimensiones de especímenes y condiciones de curado. Por último, la etapa cinco se centra en la realización de ensayos a los especímenes elaborados, para la obtención de los resultados que son el objetivo de esta investigación, la mayoría de las conclusiones vendrán de esta etapa.

3.2. ETAPA 1: OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados en esta investigación fueron: la cáscara de cacahuete, cemento, ceniza de bagazo de caña de azúcar y aditivos. Todos fueron almacenados en el Laboratorio de Investigación e Innovación de Materiales de Construcción en el Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

- El cemento portland utilizado fue el CPO40R, a partir de ahora rotulado como CM40, fue proporcionado por la empresa Holcim directamente de la planta ubicada en Monterrey, Nuevo León, se almacenó de manera que la humedad no le afecte.
- La ceniza de bagazo de caña azúcar, desde este momento etiquetada como CBCA, fue donada por la empresa Ingenio Mahuixtlán S.A. de C.V. la cual se encuentra localizada en el municipio de Coatepec, Veracruz, esta se analizará para ver el cumplimiento con los requisitos de la ASTM C618 [42] para su uso como puzolanas naturales.
- La cáscara de cacahuete, a partir de este momento referida como CC, fue obtenida del estado de Chiapas, específicamente del ejido de Roberto Barrios municipio de Cintalapa, la cáscara es molida durante el proceso de obtención de la semilla y cuando se utiliza para fabricar pastura, esto último fue el caso de obtención, se utilizó un molino marca Azteca No.20, con número de serie 046863 (figura 13a), la criba a utilizar fue la de 1 pulgada (figura 13b), esto permite un tamaño de partícula no tan reducido y con mayor variedad.



Figura 13. a) Molino marca Azteca, b) Criba de 1"

- El aditivo reductor de agua utilizado fue el MasterGlenium 3035 de la marca Master Builders este compuesto con base en cadenas de éteres policarboxílicos modificados, permite producir concreto de alta calidad sin el riesgo que supone la adición de más agua. Además, según la ficha técnica cumple con la norma ASTM C494[50] para aditivos tipo A y F.
- La cal viva (óxido de cal) utilizada para dar tratamiento a la cáscara de cacahuete fue donada por la empresa Oxical, con sede en la ciudad de Puebla. El material fue proporcionado en grano fino de 1/4" con pureza de 90-92%, se revisó que estuviera correctamente sellado y se almaceno con el debido cuidado debido al tipo de reacción que puede llegar a provocar.
- Se utilizó una membrana de curado de nombre comercial KUREZ 100 WP de la marca Eucomex que permitiera el curado más rápido, esta cumple con los requerimientos de la norma ASTM C309[51] para retención de humedad, según su ficha técnica.

3.3. ETAPA 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Es de importancia caracterizar los materiales de manera individual para tener un panorama de cómo se comporta el material por sí solo, ya sea física o químicamente, en esta investigación cabe mencionar que todas las pruebas se desarrollaron por triplicado.

3.3.1. Distribución de tamaño de partícula.

Es importante saber los porcentajes de distribución de los agregados en cierta cantidad de masa, esta juega un papel primordial en su comportamiento y durabilidad, una buena distribución implica un mejor acomodamiento de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de flexión y compresión. La distribución del agregado se grafica mediante una curva granulométrica, por ejemplo, una curva tendida indica que un material esta denso y los espacios entre partículas son mínimos, en cambio una curva casi vertical indica que hay poca diferencia de tamaños y hay más espacios vacíos[52].

Cáscara de cacahuete: Para la cáscara de cacahuete (CC) se realizó lo indicado por las recomendaciones RILEM TC 236-BBM[13] para los métodos de cribado manuales,

la prueba consiste en separar el material en varios tamaños, estos tamaños están definidos por el número de mallas seleccionadas de acuerdo a la naturaleza del Bio-Agregado y la precisión requerida. Para iniciar la prueba, se secó la cáscara en un horno con ventilación de la marca Masters modelo A005-08-KIT a una temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ aproximadamente por 24 horas, deben ser entre 6 y 7 tamices teniendo la última una apertura de 0.5 milímetros, las mallas escogidas fueron la No.5, 8,10, 16, 20 y 30 (figura 14a), realizando un cuarteo para obtener muestras representativas y homogéneas de la cáscara (figura 14b). El peso de la muestra analizada fue de $100\pm 20\text{g}$ y el tamizado se realizó durante 30 minutos para que fuera lo más exacto posible, reportando el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices, sin olvidar que la prueba se realizó por triplicado.



Figura 14. a) Tamices utilizados, b) Proceso de cuarteo

Cemento Portland: En el caso de CM40 se analizó con el equipo Microtrac modelo S3500, donde el equipo por medio de difracción de láseres obtiene los parámetros. La muestra se obtuvo de los sacos donde eran almacenados.

Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar: En este caso la ceniza es recolectada en tamaños muy grandes, por ende, se decidió darle un proceso mecánico más antes de ser utilizada. Este proceso consta, en una molienda de una hora por un molino marca Ceramics Instruments el cual en su interior utiliza bolas de acero de una pulgada de diámetro, posteriormente se cribó por la malla No. 200 con la finalidad de hacerla más

reactiva, de la fracción que paso la malla No. 200 se analizó el polvo con el equipo Microtrac modelo S3500.

3.3.2. Densidad

La densidad se define como la relación de peso a volumen de una masa determinada. Debido a que las partículas del agregado tienen poros y están compuestos de diferentes minerales se distinguen diferentes tipos de densidades, estos tipos son: densidad absoluta, densidad nominal y densidad aparente. Para el diseño de mezclas, la densidad aparente es la que se utiliza, pues con ella se determina el peso del agregado para un volumen unitario de concreto, esto se debe a que los poros van a ocupar un volumen dentro de la masa del concreto y el agua que se aloja dentro de los poros saturables no hace parte del agua del mezclado[52].

Cáscara de cacahuete: Para la determinación de la densidad aparente, se siguió lo recomendado por el RILEM TC 236-BBM, para esto se utilizó la cáscara secada a 60°C y un molde cilíndrico de PVC de 10 centímetros de diámetro y 20 centímetros de altura (figura 15), se realizó el procedimiento a continuación detallado:

- I. Pesar el molde vacío.
- II. Poner el BA hasta cubrir aproximadamente la mitad del volumen del molde.
- III. Voltear el molde 10 veces de manera vertical.
- IV. Agitar horizontalmente el molde para obtener una superficie plana.
- V. Colocar un disco de cartón en la superficie del agregado y marcar el nivel del molde.
- VI. Remover el agregado del molde.
- VII. Llenar con agua hasta la marca establecida y pesar el cilindro para calcular el volumen de agua.
- VIII. Calcular la densidad mediante,

$$\rho = \frac{M}{V}$$

donde ρ es la densidad aparente (Kg/m^3), M es la masa (Kg) y V es el volumen(m^3) de la muestra.

Este procedimiento se realizó también para las muestras con tratamientos debido al cambio físico que se llega a presentar en ellas.



Figura 15. Molde usado para el cálculo de la densidad aparente.

Cemento Portland y Ceniza de Bagazo de Caña de azúcar: Para el caso de ambos materiales la muestra en polvo es analizada por un multipicnómetro de la marca Quantachrome modelo MVP-D160E (figura 16), el equipo utiliza Nitrógeno para su funcionamiento, el procedimiento para la obtención de las lecturas es el que se describe a continuación:

- I. Usando el adaptador “Micro” se coloca la muestra en la celda de medición.
- II. Se cierran las válvulas 1 y 2.
- III. Se coloca el selector en “Celda” y se abre la válvula de salida y, de entrada, todo en ese orden.
- IV. Se ajusta la entrada de gas a 1.000 psi aproximadamente usando la válvula de flujo de entrada.
- V. Dejar purgar por 5 minutos y cerrar la válvula de entrada.
- VI. Esperar hasta que el indicador marque 0.000 psi, si no se obtiene el valor se usa ajuste de cero.
- VII. Ahora se coloca el selector en “Referencia”, se cierra la válvula de salida y se abre la de entrada.

- VIII. Cerrar válvula de entrada una vez que el indicador marque aproximadamente 17.000 psi.
- IX. Esperar hasta que se estabilice la lectura y no tenga variación por espacio de 10 segundos.
- X. Anotar el valor del indicador como p_1 .
- XI. Colocar selector en "Celda".
- XII. Esperar hasta que se estabilice la lectura y no tenga variación por espacio de 10 segundos.
- XIII. Anotar el valor del indicador como p_2 .
- XIV. Abrir válvula de salida.



Figura 16. Multipicnometro para el cálculo de densidades.

El cálculo se realiza con los valores obtenidos y conocidos. Se calcula V_1 con los valores obtenidos del equipo para después calcular V_2 y por último calcular la densidad.

$$V_1 = \frac{p_1}{p_2} - 1$$

$$V_2 = (V_{Cel} - V_{Ref}) * V_1$$

donde V_{cel} y V_{Ref} son valores proporcionados por el equipo.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

3.3.3. Absorción de agua

La capacidad de absorción de agua está seriamente asociada con la porosidad, esto depende sobre todo del número, tamaño y continuidad de estos. Según el contenido de humedad, las partículas del agregado pueden estar en alguno de los estados de la figura 17.

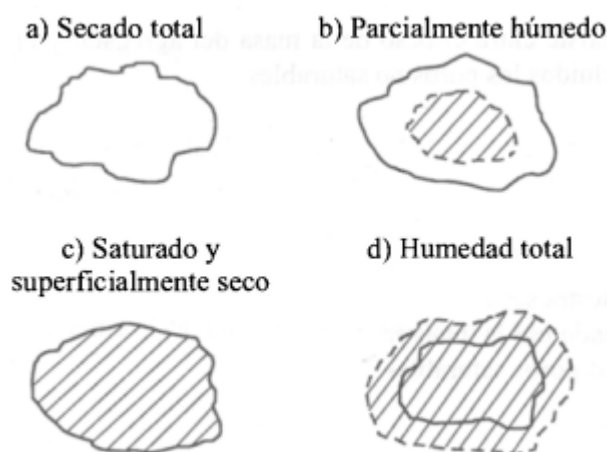


Figura 17. Diferentes estados de saturación del agregado.

En el caso a), está completamente seco solamente con el agua absorbida por su constitución mineralógica, en b) el material tiene algo de humedad la cual se encuentra en los poros, en c) el material tiene los poros saturados, pero por fuera se mantiene seco y por último en d) el material se encuentra saturado y posee lo que se conoce como agua libre, proporcionando una película brillante[52].

Fue necesario medir la absorción de la CC, debido a que es el único agregado como tal a utilizar, al igual que la granulometría y densidad se calculó siguiendo lo establecido por las recomendaciones del RILEM TC 236-BBM, se debe utilizar una centrifuga de ensaladas (figura 18a), además debido a la naturaleza del agregado es necesario poder deshacerse del agua que se puede almacenar. El procedimiento es el que a continuación se describe:

- I. Secar 200 gramos de BA a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- II. Sumergir en agua una bolsa permeable con perforaciones de 1mm y asegurarse que esté completamente húmeda.

- III. Colocar la bolsa húmeda en el centrifugador y girar 100 veces, aproximadamente 2 rotaciones por segundo.
- IV. Pesar la bolsa y anotar el valor.
- V. Pesar 25 gramos de BA seco y colocar en la bolsa permeable del paso anterior.
- VI. Sumergir la bolsa con el BA por 1 minuto.
- VII. Colocar la bolsa en el centrifugador y girar 100 veces, aproximadamente 2 rotaciones por segundo.
- VIII. Pesar la bolsa con BA y anotar el valor.
- IX. Repetir los pasos 5, 6 y 7 con la misma muestra a tiempos de inmersión de 15 minutos, 4 horas, 24 horas y 48 horas (figura 18b).
- X. Calcular para cada tiempo de inmersión, el valor de absorción usando la siguiente ecuación:

$$W = \frac{m_H - m_D}{m_D} \times 100$$

donde W es el porcentaje de absorción, m_H es muestra húmeda y m_D es muestra seca.

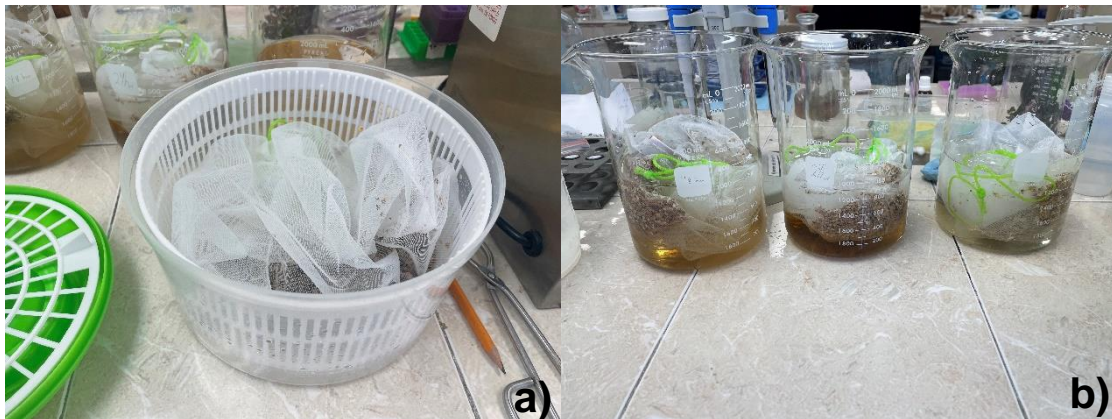


Figura 18. a) Centrifuga con bolsa permeable, b) Inmersión de BA a diferentes tiempos.

3.3.4. Conductividad Térmica

Para la medición de la conductividad térmica de la CC, si bien el RILEM tiene un proceso a seguir, debido a la disponibilidad del aparato y del sensor, no se pudo hacer como lo indica, sin embargo, se ajustó el procedimiento teniendo en cuenta la normativa ASTM D5334, se usó el equipo Meter modelo TEMPOS, además el sensor utilizado fue el KS-3, el procedimiento a seguir quedó de la siguiente manera:

- I. Secar la muestra a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
- II. En un frasco o molde de plástico de al menos 50mm de diámetro insertar el BA hasta llenarlo por completo.
- III. Al centro del espécimen, insertar el sensor.
- IV. Correr la prueba a 10 minutos en temperatura ambiente (figura 19).
- V. Tomar la lectura del medidor y reportar.

El mismo procedimiento aplica para las muestras con los tratamientos que se aplicaran más adelante.



Figura 19. Proceso de medición de la cáscara de cacahuete.

3.3.5. Composición química

Este caso es primordialmente enfocado al análisis de los componentes principales de los BA como lo son el contenido de Humedad, Ceniza, Extraíbles, Lignina, Holocelulosa, Celulosa y Hemicelulosa. Estos parámetros se obtienen de acuerdo a lo establecido por las normas Tappi y otros procedimientos experimentales. Se deben tomar muestras homogéneas y representativas del material.

Análisis de humedad (TAPPI T264)

La humedad de las muestras corresponde a la humedad de equilibrio de cada muestra y es tenida en cuenta para posteriores análisis. Se debe pesar 2.00 ± 0.01 gramos de muestra (m_0) en un recipiente tarado libre de humedad, luego, el conjunto se coloca en una estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado,

las muestras se enfriaron a temperatura ambiente dentro de un desecador de silica gel. Una vez frías las muestras se pesan (m_f) y se determina la humedad de acuerdo a la siguiente formula:

$$\%humedad = \left[\frac{(m_0 - m_f)}{m_0} \right] \times 100$$

Análisis de cenizas (TAPPI T211)

El ensayo se lleva a cabo sobre 1.00±0.01 gramos de materia prima a la humedad de equilibrio, puesta en un crisol de porcelana (m_0) tarado libre de humedad, este se somete a calcinación en mufla a 525°C durante 3 horas (figura 20a).



Figura 20. a) Muestras en la mufla, b) Muestras después del proceso de calcinación

El crisol debe ser enfriado dentro de un desecador de silica gel. Una vez frío se pesa el conjunto (m_f) (figura 20b) y se calcula el porcentaje de cenizas como:

$$\%cenizas = \left[\frac{m_f}{(m_0 - humedad)} \right] \times 100$$

Extraíbles con etanol-tolueno (TAPPI T204)

Mediante este método se determina la cantidad de compuestos no volátiles extraíbles con disolventes orgánicos que presenta la materia prima, como ceras, grasas, algunas resinas, hidrocarburos no volátiles, carbohidratos de bajo peso molecular y algunas sales.

Para su determinación, se utilizan 4.0 ± 0.1 gramos de muestra (m_0) a la humedad de equilibrio. La materia prima se dispone en un cartucho de papel filtro, previamente pesado. Luego, encima del cartucho con la muestra en su interior (figura 21a), se coloca otro cartucho ajustado como tapa, también pesado, para evitar pérdidas de muestra durante la extracción. El conjunto se coloca en un soxhlet y se añaden 150 mL de mezcla etanol-tolueno (1:2 v/v), más o menos hasta una sifonada y media. El soxhlet se acopla a un matraz y un condensador y se calienta a reflujo (figura 21b), llevando la mezcla a ebullición.

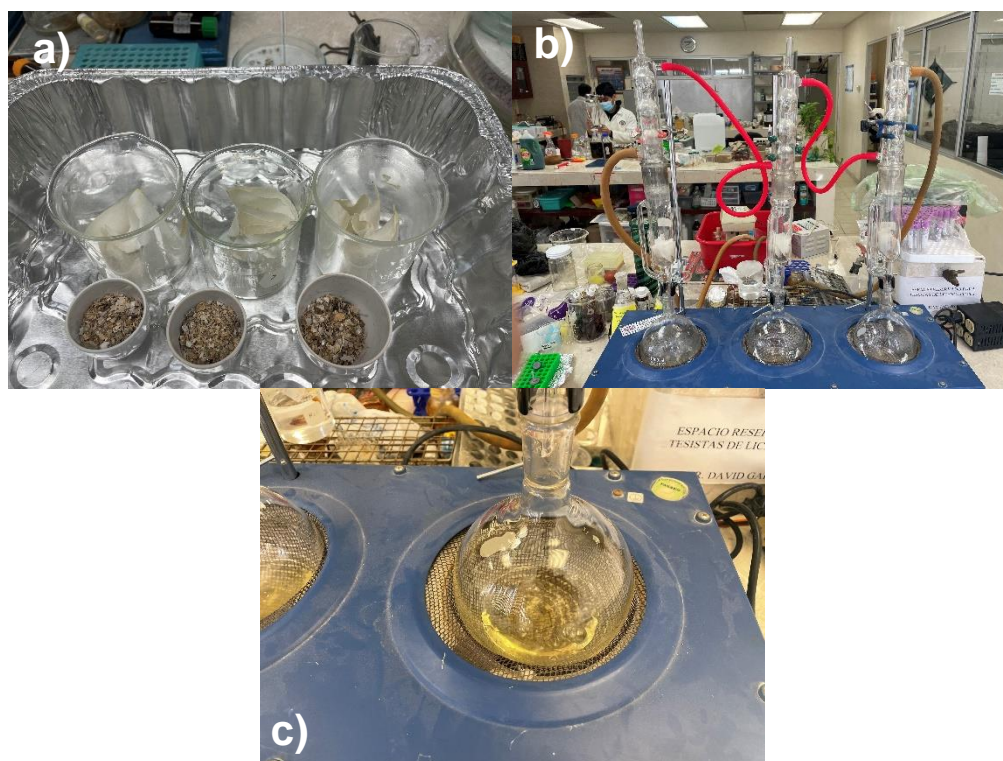


Figura 21. a) Muestras y cartuchos preparados, b) Equipo armado para la extracción, c) Disolvente acumulado

Tras un máximo de 6 horas, durante el cual deben ocurrir no menos de 24 extracciones, y una vez frío, se desmonta el soxhlet y se deja evaporar parcialmente el disolvente del Erlenmeyer a temperatura atmosférica y en campana (figura 21c). El cartucho con la muestra se recoge para posteriores análisis, se seca en estufa a 105°C durante 24 horas hasta que el extracto esté seco. Finalmente, se pesa y se obtiene la masa extraída (m_f). El resultado del análisis se expresa en base seca y el porcentaje de extraíbles se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ extraíbles } E - T = \left[\frac{m_f}{(m_0 - \text{humedad})} \right] \times 100$$

Contenido en lignina insoluble en ácido (TAPPI T222)

Mediante la aplicación de este método los carbohidratos de la materia prima son hidrolizados y solubilizados con ácido sulfúrico, de forma que la lignina insoluble en ácido queda aislada.

El procedimiento consiste en pesar 1.0 ± 0.1 gramos (m_0) de la muestra libre de extraíbles. Luego, se adicionan 15 mL de ácido sulfúrico al 72%, agitando de vez en cuando durante 2 horas a temperatura ambiente (figura 22a). Después se trasvasa el contenido a un matraz de 1000 mL y se añade 560 mL de agua destilada y se lleva a ebullición con reflujo durante 4 horas (figura 22b). La disolución se filtra en un filtro numero 3 previamente pesado y se lava con agua caliente hasta pH neutro.

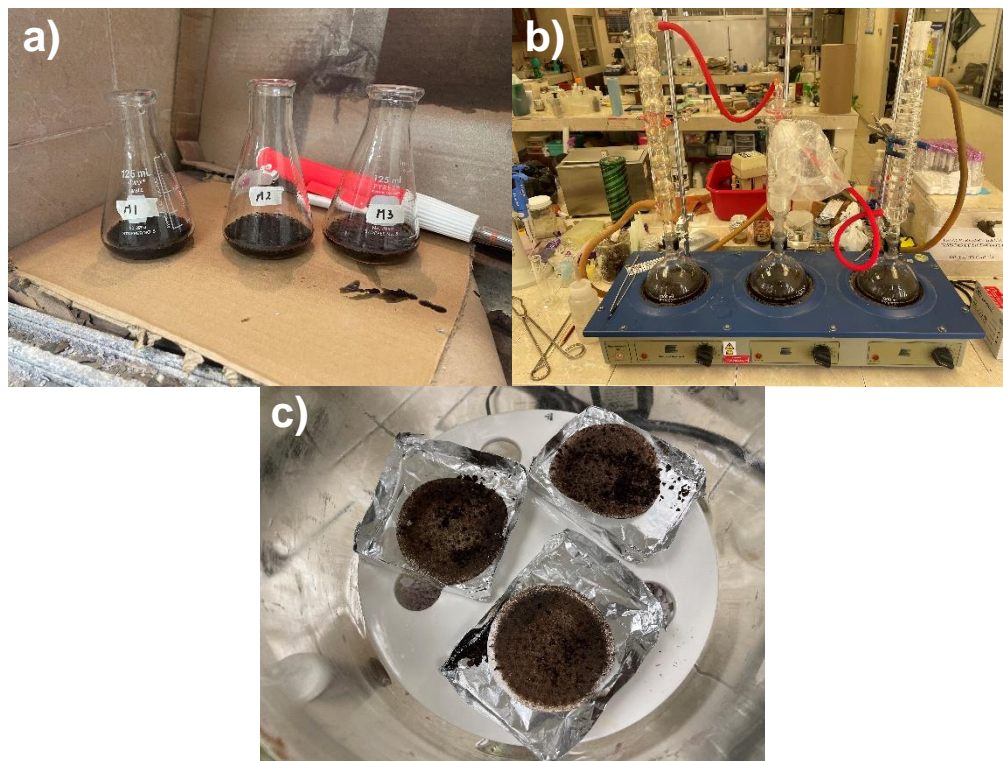


Figura 22. a) Muestra con ácido sulfúrico, b) Equipo montado a reflujo, c) Filtros secados

El filtro se seca en estufa a $100-105^\circ\text{C}$ durante 24 horas (figura 22c). Transcurrido este tiempo. El filtro se coloca en un desecador de silica gel para evitar la absorción de

humedad. Una vez frío se pesa el filtro (m_f) y se determina el porcentaje de lignina como:

$$\% \text{ lignina} = \left(\frac{m_f}{m_0} \right) \times 100$$

Contenido en holocelulosa (Método de Wise)

La Holocelulosa se define como la fracción de carbohidratos insoluble en agua presentes en las materias primas vegetales. Incluye, por lo tanto, la celulosa y hemicelulosas presentes en los sustratos. El método de Wise disuelve la lignina mientras los hidratos de carbono permanecen inalterados. Para llevar a cabo dicho método se parte de 2.5 ± 0.1 gramos (m_0) de muestras libres de extractos y secas, se colocan en un matraz Erlenmeyer, donde se añaden 80mL de agua destilada caliente ($70-80^\circ\text{C}$) y la mezcla se sumerge en un baño termostático a 70°C (figura 23a), agitando periódicamente con una varilla a fin de homogenizarla.

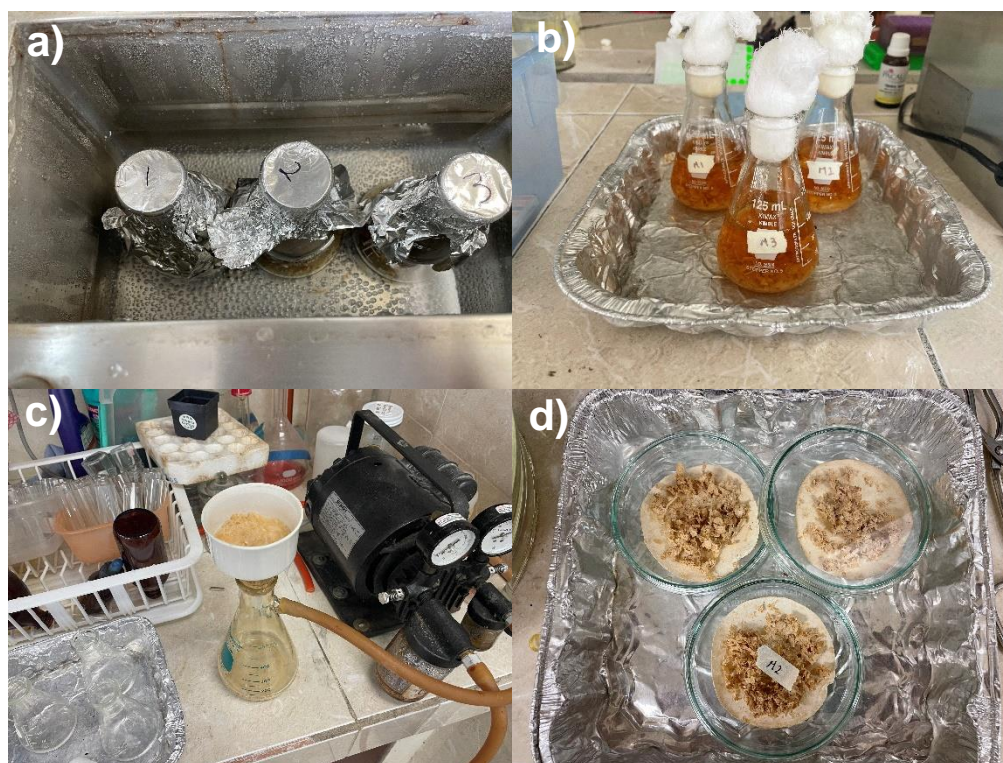


Figura 23. a) Muestras en baño termostático, b) Muestras en ácido glacial y clorito sódico, c) Filtrado de las muestras, d) Muestras secas

A continuación, se añaden cada 60 minutos 0.5 mL de ácido acético glacial y 2.6 mL de clorito sódico al 25% (figura 23b), hasta cubrir un total de 6-8 horas. Después de transcurrido ese tiempo la mezcla se mantiene en el baño durante 12 horas sin nuevas adiciones. Para finalizar, el residuo sólido (holocelulosa) se filtra con un papel número 2 (figura 23c), se seca durante 24 horas en una estufa a 105°C (figura 23d), se enfría en una desecador y se determina su cantidad (m_f). Se calcula el contenido con la ecuación siguiente:

$$\% \text{ holocelulosa} = \left(\frac{m_f}{m_0} \right) \times 100$$

Determinación de celulosa y hemicelulosa (Método de Rowell)

La normativa Tappi tiene un método para la determinación de la celulosa, sin embargo, la misma norma hace énfasis en su aplicación para pastas de papel, por eso se opta por el uso del método Rowell. La hemicelulosa se solubilizará por medio del hidróxido sódico y el ácido acético, la fracción que permanece insoluble corresponde a la celulosa. Se pesan 2.00±0.01 gramos de muestra de holocelulosa seca y libre de extractos (m_0). Se añaden 10 mL de NaOH al 17.5% agitando hasta lograr una correcta dispersión. Posteriormente, se añaden 5 mL de NaOH al 17.5% cada 5 minutos hasta completar un total de 25 mL (3 adiciones de 5 mL). Tras la última adición se deja reposar 30 min a 20°C (tiempo total de reacción 45 minutos). Después, se añaden 33 mL de agua destilada a 20°C agitando bien toda la dispersión y se deja reposar 1 hora (figura 24a) procediendo a su filtrado en un filtro de porosidad media número 2.

Posteriormente se lava el residuo sólido con 100 mL de disolución de NaOH al 8.3% tras lo cual se lava con agua destilada dos veces más. Se añaden 15 mL de ácido acético al 10%, dejándolo reaccionar 3 minutos antes de conectar el vacío (figura 24b). Finalmente, se lava con agua destilada hasta que el filtrado queda libre de ácido (pH neutro). Se seca a 105°C, se enfría en desecador (figura 24c) y se determina la celulosa gravimétricamente (m_f), correspondiente a la fracción que permanece insoluble a lo largo de todo el tratamiento.



Figura 24. a) Muestras con NaOH, b) Proceso de filtrado a vacío, c) Muestras secas

Las hemicelulosas se calculan por diferencia con la muestra inicial. Las cantidades se obtienen de los cálculos siguientes:

$$\% \text{ celulosa} = \left(\frac{m_f}{m_0} \right) \times 100$$

$$\% \text{ hemicelulosa} = \% \text{ holocelulosa} - \% \text{ celulosa}$$

3.3.6. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más eficientes de caracterización cristalina, permite la identificación tanto cuantitativamente como cualitativamente de las fases cristalinas. La interacción entre el vector eléctrico de la radiación X y los electrones de la materia que atraviesa da lugar a una dispersión, esto ocasiona interferencias entre los rayos dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación. El resultado de este proceso es la difracción. Los rayos X son radiaciones

electromagnéticas de la misma naturaleza que la luz con una longitud de onda mucho más corta. Se produce un patrón que consiste de picos de diversas intensidades a característicos ángulos de difracción. Estos valores tienen longitudes de onda en el rango de 0.5-2.5 Å mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000 Å [53–55].

En los tres casos de caracterización de los materiales (CC, CM-40 y CBCA) se utilizó un difractómetro de la marca Panalytical modelo Empyrean, (radiación Cu $K\alpha_1$, 1.5406Å) teniendo como intervalo $2\theta = 8$ a 80° con un tamaño de paso de 0.0508714° . Posteriormente, los difractogramas obtenidos fueron comparados con la base de datos para encontrar el grupo de picos que coincidieran con las fases típicas de los materiales.

3.3.7. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras. El análisis de FRX está basado en la excitación de átomos de la muestra que vuelven a su estado fundamental, donde un rayo X primario generado por un tubo de rayos X golpea un electrón de capa interna del átomo y lo expulsa. La posición ahora libre es ocupada por un electrón desde otra capa externa y emite radiación fluorescente. La energía emitida es igual a la diferencia de energía entre las dos capas involucradas. Esta energía proveniente de la radiación es característica del átomo e indica que átomo está presente en la muestra. Como muchos átomos están presentes en la muestra se emitirán varios rayos X con diferente energía, la cual será recolectada por un detector de semiconductores, creando señales que dependerán de la energía de radiación, estas señales son recogidas por un analizador multicanal [55, 56].

Para el análisis de las tres muestras (CC, CM-40 y CBCA) se utilizó el equipo Epsilon-3XL de la marca Panalytical, las muestras fueron analizadas en la condición de polvo.

3.3.8. Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

La técnica es usada en la determinación de estructuras moleculares, identificación de especies químicas de manera cuantitativa/cualitativa. Esta técnica se fundamenta en la absorción de radiación en el espectro infrarrojo por la sustancia en estudio, lo que

tiene un efecto de vibración de distintos tipos sobre los enlaces. Para absorber radiación en el infrarrojo, una molécula debe sufrir un cambio neto en el momento dipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o rotación. Esta vibración se logra de manera característica para cada enlace en función de la longitud de onda lo que permite su detección mediante la técnica. Se puede decir entonces, que en un espectro infrarrojo se pueden manifestar bandas asociadas a prácticamente todos los compuestos moleculares[55].

Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Una vibración de tensión supone un cambio continuo en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos y las vibraciones de flexión se caracterizan por un cambio en el ángulo entre dos enlaces (figura 25[57]). Como caso aparte en una molécula que contiene más de dos átomos, son posibles todos los tipos de vibraciones, además se puede producir una interacción o acoplamiento de las vibraciones si estas involucran enlaces con un mismo átomo central[57].

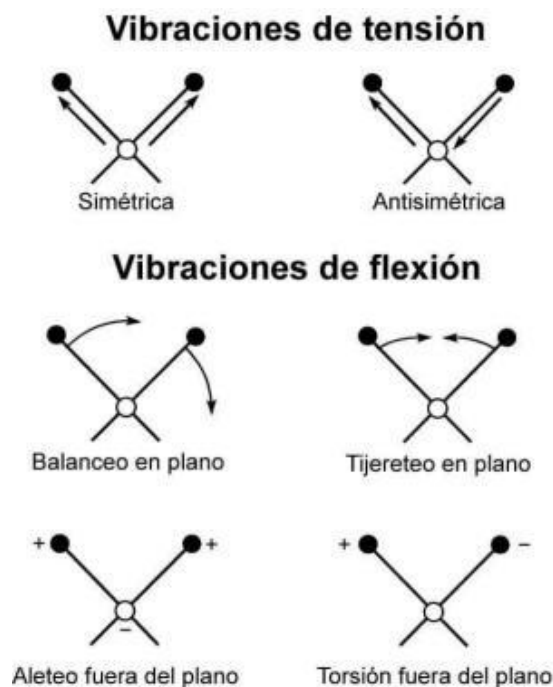


Figura 25. Tipos de vibraciones en IR

Respecto a la presentación de las gráficas, es normalmente utilizado que en el eje de las ordenadas se presente una escala lineal de la transmitancia y en las abscisas una

escala lineal de número de onda en unidades de cm^{-1} (Figura 26). La presencia de absorción de agua y CO_2 en la atmósfera durante la preparación de la muestra puede llevar a conclusiones erróneas, por lo tanto, es importante tener esto en cuenta[58].

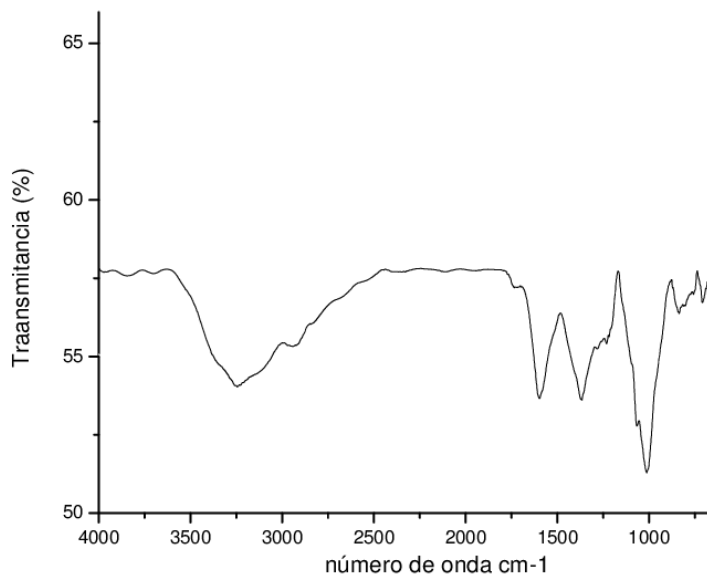


Figura 26. Transmitancia (%) vs Número de onda cm^{-1} .

Para el caso de estudio se utilizó el equipo Shimadzu modelo IRTracer-100 donde se utilizó los siguientes parámetros; Rango: $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$, Resolución: 4 cm^{-1} , teniendo en el caso de la cáscara de cacahuate un total de 80 barridos, para la ceniza y el cemento un total de 64 barridos.

3.3.9. Termogravimetría (TGA)

El análisis termogravimétrico es la técnica mediante el cual se mide una propiedad física de una muestra en función de la temperatura, fundamentalmente consiste en ir calentando la masa de una muestra en una atmósfera controlada donde será sometido a una rampa de temperatura. De esta manera es posible registrar las pérdidas de masa debido a la evaporación de agua, descomposición, sublimación, desorción, pirolisis o descarboxilación. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica[57, 59].

Existen condiciones que pueden afectar el proceso de ensayo[60], como son:

- La atmosfera en la que se realiza el análisis, debe ser inerte y no afectara a las reacciones que pueden transcurrir en el material.
- La velocidad de calentamiento influye en el acercamiento o alejamiento de los picos.
- La cantidad de muestra y el grado de pulverización de la muestra.
- La naturaleza del crisol.

Para esta investigación se usó el equipo PerkinEimer modelo STA6000, las condiciones de ensayo fueron: el rango de temperatura de 20 a 800°C (CC), 30-800°C (CBCA y CM40), velocidad de 10°C/min y usando gas nitrógeno. La muestra fue analizada en polvo en este caso.

3.4. ETAPA 3: TRATAMIENTOS AL BIO-AGREGADO

3.4.1. Tratamiento de Hornificación

El tratamiento de hornificación es un tratamiento físico, el cual consiste en proporcionar ciclos de humedecido y secado al Bio-Agregado de aquí en adelante la cáscara hornificada recibirá la nomenclatura (CH). Para este caso se realizaron 10 ciclos y la metodología fue la siguiente:

- I. En un recipiente se coloca la cáscara (figura 27).
- II. Se agrega agua hasta cubrir la cáscara por completo y se deja reposar durante 3 horas, debido a la naturaleza del agregado cada 30 minutos se agita para homogenizar.
- III. Finalizadas las 3 horas, se filtra la cáscara, liberándose por completo del agua.
- IV. Se coloca la cáscara en una charola e inmediatamente se mete al horno a una temperatura de 80°C.
- V. Después de 18 horas se retira dejando enfriar por media hora para evitar cualquier choque térmico.
- VI. Se repite del paso I al V hasta completar los 10 ciclos.
- VII. Se almacena en bolsas herméticamente selladas.



Figura 27. Colocación de la cáscara en charolas.

3.4.2. Tratamiento con Cal Viva

Se utilizó este tratamiento con la finalidad de proteger y estabilizar los componentes de la cáscara, es un proceso en el cual se genera una reacción exotérmica por lo tanto es importante tener el equipo y precauciones necesarias, la cáscara con cal viva se presenta con la abreviación (CQ). El proceso experimental que se implementó fue el siguiente:

- I. En un recipiente con tapa hermética se colocó 1 kilogramo de cáscara
- II. Para poder ayudar a la cal a impregnarse con la cáscara se molió en un mortero hasta tener partículas relativamente finas.
- III. Se agrega por cada kilogramo de cáscara 1.2 litros de agua que corresponden a la cantidad de agua que puede absorber la cáscara.
- IV. Se coloca la tapa y se agita por 2 minutos.
- V. Inmediatamente se colocan 750 gramos de cal viva y se sella rápidamente.
- VI. Se agita para lograr la homogenización durante 5 minutos.
- VII. Se deja reposar durante 48 horas para que la cal se apague.
- VIII. Se almacena en bolsas herméticamente selladas.

3.4.3. Tratamiento mixto.

Con la primicia de que cada tratamiento mejora por sí solo el comportamiento de la cáscara en el concreto, se propuso utilizar un tratamiento mixto con la idea de que la mejora será aún mayor, de este momento adelante se le da la nomenclatura de (CM). El procedimiento es prácticamente el mismo, primero se hornifica la cáscara completando los 10 ciclos y después se procede a realizar el tratamiento con cal viva, aquí la única diferencia es la cantidad de agua a añadir, ya que la cáscara hornificada ocupa de más agua para absorber en el mismo lapso de tiempo, en este caso fueron 1.4 litros por cada kilogramo de cáscara. Se almacena la cáscara en bolsas herméticas para su uso más adelante.

3.5. ETAPA 4: FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES

Para poder desarrollar la mezcla, primero se definieron los parámetros de dosificación, estos fueron la relación agua/cemento (a/c) y Bio-Agregado/cemento (b/c) para poder obtener las cantidades de material a utilizar. La metodología de fabricación de la mezcla se relaciona con los tiempos de mezclado, así como los tiempos de curado. Las dimensiones y tipos de especímenes a elaborar se definen de acuerdo a los ensayos a realizar.

3.5.1. Dosificación de la mezcla.

Para la dosificación de la mezcla se buscaron las relaciones a/c y b/c para poder realizar el diseño, Mahn [61], en su tesis resumió diversos concretos vegetales que se habían desarrollado hasta ese momento, encontró que entre más denso sea el material menos contenido de este debía haber dentro de la matriz, de igual manera se percató que la mayoría de los autores tenían la relación de que entre más baja la relación b/c más alta es la relación a/c , llegando a mostrar relaciones a/c de hasta 2.

Por lo tanto, se optó por empezar con las mismas relaciones que Mahn, teniendo 0.67 de a/c y 0.43 de b/c , en primera instancia la densidad de la cáscara es más baja que la del cáñamo, de aquí se realizó el primer ajuste, dejando la relación b/c con un valor de 0.30, quedando establecido este valor para todas las mezclas. Con la primera mezcla se vio que esta no tenía una trabajabilidad incluso con el uso de un aditivo

reductor de agua, por lo tanto, se propuso realizar un segundo ajuste aumentando la relación a/c al valor de 0.75.

En total se fabricarán 13 muestras diferentes, las variables a considerar son en este caso los tratamientos para la cáscara, teniendo 4 variables; sin tratamiento (M/ST), tratamiento de hornificación (M/H), tratamiento químico (M/Q) y el tratamiento mixto (M/M). La cantidad de CBCA a reemplazar agrega dos variables más para cada variable anteriormente mencionadas, que corresponden a los porcentajes reemplazados de cemento, el primero será del 20% y el segundo será del 40%. La mezcla que falta es la mezcla de referencia, la cual se elaboró utilizando la relación a/c establecida, además como se aprecia en la tabla 9 se usó el aditivo reductor de agua, siendo este del 2.5% respecto a la cantidad de cementante total. Por lo tanto, las dosificaciones utilizadas son las que se presentan en la tabla 9, estas están descritas por metro cubico utilizado.

Tabla 9. Dosificación para cada muestra por m³ de mezcla.

Muestra	Cáscara (Kg)	AP (L)	Cemento (Kg)	Ceniza (Kg)	Aditivo (L)	AT (L)
M/R	-	-	524.02	-	-	393.02
M/ST	157.21	95.24	524.02	-	13.10	393.02
M/STC20	157.21	95.24	419.22	104.80	13.10	393.02
M/STC40	157.21	95.24	314.41	209.61	13.10	393.02
M/H	157.21	89.68	524.02	-	13.10	393.02
M/HC20	157.21	89.68	419.22	104.80	13.10	393.02
M/HC40	157.21	89.68	314.41	209.61	13.10	393.02
M/Q	157.21	25.06	524.02	-	13.10	393.02
M/QC20	157.21	25.06	419.22	104.80	13.10	393.02
M/QC40	157.21	25.06	314.41	209.61	13.10	393.02
M/M	157.21	11.89	524.02	-	13.10	393.02
M/MC20	157.21	11.89	419.22	104.80	13.10	393.02
M/MC40	157.21	11.89	314.41	209.61	13.10	393.02

Nota: AP = Agua de preabsorción, AT = Agua total.

3.5.2. Fabricación y colocación de la mezcla.

Teniendo la dosificación realizada se procede a la fabricación de cada mezcla, realizando los ajustes en volumen requerido para los especímenes, el equipo utilizado

fue una mezcladora Hobart modelo N-50 con 3 velocidades, el procedimiento para la realización es el que se presenta en la tabla 10.

Tabla 10. Pasos y tiempo de mezclado.

Tiempo	Descripción	Tiempo acumulado
-	Colocación de la cáscara en la mezcladora.	0 min
1 min	Homogenizar la cáscara.	1 min
1 min	Agregar el agua de preabsorción.	2 min
1 min	Homogenizar.	3 min
1 min	Agregar el cemento.	4 min
2 min	Homogenizar.	6 min
1 min	Agregar el aditivo mezclado con el agua.	7 min
4 min	Homogenizar a velocidad media.	11 min

3.5.3. Llenado de especímenes.

Como se comentó anteriormente los especímenes dependen de las pruebas a realizar, por lo tanto, se determinó que serían cubos de 5x5x5 cm para resistencia a compresión y cilindros de 10 cm de alto por 5 cm de diámetro para la conductividad térmica. Se estableció que por cada edad a ensayar se debe tener cuatro especímenes, por lo tanto, se elaboran un total de 12 cubos y 12 cilindros (figura 28).



Figura 28. Presentación de especímenes a elaborar.

El llenado de los especímenes se realizó con lo establecido por la ASTM-C109 en el caso de los cubos, donde indica que el llenado debe completarse en no más de 2 minutos y 30 segundos después de terminar de mezclar. Se deben colocar dos capas a la mitad del volumen en todos los comportamientos del molde. Se debe apisonar la mezcla de cada cubo en 4 rondas de 32 golpes en aproximadamente 10 segundos, cada ronda debe ser cambiando el ángulo del apisonamiento, esto se ilustra mejor en la figura 29. Se debe completar un cubo antes de pasar al siguiente, al final se procede a dar un ligero acabado con el propósito de que no se vea alguna aspereza.

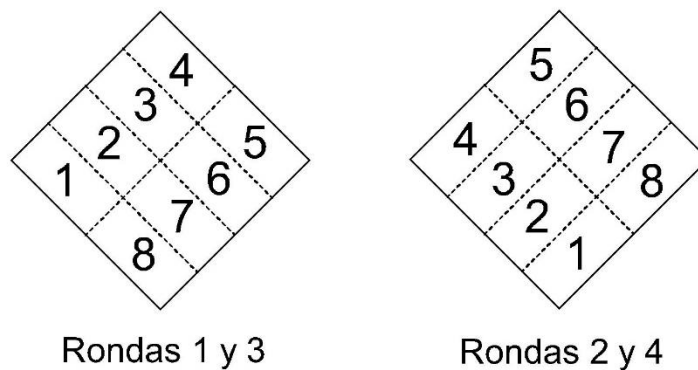


Figura 29. Forma de apisonar el llenado de los cubos.

En el caso de los cilindros esto se ajusta los procedimientos indicados por la ASTM-C31, se llena en 2 capas varillando 25 veces por golpe, con una varilla de 1/8" y dando 8 golpes por lado, dando el acabado correspondiente. Ambas muestras se protegen de la liberación de humedad por medio de colocación de plástico, apretándolo con ligas de hule, estas se dejan por 24 horas en condiciones de laboratorio.

3.5.4. Curado

Pasadas las 24 horas se procede a desmoldar los especímenes, en este caso debido a la naturaleza del concreto, se optó por usar una membrana de curado (descrita en la sección 3.2). La aplicación de la membrana se realizó de acuerdo a lo indicado por el fabricante, se aplica una primera capa con brocha o aspersor, se esperan 24 horas y se aplica la segunda capa y se vuelven a esperar 24 horas para después almacenarlas hasta el momento de su ensayo.

3.6. ETAPA 5: REALIZACIÓN DE ENSAYOS A ESPECÍMENES

Como parte fundamental del proyecto, los ensayos representan los valores de los resultados para poder evaluar el funcionamiento de la matriz. Las pruebas realizadas en estado fresco fueron: medición de fluidez; en estado endurecido: resistencia a compresión, densidad, conductividad térmica, FRX, DRX, FTIR y TGA. Las edades ensayadas para las primeras dos pruebas fueron a los 28, 56 y 91 días. Para las pruebas de microcaracterización fueron las mismas edades; de los especímenes ensayados de resistencia a compresión se tomaron aproximadamente 10 gramos y fueron puestos en alcohol isopropílico, para detener el proceso de hidratación del concreto, cumpliéndose 24 horas se retiró el alcohol isopropílico y se colocó la muestra en el horno a 60°C durante 24 horas.

Después de retiradas las muestras del horno, se procedió a insertarlas en el molino Herzog modelo HSM-50, la molienda constó de un ciclo de 2 minutos para reducirlo a polvo y así pudieran ser analizadas.

3.6.1. Medición de fluidez.

La fluidez es uno de los parámetros que indica la trabajabilidad de la muestra la normativa ASTM-C1437 se encarga de proporcionar el método para el cálculo, en este caso se realiza la prueba para tener parámetros de referencia de cómo se comporta el concreto, el procedimiento consiste en lo siguiente:

- I. En una mesa de fluidez previamente limpiada se coloca el molde de forma cono truncado.
- II. Dentro del molde se coloca una capa de aproximadamente 25 milímetros se apisona 20 veces, asegurándose de dejar una capa uniforme.
- III. Llenar lo restante del molde repitiendo el paso II, esta vez se debe asegurar una superficie enrasada.
- IV. Inmediatamente se retira el molde y se procede a girar el mecanismo de la mesa 25 veces en 15 segundos.
- V. Terminado el proceso se miden cuatro diámetros sugeridos por las líneas de referencia de la mesa.
- VI. Calcule la fluidez con la formula siguiente:

$$Fluidez = \frac{D_{Promedio} - 10.16}{10.16} \times 100$$

donde: D = diámetro y 10.16 es el diámetro inferior del molde truncado.

3.6.2. Densidad.

La densidad fue calculada en los cubos antes de ser ensayados, se tomaron 3 mediciones con un vernier de cada lado del cubo para calcular el volumen (m^3) y luego se procedió a pesarlo en la báscula (Kg), anotando los valores. La densidad se calculó con lo siguiente:

$$D = \frac{P}{V}$$

3.6.3. Resistencia a compresión.

Como ya se mencionó las edades de ensayo son a los 28, 56 y 91 días, al momento de ensayar se permite una tolerancia de ± 12 horas para realizar el ensayo, la normativa ASTM-C109 indica que la velocidad de carga debe ser de 900 a 1800 N/s, sin embargo, en este caso se redujo la velocidad a 450 N/s, ya que la situación de los concretos vegetales no es la misma que un mortero, el ensayo se realizó en la máquina universal INSTRON 600DX, corroborando que los cabezales sean los indicados.



Figura 30. Ensayo de los cubos.

3.6.4. Conductividad térmica.

Los cilindros fabricados fueron retirados de su almacenamiento, para ser perforados con una broca de 6mm, la profundidad de la perforación debe ser de aproximadamente de 6 centímetros para poder insertar el sensor correspondiente, se utilizó equipo Meter modelo TEMPOS con el sensor RK-3. Se inserta el sensor con pasta térmica de modo que sea homogénea dentro del espécimen, se procede a correr la prueba por 10 minutos y se anotan los valores que el equipo proporciona.



Figura 31. Medición de conductividad térmica.

3.6.5. Difracción de rayos X (DRX)

Se utilizó un difractómetro de la marca Panalytical modelo Empryean, (radiación Cu $K\alpha_1$, 1.5406Å) teniendo como intervalo $2\theta = 8$ a 80° con un tamaño de paso de 0.0508714° . Los difractogramas obtenidos fueron comparados en la base de datos para encontrar el grupo de picos de las fases típicas encontradas en el material.

3.6.6. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Para el análisis de las trece muestras se utilizó el equipo Epsilon-3XL de la marca Panalytical, las muestras fueron analizadas en la condición de polvo, la obtención de estos polvos se explicó en la sección 3.6.

3.6.7. Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Las muestras de concreto fueron analizadas en el equipo Shimadzu modelo IRTracer-100 donde se utilizó los siguientes parámetros; Rango: 4000-400 cm^{-1} , Resolución: 4 cm^{-1} , para todas las muestras se realizaron un total de 140 barridos.

3.6.8. Termogravimetría (TGA)

En esta etapa de la investigación se usó el equipo PerkinEimer modelo STA6000 para la obtención de los resultados, las condiciones de ensayo fueron: el rango de temperatura de 25 a 900°C, velocidad de 10°C/min y usando gas nitrógeno. La muestra fue analizada en polvo en este caso.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CÁSCARA DE CACAHUATE

Los resultados de la cáscara se presentan por cada tratamiento utilizado, como ya se definió en la metodología experimental se utilizarán las nomenclaturas correspondientes para cada uno.

4.1.1. Tamaño de partícula

Se muestra el tamizado en general de la cáscara, en la tabla 11 se muestran los resultados del proceso donde se puede observar cómo alrededor del 40% es retenido en la malla 5, esto indica que la cáscara obtenida tiene un rendimiento de casi la mitad, en pocas palabras por cada kilogramo de cáscara estaríamos aprovechando alrededor del 60%.

Tabla 11. Porcentajes retenido, acumulado y que pasa de cáscara.

Abertura (mm)	No. Malla	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
4.00	5.00	55.13	45.94	45.94	54.06
2.36	8.00	27.30	22.75	68.69	31.31
2.00	10.00	8.03	6.69	75.39	24.61
1.18	16.00	16.80	14.00	89.39	10.61
0.84	20.00	4.53	3.78	93.17	6.83
0.60	30.00	2.80	2.33	95.50	4.50
Finos	-	5.40	4.50	100.00	0.00

En la figura 32 se aprecia una tendencia vertical que indica como hay tamaños de partícula desiguales, después se forma una línea horizontal desde las 2000 micras hasta las 600 micras, esta tendencia marca como ya hay tamaños de partícula mejor distribuidos lo cual es deseado dentro de la matriz cementante para proporcionar la cohesión y reducir los espacios, sin embargo, las partículas presentan formas irregulares lo cual puede indicar una mejor adhesión con el cemento[52, 62].

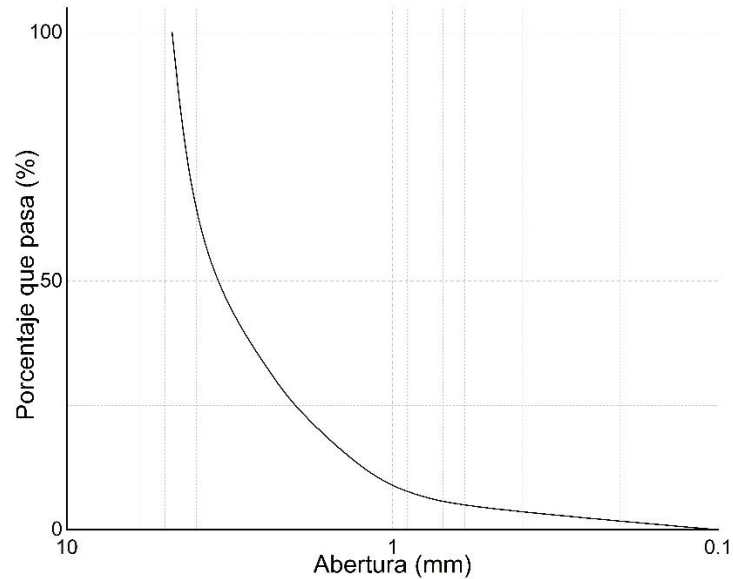


Figura 32. Granulometría de la cáscara de cacahuete

4.1.2. Densidad

Las densidades se presentan en la tabla 12, estas densidades sin tratamiento son iguales a la de otros Bio-Agregados, los cuales se observaron en la tabla 2, el incremento en la densidad en el tratamiento de hornificación se debe al que estabilizarse la cáscara este gana peso en partícula a partícula. En el tratamiento químico la inclusión de óxido de cal le agrega peso como tal a la cáscara por eso la densidad se duplica.

Tabla 12. Densidad aparente de la cáscara con diversos tratamientos.

Tratamiento	Densidad (Kg/m ³)
CC	112.04
CH	123.92
CQ	266.52
CM	263.83

Las densidades bajas pueden afectar en la resistencia a compresión, ya que se ocupa mucho más espacio, lo cual deja menos espacio para el cemento. Esto se debe a que la cáscara ocuparía más volumen y el cemento ocuparía menos y no permitiría el buen desarrollo del concreto en sus productos de hidratación[62].

4.1.3. Absorción de agua

Diferentes tiempos de sumergido fueron establecidos, 1, 15, 240, 1440 y 2880 minutos los cuales se pueden apreciar en la figura 33.

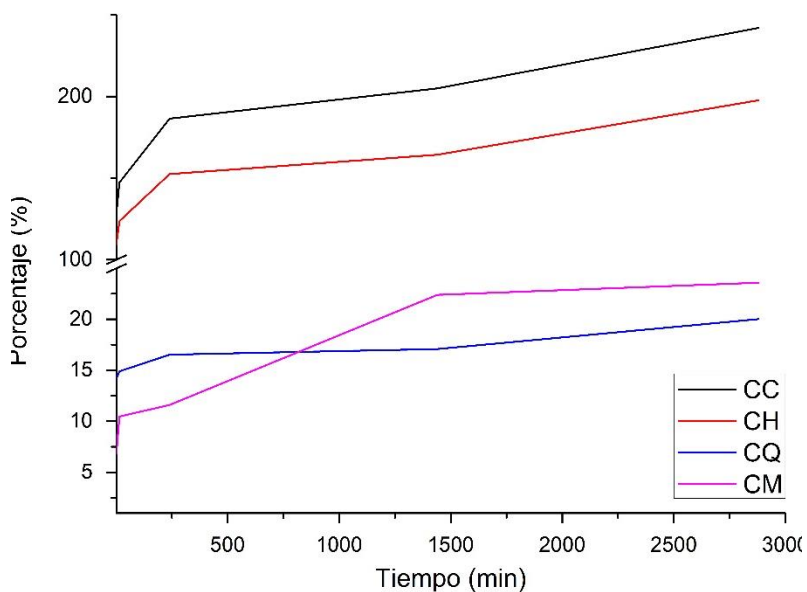


Figura 33. Absorción de agua en diferentes tiempos de sumergido.

Se corroborará que con el tratamiento de hornificación se aumenta la capacidad hidrofóbica, este se reduce hasta en un 50 por ciento a los 2880 minutos con respecto a la muestra sin tratamiento, se debe a que la celulosa se expande al entrar en contacto con el agua, con la hornificación se pierden estos compuestos químicos y hacen posible la disminución de la absorción. El tratamiento químico igual aumenta la capacidad hidrofóbica, en este caso se atribuye a que uno de los pasos de este tratamiento es saturarla con agua previamente, por ende, ya no absorbe tanta agua, una de las posibilidades es que absorbe el agua que la cal tomó prestada durante el proceso de apagado de la cal. En cuanto a la cáscara mixta, se aprecia como empieza absorbiendo menos agua, pero después incrementa, aquí entra la porosidad de la cáscara, puede que algunos poros se hayan llenado con cal por lo tanto pasado el tiempo estos dejan de ocupar ese espacio y es reemplazado por agua.

4.1.4. Conductividad térmica

Los datos mostrados en la tabla 13 demuestran que la cáscara por sí sola tiene una buena conductividad térmica, esta aumenta conforme se van aplicando los

tratamientos, se debe a que los poros se van cerrando, primero por la cal y la otra se debe a que el lavado hace que algunas partículas finas se vayan, por eso el aumento de la cáscara sin tratamiento a la hornificada es muy poca.

Tabla 13. Conductividad térmica de la cáscara con los tratamientos.

Muestra	Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia térmica (°C·m/W)
CC	0.0467±0.00065	21.41±0.2961
CH	0.0543±0.00101	18.42±0.3439
CQ	0.1008±0.00246	9.92±0.2516
CM	0.0911±0.00832	11.03±0.9824

Además, en la figura 34 podemos ver esta diferencia en cuanto a la densidad, en algunos casos como lo indica Ansell et. al [63], la mayoría de los Bio-Agregados demuestran una mayor conductividad térmica con respecto aumenta la densidad, esto se demuestra en la figura 34, la cáscara química es la que muestra una mayor densidad y por ende una conductividad más alta, esto valores de conductividad se podrán ver reflejados en el concreto.

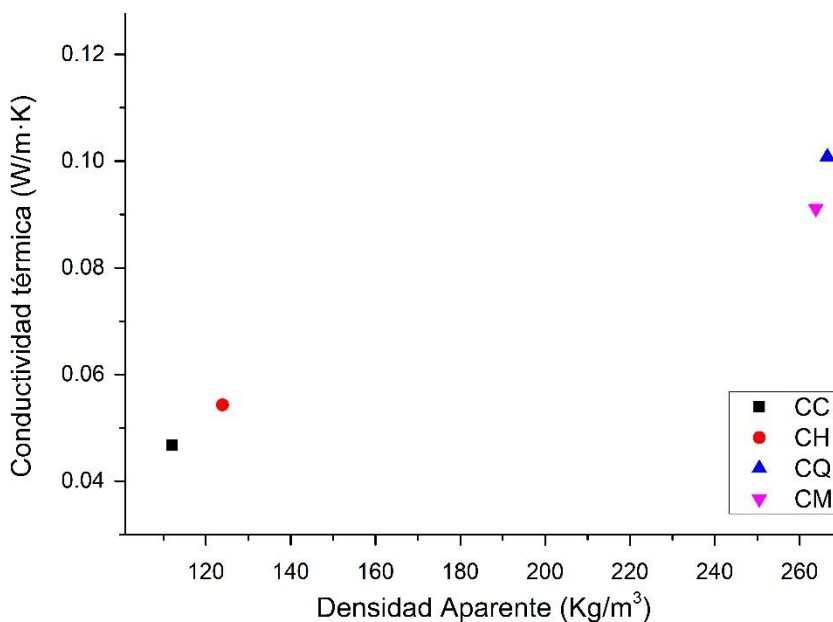


Figura 34. Conductividad térmica contra densidad aparente de la cáscara

4.1.5. Composición química

De todos los componentes calculados, los de mayor importancia como ya se han mencionado son las hemicelulosas, celulosas y lignina, sin embargo, los demás valores se calculan como parámetros de referencia. En la tabla 14 se muestran los valores obtenidos en esta investigación y se comparan con los valores de Gatani y los que se obtienen con el cáñamo que encabezó la vanguardia en cuanto a la investigación de concretos vegetales.

Tabla 14. Comparativa de los resultados obtenidos de composición química.

Componentes	Cáscara de Cacahuete	Cáscara de Cacahuete[17]	Cáñamo[9]
Humedad	8.04%±0.0033	8-10%	-
Extraíbles	4.147%±0.0005	1-2%	5.5-28%
Cenizas	2.35%±0.0016	2-4%	
Lignina	40.39%±0.0095	27-33%	4-28%
Celulosa	26.97%±0.0054	35-45%	34-62.5%
Hemicelulosa	18.55%±0.0054	23-30%	9-37%

Si realizamos una pequeña revisión de los valores obtenidos de la cáscara, la humedad dentro de ella indica que durante el proceso ha almacenado poca agua, los extraíbles y las cenizas tienen juntos alrededor de un 6% lo cual deja más porcentaje para los tres compuestos principales. El contenido de lignina indica que es muy susceptible a que el agua sea almacenada y transportada en los poros; la celulosa alrededor del 30% es un buen parámetro en cuanto a la capacidad por sí sola de la cáscara y ayudaría al concreto a ofrecer esa resistencia a esfuerzos externos; y el contenido bajo de hemicelulosa señala que es más viable proteger a la cáscara para obtener mejores resultados, rectifica el uso de tratamientos en la cáscara.

Ahora bien, la comparativa que podemos ver en la tabla 14, primero con la cáscara de Gatani, los valores obtenidos en esta investigación están por debajo ya que la cáscara proviene de dos lugares distintos, esto comprueba que las diferentes condiciones en la que es cultivado impactan en su composición química. Ahora bien, si realizamos la

comparación con la columna del cáñamo podemos observar cómo se está dentro de los rangos a excepción de la celulosa lo cual significa que ofrece menos resistencia que el cáñamo, aquí influye que el cáñamo es una planta de mayor tamaño y por ende debe tener más resistencia para soportar su propio peso, en cambio la cáscara solo se encarga de proteger a la semilla. Con todo esto, los resultados se pueden compensar seleccionando relaciones b/c que permitan compensar estas diferencias.

4.1.6. FRX sobre la cáscara de cacahuete

Se realizó la fluorescencia de rayos X sobre el polvo de cáscara de cacahuete sobre las muestras sin tratamiento y tratamiento de hornificación, se omitió la prueba sobre las muestras que incluían el tratamiento químico debido a que esta solo haría que aumentara el porcentaje de contenido del óxido de cal.

Tabla 15. Resultados obtenidos por FRX

Muestra	Compuesto (%)					
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O
CC	0.534	3.205	9.538	3.906	2.520	33.092
CH	2.193	10.564	24.966	5.979	4.373	8.133

Tabla 15. (Continuación)

Muestra	Compuesto (%)				
	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Ag ₂ O	Otros
CC	27.617	1.904	14.492	1.572	1.619
CH	25.806	1.686	12.526	1.985	1.786

En la tabla 15 se puede comprobar como los diversos óxidos que componen la muestra se ven reducidos con el tratamiento de hornificación primordialmente el óxido de potasio, el cual mantiene una baja probabilidad de provocar una reacción alcali-agregado, la cual genera expansiones en el concreto. Los demás compuestos presentes en mayoría, como lo son el óxido de calcio y el óxido de hierro pueden aportar algún beneficio al momento del desarrollo de los compuestos principales del concreto. El aumento que se aprecia en la cáscara hornificada en los contenidos de sílice y aluminio se debe sobre todo que al perder porcentaje de potasio se compensan, hay que hacer énfasis en que no significa que gana o tenga más contenido de estos compuestos.

4.1.7. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

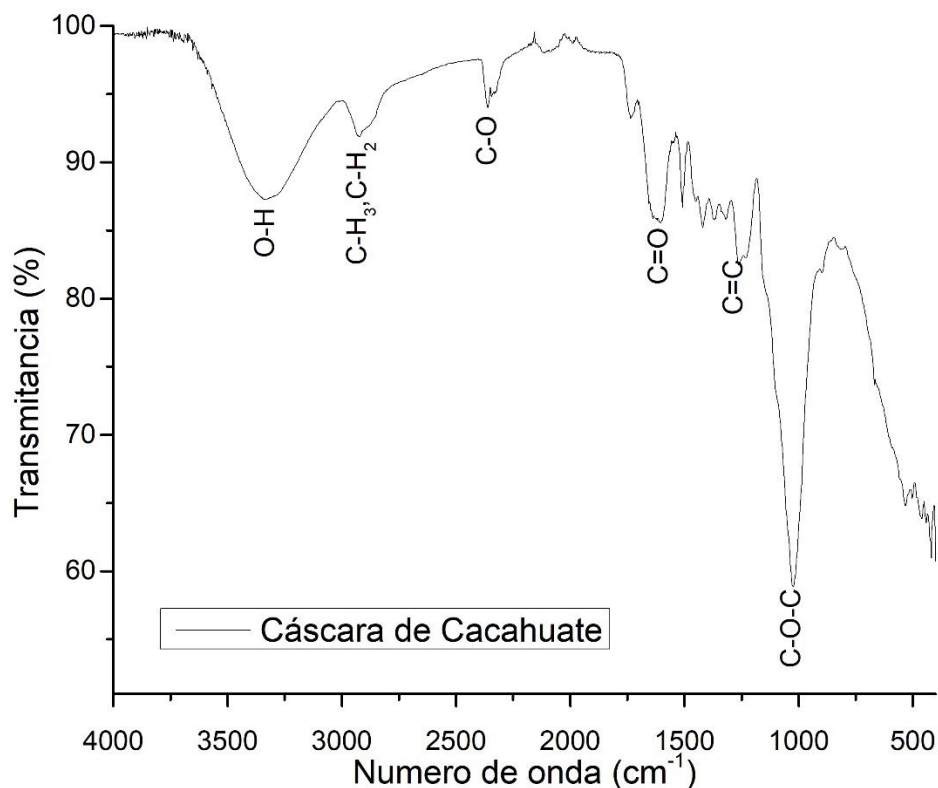


Figura 35. Resultados de análisis FTIR sobre la cáscara.

Como se observa en la figura 35, se aprecia una banda entre 3000 y 3500 cm^{-1} que corresponde a la vibración de estiramiento de los grupos O-H. Además, la banda a 2920 cm^{-1} se atribuye a los estiramientos asimétricos C-H de los grupos metilo y metileno que se encuentran en la celulosa. La banda con frecuencia de 1602 cm^{-1} puede corresponder a las vibraciones de los grupos C=O, que se encuentran presentes en la hemicelulosa. La banda en los 1240 cm^{-1} puede atribuirse a enlaces C=C de los anillos aromáticos presentes en la estructura de la lignina. Finalmente, la banda pronunciada en la región entre 1000 y 1100 cm^{-1} se podría asociar a la presencia de los enlaces C-O de los grupos éter que unen a los monosacáridos.

Señalando que la muestra ensayada fue la CC, se realizó el ensayo para la muestra CH, sin embargo, se decidió no reportar ya que no se presentaron variaciones significativas que dieran el motivo para incluirlas, por eso, se menciona solamente que son prácticamente idénticas.

4.1.8. Difracción de rayos X sobre la cáscara

Se realizó un difractograma para saber que esta presenta la fase importante en la cáscara, en este caso el único compuesto cristalino que se forma es la celulosa y es importante corroborar que está ahí.

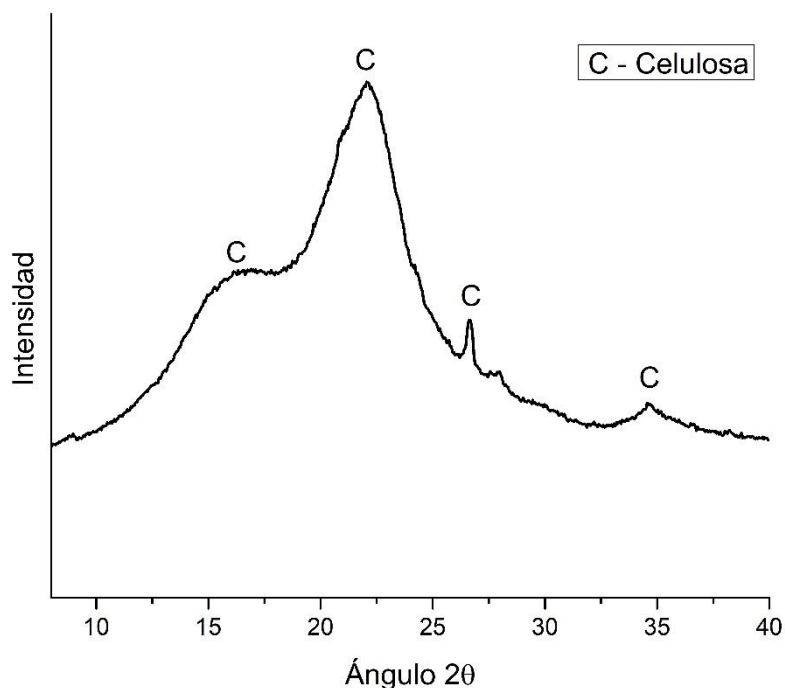


Figura 36. Difractograma de la cáscara de cacahuate.

En la figura 36 podemos apreciar cómo se forman picos pronunciados y únicos, estos pertenecen a la celulosa y se presentan en los ángulos 16° , 23° , 27° y 35° en el eje de los 2θ , la celulosa cristalina predomina en los ángulos 16° y 23° . Estos datos concuerdan con lo encontrado por otros autores.[64, 65]

4.1.9. Termogravimetría de la cáscara

La estabilidad térmica es una de las propiedades que determinan las aplicaciones del material, por lo tanto, se analiza el comportamiento en el rango de temperatura. En la figura 37 podemos observar el termograma realizado a la cáscara, se aprecian dos caídas en la curva y al final una progresión lineal, la primera curva se aprecia en el rango de temperatura de $30-100^\circ\text{C}$, lo cual representa una pérdida de masa de alrededor del 5% para ambas muestras, se debe sobre todo a la remoción de la humedad contenida dentro de la cáscara. La segunda caída, la cual representa una pérdida en masa aproximadamente del 60%, en un rango de temperatura de los $250-$

350°C para la cáscara sin tratamiento, y de 300-400°C para la cáscara hornificada, este incremento de temperatura se atribuye a que gracias al tratamiento el agua retenida en la fibras tarda más en retirarse ya que se estabilizaron las cadenas pertenecientes a la celulosas incrementando la temperatura en la cual se lleva a cabo la pérdida de masa; en esta fase se oxidan los compuestos orgánicos de la cáscara que corresponden a las celulosas, hemicelulosas, entre otros.

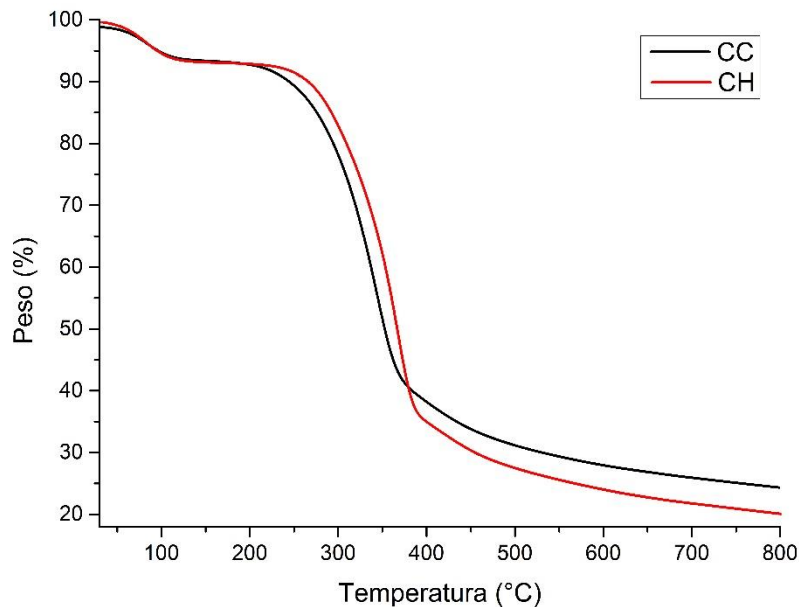


Figura 37. TGA comparativo entre las muestras tratadas.

En la última fase que corresponde a una tendencia lineal se debe a la formación de las cenizas, se puede apreciar como el ensayo llegó hasta los 800°C, se pierde aproximadamente 10% en masa de la muestra, esto se debe a un proceso de pirolisis, dejando como remanentes puros minerales[64].

4.2. CEMENTO PORTLAND

4.2.1. Tamaño de partícula

No hay una norma que indique particularmente el valor del tamaño de partícula, pero se toma en consideración el D_{50} , en este caso se obtuvo un valor de 14.36%. En la figura 38 se puede apreciar la composición en tamaño del cemento. Los valores reflejados se asemejan a lo estipulado por el fabricante y a otros cementos de naturaleza semejante.

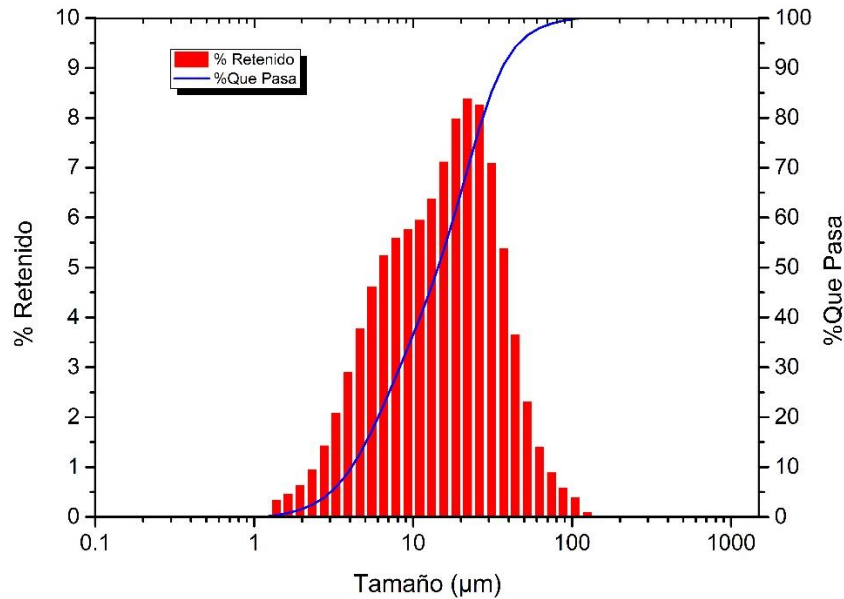


Figura 38. Tamaño de partícula del cemento (CPO40R).

4.2.2. Densidad

Otro de los parámetros importantes en los materiales es la densidad, en la tabla 16 se puede apreciar la densidad promedio calculada a partir de las densidades individuales. No hay valores establecidos, sin embargo, se asemejan a lo estipulado por el fabricante y que es típica a este tipo de cementantes.

Tabla 16. Resultados de densidad al polvo de cemento.

Muestra	Peso de la muestra (g)	Densidad de la muestra (g/cm ³)			Densidad Promedio (g/cm ³)
		1	2	3	
CM-40	105.2073	3.09	3.10	3.10	3.10

4.2.3. Fluorescencia de rayos x (FRX)

En el caso de los compuestos, estos deben cumplir con lo establecido en la norma ASTM-C150, en la tabla 13 se presentan el porcentaje obtenido por el FRX.

Tabla 17. Resultados de FRX al polvo de cemento.

Muestra	Compuesto (%)							
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Otros
CM-40	0.973	4.303	15.852	4.827	1.192	68.118	3.452	1.281

La normativa indica que los principales compuestos de referencia son el óxido de magnesio y el C_3A , primero se define en qué tipo de cemento entra el cemento que utilizamos, lo que dice la normativa es que los cementos tipos III son aquellos en los que una alta resistencia es deseada, el CPO40R tiene característica la letra “R”, indica que se desea una alta resistencia, por lo tanto, el cemento cae dentro de esta tipología.

Regresando a lo que indica la norma, dice que, el contenido de óxido de magnesio debe ser máximo del 6%, lo cual cumple, ya que en la tabla 17 podemos observar que es de 0.97%; el contenido de C_3A debe ser máximo de 15%, si lo calculamos con la fórmula que trae la normativa nos da un 5.56%, entonces el cemento cumple con lo establecido por la norma.

4.2.4. Difracción de rayos X (DRX)

Es conocido que las principales fases del cemento son las correspondientes a la Alita, Belita, Alúmina y Ferrita, por ende, es importante verificar que están presentes, en la figura 39 podemos observar la identificación de cada una.

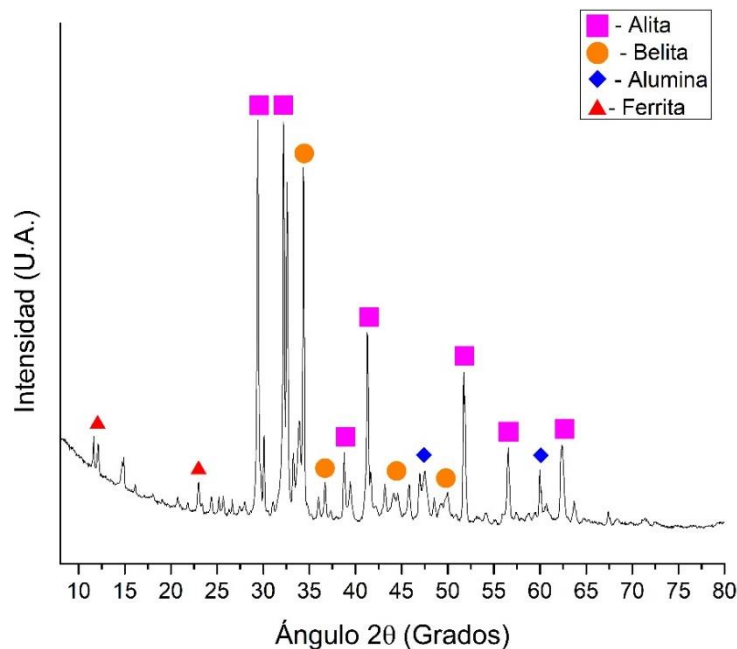


Figura 39. DRX al polvo de cemento (CPO40R)

Se pueden apreciar en la figura 39 que en los ángulos 12° y 24° está presente la fase minoritaria conocida como Ferrita; en los ángulos 47° y 60° esta la fase de Alúmina; en los ángulos 34°, 38°, 44° y 50° se encuentran las fases correspondientes a la Belita;

y en los ángulos 29°, 33°, 39°, 42°, 52°, 56° y 63° se encuentran la fase mayoritaria que tiene por nombre Alita. Esto corrobora que están presentes las cuatro fases importantes del cemento.

4.2.5. FTIR sobre el polvo de cemento

La realización de la espectroscopia confirma que enlaces están presentes en este caso, los correspondientes al cemento.

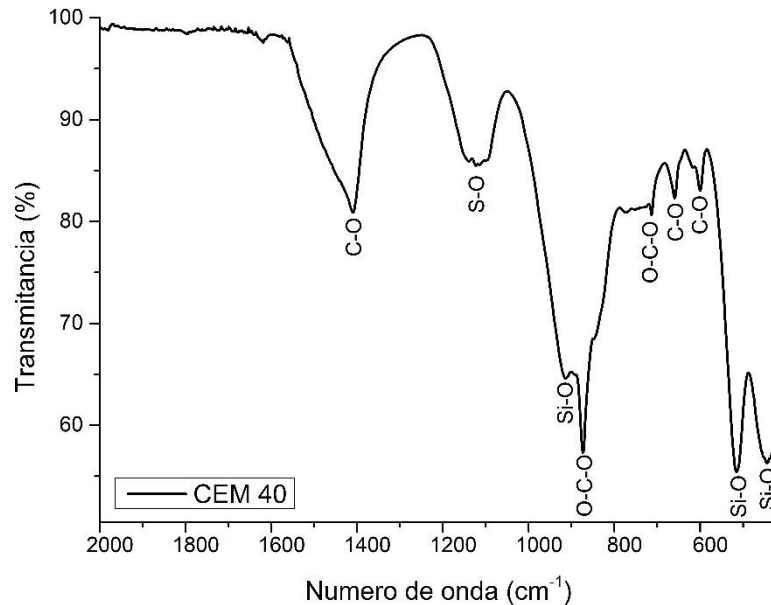


Figura 40. FTIR sobre el polvo de cemento.

En la figura 40, se pueden apreciar los resultados del ensayo. El pico presente en los 1410 cm^{-1} , corresponde a las tensiones asimétricas de los enlaces C-O del CO_3 , con el pico pronunciado a 871 cm^{-1} , es característico de las deformaciones de los enlaces O-C-O que indicaría la presencia de carbonatos como lo indica Torres-Carrasco et al.[66], además el pequeño pico que se forma en los 711 cm^{-1} confirma que este carbonato presente, sería calcita lo cual confirma Bordy et al. [67]. Ahora bien, el pico ancho que se ve en la región de los $1100\text{-}1150\text{ cm}^{-1}$ confirma la presencia de sulfatos, la presencia de CaSO_4 podría ser dihidratado, semihidratado o anhidro, esto no se puede corroborar, ya que las bandas se sobreponen en esa región, sin embargo, los picos de 660 cm^{-1} y 600 cm^{-1} corroboran la presencia de Yeso en cemento[68].

Por último, la banda cerca de los 915 cm^{-1} es asociada con las tensiones asimétricas de los enlaces Si-O de la alita o la belita. La presencia de los enlaces en el pico de 510

cm^{-1} y 440 cm^{-1} corresponde a las tensiones simétricas del enlace Si-O de los grupos SiO_4 .

4.2.6. TGA sobre el polvo de cemento

Por lo regular la termogravimetría del cemento es por así decirlo, sencillo, este enunciado se debe a que es muy poca la masa que se pierde sin embargo no deja de ser relevante lo que podemos encontrar.

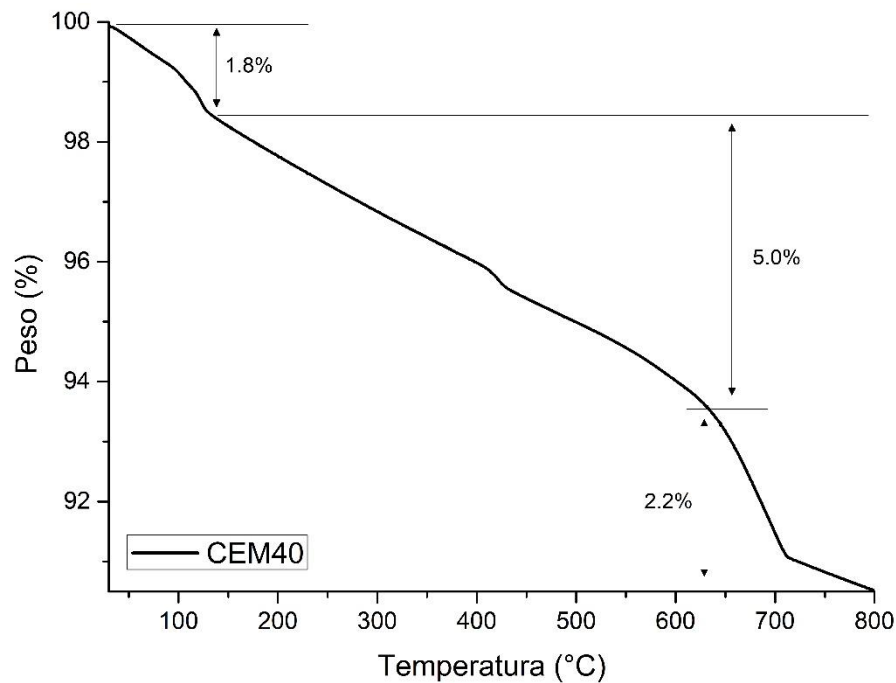


Figura 41. Resultados de TGA sobre el polvo de cemento.

Como podemos observar en la figura 41 existen 3 caídas significativas, la primera de los 30°C a los 100°C se puede atribuir a la pérdida de humedad residual y al inicio de la descomposición del yeso presente en el cemento como lo menciona Torres-Carrasco et al.[66], la segunda fase se presenta a partir de los 100°C y continúa con la descomposición del yeso y otros carbonatos que pudieran estar presentes, desapareciendo los iones H_2O , esta pérdida representa el 5% de la masa. Por último, la fase que empieza alrededor de los 600°C , es donde se presenta la pérdida del CO_2 dejando presente los minerales como lo son el carbono, el cual compone en su mayoría al cemento como lo menciona Villain et al.[69], él confirma que los carbonatos se desprenden del dióxido de carbono dejando solamente el carbono.

4.3. CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

4.3.1. Tamaño de partícula

Como ya se mencionó la ceniza tuvo el proceso extra de molienda y cribado, se buscó que cumpliera con lo establecido por la norma ASTM C618 para su uso en concreto.

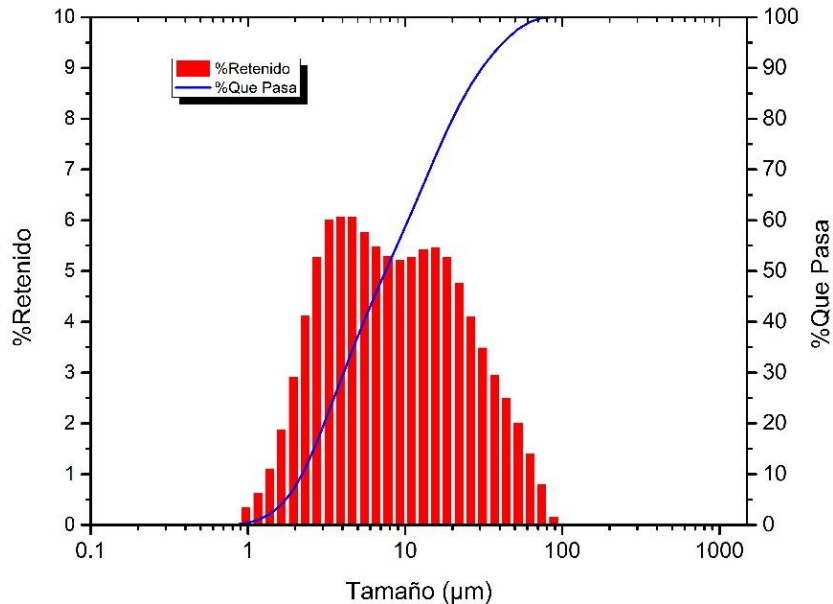


Figura 42. Grafica granulométrica al polvo de CBCA.

Debido a las características de la ceniza debe entrar en la categoría de clase N, ya que viene de un proceso de calcinación, para ello la norma indica que lo retenido por la malla No. 325 (45µm) debe ser como máximo del 34%, en la figura 42, se puede observar que lo retenido acumulado en ese tamaño de paso es del 4.38%, lo cual cumple con lo establecido por la norma.

4.3.2. Densidad

Si bien la norma ASTM C618 es un indicativo en cuanto a parámetros para el uso, no viene establecido que densidad debería tener, lo correcto es, sabiendo que sustituirá al cemento, esta tenga una densidad parecida.

Tabla 18. Densidad promedio de la CBCA.

Muestra	Peso de la muestra (g)	Densidad de la muestra (g/cm ³)			Densidad Promedio (g/cm ³)
		1	2	3	
CBCA	88.5045	2.70	2.70	2.69	2.70

La densidad de la ceniza se ve influenciada por diversos factores, como lo son la temperatura de procesamiento hasta el tipo de molienda, Yadav et al.[19] indica que los valores de densidad están entre los 2.1 g/cm³ a 2.5 g/cm³, en el caso de la ceniza utilizada da un 2.7, este valor alto se justifica ya que se cribó la ceniza hasta pasar la malla No.200. Si bien es un poco baja en relación con la del cemento, esto no causa ningún inconveniente al momento de sustituir los porcentajes.

4.3.3. Fluorescencia de rayos X sobre la ceniza

Al igual que el tamaño de partícula, la norma ASTM C618 indica valores de referencia en cuanto su composición, por eso se usó la técnica FRX.

Tabla 19. Resultados de FRX al polvo de CBCA.

Muestra	Compuesto (%)									
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Otros
CBCA	3.334	13.897	59.163	1.760	0.185	5.283	7.188	1.046	7.643	0.497

Los valores de referencia indicados por la normativa son que la suma del dióxido de silicio + óxido de aluminio + óxido de hierro debe ser mínimo del 70%, si realizamos la suma de estos tres compuestos tenemos un 80.69% lo cual cumple con lo indicado para la clase N. Otro valor es el caso de los sulfatos los cuales deben ser máximo del 4%, la ceniza destaca por tener regularmente bajos contenido de sulfatos, Tanu & Unnikrishnan[70] reportaron valores de 1.68%, es típico encontrar valores en el rango de 0.09% a 2.10%, en el caso de la CBCA de Mahuixtlán el valor es menor teniéndolo como se muestra en la tabla 19 de 0.185%

4.3.4. Difracción de rayos X sobre la CBCA

Al ser la ceniza en su mayoría SiO₂, se va a encontrar en su mayoría este compuesto en sus fases de cuarzo o cristobalita, es más común encontrar el cuarzo, pero esto dependerá de la temperatura de calcinación.

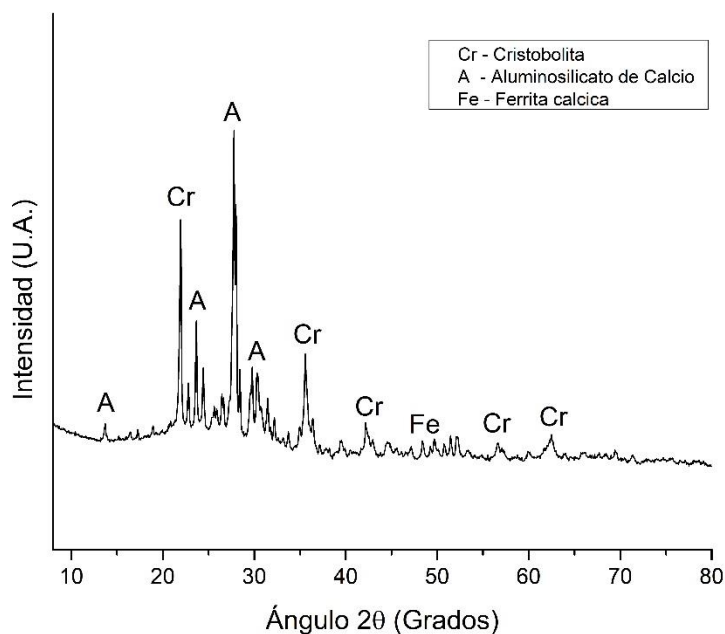


Figura 43. Resultados de DRX sobre el polvo de ceniza.

Como se puede apreciar en la figura 43, existe la presencia de la cristobalita como principal cristal formado, es común en la CBCA ya que indica que la temperatura de calcinación fue alta, además la cristobalita se forma a partir de la presencia del silicio en la planta[71, 72]. La presencia de aluminosilicatos de calcio y ferrita cálcica contribuirá a la reacción puzolánica con la presencia del agua.

4.3.5. FTIR sobre el polvo de CBCA

En el caso del FTIR para la CBCA los enlaces que se buscan son los que contemplan al silicio y al aluminio ya que son los compuestos principales como ya pudimos observar en el FRX y el DRX.

En la figura 44, podemos observar tres sencillos picos en diferentes bandas, se pueden observar las vibraciones Si-O, la banda fuerte a los 980 cm^{-1} indica la presencia de estiramientos asimétricos correspondientes a los enlaces de silicio, la banda 580 cm^{-1} y el pico presente a los 530 cm^{-1} muestran que la cristobalita está presente y concuerda con lo obtenido en el análisis de DRX [73, 74].

El pico de los 800 cm^{-1} corresponde a las vibraciones del enlace Al-O[75], esto explica la formación del aluminosilicato de calcio encontrado en el análisis de DRX.

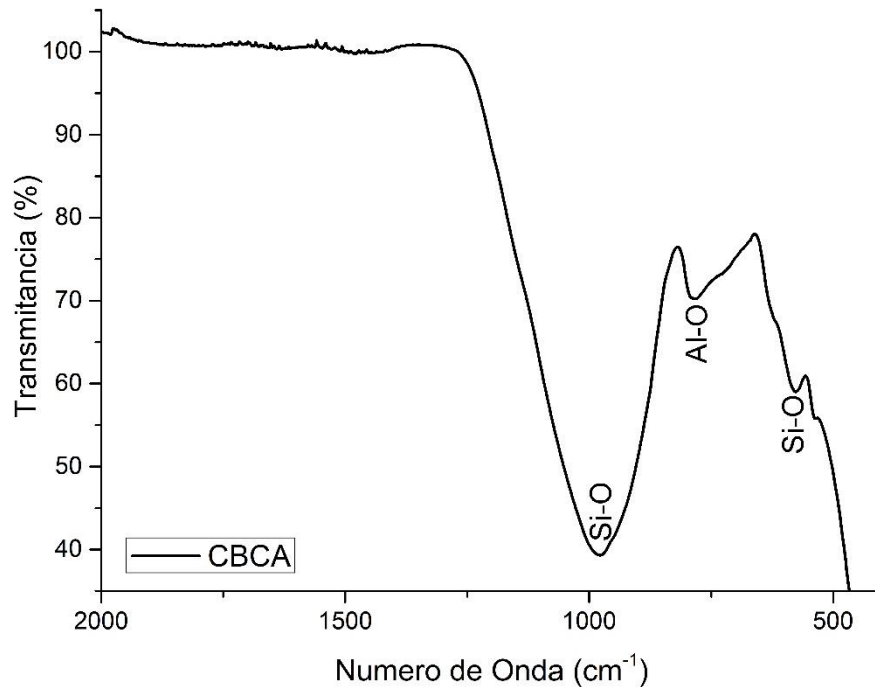


Figura 44. Resultado de FTIR de la CBCA.

4.3.6. TGA sobre la CBCA

Como la ceniza ya viene de un proceso de 800°C es muy posible que no sea de gran significado los resultados, sin embargo, el análisis se corre para poder comprobarlos.

Como se observa en la figura 45, hay una sola caída apreciable, donde se puede ver como en los primeros 300 grados se va toda la materia orgánica, esta llega a una temperatura de hasta 500°C, a partir de esta temperatura sigue bajando la línea donde se relaciona a la descomposición de los carbonatos y, por último, la bajada de los 620 °C es debido a donde se empieza a disolver el CO₂[76].

Esta línea pronunciada se debe sobre todo a que como se mencionó al principio ya pasó por un proceso de calcinación durante la obtención del material, es una combinación de la volatilidad de la materia orgánica.

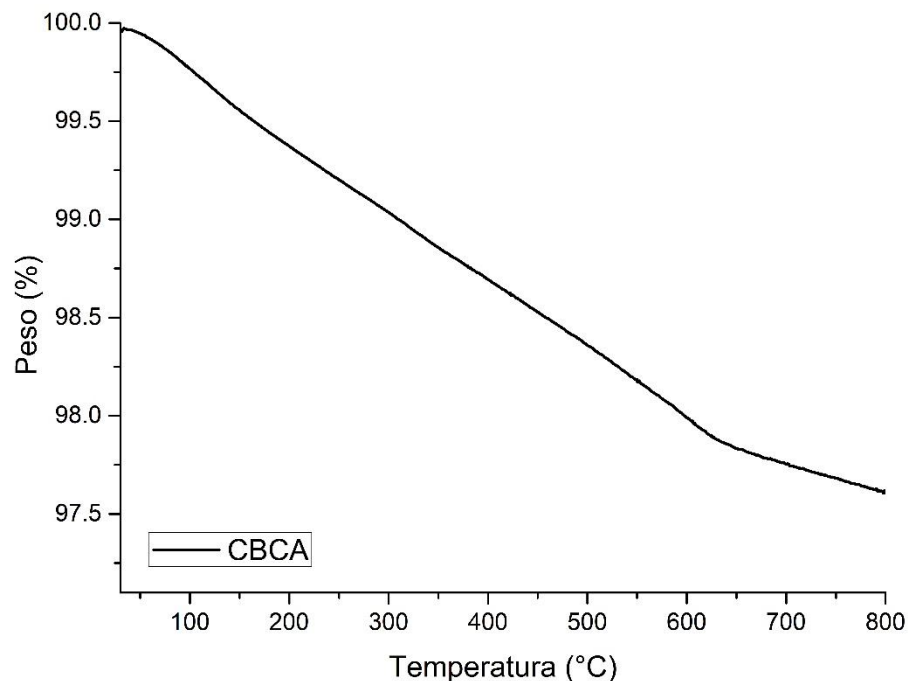


Figura 45. Resultados de TGA de la CBCA.

4.4. CONCRETO VEGETAL

4.4.1. Fluidéz

Se evaluó la fluidez para todas las mezclas, como tal la fluidez en mezclas con cáscara de cacahuete no han sido medidas y por lo tanto no se tienen referencias de esto, se busca que con los resultados medidos se establezcan referencias. En el caso de la ceniza se tiene investigado que entre más porcentaje de ceniza se sustituya existirá un decremento en la fluidez, ya que al ser menos densa requiere de más agua a como si fuera una mezcla de puro cemento [70, 77, 78].

En la figura 46 podemos observar como en la muestra sin tratamiento existe desde un principio una fluidez baja, esto se debe a que la cáscara es un material con densidad baja lo que permite que el agua sea fácilmente sustraída por ella, lo que impide que la mezcla tenga un comportamiento manejable, el ingreso de la CBCA al 20% no presenta ningún efecto, esto se debe a que la ceniza se adueña primero del agua de reacción permitiendo que trabaje como cementante, por otro lado el ingreso del 40% de CBCA demuestra que la porosidad de las partículas de la ceniza disminuye este parámetro y al ser una cantidad grande, termina por absorber más agua de reacción de la mezcla.

La mezcla con tratamiento de hornificación permite que haya una mejora alrededor del 15% con respecto a las muestras sin tratamiento ya sea con 20% o con 40% de sustitución esta mejora se atribuye porque al perder la cáscara su capacidad de absorción deja disponible más agua de reacción tanto para el cemento como para la ceniza.

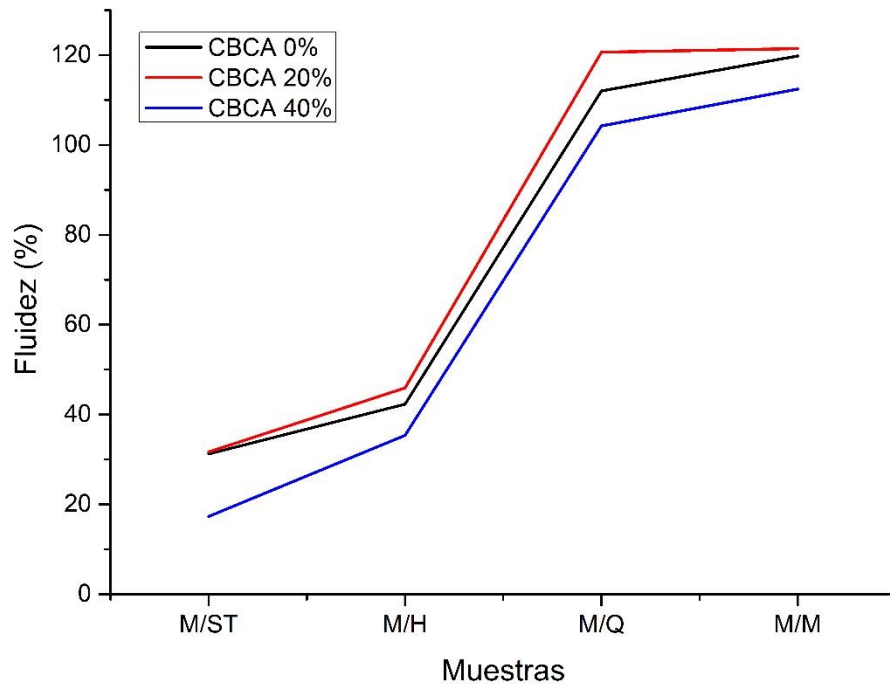


Figura 46. Fluidez de las muestras elaboradas.

Para la muestra M/Q se puede observar como la fluidez presenta un incremento considerable llegando a obtener la trabajabilidad que tienen las mezclas de morteros y tal cual como lo indica a la normativa ASTM, esta mejora se ve para las tres variables viendo la tendencia lineal, el aumento de la fluidez en esta muestra se atribuye sobre todo a que la presencia de la humedad liberada por el tratamiento permite que la cáscara ya no absorba agua y por lo tanto, haya más agua disponible además la presencia de los hidróxidos de calcio permite que la ceniza obtenga el comportamiento de un cemento y esta no tome parte del agua de reacción para llevar a cabo su proceso de reacción. Esta aseveración no puede ser afirmada hasta ver que en realidad se están formando los compuestos correspondientes sin interferir con los formados por el cemento.

Por último, para la muestra M/M se observa como existe una ligera mejora con respecto a la muestra M/Q lo cual se esperaba al ser una mezcla mixta de tratamientos, se puede concluir que presenta la mejora de la muestra tratada químicamente ya que esta eleva la fluidez hasta el 100%, la mejora es del alrededor 5%, donde actúa el tratamiento de hornificación que deja más agua disponible para la mezcla, y hace que este ligero aumento se presente. La mezcla de referencia M/R no se muestra en el grafico ya que esta presento una fluidez que desbordaba el plato de ensayo haciéndola difícil de calcular.

4.4.2. Densidad

La densidad en estado endurecido se midió para cada una de las muestras y las variables. En la figura 47, podemos observar cómo hay una tendencia igual para todas las muestras, la densidad promedio de todas sería de 1200 Kg/m³, las variaciones que se pueden observar se pueden deber alguna cantidad de agua que se evaporó sin embargo se consideran despreciables. La muestra de referencia es la línea roja que se puede observar, los valores del concreto en cualquiera de sus tratamientos están por debajo.

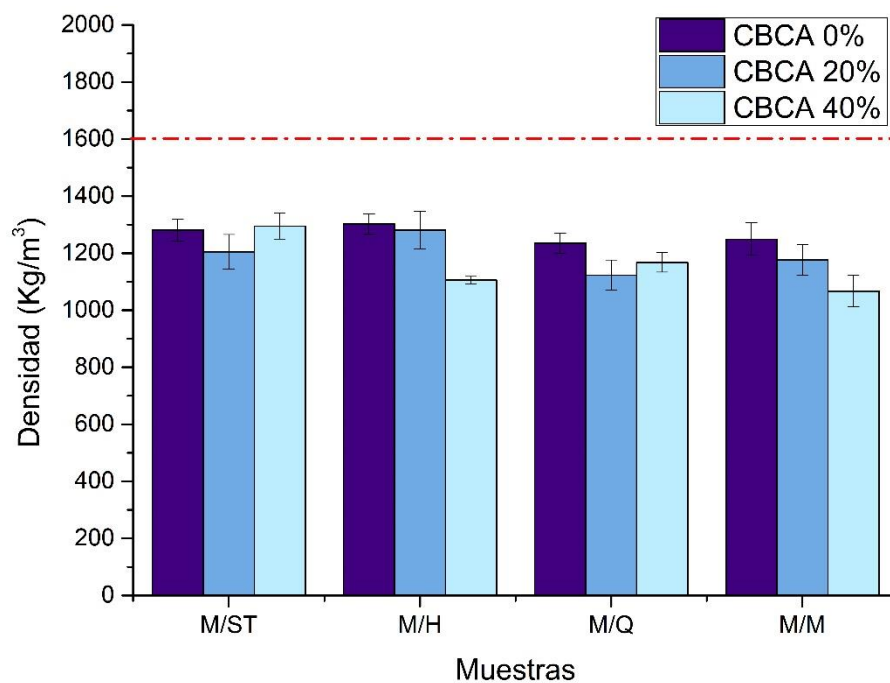


Figura 47. Densidad de las muestras en estado endurecido.

El hecho que la densidad este por debajo no es un indicativo de descarte, el conjunto de propiedades es uno de los parámetros que se debe tener en cuenta. En la tabla 20 podemos observar un conjunto de piezas que tiene que ver con la aplicación que se le busca dar a la mezcla creada, si bien no compite con un bloque de concreto se puede comparar con un tabique de barro recocido y no muy lejos del tabicón, como se mencionó esto no influye a un descarte o aprobación de la mezcla.

Tabla 20. Densidad neta de piezas en estado seco.

Tipo de pieza	Valores en (Kg/m³)
Tabique de barro recocido	1300
Tabique de barro con huecos verticales	1700
Bloque de concreto	1700
Tabique de concreto (tabicón)	1500

Nota: Adaptada de las normas técnicas complementarias mexicanas.[79]

Por otro lado, podemos compararlo con concretos ligeros, estos concretos rondan en densidades de 200 - 1900 Kg/m³[80], así que se podría considerarse con la característica de ser ligero también.

4.4.3. Resistencia a la compresión

Los valores de resistencia a compresión (RC) dieron resultados mejores de lo esperado, se pudo comprobar que la aplicación de tratamientos mejora, en este caso, la propiedad de compresión, en la figura 48, podemos observar como la muestra sin ningún tratamiento desarrolla el menor valor a compresión llegando a ser 1.00 MPa, este valor se ve comprometido aún más cuando se agrega la CBCA al concreto, entre más sea el porcentaje más disminuye, la poca resistencia a compresión obtenida se debe los azúcares presentes en la cáscara de cacahuate. La muestra con tratamiento de hornificación es la que obtuvo los mejores valores, llegando hasta 6.75 MPa, esto se debe a como ya se comentó, a la pérdida de capacidad de absorción de agua y los extractos que se pierden durante el lavado, de igual manera se comprueba que el agregar CBCA sigue afectando al desarrollo de esta propiedad, por lo tanto, la cáscara no beneficia en absoluto a la ceniza, pero tampoco la afecta, llegando a concluir que la interacción entre ellas es nula dentro de la matriz cementante.

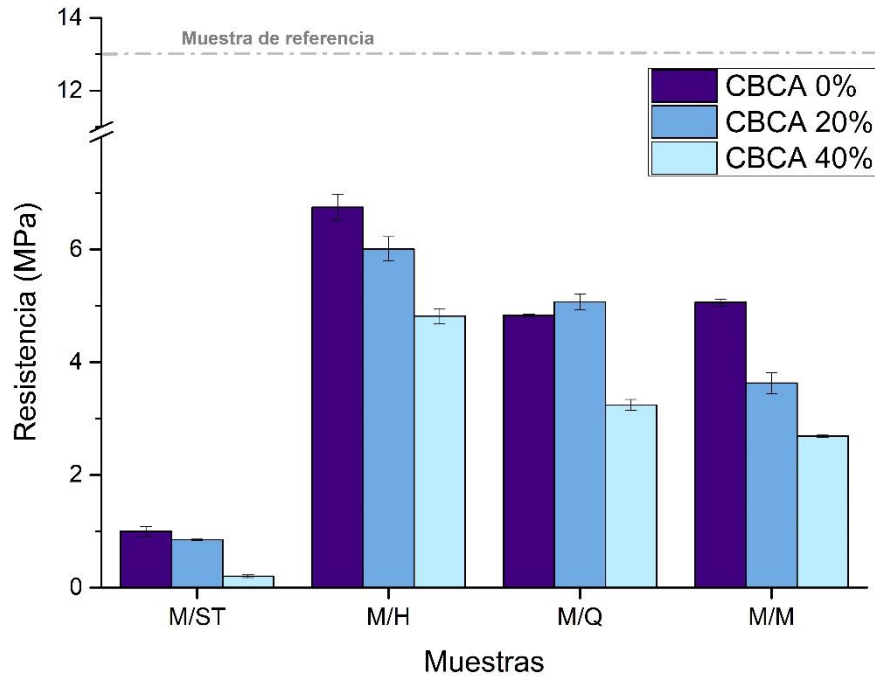


Figura 48. Resistencia a compresión a 28 días

Los valores para la muestra M/Q son alrededor de los 5.00 MPa, en esta parte se cumple con el objetivo de proteger a la cáscara y que gane capacidad hidrofílica, pero como podemos observar en la figura 48, no es del todo eficaz, puede que los azúcares presentes dentro de la cáscara estén interactuando para evitar que se generen compuestos químicos que influyen, lo cual sugiere que el tratamiento ayuda, pero al compararlo con el de hornificación queda por debajo. En esta muestra es donde sucede algo curioso la muestra con sustitución del 20% de CBCA desarrollo mayor resistencia que la que no tiene, a falta de analizar microestructuralmente, esto podría originarse debido a que hay presente hidróxido de calcio, la ceniza actuaría primero con este compuesto antes que con el cemento, generando mayores compuestos que se encargan de la resistencia, para la muestra con el 40% el hidróxido de calcio no sería suficiente para seguir desarrollando esta mejora.

Por último, la muestra M/M desarrolla, en la muestra sin ceniza, una ligera resistencia mayor que la muestra química pero no alcanza a desarrollar más que la muestra M/H, se repite el mismo comportamiento cuando se agrega ceniza. Ninguna de las muestras se acerca a lo mostrado en la muestra de referencia llegando a desarrollar prácticamente el 50% como máximo de esta referencia.

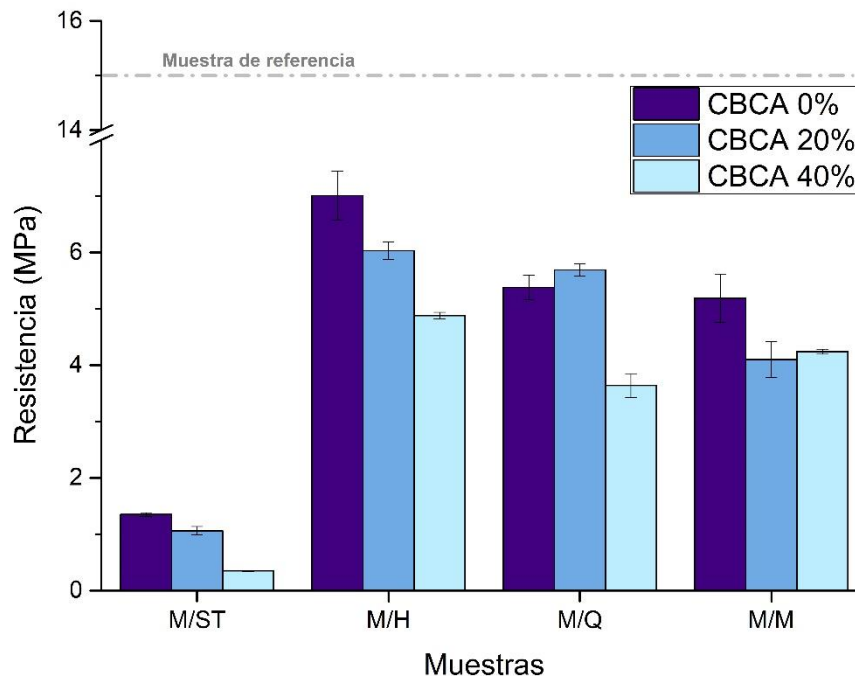


Figura 49. Resistencia a compresión a 56 días.

En la figura 49, podemos observar las resistencias obtenidas a los 56 días, la tendencia es prácticamente la misma en cuanto al valor de resistencia encontrado para cada porcentaje de sustitución, si comparamos con lo mostrado a 28 días podemos ver como la muestra M/ST sigue desarrollando resistencia a compresión llegando a valores de 1.35 MPa para la muestra sin ceniza, 1.06 MPa para a muestra con 20% de CBCA y 0.35 MPa para la muestra con 40%, dando un promedio del 30% de resistencia ganada, para las muestras hornificadas el desarrollo fue de alrededor de 3%, para la muestra M/Q el desarrollo es de un 10% más. Es en la muestra M/M donde se notan cambios a tomar en cuenta, con la variable 0% y 20% de CBCA se sigue mostrando el desarrollo entre el 3 y 10%, sin embargo, para la de muestra del 40% de CBCA hay un desarrollo alrededor del 40% llegando a superar a la muestra con el 20%, este incremento es algo a tomar en cuenta y se profundizara en el más adelante.

En la figura 50, se muestran los resultados a 91 días, donde se puede apreciar cómo se continúa desarrollando resistencia, si bien el propósito de ensayar a edades altas era corroborar la función de la ceniza, queda comprobado que la cáscara sin necesidad de tratamiento llega a tener un desarrollo de hasta un 50% de resistencia a compresión a esta edad, comparado con la muestra a 28 días.

Las muestras M/H siguen presentado este comportamiento lineal de ganancia habiendo en este caso un 20% desde la primera lectura a 28 días hasta los 91 días, teniendo la muestra con 0% de CBCA un resultado de 8.00 MPa siendo el más alto de esta investigación. La muestra química termina con la muestra a 20% de CBCA como la más alta, con un valor de 7.14 MPa, quedando pendiente un análisis, para saber si en verdad la presencia de hidróxido de cal ayuda a la CBCA. Por último, la muestra M/M tiene como valor más alto 6.04 para la muestra con 0% de CBCA, es interesante ver como esa pequeña variación que existía entre las muestras de 20% y 40% de CBCA ahora se invierte y la muestra con 20% es la que domina, lo cual corresponde con el comportamiento esperado del uso de ceniza.

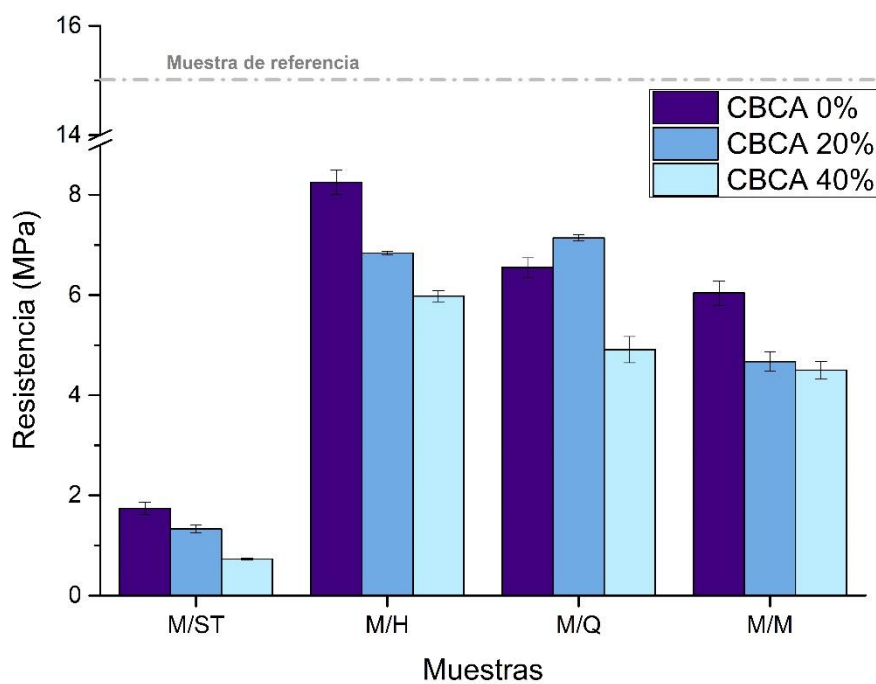


Figura 50. Resistencia a la compresión a 91 días.

Es de importancia hacer la comparativa que se hizo con la densidad, comparando los resultados con concretos ligeros que se aplican para la elaboración de bloques de concreto. En la tabla 21, se puede apreciar como con concretos que usan el poliestireno se han obtenido valores parecidos a los encontrados, al igual que como con la cáscara depende de valores de sustitución. Para tener más referencias en cuanto a este tipo de concretos, se hace la comparativa con concretos que añaden perlita y los concretos espumeados, ambos tienen las características de tener baja

densidad, con los de perlita se están dentro del rango, pero muy lejos del mayor valor obtenido, en cambio con los espumeados se está dentro de este rango y no existe mucha variación en cuanto a los límites.

Tabla 21. Resistencia a compresión de algunos concretos ligeros.

Tipo de concreto	Resistencia a la compresión (MPa)	Referencia
Poliestireno	7.85-20.77	[81]
Perlita	1.1-17.3	[82]
Espumeadado	2.33-10.27	[83]

4.4.4. Conductividad térmica

En la figura 51, se presentan los resultados de conductividad térmica, la mezcla M/R es la de referencia. los valores son altos, ya que esta mezcla es más densa que las de esta investigación, un valor alto significa que pone menos resistencia de calor por parte del material, podemos tomar como punto de partida para la comparación este valor. Las variaciones, en cuanto avanza la edad se pueden atribuir al agua almacenada.

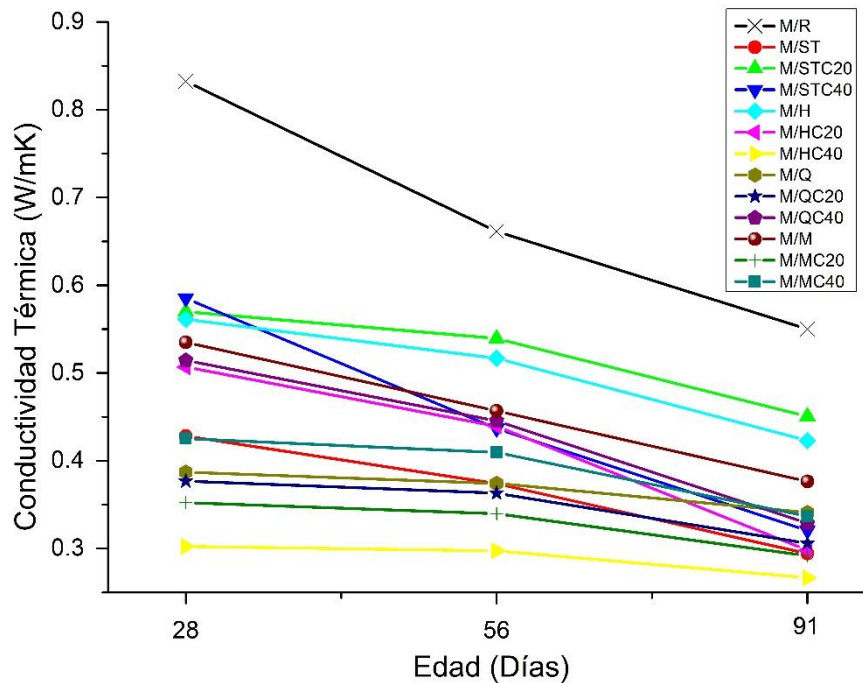


Figura 51. Análisis de conductividad térmica en las muestras.

Las muestras con mejor resultado la presentan las que tienen un porcentaje de CBCA dentro de la matriz, en este caso la M/MC40 es la que obtuvo mejores resultados siendo el valor de 0.26 W/mK, sin embargo, la mayoría de la muestra son variadas. El efecto de la interacción entre la cáscara y la CBCA da resultados variados dependiendo del tratamiento. La muestra M/ST también muestra buenos resultados demostrando que el uso de la cáscara si mejora esta propiedad, como se puede observar, el uso de tratamientos aumenta la capacidad de transmitir calor todas las muestras están por arriba de la muestra sin tratamiento.

Si comparamos las muestras M/H y M/Q las cuales obtuvieron mejores resultados de RC, se puede observar como las muestras M/Q tienen un mejor comportamiento térmico, por ende, si hablamos en una equidad de resultados podríamos optar por esta. Volviendo a realizar la comparativa en la tabla 22 podemos observar cómo, si bien, no se llegan a los valores de un concreto con poliestireno, se está dentro del rango de los concretos con perlita y los espumados, en el caso de los espumados, estos valores van de acuerdo al porcentaje de sustitución con el 100%, como en el caso del cacahuate, el valor es el de 0.14, por lo tanto, los resultados obtenidos son mejores. Al final se está ganando contra los bloques utilizados en construcción actualmente y eso es lo que se busca.

Tabla 22. Conductividad térmica de algunos concretos.

Tipo de concreto	Conductividad térmica (W/mK)	Referencia
Poliestireno	0.084	[84]
Perlita	0.13-0.57	[82]
Espumado	0.14-0.32	[83]
Block normal	1.399	[85]

4.4.5. Análisis de FRX sobre las muestras

Con las muestras analizadas, se realizó el análisis de FRX para ver, sobre todo, el porcentaje de compuestos que integran a cada una, en la tabla 23 podemos ver cada uno de estos compuestos encontrados en las muestras.

Tabla 23. Porcentaje de compuestos encontrados en las muestras mediante FRX.

	M/R	M/ST	M/STC20	M/STC40	M/H	M/HC20	M/HC40	M/Q	M/QC20	M/QC40	M/M	M/MC20	M/MC40
MgO	0.70	0.68	1.13	1.78	0.74	1.01	1.45	0.78	0.88	1.19	0.68	0.84	1.14
Al₂O₃	4.30	4.45	5.88	7.60	3.93	5.29	6.91	3.38	4.02	5.19	3.21	4.06	5.36
SiO₂	16.76	15.04	23.16	32.12	15.04	21.66	29.34	12.89	16.62	22.07	12.07	16.53	22.63
P₂O₅	0.55	0.60	0.84	1.07	0.59	0.78	0.99	0.56	0.70	0.88	0.53	0.69	0.87
SO₃	3.70	4.65	3.81	3.07	3.75	3.24	2.78	3.03	2.58	2.13	3.09	2.63	2.35
K₂O	0.99	1.18	2.10	3.07	0.98	1.81	2.59	0.99	1.51	2.30	0.84	1.46	2.20
CaO	68.74	68.91	56.97	44.67	70.32	60.11	48.68	74.47	69.15	60.35	75.84	68.95	59.42
TiO₂	0.27	0.27	0.49	0.69	0.28	0.49	0.68	0.23	0.37	0.55	0.22	0.38	0.56
V₂O₅	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cr₂O₃	-	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	-	-	0.02	0.02	0.03	0.02
MnO	0.16	0.16	0.18	0.19	0.16	0.19	0.20	0.13	0.13	0.16	0.13	0.14	0.16
Fe₂O₃	3.63	3.83	4.82	5.75	3.80	4.99	6.03	3.11	3.70	4.81	2.98	3.94	4.95
ZnO	0.14	0.15	0.12	0.09	0.15	0.13	0.10	0.12	0.10	0.08	0.12	0.10	0.08
SrO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.33	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08
SnO₂	-	-	0.03	-	-	-	0.03	-	0.03	-	-	-	-
Ag₂O	0.13	0.15	0.14	0.13	0.15	0.15	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.14
BaO	-	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.09	0.12	0.02	0.15	0.02	0.03

Hay compuestos que representan una cantidad muy mínima que llegan a ser despreciables, como lo son el Titanio, Vanadio, Estroncio, Cromo, Estaño, Bario, Zinc, Manganeso y Oro. Estos en su mayoría provienen de la cáscara y la ceniza, si recordamos los resultados obtenidos de estos materiales el Oro y Titanio eran compuestos que representaban cierta cantidad dentro ellos y por ende están presentes. Ahora bien, siguiendo con el análisis podemos observar cómo los compuestos como el Potasio, Fósforo y Magnesio tienen una ligera concentración, pero conforme se va aumentando la cantidad en estos compuestos, esto indica que si usáramos más ceniza se iría incrementado la concentración. En el caso del Potasio al ser un porcentaje bajo no es posible que se genere una reacción álcali-agregado, sin embargo, es algo a tener en cuenta, la presencia del Magnesio y Fósforo pueden ayudar a lo que se conoce como ataque por sulfatos y se debe analizar si se forma etringita, sobre todo en las muestras con CBCA al 40%.

Si de ataque a sulfatos nos referiremos, el contenido de Azufre es el que debemos considerar, en este caso la mezcla de referencia marco un 3.75%, este porcentaje se ve aumentado con el uso de la cáscara sin tratamiento y hornificada, se ve disminuido con el tratamiento químico, el uso de CBCA disminuye la concentración, esto puede indicar que la etringita se está formando. Como es de esperarse el uso de CBCA aumenta la concentración de Sílice, y por lo tanto, disminuye la concentración de Calcio. De igual manera esto hace que la concentración de Hierro y Aluminio aumente, es entonces posible con esto tener una idea de que fases principales y con qué elementos se están formando dentro del concreto.

4.4.6. FTIR sobre las muestras de concreto

El análisis de FTIR comprueba que existen los enlaces del compuesto, en la figura 52 se pueden observar las bandas encontradas. La banda de los 1415 cm^{-1} está presente en todas las muestras, junto a la banda encontrada en los 880 cm^{-1} , corresponden a los enlaces C-O los cuales se pueden atribuir a la presencia de carbonatos, la banda de los 956 cm^{-1} también está presente en todas las muestras y corresponde a enlaces Si-O. La presencia de la banda en los 3645 cm^{-1} , corresponde a los estiramientos de los enlaces O-H y puede atribuirse a la formación de portlandita

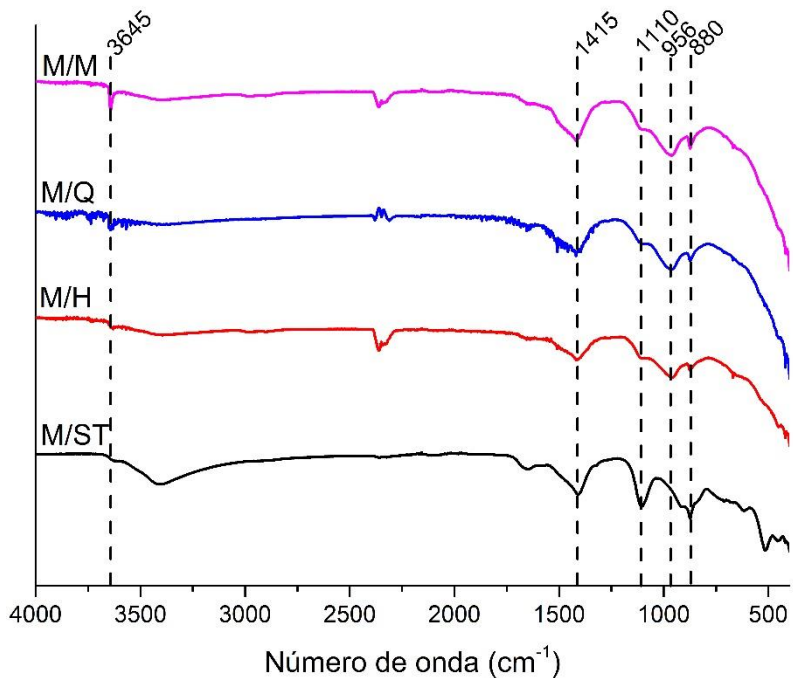


Figura 52. Resultados de FTIR sobre las muestras con 0% de CBCA.

Por último, la banda en los 1110 cm^{-1} corresponde a estiramientos del enlace S-O que se puede atribuir a la formación de algunos sulfatos.

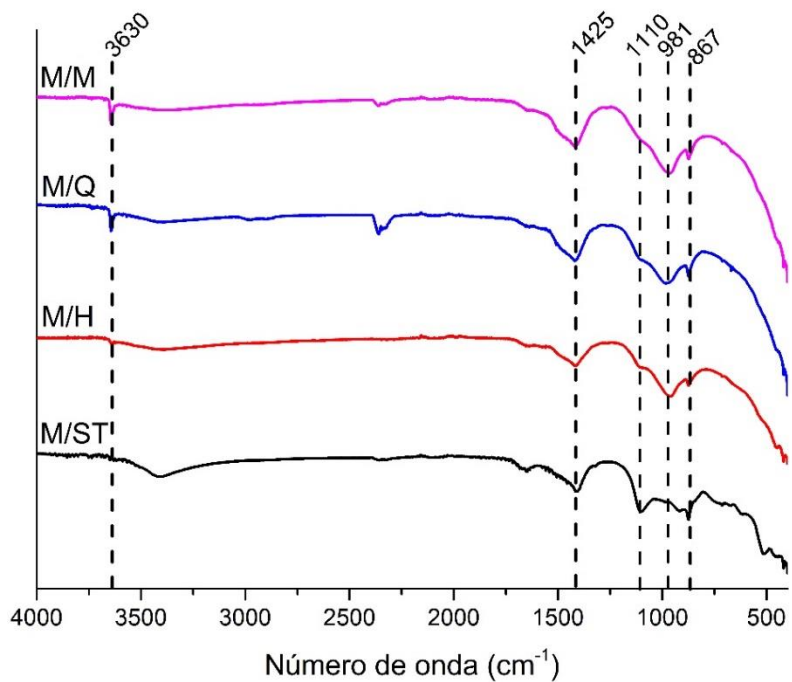


Figura 53. Resultados de FTIR sobre las muestras con 20% de CBCA.

En la figura 53 podemos observar que en la muestra con CBCA al 20%, se presentan los mismos picos que en el de ceniza esto indica que están presentes los mismos enlaces. Es importante destacar que en la muestra sin tratamiento el pico de los 1110 cm^{-1} es más pronunciado y que el pico de los 867 cm^{-1} casi no se aprecia.

Por último, en la figura 54, se observa cómo están los picos de 3600, 1400, 980 y 860 cm^{-1} , sin embargo, el pico de los 1100 cm^{-1} que corresponde a los enlaces S-O ya no está presente esto podría ser un indicativo de que estas muestras pueden estar libres de sulfatos, para confirmar a que corresponden cada uno de estos enlaces establecidos, es necesario que mediante la prueba de DRX se establezcan que fases cristalinas están conformando cada una de las muestras.

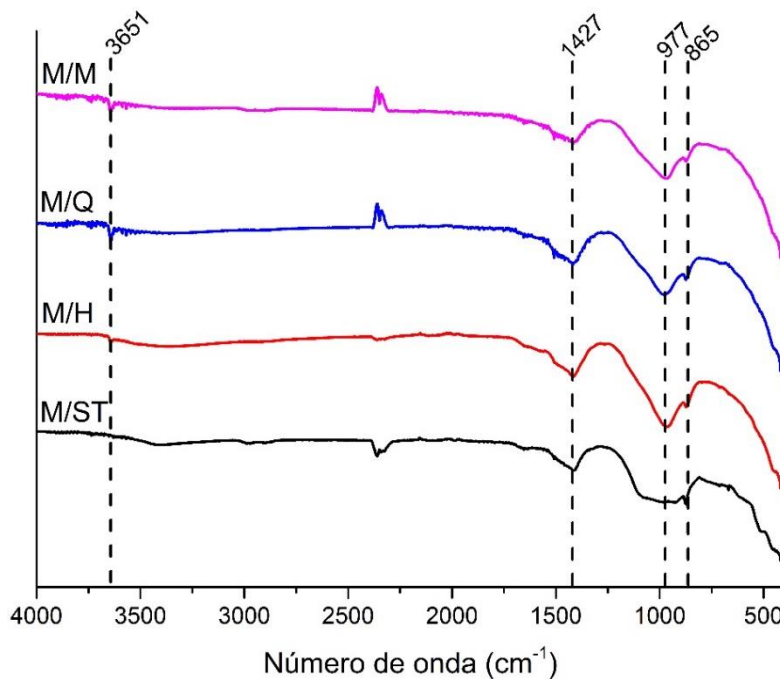


Figura 54. Resultados de FTIR sobre las muestras con 40% de CBCA.

4.4.7. DRX sobre las muestras de concreto

Como se mencionó anteriormente, teniendo los resultados de FRX podemos saber qué elementos buscar en el análisis, se realizó tomando en cuenta las diversas variables, en la figura 55, se observa lo encontrado en la mezcla de referencia, estos compuestos en su mayoría deben estar presentes para las muestras elaboradas con cáscara de cacahuate. Estos compuestos son la Etringita (9° , 16° y 23°), la Portlandita (18° , 28° ,

34°, 47°, 50°, 54°, 62°, 64°), la Calcita (29°) y el yeso (12°). Esta incidencia en los picos en este caso coincide con la cuantificación arrojada por el programa HighScore Plus, el cual dice que 54% de la muestra es portlandita, 23 % es calcita, 15% es etringita y 8% Yeso.

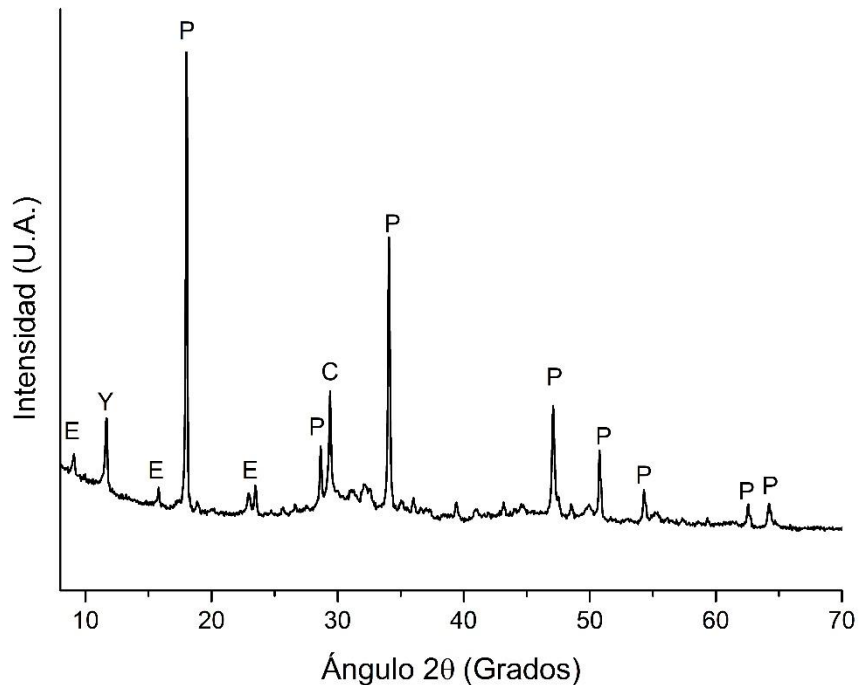


Figura 55. Fases encontradas por DRX en la muestra M/R.

Por otro lado, en el la figura 56 podemos observar la gráfica conforme a las edades de ensayo, en este caso la muestra hornificada, con el objetivo de mostrar las variaciones que quizás se pueden formar. Los ángulos 9° y 23° corresponde a la etringita; el ángulo cercano a los 12° corresponde al yeso; el ángulo alrededor de los 29° es el característico de la calcita; y los ángulos encontrados en los ángulos 18°, 34°, 47° y 50° son los que confirman la presencia de portlandita. Si bien los picos de la etringita y el yeso no muestran la intensidad debida, están presentes.

Lo destacable aquí es dejar demostrado que la edad no representa una variación en cuanto la formación de algún compuesto, esto claro teniendo en cuenta que falta realizar la cuantificación por que puede ser que se esté formando más un compuesto, esta relación sobre la no variación aplica para todas las muestras y por ende se descarta hacer el análisis de esa forma.

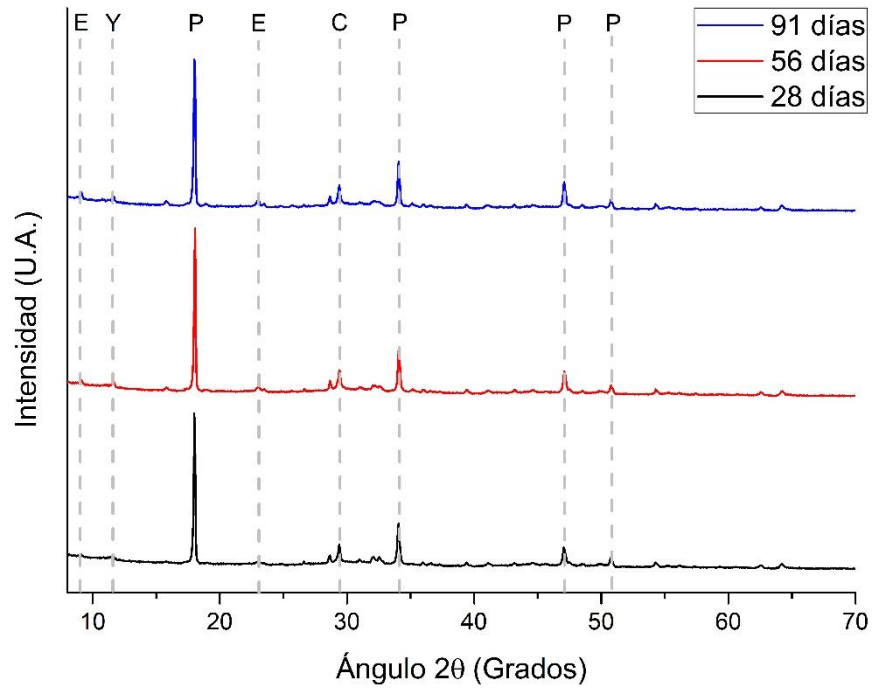


Figura 56. Análisis de DRX de acuerdo a las edades de ensayo en la muestra M/H.

Con base a lo anterior dicho, se opta por hacer una comparativa entre tratamientos teniendo como variable la cantidad de ceniza. En la figura 57 se aprecian los resultados de cómo afectan los diferentes tratamientos en la mezcla con 0% de CBCA.

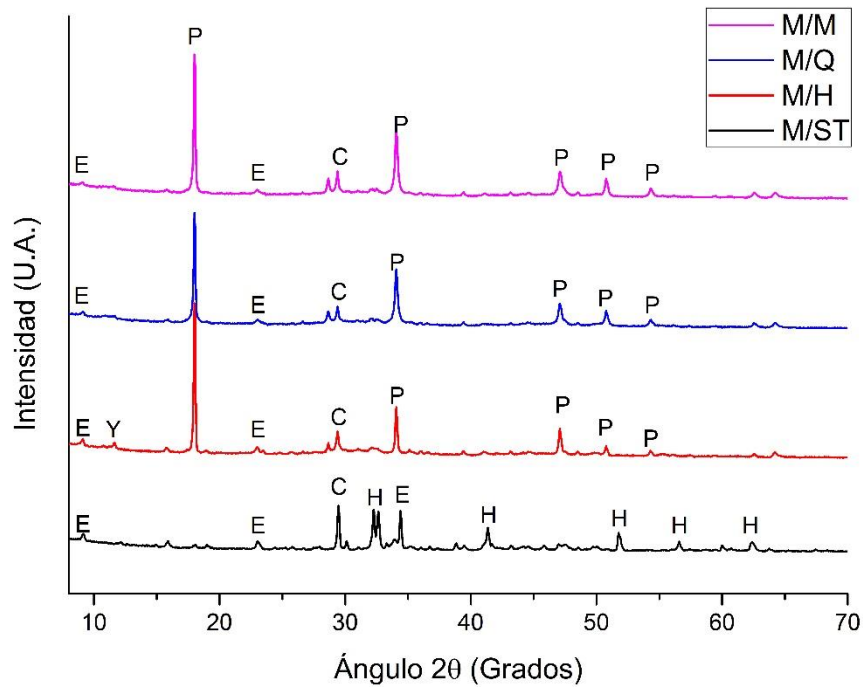


Figura 57. Resultados DRX sobre las muestras con 0% de CBCA.

Siguiendo con la apreciación de la figura 57, empezamos observando como en todas las mezclas se genera Etringita (E) y Calcita (C), fases características en el concreto, particularmente en este caso la presencia de etringita ayuda a dar una mayor cohesión, sin embargo, podemos observar como para la muestra M/ST no se forma la Portlandita (P) esto puede explicar la poca resistencia que ofreció este compuesto al no presentarse la adhesión con el agregado como menciona Giraldo & Tobón [86]. La falta de portlandita se puede observar con la presencia de Hatrurita (H) la cual es la Alita, pero con diferente estructura cristalina, lo cual confirma que la cáscara sin tratar afecta al desarrollo de la matriz.

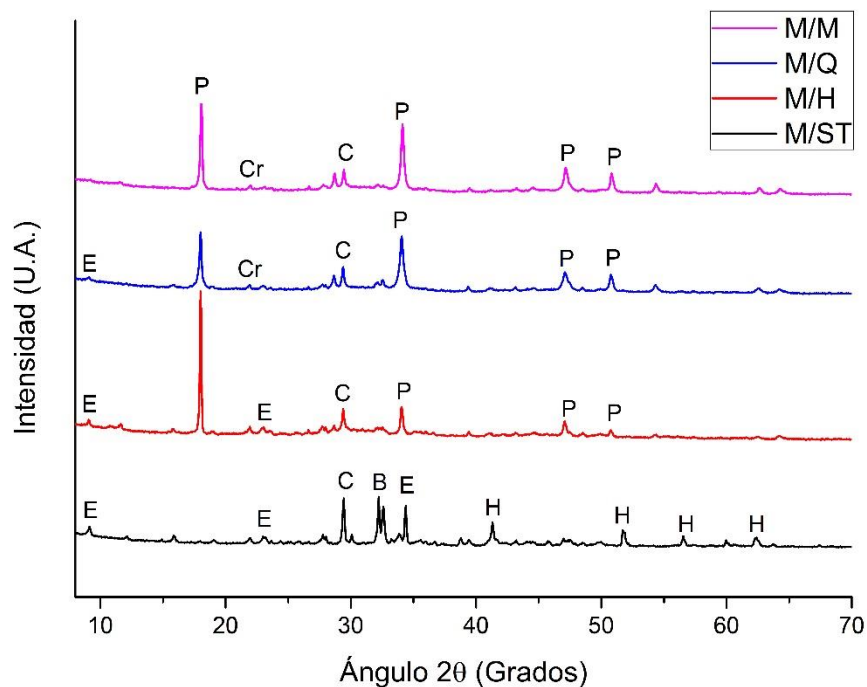


Figura 58. Resultados DRX sobre las muestras con 20% de CBCA.

Por otro lado, en la figura 58, podemos observar como la presencia de la CBCA, no afecta en la formación de los compuestos ya establecidos. El primer cambio se nota en la muestra M/ST donde podemos observar donde aparece la Brownmillerita (B) la cual es un acomodo diferente de la Ferrita, esta tampoco alcanza a reaccionar y por eso se encuentra en ese estado. El segundo cambio es la aparición de Cristobalita (Cr), sobre todo en la muestra M/Q y M/M, esto se puede deber a la aparición del hidróxido de calcio libre el cual no reacción con la ceniza.

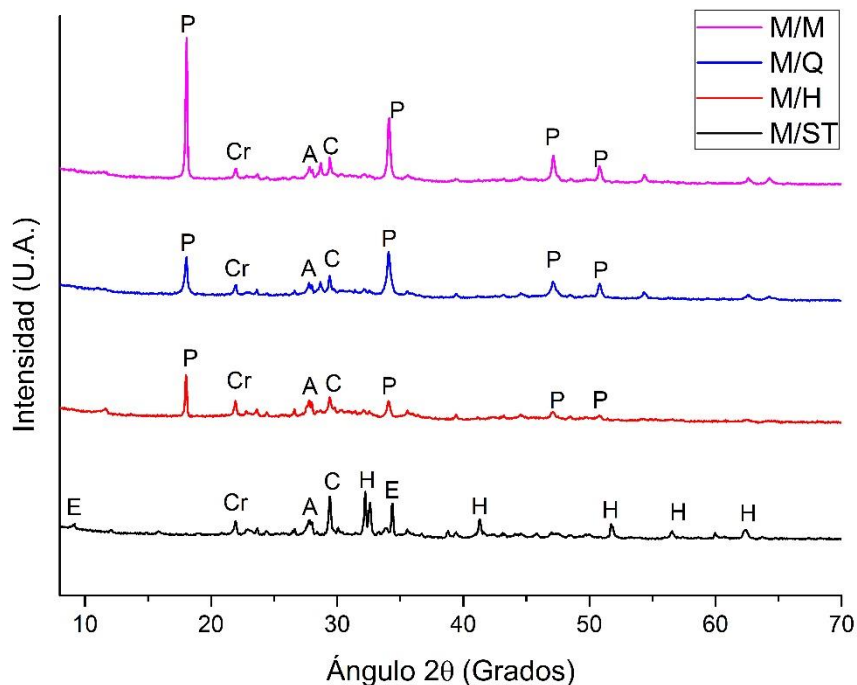


Figura 59. Resultados DRX sobre las muestras con 40% de CBCA.

En la figura 59, podemos observar como la presencia de la cristobalita se hace presente para todas las muestras esto se atribuye a la cantidad mayor de ceniza presente, lo destacable aquí es la presencia del mineral Anortita (A), el cual es un aluminosilicato, como tal es un geopolímero que se puede estar formando al alto contenido de sílice presente y el aluminio tanto de la ceniza como de la cáscara, la presencia de la Anortita influye en la conductividad térmica como lo explica Salirrosas [87]. Sin embargo, es curioso la formación de este ya que se ocupa de una solución alcalina, la cual puede ser proporcionada por la cáscara.

4.4.8. TGA sobre las muestras de concreto

En las próximas muestras podremos observar los resultados de TG y DTG realizados sobre las muestras, al igual que las muestras de DRX estas fueran analizadas con las muestras a 91 días de edad, el DTG se obtuvo con la ayuda del software Origin donde se realizó la primera derivada, como podemos observar en la figura 60, 61 y 62, las 3 muestras tienen el mismo comportamiento, alrededor de los 100°C las muestras pierden el agua libre así como los productos de hidratación como lo es la etringita este se confirma con el DTG donde se puede observar cómo se forma ese pico característico.

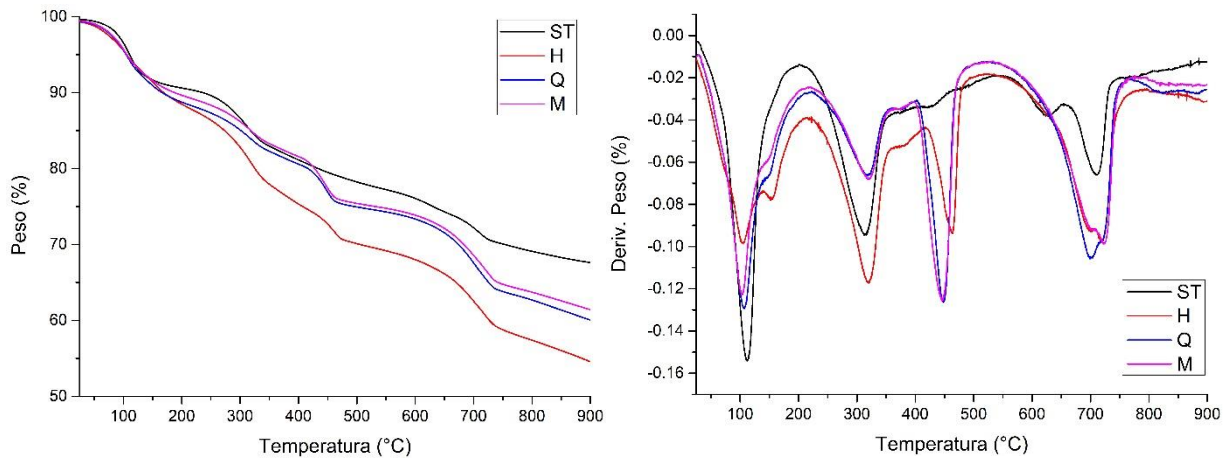


Figura 60. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 0% de CBCA.

Después podemos observar otro descenso en el rango de los 300-350°C el cual representa las pérdidas de los compuestos orgánicos, de igual manera el DTG confirma lo dicho por Choi[88], el cual es donde están las celulosas, hemicelulosas y ligninas, la intensidad de los picos es alta comparado a lo encontrado por Choi debido al porcentaje utiliza de Bio-Agregado.

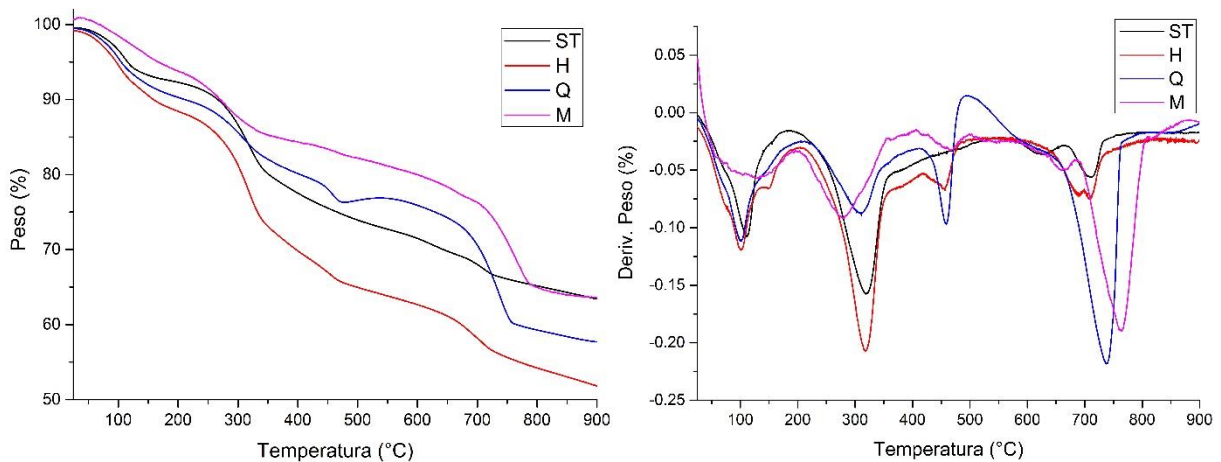


Figura 61. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 20% de CBCA.

Lo interesante se encuentra en el rango de los 400-500°C podemos observar en la figura 60 como el descenso a esta temperatura es más pronunciado, mientras que en las figuras 61 y 62 este descenso ya no lo es, en el DTG podemos observar cómo se forma el pico donde sucede en este caso particular la degradación $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la cual corresponde la portlandita, el punto interesante esta aquí, donde para todas la

muestras ST se aprecia como no se forma este pico característico lo cual confirma la ausencia encontrado de este compuesto mientras el análisis de DRX.

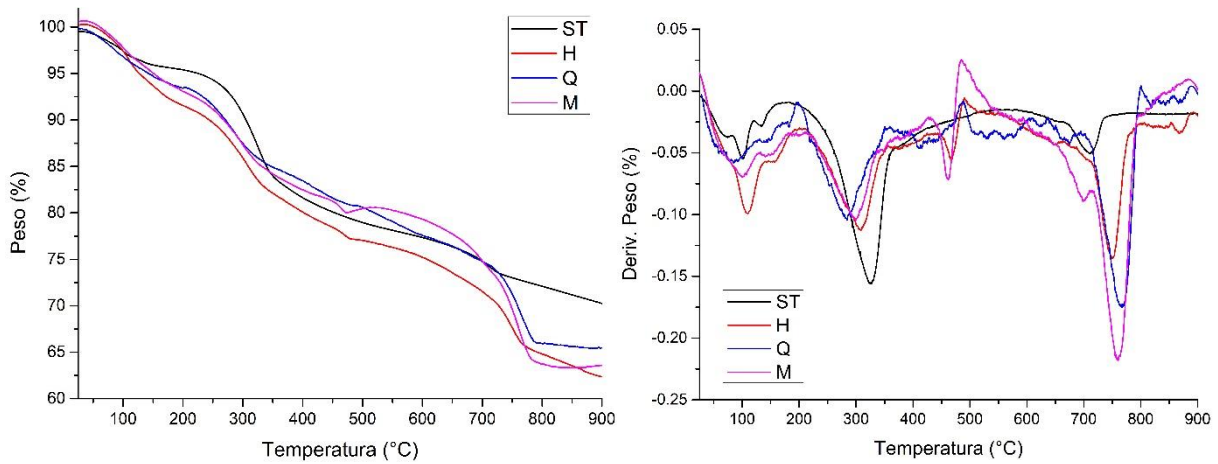


Figura 62. TG (lado izq.) y DTG (lado dcho.) de las muestras con 40% de CBCA.

Por último, se observa como el descenso al final se presenta en el rango de los 700-800 °C es el cual corresponde a la pérdida de CO₂, lo cual confirma la presencia de calcita, el pico se presenta también en el DTG. Al final se puede observar como la mayor pérdida de masa se da debido al alto contenido de materia orgánica dentro la matriz, esta corresponde alrededor del 10-15%.

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. La cáscara de cacahuete actúa como retardante en el fraguado, debido a que la lignina absorbe el agua para después liberarla, esto se observó durante la fabricación de los especímenes, los tratamientos otorgados ayudan a que los tiempos de fraguado se vean reducidos.
2. El agua liberada evita que los productos de hidratación se formen de manera correcta y se produzca el cambio a los compuestos que constituyen a un concreto.
3. La mezcla usada produjo concretos ligeros debido a su densidad baja, con valores competitivos de resistencia a compresión y conductividad térmica comparados con otros tipos de concretos de baja densidad.
4. Las mezclas con cáscara de cacahuete tratada, permitieron un mejoramiento del comportamiento mecánico y térmico, mediante los tratamientos de hornificación y químico respectivamente.
5. Los Bio-Agregados tratados dentro de la matriz cementante generan la portlandita, a diferencia de los no tratados.
6. Se confirma una vez mas que los mejores resultados los da el uso de tratamientos en los Bio-Agregados.
7. El uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar retarda el fraguado hasta 10 días, además, se disminuye la resistencia a compresión, sin embargo, desarrolla una mejor conductividad térmica cuando se empiezan a subir los porcentajes de sustitución.

5.2. RECOMENDACIONES

1. Para definir cuál sería la mejor opción en cuanto a la conductividad térmica haría falta realizar un estudio o simulación energética donde se aprecie cómo funciona el material en una habitación o casa promedio y ver si en realidad se produce el ahorro energético.

2. Se debe fijar en los contenido de lignina si se pretende utilizar Bio-Agregados ya que como se confirmo en esta investigación es propicia a retardar el curado, una investigación para su uso como agente de curado interno seria relevante.
3. Se recomienda no utilizar la ceniza de bagazo de caña como sustituto del cemento en este tipo de matrices, ya que no es factible al momento de trasladar a la aplicación de esta matriz esperar esos tiempos para poder desmoldar. Si se llegan a utilizar que sean porcentajes menores al 20%.
4. Es importante la divulgación, las investigaciones como esta ayudan a conocer los concretos vegetales, pero no basta, en países como México o algunos países en vías de desarrollo, la cultura de reciclaje y cuidado del medio ambiente no están establecida y las leyes regulatorias son mínimas. Existiendo esta cultura, se llevará a darle prioridad a estos residuos y que su divulgación ocurra, se vea que producen mayor confort que los concretos convencionales y tienen una mejora desde el punto de vista económico como ambiental.

Capítulo 6: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Kalpogiannaki, M., Laskaris, N., Lampropoulou, P., ... Koukouzas, N. (2022). Sustainable Use of By-Products and Wastes from Greece to Produce Innovative Eco-Friendly Pervious Concrete. *Applied Sciences*, 12(5861), 1–18. <https://doi.org/10.3390/APP12125861>
- [2] Salman, M. M., Abdul-Ameer, J. S., & Abd, L. M. (2016). Effect of Recycled Aggregates and Steel Fibers on Flexural and Shear Behavior of Reinforced Normal Concrete Beams. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 20(1), 178–193.
- [3] Schmidt, W., Ngassam, I. L. T., Breitschaft, G., & Virchow, S. (2018). Challenges of the growing African cement market – environmental issues, regulative framework, and quality infrastructure requirements. *MATEC*, 149(01014), 1–8. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201814901014>
- [4] Rodgers, L. (2018, diciembre 17). La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías. Recuperado el 26 de abril de 2023, a partir de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- [5] Mejias-Brizuela, N. Y., Orozco-Guillen, E., & Galánn-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los Residuos Agroindustriales y su Contribución al Desarrollo Sostenible de México. *Revista de Ciencia Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27–41.
- [6] Saucedo-Rivalcoba, H., Morales-Vasquez, A., & Saucedo-Rivalcoba, V. (2018). Responsabilidad social de la gestión, manejo y normatividad de Iso residuos agroindustriales. *Medio ambiente, sustentabilidad y vulnerabilidad social*, 5, 361–378.
- [7] Navarro Pedreño, J., Moral Herrero, R., & Gómez Lucas, I. (1995). *Residuos Orgánicos y Agricultura (Primera.)*. Universidad de Alicante.

- [8] Fuentes, R. I., & Hernández, A. (2011). *Principales Problemas Ambientales Generados por Tajos y Canteras Abandonadas en la Provincia de Matanzas*. Sociedad Cubana de Geología.
- [9] Ratsimbazafy, H. H., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., & Evon, P. (2021). A Review of the Multi-Physical Characteristics of Plant Aggregates and Their Effects on the Properties of Plant-Based Concrete. *Recent Progress in Materials*, 3(2), 2–69. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102026>
- [10] Amziane, S., & Sonebi, M. (2016). Overview on Biobased Building Material made with Plant Aggregate. *RILEM Technical Letters*, 1, 31–38. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.9>
- [11] Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2004). Características de los Materiales. *N·CMT·2·02·005/04*.
- [12] Velásquez, S. M., Pelaéz, G. J., & Giraldo, D. H. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *Informador Técnico*, 80(1), 77–86.
- [13] Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., & Sonebi, M. (2017). Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(3), 2–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>
- [14] Juárez, C. A. (2002). *Concretos Base Cemento Portland Reforzados con Fibras Naturales (Agave Lecheguilla), como Materiales para Construcción en México*.
- [15] Grădinaru, C. M., Şerbănoiu, A. A., & Şerbănoiu, B. V. (2021). Sunflower Stalks versus Corn Cobs as Raw Materials for Sustainable Concrete. *Materials*, 14(5078), 2–16. <https://doi.org/10.3390/MA14175078>
- [16] Brümmer, M. (2021). *Restauración y rehabilitación de edificios y bioconstrucción con morteros ligeros aditivados con fibras vegetales*.

- [17] Gatani, M., Argüello, R., & Sesín, S. (2010). Materiales compuestos de cáscaras de maní y cemento. Influencia de diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas. *Materiales de Construcción*, 60(298), 137–147. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.46908>
- [18] Jácome, S., Suntaxi, M., & Dueñas, M. (2019). Análisis de las propiedades de bloques de construcción a partir de la fabricación de los mismos, con materiales reciclados como el PET, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar y cáscara de maní. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*.
- [19] Yadav, A. L., Sairam, V., Muruganandam, L., & Srinivasan, K. (2020). An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>
- [20] 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>
- [21] Samad, S., & Shah, A. (2017). Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 663–674. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2017.07.003>
- [22] Lagouin, M., Magniont, C., Sénéchal, P., Moonen, P., Aubert, J.-E., & Laborel-préneron, A. (2019). Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. *Construction and Building Materials*, 222, 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>
- [23] Niyigena, C., Amziane, S., & Chateauneuf, A. (2018). Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 160, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>

- [24] Ahmad, M. R., Chen, B., Haque, M. A., & Oderji, S. Y. (2020). Multiproperty characterization of cleaner and energy-efficient vegetal concrete based on one-part geopolymer binder. *Journal of Cleaner Production*, 253(119916). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119916>
- [25] Nguyen, T. T., Picandet, V., Carre, P., Lecompte, T., Amziane, S., & Baley, C. (2010). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(5), 545–560. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>
- [26] Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- [27] Aamr-Daya, E., Langlet, T., Benazzouk, A., & Quéneudec, M. (2008). Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: Physico-mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 957–963. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.002>
- [28] EL Hajj, N., Dheilly, R., Aboura, Z., Benzeggagh, M., & Quéneudec, M. (2009). Procédé de fabrication des composites 100% végétaux: Effet de la granulométrie des étoupes de lin et de l'ajout des bios liants.
- [29] Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 65–70. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00072-X)
- [30] Sudin, R., & Swamy, N. (2006). Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of Materials Science*, 41(21), 6917–6924. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0224-3/TABLES/4>
- [31] Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Amziane, S., & Farcas, F. (2020). Durability of hemp concretes exposed to accelerated environmental aging. *Construction and Building Materials*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119043>

- [32] FAO. (2019). Groundnuts Production. Recuperado el 21 de febrero de 2023, a partir de <https://www.nationmaster.com/nmx/ranking/groundnuts-production>
- [33] Angulo, J., & Joaquín, I. (2008). *Paquete tecnológico para alta productividad de cacahuete Memoria*.
- [34] García, J., Rodríguez, E., & Farrera, J. (2019). Iniciativa que expide la ley nacional de fomento al cultivo, comercio e industrialización del cacahuete.
- [35] Fermanelli, C., Saux, C., & Pierella, L. (2014). *Revalorización de la cáscara de maní: implementación de un sistema pirolítico para generar productos químicos de interés*.
- [36] Arbeláez Pérez, O. F., Delgado Varela, K. A., & Castañeda Mena, J. D. (2022). Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2022.08.001>
- [37] Kääntee, U., Hupa, M., Zevenhoven, R., & Backman, R. (2003). *Modelling a Cement Manufacturing Process to Study Possible Impacts of Alternative Fuels - Part A*.
- [38] González, Y. (1999). *Caracterización de costras y anillos en hornos rotarios de cemento*.
- [39] American Society for Testing and Materials. (2012). Standard Specification for Portland Cement. *ASTM-C150*. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-12
- [40] SECRETARÍA DE ECONOMÍA. (2012). *Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México*.
- [41] Sales, A., & Araújo, S. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*, 30(6), 1114–1122. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.026>

- [42] American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM-C618*. <https://doi.org/10.1520/C0618-15>
- [43] Srinivasan, R., & Sathiya, K. (2010). Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete. *International Journal for Service Learning in Engineering*, 5(2), 60–66. <https://doi.org/10.24908/ijlsle.v5i2.2992>
- [44] Amin, M., Attia, M. M., Agwa, I. S., Elsakhawy, Y., Abu el-hassan, K., & Abdelsalam, B. A. (2022). Effects of sugarcane bagasse ash and nano eggshell powder on high-strength concrete properties. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01528>
- [45] Kubissa, W., Wilińska, I., & Jaskulski, R. (2022). Study on the effect of VMA admixture for concrete cured under different conditions on air permeability and sorptivity. *Construction and Building Materials*, 346, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128350>
- [46] Ferraz, D. F. (2016). Aditivos reductores de agua para concreto premezclado. *Construcción y tecnología en concreto*, 22–23.
- [47] Durand, A. (2017, diciembre 15). *Influencia del óxido de calcio en la trabajabilidad, fraguado, compresión, densidad, porosidad y absorción del concreto para elementos estructurales, Trujillo 2017. Universidad Privada del Norte*.
- [48] Guevara Fallas, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L., & Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80–86.
- [49] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. *NMX-C-021-ONNCCE-2014*.
- [50] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. *ASTM-C494*.

- [51] American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete. *ASTM-C309*.
- [52] Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (Primera.). Universidad Nacional de Colombia.
- [53] Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (First.). CRC Press.
- [54] Flores, A., Barceló, F., Bucio, L., Arenas, J., & Ruvalcaba, J. (2016). Análisis químico elemental y de fases por medio de PIXE, DSC, TGA y DRX en MTA Angelus® y un cemento Portland blanco. *Revista Odontológica Mexicana*, 20(3), 187–192. <https://doi.org/10.1016/J.RODMEX.2016.08.006>
- [55] Vaca, L. (2020). *Evaluación del Grado de Envejecimiento del Concreto en el Desempeño de Tratamientos Superficiales con Nanopartículas Base Silicio*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [56] Corres, O., Olivera, O., Fuentes, F., Rodas, E., Reynaga, A., Olivares, O., & Porras, N. (2020). Determinación de metales pesados mediante fluorescencia de rayos X en sedimentos del agua en la microcuenca del río Huancaray, Apurímac-Perú, para periodos de estiaje y lluvia. *Acta Nova*, 9(4), 504–523.
- [57] Skoog, D., Holler, F. J., & Nieman, T. (2001). *Principios de Análisis Instrumental* (Quinta.). McGraw-Hill.
- [58] Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J. (2001). *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing.
- [59] Barroso, I. (2010). Termogravimetría. Fundamentos y Aplicaciones. *NETZSCH*.
- [60] Rodríguez, J. (2011). Técnicas de difracción y termogravimetría para la determinación estructural de materiales. *Innovación y Experiencias Educativas*, 39.
- [61] The Mahn, D. (2014). *Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant*. Université de Toulouse.

- [62] Chan, J., Solís, R., & Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39–46.
- [63] Ansell, M. P., Lawrence, M., Jiang, Y., Shea, A., Hussain, A., Calabria-Holley, J., & Walker, P. (2020). Natural plant-based aggregates and bio-composite panels with low thermal conductivity and high hygrothermal efficiency for applications in construction. En *Nonconventional and Vernacular Construction Materials* (pp. 217–245). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00010-X>
- [64] Pereira, B., & Arantes, V. (2020). Production of cellulose nanocrystals integrated into a biochemical sugar platform process via enzymatic hydrolysis at high solid loading. *Industrial Crops and Products*, 152, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112377>
- [65] Mazian, B., Bergeret, A., Benezet, J.-C., & Malhautier, L. (2018). Influence of field retting duration on the biochemical, microstructural, thermal and mechanical properties of hemp fibres harvested at the beginning of flowering. *Industrial Crops and Products*, 116, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.062>
- [66] Torres-Carrasco, M., del Campo, A., de la Rubia, M. A., Reyes, E., Moragues, A., & Fernández, J. F. (2017). New insights in weathering analysis of anhydrous cements by using high spectral and spatial resolution Confocal Raman Microscopy. *Cement and Concrete Research*, 100, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.06.003>
- [67] Bordy, A., Younsi, A., Aggoun, S., & Fiorio, B. (2017). Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. *Construction and Building Materials*, 132, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.080>
- [68] Gázquez, F., Rull, F., Calaforra, J. M., Venegas, G., Manrique, J. A., Sanz, A., ... Martínez-Frías, J. (2014). Caracterización mineralógica y geoquímica de minerales hidratados de ambientes subterráneos: implicaciones para la exploración planetaria. *Estudios Geológicos*, 70(2). <https://doi.org/10.3989/egeol.41688.314>

- [69] Villain, G., Thiery, M., & Platret, G. (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1182–1192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>
- [70] Tanu, H. M., & Unnikrishnan, S. (2023). Mechanical Strength and Microstructure of GGBS-SCBA Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 7816–7831. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.05.051>
- [71] Bahurudeen, A., Kanraj, D., Gokul Dev, V., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 59, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>
- [72] Lyra, G. P., dos Santos, V., De Santis, B. C., Rivaben, R. R., Fischer, C., Pallone, E. M. de J. A., & Rossignolo, J. A. (2019). Reuse of sugarcane bagasse ash to produce a lightweight aggregate using microwave oven sintering. *Construction and Building Materials*, 222, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.150>
- [73] Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., ... Tashima, M. M. (2015). Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. *Construction and Building Materials*, 94, 670–677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- [74] Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Murugesan, R., & Sarayu, K. (2015). Micro-analytical studies on sugar cane bagasse ash. *Sadhana*, 40(5), 1629–1638. <https://doi.org/10.1007/S12046-015-0390-6/FIGURES/5>
- [75] Frías, M., Villar, E., & Savastano, H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>

- [76] Pereira, A., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., ... Payá, J. (2015). Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. *Ceramics International*, 41(10), 13012–13024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.001>
- [77] Le, D.-H., Sheen, Y.-N., & Lam, M. N.-T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029>
- [78] Srinivas, D., Suresh, N., & Lakshmi, N. H. (2021). Experimental Investigation on Bagasse ash Based Geopolymer Concrete Subjected to Elevated Temperature. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 796(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012028>
- [79] NTC. (2017). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA*.
- [80] Cervantes Abarca, M. A. (2008). *NUEVAS TECNOLOGÍAS EN CONCRETOS CONCRETO CELULAR-CONCRETO REFORZADO CON FIBRA-CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL*.
- [81] Xu, Y., Jiang, L., Xu, J., & Li, Y. (2012). Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction and Building Materials*, 27(1), 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.030>
- [82] Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 671–676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- [83] Jose, S. K., Soman, M., & Evangeline, Y. S. (2021). Influence of mixture composition on the properties of foamed concrete. *Materials Today: Proceedings*, 42(2), 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.592>

- [84] Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R., & Clifton, G. C. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716–724. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.218>
- [85] Zhu, L., Dai, J., Bai, G., & Zhang, F. (2015). Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 94, 620–628. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.07.058>
- [86] Giraldo, M., & Tobón, J. (2006). Evolución Mineralógica del Cemento Portland durante el Proceso de Hidratación. *DYNA*, 73(148), 69–81.
- [87] Salirrosas, J. (2020). *Geopolímeros en la industria de la construcción: aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural*.
- [88] Choi, Y. C. (2022). Hydration and internal curing properties of plant-based natural fiber-reinforced cement composites. *Case Studies in Construction Materials*, 17, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01690>