

**Influencia De La Incorporación De Yeso Residual En Las Propiedades Químicas Y
Mecánicas Del Concreto Simple**

Joan Sebastian Carrillo Bravo

Trabajo de grado para optar el título de Químico Ambiental

Director

Qco. PhD. Hernando Alberto Camargo García

Co-Directores

Ing. Civil. Andrea Carolina Chaparro

M Ing. Mat. Carlos Andrés Martínez Bonilla

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2021

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo se encuentra dedicado principalmente a mis padres quienes con su paciencia, trabajo y sacrificio me han permitido alcanzar este nuevo logro como lo es culminar mi carrera universitaria.

De igual forma dedico este logro a mi abuela y mis tías quienes han sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, contribuyendo a formar la persona que soy el día de hoy.

Agradecimientos

Me gustaría comenzar este apartado agradeciendo a mi director y codirectores de trabajo de grado quienes no solo me guiaron en la elaboración de mi tesis sino a lo largo de mi carrera, brindándome su apoyo y conocimientos.

También a mis compañeros de ingeniería civil Dennis y Tatiana quienes aportaron y dedicaron su tiempo para que fuera posible el desarrollo del trabajo.

Por último, me gustaría agradecer a mis amigos y familiares por los consejos brindados cuando más los necesitaba.

Contenido

Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Marco Referencial	16
2.1 Marco Teórico.	16
2.1.1 <i>Cemento Portland</i>	17
2.1.2 <i>Concreto</i>	19
2.1.3 <i>Aditivos en el Concreto</i>	21
2.1.4 <i>Yeso Odontológico</i>	22
2.1.5 <i>Caracterización Química del Yeso</i>	23
2.2 Estado del Arte	26
2.3 Marco Legal.....	46
2.3.1 <i>Resolución 541 de 1994</i>	46
2.3.2 <i>Resolución 472 de 2017</i>	46
2.3.3 <i>Resolución 2397 de 2011</i>	46
2.3.4 <i>NTC 1377 de 1994</i>	47
2.3.5 <i>NTC 673 de 2010</i>	47
3. Metodología	47

3.1	Materiales y Equipos	48
3.2	Reactivos	48
3.3	Proceso Experimental	49
3.3.1	<i>Caracterización Química de los Materiales de Partida (Cemento y Yeso residual)</i>	49
3.3.2	<i>Recolección de Materia Prima</i>	50
3.3.3	<i>Molienda Material</i>	51
3.3.4	<i>Preparación del Concreto</i>	51
3.3.5	<i>Prueba de Resistencia</i>	54
4.	Resultados y Discusión	55
4.1	Cantidad de Yeso Consumido: Preclínicas y Pregrado.	55
4.2	Caracterización Química	58
4.3	Caracterización Mecánica.....	68
5.	Conclusiones	73
	Referencias.....	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Fuerzas de compresión y flexión de especímenes con distintas proporciones de yeso residual.</i>	32
Tabla 2. <i>Bloques cerámicos de baja resistencia mecánica.</i>	36
Tabla 3. <i>Composición de ladrillos de tierra con aditivos.</i>	40
Tabla 4. <i>Proporciones de materias primas en el nuevo concreto.</i>	52
Tabla 5. <i>Yeso consumido dentro de pregrado y preclínicas odontológicas.</i>	56
Tabla 6. <i>Principales fases cristalinas presentes en el yeso residual.</i>	60
Tabla 7. <i>Principales fases cristalinas del Cemento Hidráulico (Cemex).</i>	61
Tabla 8. <i>Principales Fases Cristalinas de los Agregados Finos.</i>	63
Tabla 9. <i>Influencia de la inclusión de yeso residual en las fases cristalinas del nuevo material no estructural.</i>	63
Tabla 10. <i>Resistencias a compresión de los bloques de concreto con incorporación de yeso residual.</i>	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Distribución porcentual de los RCD en volumen.</i>	14
Figura 2. <i>Óxidos libres formados a partir de descarbonatación de arcillas y caliza.</i>	17
Figura 3. <i>Sustancias constituyentes del Clinker a partir del crudo precalcinado.</i>	17
Figura 4. <i>Composición relativa del Clinker del cemento Portland.</i>	18
Figura 5. <i>Aluminatos de calcio presentes en el cemento.</i>	18
Figura 6. <i>Componentes que constituyen el concreto.</i>	19
Figura 7. <i>Resistencia a compresión de una mezcla de concreto respecto al tiempo de fraguado.</i>	20
Figura 8. <i>Tipos de aditivos retardantes y acelerantes en el concreto.</i>	22
Figura 9. <i>Calcinación sulfato de calcio dihidratado.</i>	22
Figura 10. <i>Tipos de yeso según su aplicación en la odontología</i>	23
Figura 11. <i>Patrón de difracción de los componentes de una mezcla de concreto simple.</i>	25
Figura 12. <i>Patrón de difracción de especímenes de concreto de humo de sílice y hormigón liso.</i>	26
Figura 13. <i>Cambios en la resistencia de los 9 especímenes diseñados con presencia de activadores orgánicos variando sus proporciones.</i>	28
Figura 14. <i>Residuo de placas de yeso como aditivo en materiales de construcción.</i>	29
Figura 15. <i>Residuo de yeso rojo como aditivo en materiales de construcción.</i>	30

Figura 16. Resistencia a compresión de morteros de escoria y yeso residual a distintos tiempos de fraguado.	33
Figura 17. Resistencia a compresión de un sistema ternario conformado por yeso residual y escoria.	34
Figura 18. Fuerza de compresión de residuos industriales (Fosfoyeso) como material de valor agregado.	35
Figura 19. Resistencia a compresión de bloques con residuos de yeso a condiciones húmedas y secas.	37
Figura 20. Residuos de placas de yeso empleados en materiales cementosos de baja resistencia.	39
Figura 21. Ladrillos reforzados con fibras de cáñamo, lino y yeso como aditivos.	41
Figura 22. Efecto de la temperatura en la resistencia de moldes de cemento de sulfoaluminato de calcio.	42
Figura 23. Ladrillos cerámicos de yeso residual con aglutinantes y porcelana como aditivos. .	43
Figura 24. Resistencias de yesos estructurales como refuerzos en edificios de mampostería. ...	44
Figura 25. Residuos industriales con activadores aplicados como material de relleno.	45
Figura 26. Materias primas empleadas en la elaboración del nuevo material.	49
Figura 27. Difractómetro modelo D8 Advance.	50
Figura 28. Yeso residual recolectado en preclínicas odontológicas.	51
Figura 29. Materiales mezclados en la preparación del concreto.	53
Figura 30. Cilindros de concreto con inclusión de yeso residual.	53

Figura 31. <i>Ensayos a compresión de los bloques de concreto con inclusión de yeso residual.</i> ..	55
Figura 32. <i>Perfil de difracción por DRX de muestras policristalinas de yeso residual odontológico.</i>	59
Figura 33. <i>Perfil de difracción por DRX de muestras policristalinas del cemento.</i>	61
Figura 34. <i>Perfil de difracción por DRX de muestras policristalina de arena.</i>	62
Figura 35. <i>Formación de Etringita a partir de alto contenido de yeso.</i>	66
Figura 36. <i>Formación de carbonatos a partir de Portlandita.</i>	67
Figura 37. <i>Superposición de perfiles de difracción de los bloques de concreto con inclusión de yeso residual odontológico.</i>	67
Figura 38. <i>Comportamiento de la resistencia de los bloques de concreto respecto al yeso incorporado.</i>	71
Figura 39. <i>Bloque de concreto con falla Tipo 6.</i>	72
Figura 40. <i>Bloque de concreto con falla Tipo 3.</i>	72

Abreviaturas

DRX	Difracción de rayos X
DRXP	Difracción de rayos X de muestras policristalinas
NTC	Norma Técnica Colombiana
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
RG	Yeso Rojo
PG	Placas de Yeso
DC	Cemento en Polvo <i>Portland</i>
CAC	Cemento de Aluminato de Calcio
BOS	Escoria de Oxígeno Básico
WG	Yeso Residual
NG	Yeso Natural
BFS	Escoria de Alto Horno
MR	Mezcla Referencia
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
TG	Termogravimetría
MG	Mezcla con Yeso Residual
ME	Mezcla con escoria
Mt	Megatonelada
FGD	Yeso de Desulfuración de Gases de Combustión
PG	Fosfoyeso
CG	Yeso Comercial
WFA	Residuos de Cenizas Volantes
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
PKT	Técnica de Encerado Progresivo (Peter. K. Thomas)
RCD	Residuos de Construcción y Demolición

Resumen

El yeso es empleado en diversas actividades productivas destacando la industria de construcción, el sector odontológico y orfebre. Dichos sectores generan grandes cantidades de residuos que sumados a los ya generados por otras actividades alteran las condiciones ambientales, al no recibir tratamiento y ser vertidos en rellenos sanitarios, contribuyendo negativamente a la sostenibilidad, aumentando los daños medioambientales que en ocasiones son irreversibles y tienen consecuencias negativas en la salud humana.

Debido a su composición química, el yeso presenta propiedades que le brindan la capacidad de ser reutilizado y empleado como aditivo en la preparación de concreto. El presente trabajo incorporó yeso residual de las preclínicas odontológicas de la Universidad Santo Tomás mediante procesos de fabricación de concreto, considerando reincorporar el material mitigando el daño medioambiental que genera su disposición final. El nuevo material exhibió resistencias inferiores a 5 Mpa (20%) y fases cristalinas específicas de los materiales analizados.

Palabras Clave: Concreto, Difracción de rayos x, Valoración de residuos, Yeso residual.

Abstract

The plaster is used in various productive activities highlighting the construction industry, the dental sector and goldsmith. These sectors generate large amounts of waste that, added to those already generated by other activities, alter environmental conditions, by not receiving treatment and being dumped in sanitary landfills, contributing negatively to sustainability, increasing environmental damage that is sometimes irreversible and has consequences. negative on human health.

Due to its chemical composition, gypsum has properties that give it the ability to be reused and used as an additive in the preparation of concrete. The present work incorporated residual gypsum from the dental preclinics of the Santo Tomás University through concrete manufacturing processes, considering reincorporating the material mitigating the environmental damage generated by its final disposal. The new material exhibited strengths below 5 MPa (20%) and specific crystalline phases of the analyzed materials.

Key Word: Concrete, Residual gypsum, X-ray diffraction, Waste assessment.

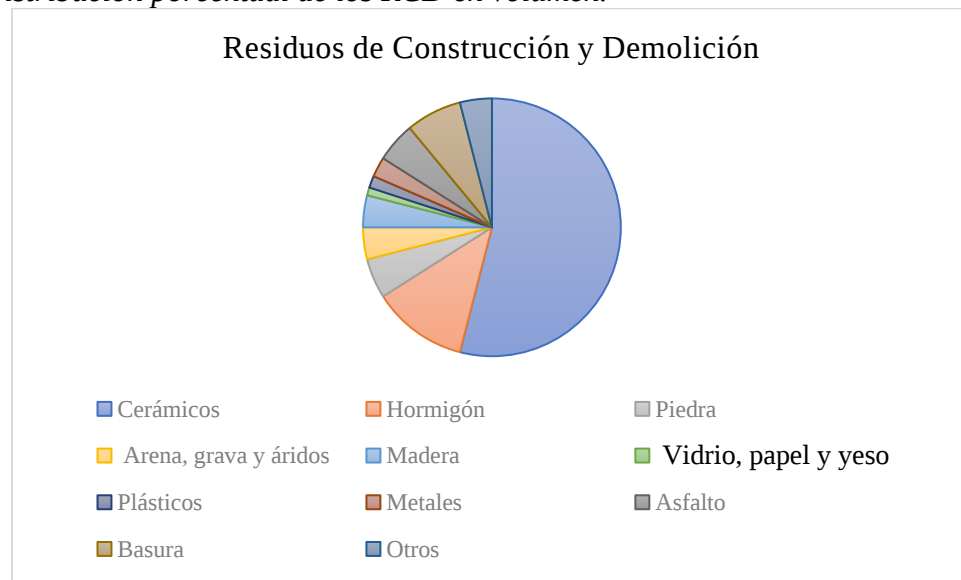
Introducción

El yeso o sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un mineral sedimentario constituido por un 79% de sulfato de calcio y 21% de agua, formado por evaporación marina durante millones de años y obtenido mediante operación minera. Los principales usos del material están en la construcción, decoración, medicina y la industria ligera (Quintana Nodarse & Martínez Ochoa, 2014). El yeso se calienta a 120 °C con el objetivo de deshidratar la roca sedimentaria y producir yeso de París o yeso dental (López & Alarcón, 2011). Dicho proceso mejora las propiedades del yeso destacando: su baja resistencia mecánica, buena regulación de la humedad, buen aislante térmico y acústico minimizando pérdidas de calor dentro y fuera de viviendas, permeabilidad al agua, adherencia a otros materiales de construcción, y resistente a altas temperaturas. El uso de yeso se justifica desde sus propiedades, las cuales le otorgan la capacidad de ser usado como aditivo o sustituto dentro del proceso de fabricación del concreto, brindando alternativas de la aplicación del yeso odontológico y brindándole nuevas características al material de construcción (Nolhier & Mallart, 1986).

En 2012, la producción mundial de yeso crudo fue de 150 Mt donde veintinueve países aportaron el 90% total del mineral, China fue el principal productor aportando un 32% de la producción total seguida por Irán y España quienes abastecen Oriente Medio y a Europa Occidental respectivamente. En Sudamérica se destacan Brasil (2,8 Mt), que cuenta con una de las mayores reservas mundiales de yeso natural, y Argentina (1,2 Mt) (Begliardo H. F., 2015). Aunque el porcentaje de los materiales de construcción a base de yeso solo representa un 1% respecto a la

composición total de RCD, la cantidad de estos residuos anualmente se encuentra alrededor de las 65.362 toneladas (Morán del Pozo, Valdés, Aguado P, Guerra, & Medina, 2011).

Figura 1. *Distribución porcentual de los RCD en volumen.*



Adaptado de (Begliardo H. F., 2015).

Las propiedades del yeso lo han convertido en un material fundamental en la construcción de moldes odontológicos brindándole la capacidad de ser utilizado en el diseño de moldes, impresiones dentales y enmuflados de prótesis (Ávila Arias & Alcón Condori, 2013). Habitualmente el yeso usado dentro de las prácticas odontológicas es descartado como residuo con destino a rellenos sanitarios y vertederos, su bajo nivel de degradación le brinda al mineral la capacidad de provocar contaminación en el lecho freático, generación de gases tóxicos y la formación de sustancias perjudiciales para la salud como lo es gas sulfuro de hidrógeno (H_2S) en los vertederos bajo condiciones anaerobios y reducción de bacterias al reaccionar con azufre

(Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013). Adicionalmente, en ambientes urbanos el yeso es el principal productor de neoformaciones en rocas carbonatadas tanto calizas como dolomías en terrenos inadecuados, superficies geológicamente inestables con estructuras morfológicas poco porosas permiten un flujo continuo de agua impulsada por la gravedad causando derrumbes y fallos geológicos (Navarro Martínez, 2018).

En las preclínicas odontológicas de la Universidad Santo Tomás, seccional Floridablanca, se producen diariamente cerca de 1 kilogramo de desechos de yeso. Las prácticas de laboratorio llevadas a cabo ejercen el desarrollo de moldes enmuflados en prótesis removibles y otros procesos para elaborar moldes preliminares en prótesis totales usando compuestos de modelar como material de impresión (Pineda-Higuaita, Moreno Callejas, & Flórez Rivera, 2018). Luego de empleado, el yeso odontológico es descartado como desecho sin recibir ningún tipo de tratamiento convirtiendo al material en residuo que genera contaminación ambiental (Chaverri Carvajal, s.f).

La presente propuesta de investigación hace parte de un proyecto de investigación avalado en la XI convocatoria interna de proyectos de investigación de la Universidad Santo Tomás, liderado por la Facultad de química ambiental, arquitectura e ingeniería civil, y busca aprovechar el yeso residual descartado por las preclínicas odontológicas en la producción de nuevos materiales que permitan generar propuestas de economía circular, en donde se realizan apuestas de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente. Se realizó una caracterización del yeso residual por difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRXP), y del nuevo material generado, evaluando la influencia en términos químicos y mecánicos de la reincorporación del residuo en una mezcla de concreto (con el reemplazo en porcentaje de cemento portland).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la incorporación de yeso residual generado por la facultad de odontología USTA-Bucaramanga, en las propiedades químicas y mecánicas en un mortero de concreto simple.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima incorporada (yeso residual) empleando la técnica difracción de rayos-X de muestras policristalinas.
- Identificar las fases cristalinas presentes en el nuevo material generado a partir de la reincorporación del yeso, empleando la técnica de difracción de rayos-X de muestras policristalinas.
- Evaluar la influencia de la incorporación del yeso residual en las propiedades mecánicas del concreto simple aplicando pruebas de compresión.

2. Marco Referencial

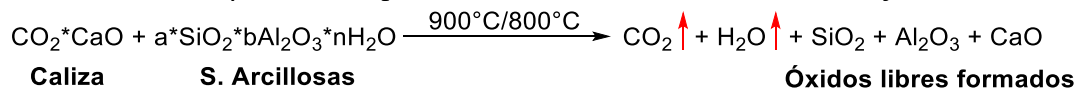
2.1 Marco Teórico.

2.1.1 Cemento Portland

El cemento tipo portland es un conglomerado hidráulico resultante de calcinar a temperatura de *clinkerización* (1400 a 1650°C) una mezcla homogénea de piedra caliza y arcilla artificial (aproximadamente 20 % en peso) para obtener un cuerpo de *Clinker* siendo el principal producto del cemento portland y componente más importante del hormigón constituido por silicatos, aluminatos anhidros, y una pequeña cantidad de óxido de calcio (CaO) (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

En la primera fase de calcinación se produce una descarbonatación del CO₃ y Ca y una descomposición de la arcilla (Figura 2).

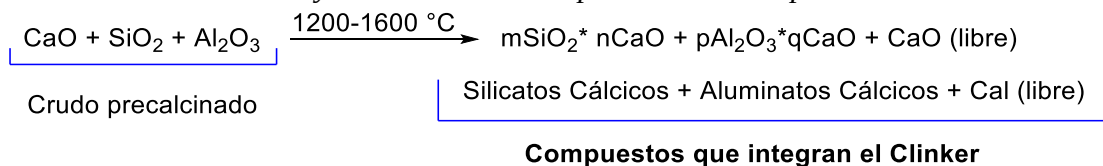
Figura 2. Óxidos libres formados a partir de descarbonatación de arcillas y caliza.



Tomado de (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

Siguiendo la calcinación y aumentando la temperatura durante el proceso, los óxidos libres formados o crudo reaccionan produciendo nuevas sustancias (Figura 3).

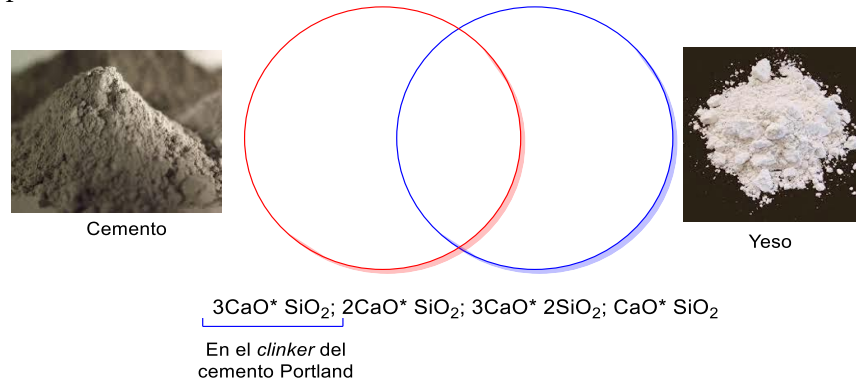
Figura 3. Sustancias constituyentes del Clinker a partir del crudo precalcinado.



Tomado de (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

Los silicatos de calcio reaccionan con los oxidos de calcio de dos posibles formas. Una de ellas con la composición mínima requerida en el clinker del cemento Portland (Figura 4).

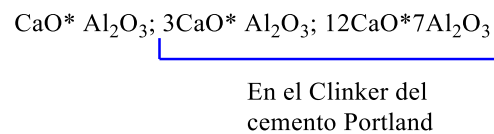
Figura 4. Composición relativa del Clinker del cemento Portland.



Tomado de (Gomá, 1979).

Dentro de los componentes de la mezcla del cemento Portland, aparte de los silicatos de calcio que esta presenta, tambien se encuentran aluminatos de calcio de la siguiente forma: (Gomá, 1979).

Figura 5. Aluminatos de calcio presentes en el cemento.



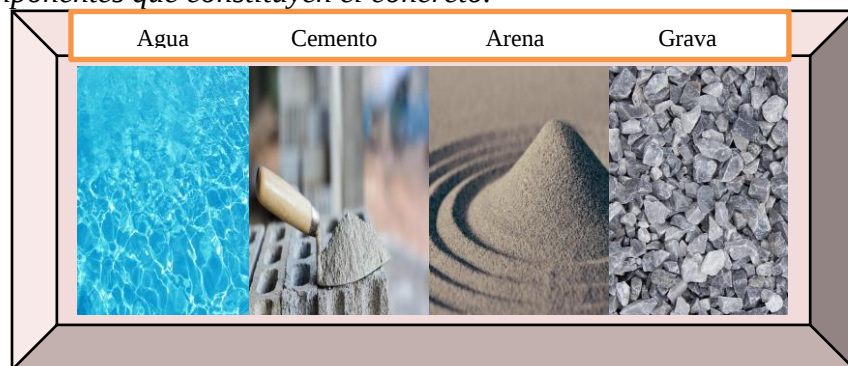
Tomado de (Gomá, 1979).

El endurecimiento de la mezcla ocurre tiempo después de realizar el amasado lo que permite formar la piedra artificial resultante. Ser moldeable, duradero y resistente son las propiedades que le permiten al cemento su gran aplicación en la construcción de edificaciones y obras públicas (Sánchez, 2013).

2.1.2 Concreto

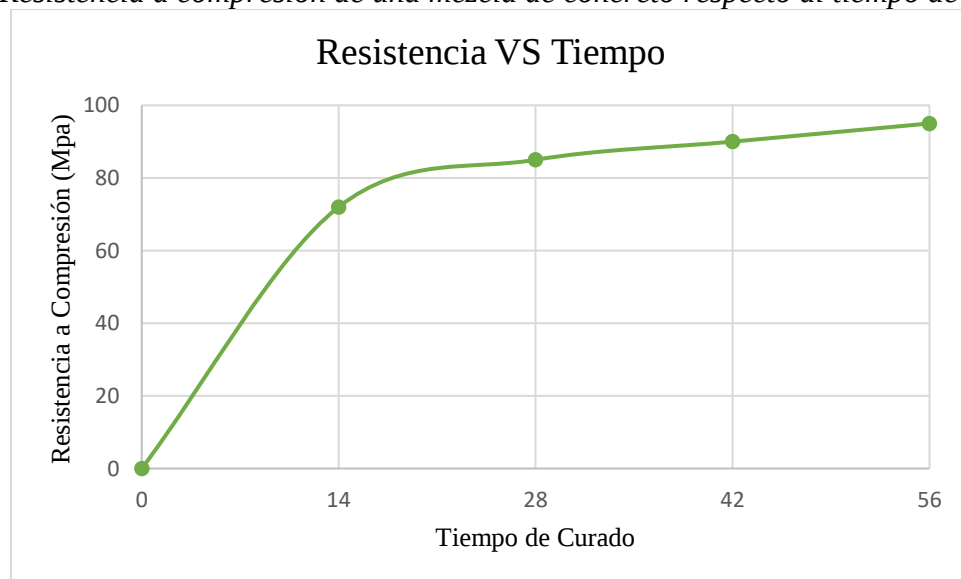
El concreto, un material de uso convencional en el ámbito de construcción producido por la mezcla de agregados y materias primas no renovables (grava, arena, cemento y agua) que al ser obtenidas mediante minería a cielo abierto provocan un impacto ambiental negativo (Bedoya & Dzul, 2015). Los elementos activos del concreto (agua y cemento) reaccionan químicamente otorgándole la solidez a la mezcla, mientras los agregados (arena y grava) le dan el esqueleto ocupando gran porcentaje del volumen final del producto. Las propiedades físicas y químicas del concreto están definidas por los componentes que la constituyen (Díaz Martínez, 2005).

Figura 6. *Componentes que constituyen el concreto.*



Este material de construcción es el más utilizado debido a que posee una gran resistencia a la acción del agua sin sufrir deterioro, además es moldeado para variar su tamaño y forma dependiendo del uso que se desee. Durante su proceso de fraguado ocurre una contracción por secado que se debe a la pérdida de agua en diferentes estados (humedad), dicho proceso ocurre cuando el cemento entra en contacto con el agua produciendo una reacción exotérmica determinando el endurecimiento de la mezcla haciendo que pierda su plasticidad y maleabilidad, tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento se presenta un nuevo estado en el que su resistencia alcanza un valor más apreciable, este estado se denomina fraguado final. El tiempo de fraguado de la mezcla varía dependiendo de la humedad relativa, temperatura ambiental, mano de obra, entre otros factores (Gaspar-Tébar, 1980).

Figura 7. Resistencia a compresión de una mezcla de concreto respecto al tiempo de fraguado.



Adaptado de (Rudeli & Santilli, 2017).

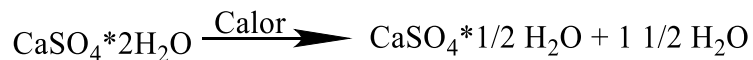
2.1.3 Aditivos en el Concreto

Una manera de modificar el tiempo de fraguado del concreto es mediante la adición de aditivos, los cuales corresponde a sustancias que son incorporadas al concreto durante su proceso de amasado en proporciones inferiores al 5% en peso del cemento. La adición del aditivo modifica las propiedades del concreto de forma deseada. Generalmente, las nuevas características brindadas por los aditivos pueden ser resumidas en: el aumento en la resistencia mecánica, mayor durabilidad física o química, influencia en los tiempos de fraguado y mejora en la trabajabilidad del hormigón sin modificar la relación agua/cemento. Según la norma técnica colombiana NTC-1299:2008 los aditivos se clasifican en: Aditivo acelerante (Tipo A), que acelera el fraguado y el desarrollo de resistencia temprana del concreto. Aditivo retardante (Tipo B), retarda el fraguado del concreto. Aditivo reductor de agua (Tipo C), reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir concreto de una consistencia dada. Aditivo reductor de agua (Tipo D), de alto rango, reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12% o más. Aditivo reductor de agua y acelerante (Tipo E), reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada y acelera el fraguado y el desarrollo de resistencia temprana del concreto. Aditivo reductor de agua y retardante (Tipo F), reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada y retarda el fraguado del concreto. Y por último el aditivo reductor de agua de alto rango y retardante (Tipo G), que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12% o más y retarda el fraguado del concreto (Icontec, 2008).

Figura 8. Tipos de aditivos retardantes y acelerantes en el concreto.

Tomadas de Internet (<https://col.sika.com/es/products.html>).

Un material capaz de cumplir la función de aditivo en la preparación del concreto es el yeso crudo al ser agregado al hormigón en su momento de fabricación facilita la obtención de mejores fraguados en el cemento.

Figura 9. Calcinación sulfato de calcio dihidratado.

Tomado de (Ávila Arias & Alcón Condori, 2013).

2.1.4 Yeso Odontológico

Los yesos odontológicos o dentales se clasifican en cinco tipos, de acuerdo con su elaboración y sus propiedades: para impresiones (tipo I), fabricado mediante calcinación en seco y empleado como elemento de impresión de dientes y tejidos blandos de la boca. Para modelos de laboratorio (tipo II), obtenidos por calcinación en autoclave y empleado para montaje de modelos en los articuladores, enmuflados de prótesis removibles parciales o totales y fabricación de

modelos preliminares en prótesis totales. Para modelos de estudio (tipo III), elaborados por calcinación húmeda y utilizado en ortodoncia, empleado también para la elaboración de modelos de trabajo en prótesis removible y algunos procesos de laboratorio. Yeso dental de alta resistencia (tipo IV), se consigue hirviendo el yeso en una solución salina como el cloruro de calcio a 30 % en peso, se utiliza en casos donde se requiere alta resistencia, gran dureza y baja expansión de fraguado. Yeso de alta resistencia y expansión (tipo V), su proceso de elaboración es similar al anterior con la diferencia de que es sometido a mayores temperaturas. Se utiliza para compensar la contracción de cristalización de las aleaciones de alto punto de fusión o de algún otro material que se contraiga (Ávila Arias & Alcón Condori, 2013).

Figura 10. Tipos de yeso según su aplicación en la odontología



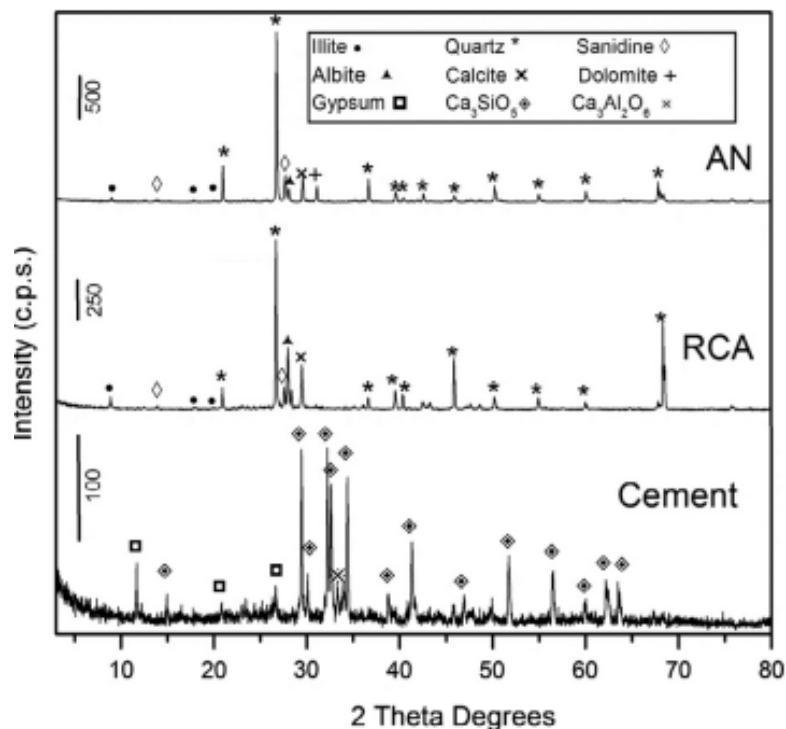
impresión de dientes -moldes laboratorio -molde estudio -yeso alta resistencia -yeso alta resistencia y expansión. (Tomadas de Internet).

2.1.5 Caracterización Química del Yeso

Las arcillas, minerales y agregados presentes en el yeso odontológico y el concreto son identificados mediante la técnica analítica difracción de rayos X, esta técnica estudia las fases

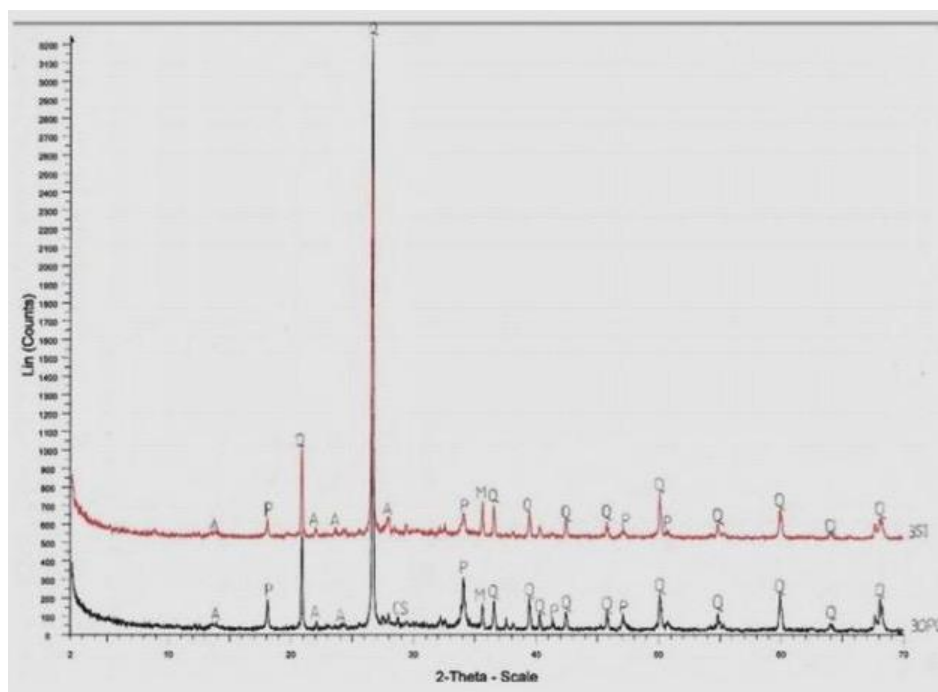
cristalinas en materiales sintéticos o naturales proporcionando intensidades en la figura de difracción permitiendo construir estructuras detallados de átomos de compuestos sólidos y sus respectivos ángulos de enlace (Atkins & Jones, 2006). El fenómeno de DRX sucede al bombardear sustancias cristalinas con electrones de alta energía que se desaceleran y emiten una radiación conocida como “*Bremsstrahlung*” en intervalos de onda específicos, sobre estos aparecen picos sobrepuestos de alta intensidad que provocan colisiones al interaccionar los electrones incidentes con los de la capa interna de los átomos expulsando un electrón de mayor energía como un fotón de rayos X (Cortes, Martinez Yepes, & Albeiro, 2006).

La identificación de las fases presentes en el concreto es determinada mediante la comparación de los perfiles de difracción experimentales con una base de datos de patrones de polvo, donde se detalla las principales fases cristalinas de los componentes que constituyen la mezcla. Los agregados naturales (grava y arena) están formados por minerales como cuarzo, illita, sanidina y albita exhibiendo un patrón de difracción similar a los agregados de concreto reciclado concordando con las características mineralógicas de ambos materiales. El cemento se constituye mayoritariamente con minerales de alita y yeso en menor proporción (Ledesma, y otros, 2014).

Figura 11. Patrón de difracción de los componentes de una mezcla de concreto simple.

Tomada de (Ledesma, y otros, 2014).

La naturaleza poco cristalina de los hidratos de silicato de calcio al reaccionar con las moléculas de agua en la formación de concreto proporciona picos de difracción débiles y tienden a ser inundados por los picos de difracción del hidróxido de calcio, esto sucede por tener fases mayormente amorfas. Por otro lado, las reflexiones de los minerales agregados pueden provocar interferencia en el análisis. La técnica tiene varias aplicaciones en el concreto como: medición del contenido de vidrio en material puzolánico, el grado de hidratos, y también en la predicción de la fuerza del cemento de escoria (Poole & Sims, 1998).

Figura 12. Patrón de difracción de especímenes de concreto de humo de sílice y hormigón liso.

Tomada de (Tanikela, 2010).

2.2 Estado del Arte

A lo largo de los años los investigadores se han encargado de estudiar al yeso y como su uso se puede magnificar al ser reciclado e incorporado a procesos de fabricación de edificaciones. En 1986 Marc Nohier realizó una valoración del yeso en términos de resistencia, trabajabilidad y bajo costo con el fin de aplicarlo a la construcción de viviendas más económicas y sostenibles. La mezcla formada por yeso residual-agua, presenta una mayor velocidad de fraguado frente a la mezcla con yeso natural y su facilidad para obtener productos con superficies perfectas y dimensiones precisas, permite desarrollar compuestos con resistencias superiores a 50 kg/cm² a compresión. La rentabilidad del uso de yeso en la fabricación de muros de cargas, revestimientos

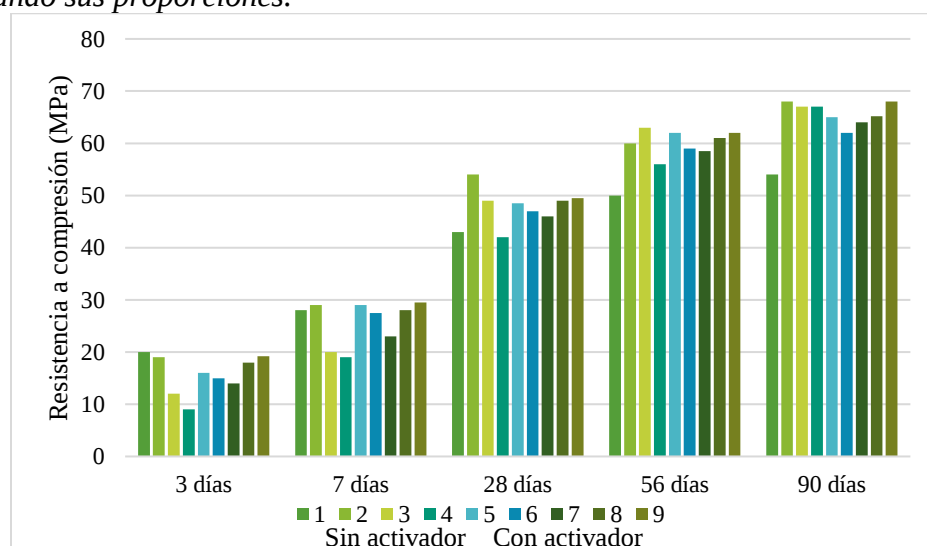
de pintura o dispositivos arquitecturales se ve afectada por su sensibilidad al agua. En este aspecto la humedad del ambiente no provoca daños estructurales; sin embargo, puede favorecer al desarrollo de microorganismos en materiales que incluyen yeso (Nolhier & Mallart, 1986).

En el año 2000 se reportó que la producción nacional de yeso en Colombia presentaba una demanda del 35 y 40%, donde además de su uso en construcción era empleado en bajas cantidades en la fabricación de fertilizantes o como material para el acondicionamiento del suelo. En Colombia, el yeso se encuentra principalmente en terrenos de la cordillera oriental, en la costa de la península de la Guajira y en algunos sectores de la cordillera central. Las principales áreas productoras de yeso son: Mesa de los Santos (Santander); Área comprendida entre los municipios de Miraflores, Páez, Almeida (Boyacá) y Gachalá (Cundinamarca); regiones de Tocaima, Girardot (Cundinamarca) y Rovira (Tolima); Área de Anzá (Antioquia) y Neira (Caldas); Regiones de Carrizales-Uribia (Guajira) (Maya Sánchez, Cardenas, & Forero, 2000).

En 2006, Mun y otros investigadores de la Universidad Nacional de Chonbuk, Jeonju en Corea del Sur examinaron la posibilidad de adicionar activadores inorgánicos (cal, yeso y polvo de piedra caliza) con el propósito de acelerar la resistencia a compresión y reforzar los poros de las estructuras a menor tiempo de endurecimiento en morteros y cementos de escoria de alto horno. El trabajo desarrollado buscó aprovechar las propiedades de los activadores al realizar ensayos con diferentes proporciones viendo cómo actúa la contracción del secado, carbonatación y la resistencia a compresión. Los ensayos mostraron que los especímenes sin adición de activadores tenían menor resistencia respecto a los diseñados con activadores siendo una forma efectiva de aumentar la resistencia en los cementos de escoria de alto horno. Por otro lado, la profundidad de

carbonatación del concreto con adición del activador disminuye reduciéndose en un 20% pasados 180 días del periodo de curado, las muestras con mayor contenido de escoria de alto horno presentaron una mejor relación de sustitución con un porcentaje de humedad del 60 % (Mun, So, & Soh, 2006).

Figura 13. Cambios en la resistencia de los 9 especímenes diseñados con presencia de activadores orgánicos variando sus proporciones.

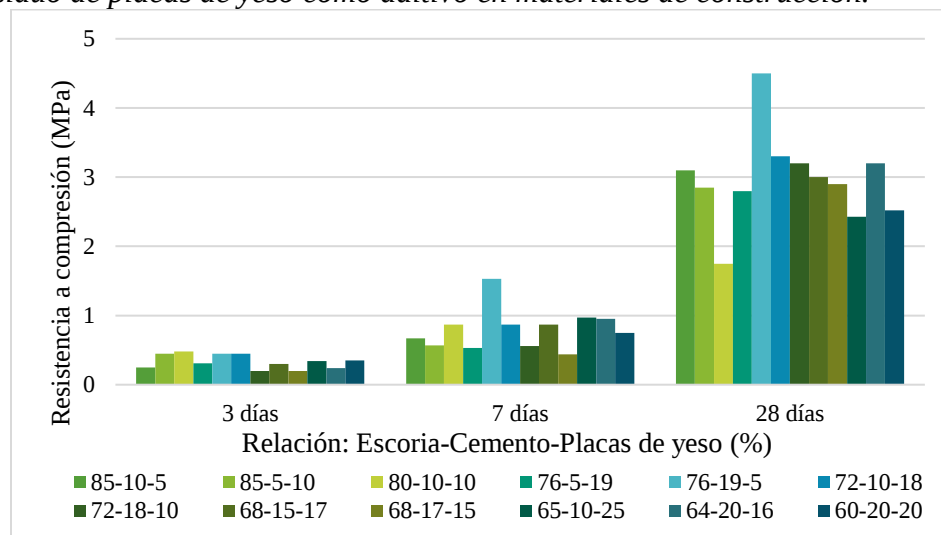


Adaptado de (Mun, So, & Soh, 2006).

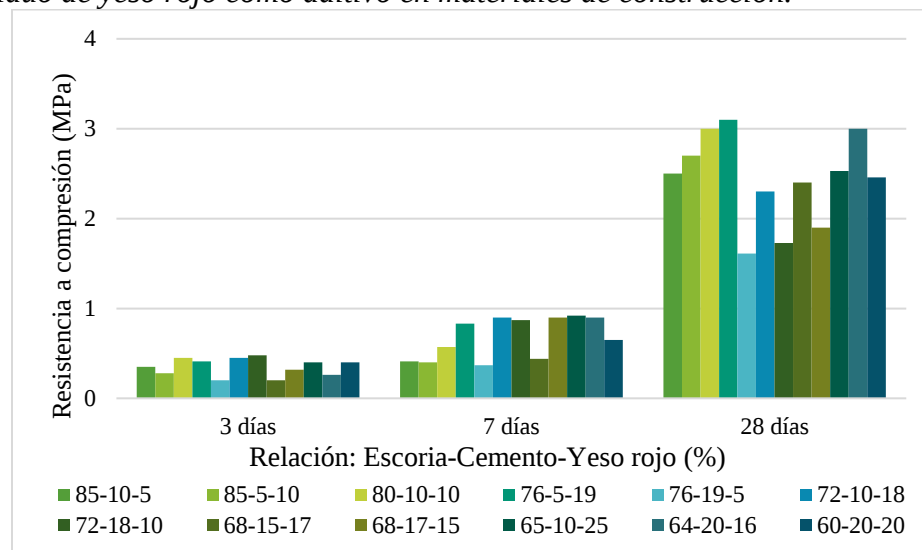
En 2007, Seema Karami en colaboración con investigadores del departamento de construcción ambiental de la Universidad de Coventry, Inglaterra investigaron una mezcla óptima de baja resistencia a compresión utilizando materiales de desecho donde se incluyó yeso rojo (RG), placas de yeso (PG), cemento en polvo (DC) y escoria de oxígeno básico (BOS). Las propiedades y calidad de las materias primas empleadas fueron valoradas en sistemas ternarios, el primero formado por una mezcla de BOS, DC y RG y el segundo formado por BOS, DC y PG, ambas

evaluadas a las mismas proporciones de escoria de oxígeno básico y variando las cantidades de yeso residual respecto al cemento en polvo. Los resultados determinaron que la presencia de placas de yeso dentro de los materiales de construcción diseñados tenía una mejor resistencia que las elaboradas con yeso rojo (Karami, Claisse, Ganjian, & Sadeghi, 2007).

Figura 14. *Residuo de placas de yeso como aditivo en materiales de construcción.*



Adaptado de (Karami, Claisse, Ganjian, & Sadeghi, 2007).

Figura 15. *Residuo de yeso rojo como aditivo en materiales de construcción.*

Adaptado de (Karami, Claisse, Ganjian, & Sadeghi, 2007).

En 2008, Yoon-Moon Chun y colaboradores dentro del programa de investigación de residuos sólidos de la Universidad de Wisconsin, USA incorporaron un yeso residual extraído de paneles de yeso junto a cenizas volantes clase C en relación 1:2 en peso en la preparación del concreto. La investigación demostró la posibilidad de reemplazar en un 30 a 60 % al cemento por la mezcla de concreto. La mezcla de concreto que presentó mejores propiedades estaba constituida por 40 % cemento, 10 % de paneles de yeso en polvo y 50 % las cenizas volantes de clase C, mostró resistencia a compresión casi tan altas como la de la mezcla de referencia a los 7 días de llevados a cabo los ensayos, dichas mezclas de concreto podrían usarse para minimizar el agrietamiento por contracción del hormigón, lo que aumenta su durabilidad y el rendimiento de las estructuras (Chun, Naik, & Kraus, 2008).

En 2009, Chandara y colaboradores realizaron un estudio del remplazo de yeso natural (NG) por un yeso residual tomado de moldes de fundición deslizante en una fábrica de cerámica para la producción de cemento tipo *Portland*, donde evaluaron las propiedades químicas y mecánicas reemplazando el yeso natural en cantidad del 3, 4 y 5 %. Los resultados de DRX del NG indicaron la presencia de dihidratos en la mezcla, mientras que, con yeso residual contenía tanto dihidratos como hemihidratos. El contenido de cada especie fue evaluada a través de las técnicas calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría (TG) mostrando que yeso residual y NG contenían 12.45% y 1.61% de hemihidratos, respectivamente. Por otro lado, los esfuerzos de flexión y compresión fueron similares para ambos tipos de cemento, mientras los tiempos de fraguado fueron más rápidos en un promedio de 15,29% y 13,67% para el yeso residual debido a la presencia de hemidratos, demostrando que los residuos de cerámica para yeso pueden ser usados como un material alternativo para el yeso natural en la producción de cemento portland (Chandara, Azizli, Ahmad, & Sakai, 2009).

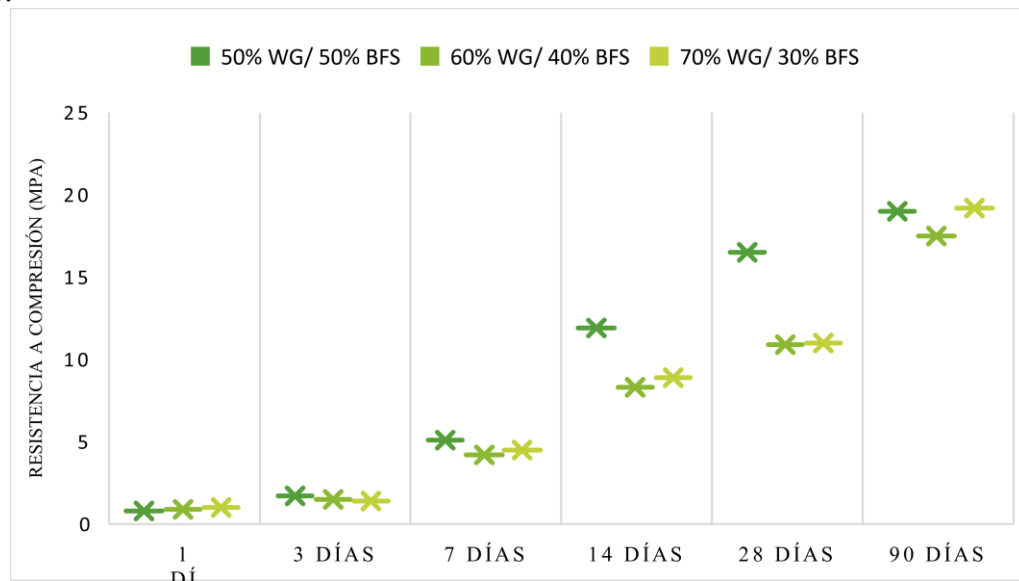
Tabla 1. *Fuerzas de compresión y flexión de especímenes con distintas proporciones de yeso residual.*

Mezclas implementando yeso residual	Fuerza compresión (MPa)			Fuerza flexión (MPa)			Área Superficial (cm ² /g)
	2 días	7 días	28 días	2 días	7 días	28 días	
97% NG/ 3% yeso residual	16.05	31.43	49.2	3.59	5.78	6.30	3816
96% NG/ 4% yeso residual	18.92	33.83	52.82	4.08	6.38	7.07	3637
95% NG/ 5% yeso residual	21.82	36.05	50.7	4.39	6.62	7.81	3691
Promedio	18.93	33.77	50.91	4.02	6.26	7.06	3714.67
97% yeso residual / 3% NG	18.45	37.15	53.25	3.96	6.49	7.51	3785
96% yeso residual / 4% NG	18.95	32.13	51.75	4.17	6.37	7.16	3948
95% yeso residual / 5% NG	17.25	31.98	51.77	3.71	5.87	7.79	3785
Promedio	18.22	33.75	52.26	3.95	6.24	7.49	3839.33

Adaptado de (Chandara, Azizli, Ahmad, & Sakai, 2009).

Así mismo en 2009 en México, Escalante-García junto a Magallanes-Rivera y Gorokhovsky investigaron el rendimiento y la resistencia al agua de los aglutinantes de escoria de alto horno y de yeso hemidratado residual al preparar morteros con diversas proporciones de los agregados variando de 50 a 70% para yeso residual (GW) y de 30 a 50% en el caso de la escoria de alto horno (BFS). Los morteros presentaron resistencias similares pero el que contenía 50% de escoria presentó mejor resistencia a mayores cargas en menor tiempo. La rápida solidificación de los morteros alcanzó un menor tiempo de fraguado a causa de su estructura inicial de yeso, una menor resistencia y un alto contenido de agua no evaporable (Escalante-García, Magallanes-Rivera, & Gorokhovsky, 2009).

Figura 16. Resistencia a compresión de morteros de escoria y yeso residual a distintos tiempos de fraguado.

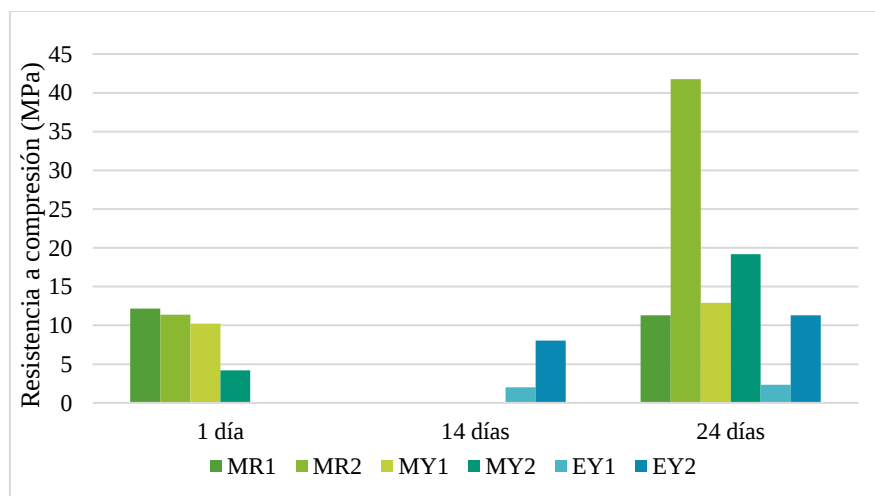


Adaptado de (Escalante-García, Magallanes-Rivera, & Gorokhovskiy, 2009).

En 2010, en la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Morales analizó el comportamiento de adicionar diferentes proporciones de yeso residual procedente de placas de cartón-yeso frente al yeso natural en un sistema ternario que constaba de tres componentes químicos: cemento portland, cemento de aluminato cálcico y yeso comercial como materiales de referencia. el sistema se altera variando el yeso comercial por yeso residual en proporciones de 1 y 5%. La mezcla de 5% presentó una resistencia mecánica de 10,23 MPa cerca a la de referencia de 12,18 MPa a las 24 horas de elaborados los ensayos. Luego de 28 días sus resistencias fueron 11,28 MPa y 12,90 MPa respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento similar del sistema de referencia con el sistema con adición de yeso residual.

Los ensayos a compresión realizados contenían una adición de 5% de yeso comercial o yeso residual, cada grupo de especímenes se diferenciaban en composición y porcentaje de composición. Las mezclas preparadas fueron: la mezcla referencia (MR) que contenía DC Cemento de aluminato de calcio (CAC) y yeso comercial, la mezcla con yeso residual (MY) contenía CP, CAC y yeso residual, y la mezcla con escoria (EY) donde se reemplazó el DC por escoria. Se diseñaron dos ensayos, 1 en proporciones de 90/10 y el 2 con proporciones de 70/30 (Morales Martinez, 2010).

Figura 17. Resistencia a compresión de un sistema ternario conformado por yeso residual y escoria.

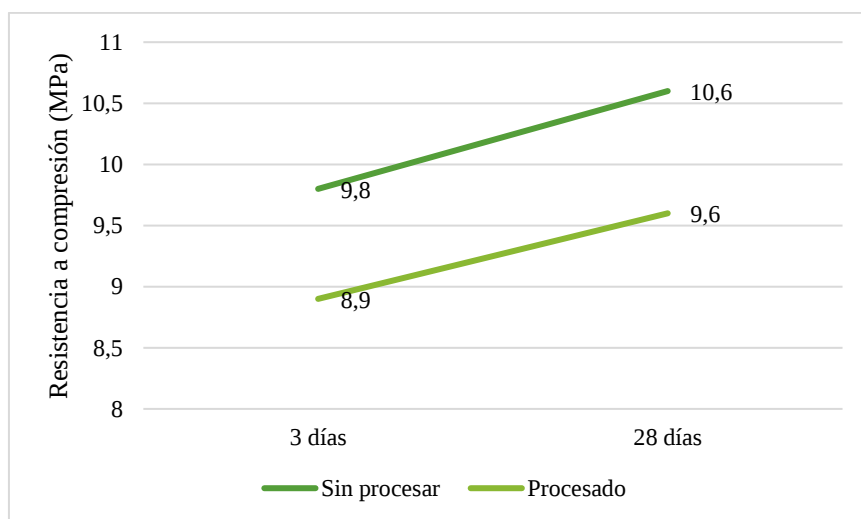


Adaptado de (Morales Martinez, 2010).

En 2011, siguiendo su línea de trabajo Garg junto a otros investigadores en el instituto central de investigación de edificaciones en la India estudiaron la posibilidad de incorporar los residuos industriales de fosfoyeso y tiza, en materiales de construcción como material de valor

agregado en asociación con otros desechos industriales como cenizas volantes y escoria. Estos materiales contienen impurezas nocivas que interfieren con el fraguado, endurecimiento de los cementos y materiales cementosos. Por lo tanto, se buscó evaluar química y mecánicamente las propiedades del material procesado (eliminando impurezas) y sin procesar para ser aplicado a pisos, bloques y baldosas de cemento sin que su degradación sea negativa para el medio ambiente. Los resultados proporcionados por la microscopia electrónica de barrido (SEM) indicaron que los materiales contenían impurezas de P_2O_5 , F, materia orgánica, álcalis ($Na_2O + K_2O$) y Cl. Se obtuvo que los fosfoyesos procesados presentaron mayor resistencia a compresión y tiempos de fraguado más largos que el yeso producido a partir de no procesado (Garg, Mridul; Minocha, A; Jain, Neeraj, 2011).

Figura 18. *Fuerza de compresión de residuos industriales (Fosfoyeso) como material de valor agregado.*



Adaptado de (Garg, Mridul; Minocha, A; Jain, Neeraj, 2011).

En 2012, Godinho-Castro y colaboradores efectuaron la incorporación de residuos de yeso procedentes de construcción y escombros de demolición en productos de bloque cerámicos, evaluando su composición química y mecánica y la ecotoxicidad ambiental del bloque por medio de pruebas de lixiviabilidad estimando la concentración a la cual el bloque cerámico tiene un efecto sobre los organismos a los que fueron realizadas las pruebas (Algas, Peces, Crustáceos, Bacterias). Se demostró la viabilidad de formar un bloque constituido en un 30% arcilla plástica, 30% arcilla no plástica, 20% cemento portland y 20% de residuo de yeso mostrando una resistencia media de 4,64 MPa en comparación con los demás bloques cerámicos formados (Godinho-Castro, Testolin, Janke, Corrêa, & Radetski, 2012).

Tabla 2. *Bloques cerámicos de baja resistencia mecánica.*

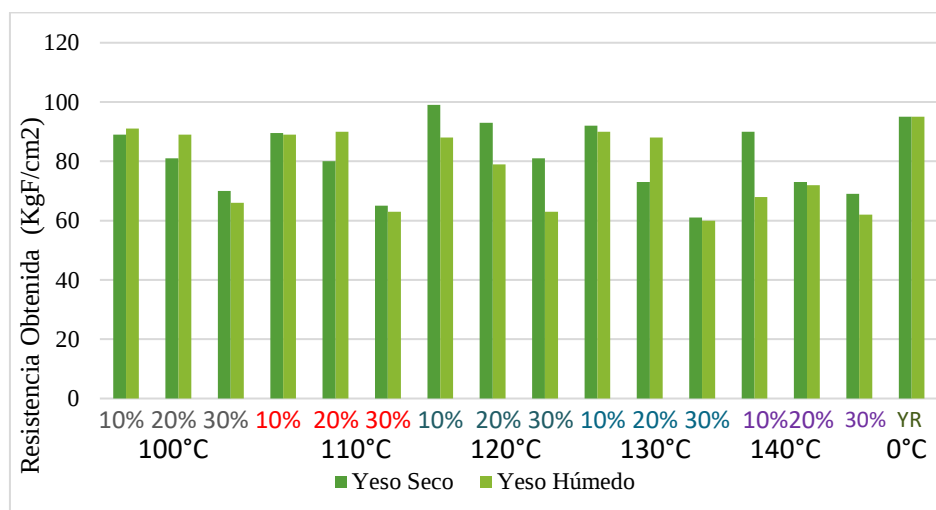
Bloque	Arcilla plástica (%)	Arcilla no plástica (%)	Residuo de yeso (%)	Cemento portland (%)	Resistencia mecánica (MPa)
1	100	0	0	0	1.71 ± 0.46
2	70	20	10	0	0.50 ± 0.11
3	65	25	10	0	0.52 ± 0.04
4	60	20	20	0	0.48 ± 0.12
5	55	15	30	0	0.40 ± 0.02
6	50	10	40	0	0.82 ± 0.63
7	0	100	0	0	1.23 ± 0.30
8	30	30	20	20	4.64 ± 0.17
9	40	40	10	10	2.38 ± 0.52
10	35	35	20	10	2.66 ± 0.32
11	30	30	30	10	2.45 ± 0.32

Adaptado de (Godinho-Castro, Testolin, Janke, Corrêa, & Radetski, 2012).

En 2013, Hugo Begliardo junto a un grupo de investigadores de la Universidad Nacional Tecnológica de Argentina, estudiaron la posibilidad de reutilizar los residuos de yeso de obras de

construcción aplicadas en condiciones húmedas (revestimientos de paredes y cielorrasos) y secas (placas laminadas) en diferentes proporciones al yeso comercial de construcción (10, 20 y 30%) en función con la temperatura a la cual fue secado el residuo. Las resistencias a compresión obtenidas permitieron catalogar al yeso en 2 tipos: Tipo A (80%) y Tipo B (60%). La inclusión del 10% del agregado tanto en condiciones húmedas o secas presento un mejor comportamiento debido a la menor presencia de impurezas en el yeso, en cuanto al incremento de la temperatura de secado del residuo (100 a 140°C) no aporó una tendencia sustancial en cuanto al aumento o disminución de la resistencia evidenciando la viabilidad del reaprovechamiento con sus beneficios medioambientales que esto conlleva, es decir, reduciendo la acumulación en rellenos sanitarios y vertederos de un recurso natural no renovable (roca de yeso) así como el consumos energéticos que este requiere (Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013).

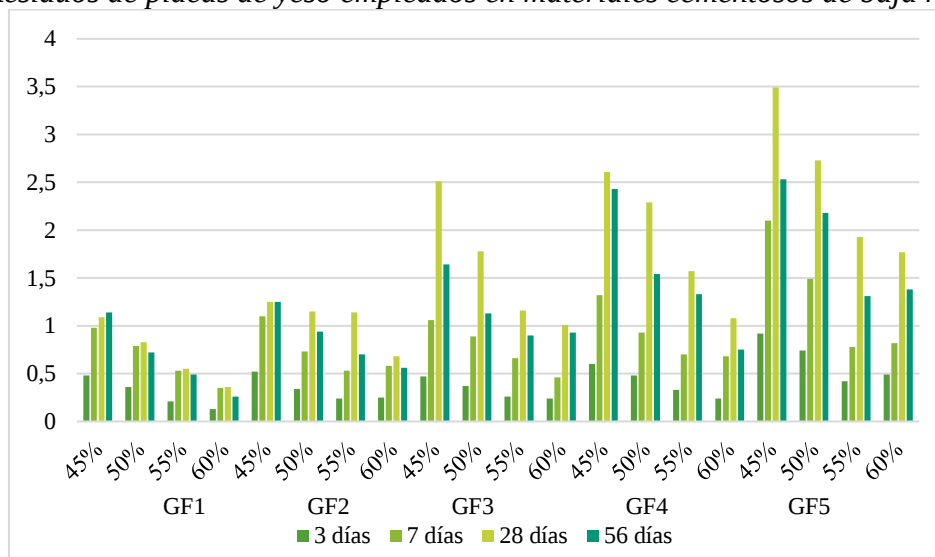
Figura 19. Resistencia a compresión de bloques con residuos de yeso a condiciones húmedas y secas.



Adaptado de (Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013).

En 2015, en la Universidad tecnológica de Visvesvaraya, India. Raghavendra junto a Udayashankar reciclaron los paneles de yeso desechados de la industria de construcción y demolición en la preparación de materiales cementosos secundarios de baja resistencia (MCSR) disminuyendo su acumulación en rellenos sanitarios y la liberación del gas sulfuro de hidrogeno (H_2S) en los vertederos. Se prepararon mezclas con aglutinantes y agregados en proporciones 1:1 en peso variando las cantidades de agua por ensayo (45%, 50%, 55%, 60%). El aglutinante fue una mezcla de paneles de yeso, cenizas volantes y cemento y el agregado, polvo de cantera en reemplazo de la arena. Se evaluaron 5 mezclas: GF1, GF2, GF3, GF4, GF5 donde por ensayo se mantuvo la cantidad de polvo de cantera, del GF1 al GF5 se disminuyó gradualmente las cantidades de paneles de yeso y cenizas volantes, y se aumentó la cantidad de cemento en los especímenes. Las mezclas confinadas a 3, 7, 28 y 56 días mostraron valores de resistencias entre 0,1 a 3,50 MPa encontrándose dentro del límite prescrito ($>8,3$ MPa) donde a medida que aumentaba la cantidad de cemento por espécimen aumentaba la demanda de agua requerida (Raghavendra & Udayashankar, 2015).

Figura 20. Residuos de placas de yeso empleados en materiales cementosos de baja resistencia.



Adaptado de (Raghavendra & Udayashankar, 2015).

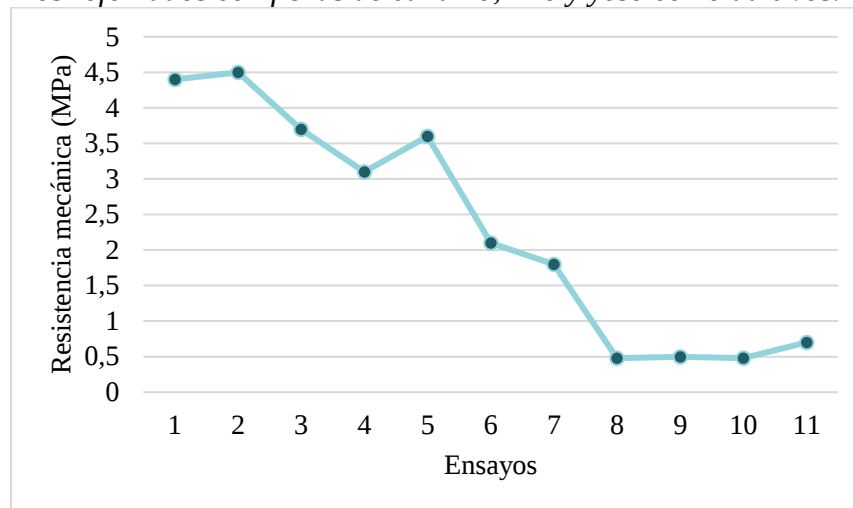
En 2016, Philip Zak junto a un grupo de investigadores buscaron la manera de fabricar ladrillos de tierra reforzados incorporando fibras naturales (subproductos agrícolas), yeso y cemento en diferentes proporciones cumpliendo con el rendimiento de los edificios y su sostenibilidad. Se prepararon 11 ensayos con la siguiente composición:

Tabla 3. *Composición de ladrillos de tierra con aditivos.*

Ensayos	Respectiva composición
1	Tierra sin aditivos
2	Tierra con 3% de fibras de lino
3	Tierra con 3% de fibras de cáñamo
4	Tierra con 3% de fibras de lino y 5% yeso
5	Tierra con 3% de fibras de lino y 10% yeso
6	Tierra con 3% de fibras de cáñamo y 5% yeso
7	Tierra con 3% de fibras de cáñamo y 10% yeso
8	Tierra con 3% de fibras de lino y 5% cemento
9	Tierra con 3% de fibras de lino y 10% cemento
10	Tierra con 3% de fibras de cáñamo y 5% cemento
11	Tierra con 3% de fibras de cáñamo y 10% cemento

Adaptado de (Zak, Ashour, Korjenic, Korjenic, & Wu, 2016).

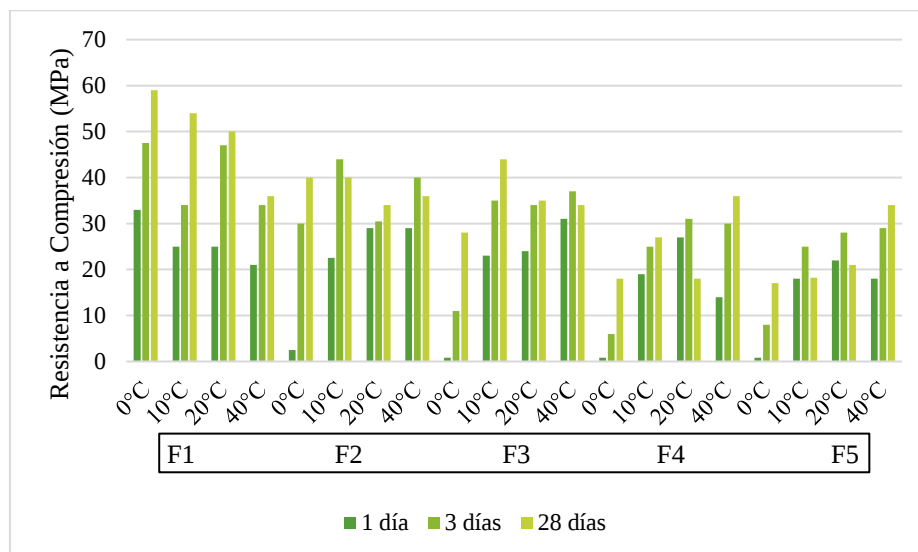
Los resultados mostraron que las fibras de cáñamo y lino actuaban como refuerzo en los ladrillos con un menor impacto sobre la resistencia a compresión que la tierra, pero una mayor influencia en el comportamiento de rotura debido a los enlaces formados con las arcillas en el material. Por otra parte, el cemento y yeso como aditivo conducían una reducción en la resistencia por no presentar una buena relación yeso-agua y cemento-agua provocando estructuras más porosas (Zak, Ashour, Korjenic, Korjenic, & Wu, 2016).

Figura 21. Ladrillos reforzados con fibras de cáñamo, lino y yeso como aditivos.

Adaptado de (Zak, Ashour, Korjenic, Korjenic, & Wu, 2016).

En 2017, Linglin Xu en contribución con otros investigadores, analizaron la posibilidad de incorporar al desecho sólido industrial yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD) a la fabricación ecológica de cemento de sulfoaluminato de calcio (CSA) gracias a su alta pureza de sulfato de calcio deshidratado. La investigación busca reducir el uso de recursos naturales, el consumo energético de la industria cementera y comprender beneficios económicos y ecológicos al aprovechar residuos industriales. Se evaluaron las propiedades químicas y mecánicas de los moldes curados bajo influencia de la temperatura (0, 10, 20, 40°C) y variando las proporciones de Clinker y FDG. La investigación evidencio la influencia de la temperatura en el cemento preparado donde a medida que se incrementaba el contenido de FGD y sucesivamente la temperatura se debilitaba la resistencia a compresión de los especímenes. Además, la adición de FDG favorece a la formación de etringita e hidróxido de alúmina y restringe la formación de monosulfato y esträtlingita (Xu, Wu, Li, Zhou, & Wang, 2017).

Figura 22. Efecto de la temperatura en la resistencia de moldes de cemento de sulfoaluminato de calcio.

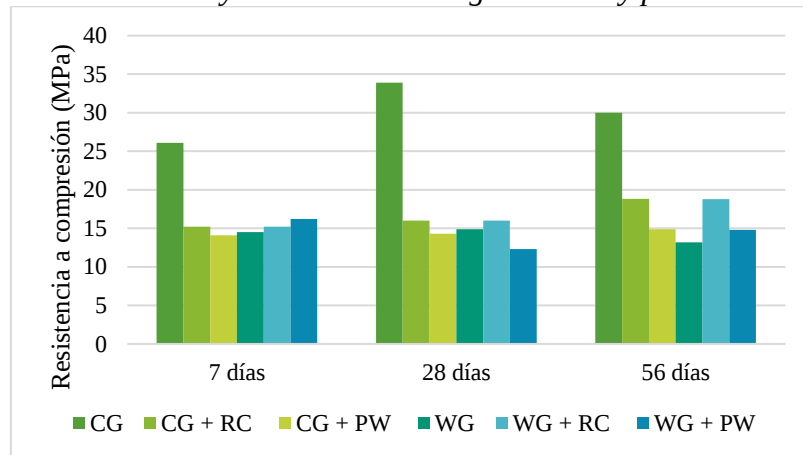


Adaptado de (Xu, Wu, Li, Zhou, & Wang, 2017).

En 2018 en Brasil, Geraldo y colaboradores examinaron las características de ladrillos cerámicos preparados con 50% (peso) de aglutinante y 50% (peso) de residuo con una pequeña relación de agua/mezcla (0,22). Los aglutinantes fueron yeso comercial (CG) y residual (WG) probando el uso de yeso residual como reemplazo del yeso comercial y en los residuos se empleó residuos de cerámica (RC) y porcelana (PW) dándole una utilidad y disminuyendo su impacto ambiental. Las muestras se moldearon antes del tiempo de fraguado a presión de carga uniaxial (10 kN). Las resistencias de los bloques estuvieron comprendidas entre 12.3 y 33.9 MPa. La baja relación Agua/Mezcla Sólida y la presión de carga ejercida antes de los tiempos de fraguados disminuyeron la porosidad que se mostró en su microestructura. Los resultados demostraron que

los materiales empleados presentan una alternativa para desarrollar componentes de construcción de buena calidad (Geraldo, Souza, Campos, Fernandes, & Camarini, 2018).

Figura 23. Ladrillos cerámicos de yeso residual con aglutinantes y porcelana como aditivos.

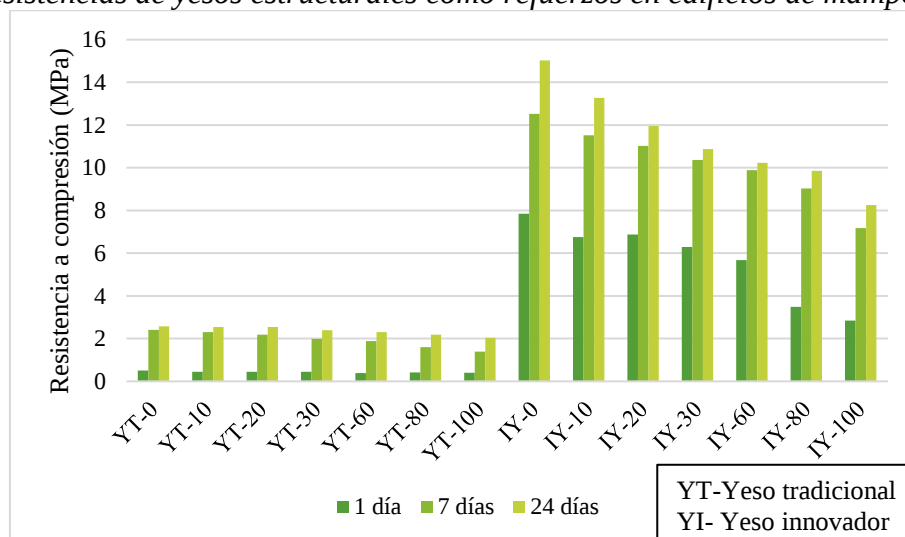


Adaptado de (Geraldo, Souza, Campos, Fernandes, & Camarini, 2018).

En 2019, Coppola en colaboración con otros investigadores en la Universidad de Bérghamo, Italia. Desarrollaron un yeso estructural para mejorar el rendimiento sísmico y la eficiencia energética de los edificios de mampostería de piedra de baja calidad sin tener presencia de cemento Portland. Se agregaron vidrios livianos activados con bases alcalinas (metasilicato de sodio pentahidratado: hidróxido de potasio: carbonato de sodio) en proporciones de 7:3:1 respectivamente teniendo en cuenta la influencia del agente de arrastre para los yesos tradicional sin presencia de cemento portland con un 25% de aire atrapado y un 35% de aire atrapado del yeso innovador en los muros de piedra. Los resultados indicaron que el yeso de base activada con álcali libre de cemento *Portland* fabricado con agregados de vidrio expandido y agente de arrastre de

aire proporcionan una resistencia de 8 MPa a 28 días y una conductividad térmica de 0.35 W (Coppola, y otros, 2019).

Figura 24. Resistencias de yesos estructurales como refuerzos en edificios de mampostería.

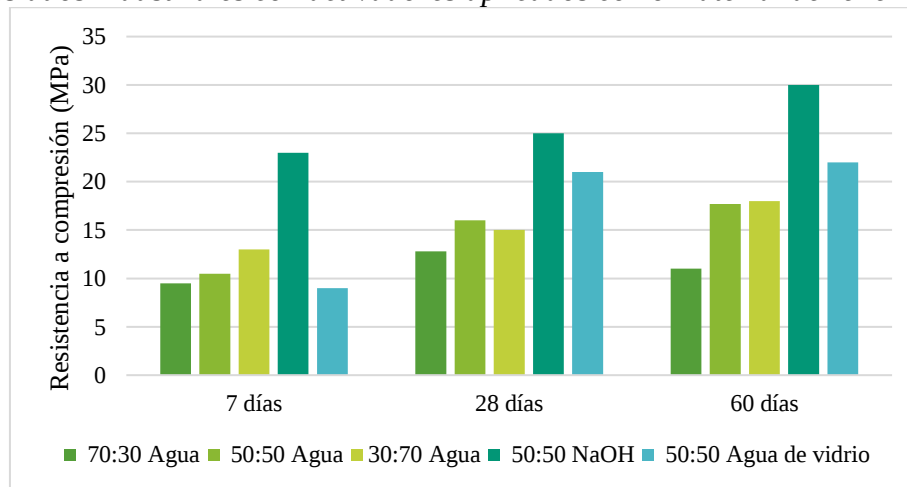


Adaptado de (Coppola, y otros, 2019).

En 2020, Yuetan Ma en cooperación con otros investigadores estudiaron la posibilidad de emplear dos materiales de desecho de una central eléctrica de China como lo fueron el yeso desulfurado de gases de combustión (FGD) y residuos de cenizas volantes (WFA) para llevar a cabo el desarrollo de materiales de relleno. Se prepararon mezclas con diferente porcentaje de FGD y WFA y utilizando tres activadores como estabilizadores, hidróxido de sodio (NaOH), agua de vidrio y agua normal, en pequeñas dosificaciones. Se evaluaron las propiedades mecánicas, químicas y microscópicas de cada mezcla elaborada a diferentes tiempos de curado. Los resultados mostraron que la mezcla activada con NaOH (FGDG: WFA = 50:50) logro propiedades mecánicas

aceptables para aplicaciones de relleno, lo que puede servir como una opción práctica para la utilización a gran volumen de los residuos industriales de FGD y WFA. La difracción de rayos X exhibió las fases cristalinas y minerales de los residuos de yeso desulfurado de gases de combustión y cenizas volantes. Las WFA estaban constituidos principalmente por mullita y cuarzo mientras FGDG por sulfato de calcio dihidratado. La microscopia de las mezclas fue examinada por la técnica microscopia electrónica de barrido (SEM), las partículas de FGD y WFA se encuentran separadas unas de otras cuando solo se usa agua, con la existencia con la regente alcalina las partículas se unieron entre unas con otras lo que se puede explicar por la fuerza del hidróxido de sodio como activador (Ma, y otros, 2020).

Figura 25. *Residuos industriales con activadores aplicados como material de relleno.*



Adaptado de (Ma, y otros, 2020).

2.3 Marco Legal

En las últimas décadas el sector de la construcción ha presentado un crecimiento exponencial en la producción de residuos de construcción y demolición (RCD). Aunque el porcentaje de los materiales de construcción a base de yeso solo representa un 1% respecto a la composición total de RCD, los aumentos en la utilización de este material ponen de manifiesto la necesidad de reciclar el cual representan una posible solución no solo para evitar la contaminación sino el agotamiento de los recursos y la saturación del medio ambiente por tipo de desechos (Virginie, 2011). La normativa colombiana para la gestión y manejo de RCD son:

2.3.1 Resolución 541 de 1994

Ministerio del medio ambiente. Con la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos de construcción y demolición (Ministerio del medio ambiente, 1994).

2.3.2 Resolución 472 de 2017

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición y se dictan otras disposiciones (Ministerio de ambiente y desarrollo, 2017).

2.3.3 Resolución 2397 de 2011

Secretaria distrital de ambiente. Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros y que esto permita que en la ciudad se dé un manejo apropiado de los RCD que repercuta en un menor impacto ambiental (Nieto Escalante, 2011).

Los bloques de concreto fueron desarrollados y ensayados según lo estipulado dentro de las normas técnicas colombiana NTC-1377:1994 y NTC-673:2010:

2.3.4 NTC 1377 de 1994

Elaboración y curado de especímenes de concreto para especímenes de laboratorio. La norma establece los procedimientos para la elaboración y curado de muestras de concreto en el laboratorio bajo estricto control de materiales y condiciones de ensayo, usando concreto que se puede compactar por apisonamiento o vibración, como se describe en la presente norma (ICONTEC, 1994).

2.3.5 NTC 673 de 2010

Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. La norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, teniendo en cuenta los valores normativos expresado de acuerdo con el sistema internacional de unidades (ICONTEC, 2010).

3. Metodología

3.1 Materiales y Equipos

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto planteado se emplearon los materiales y equipos descritos a continuación: morteros, cilindros de acero, cajas de recolección, molino industrial, palas, balanza analítica, pila de agua, máquina de ensayo a flexión de vigas de hormigón, martillo, palustre, difractómetro de rayos X de muestras policristalinas marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci, portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA), un espectrofluorímetro Shimadzu RF-551, lámparas fluorescentes blancas frías, incubadora de agitación.

3.2 Reactivos

La materia prima o reactivo incorporado en la fabricación del nuevo concreto fue el yeso odontológico residual tipo II y III obtenido de moldes PKT, dichos moldes son utilizados para llevar un registro de la mordida humana de los pacientes para realizar restauraciones complejas en la dentadura como encerados diagnóstico para seguir paso a paso los procesos de carilla y diseño de sonrisa, también es usado para observar movimientos de lateralidad y protrusiva para ajustar la inclinación de las eminencias articulares y el ángulo de Bennett. Por otro lado, se mantuvo las mismas proporciones de grava, arena, y agua y se varió la proporción de cemento dentro del proceso de fabricación del concreto, adicionando yeso residual sin que las propiedades de dichas materias se vean afectadas negativamente.

Figura 26. *Materias primas empleadas en la elaboración del nuevo material.*



3.3 Proceso Experimental

3.3.1 Caracterización Química de los Materiales de Partida (Cemento y Yeso residual)

Las materias primas constituyentes del concreto (grava, arena y cemento) y el yeso residual odontológico fueron pulverizadas y homogenizadas en un mortero de ágata, posteriormente cada muestra se montó en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) con centro de silicio “low background” mediante la técnica de “ZeroBackground”.

El yeso recolectado y las demás materias fueron analizadas cualitativamente mediante la técnica de difracción de rayos X de muestras policristalinas con ayuda del difractómetro de polvo de marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci, para conocer las fases cristalinas del material de partida.

Los datos se tomaron bajo las siguientes condiciones: Voltaje 40 (kV) Corriente 40 (mA), Rendija de Divergencia 0,6 mm, Rendijas “Soller” Primario y Secundario 2,5° Muestreo 0,02035° 2 θ con rango de Medición 3,5°-70,0° y radiación 2 θ , con tiempo de muestreo de 1,2 segundos.

Figura 27. *Difractómetro modelo D8 Advance.*



Tomada de Internet.

Las fases cristalinas se identificaron mediante el programa especializado *Diffract.EVA*, por medio de la comparación de los patrones de difracción obtenidos con la base de datos PDF-2 de patrones de polvo. Los análisis cualitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el Método de Rietveld entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos, empleando el software libre TOPAS.

3.3.2 Recolección de Materia Prima

Para obtener la materia prima (yeso residual) se aplicó una recolección del producto en un lapso de 2 meses, ubicando cajas diseñadas y roturadas para almacenar yeso residual (moldes, pedazos partidos) no contaminado de material biológico. Las respectivas cajas fueron distribuidas dentro de las preclínicas odontológicas del edificio Santander segundo piso. Al pasar el periodo de tiempo de recolección se pesó y se dispuso para ser utilizado en el proceso de elaboración del concreto.

Figura 28. *Yeso residual recolectado en preclínicas odontológicas.*



3.3.3 Molienda Material

La materia prima implementada (yeso residual) se le disminuyó su tamaño de partícula por medio de un molino y posterior a esto se tamizada con un tamiz número 40 hasta obtener un polvo fino con tamaño de partícula inferior a 5 mm, se volvió a pesar el yeso molturado para conocer el porcentaje de material perdido durante el proceso de molienda.

3.3.4 Preparación del Concreto

La preparación del nuevo concreto se realizó según lo estipulado por la norma técnica colombiana “Icontec” NTC-1377:1994 sobre la elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio, distinguida por establecer los procedimientos para la elaboración y curado de muestras de concreto en el laboratorio bajo estricto control de materiales y condiciones de ensayo, usando concreto que se puede compactar por apisonamiento o vibración, como se describe en la presente norma (ICONTEC, 1994).

El concreto preparado se llevó variando las proporciones estipuladas de cemento por yeso residual en proporciones de 0%, 20%, 40% y 60% manteniendo las mismas cantidades de los

agregados de arena (12,962 kg), grava (18,188 kg) y agua (6,5 kg) para los ensayos realizados (Aciu, Cobirzan, & Balog, 2014).

Tabla 4. *Proporciones de materias primas en el nuevo concreto.*

Material	Cant. Total (kg)	Material	Cant. Total (kg)	Material	Cant. Total (kg)	Material	Cant. Total (kg)
Cemento (100%)	6,33	Cemento (80%)	5,07	Cemento (60%)	3,80	Cemento (40%)	2,53
Yeso (0%)	0,0	Yeso (20%)	1,27	Yeso (40%)	2,53	Yeso (60%)	3,80

Luego de preparados los agregados, se mezclaron en un recipiente o bandeja metálica, impermeable, limpio y húmedo con un palustre de albañilería despuntado. El proceso se inició mezclando el cemento, el aditivo en polvo insoluble y el agregado fino (arena), sin adicionar agua, se mezclaron los materiales hasta que se aglomeraron uniformemente. Posterior, se le adicionó a la mezcla el agregado grueso (grava) y se mezcló hasta distribuir uniformemente cada agregado. Se adicionó el agua, y se mezcló la masa hasta que el concreto tenga una apariencia homogénea y la consistencia deseada. Se seleccionaron las proporciones de la carga del concreto mezclado que se va a utilizar en el moldeo de las muestras de ensayo, de tal manera que sean representativas de las condiciones actuales del concreto.

Figura 29. *Materiales mezclados en la preparación del concreto.*



Luego de preparada la mezcla, se engrasaron con aceite mineral los moldes de cilindros de acero con dimensiones 15x30 cm en los cuales se depositó la mezcla de concreto. Cada cilindro se llenó con tres capas de aproximadamente 10 cm cada una, luego de adicionada la mezcla se insertó 25 veces por capa una varilla compactadora larga de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud introduciéndola para sacar el aire de la mezcla evitando que quede porosa. Posterior al haber realizado el apisonamiento se procedió a dar 5 golpes por cada lado del cilindro (20 en total) con un mazo con cabeza de caucho. Luego de adicionar las tres capas se enrasó la superficie del concreto con un palustre para producir una superficie lisa uniforme nivelada con el borde o filo del molde y sin protuberancias mayores de 3,2 mm.

Figura 30. *Cilindros de concreto con inclusión de yeso residual.*



Cada espécimen fue dejado por 24 horas dentro de los moldes, posteriormente se desencofraron colocando cada bloque de concreto dentro de una pila llena de agua, al pasar los 28 días se sacaron los especímenes y se dispusieron para realizar las respectivas pruebas de resistencia (ICONTEC, 1994).

3.3.5 Prueba de Resistencia

Este método de ensayo es usado para determinar la resistencia a flexión de especímenes preparados y curados de acuerdo con el método de ensayo C42 o práctica C31 o C192 mediante el uso de una viga simple con carga según lo establecido por la norma ASTM (C 78:2002) y la norma técnica Icontec (NTC 673:2010). El esfuerzo determinado es alterado dependiendo del tamaño del espécimen, preparación, condiciones de humedad, curado, o cuando la viga ha sido moldeada o cortada al tamaño requerido.

Los especímenes después de haber estado en un tiempo de fraguado de 28 días deben mantenerse húmedo durante el período entre que se sacan del almacenamiento húmedo y el ensayo. Cada bloque fue ubicado con su cara endurecida hacia arriba, sobre la máquina de ensayo a compresión directamente debajo del bloque de apoyo de asiento esférico encontrada en la Universidad Santo Tomas campus de Piedecuesta (Figura 31). Se ajustó el indicador de carga de tal forma que se encontrará en cero antes de hacer cualquier ensayo. Posterior a esto, se designó la velocidad de carga la cual debe mantenerse constante durante la última mitad de la fase de carga anticipada, aquella velocidad correspondiente a una velocidad de esfuerzo sobre el espécimen de $0,25 \text{ MPa/s} \pm 0,05 \text{ MPa/s}$ [$35 \text{ psi/s} \pm 7 \text{ psi/s}$], lo que representa una carga del 3 y 6% en la superficie

del espécimen en el tercio medio, usando espesores de 0.004 y 0.015 pulgadas. Se aplicó la carga de compresión sobre el espécimen hasta que el indicador de carga presento un decrecimiento y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido. El ensayo se dio por terminado cuando la maquina registro un valor menor que el 95% de la carga pico, indicando la carga máxima resistencia que alcanza el espécimen diseñado (ICONTEC, 2010) (ASTM, 2002).

Figura 31. *Ensayos a compresión de los bloques de concreto con inclusión de yeso residual.*



4 Resultados y Discusión

4.1 Cantidad de Yeso Consumido: Preclínicas y Pregrado.

Los residuos producidos dentro de las prácticas de laboratorio por la facultad de odontología fueron recolectados en el período 2019-I y 2019-II. El consumo de yeso dentro de

pregrado y preclínicas (Tabla 5) se encuentran tabulados con sus respectivos tipos de yeso y las unidades totales empleadas en dicho período.

Tabla 5. *Yeso consumido dentro de pregrado y preclínicas odontológicas.*

Yeso Consumido	Consumo Pregrado / Preclínica (2019-I)				
	Tipos de Yeso	Pregrado		Preclínicas	
		N. Bolsas	Cantidad (g)	N. Bolsas	Cantidad (g)
	Yeso tipo II (Plaster)	954	81090	1122	95370
	Yeso tipo III Whip Mix (Biodentales)	1611	136935	899	76415
	Yeso tipo IV Whip Mix Silky-Rock (PLASTER)	730	62050	954	81090
	Yeso Mounting Stone Tipo III (Whip mix)	0	0	1254	106590
Yeso Consumido	Consumo Pregrado / Preclínica (2019-II)				
	Yeso tipo II (Plaster)	1172	99620	584	49640
	Yeso tipo III Whip Mix (Biodentales)	966	82110	196	16660
	Yeso tipo IV Whip mix Silky-Rock (Plaster)	340	28900	556	47260
	Yeso Mounting Stone Tipo III (Whip mix)	0	0	1520	129200
	Total	5773	490705	7085	602225

Tomado de Decanatura de la Facultad de Odontología-Universidad Santo Tomas.

Dentro de las prácticas de pregrado y preclínica, llevadas a cabo por la facultad de odontología en el periodo I-II del 2019, se emplearon 3 tipos de yeso dental: Tipo II, Tipo III y Tipo IV de marcas comerciales como lo son *Plaster*, *Whip Mix* y *Biodentales*. Cada yeso utilizado presenta la misma composición química, pero se diferencia por sus características como: aplicabilidad, tamaño y porosidad de los cristales de sulfato de calcio hemihidratado lo cual viene dado por el método y tiempo de calcinación de la piedra de yeso (Reyes Vélazquez, 2018).

Como se especifica en la tabla 5, las bolsas de yeso más consumidas tanto en pregrado como en preclínicas fue el tipo III el cual es empleado por los estudiantes en la preparación de modelos de estudio para vaciar las impresiones y decidir si se necesita reconstrucción o elaborar enmuflados de prótesis totales. Seguido del yeso tipo II (*Plaster*), el cual sirve para pegar el modelo de los dientes del paciente que se lleva a cabo con el yeso tipo III (WhipMix, 2018).

Se consumió un total de 12858 unidades de bolsas de yeso entre los 70 y 100g en peso, lo que corresponde aproximadamente a 1092.93 kg (1092 t) de material utilizado. Dicho material, empleado dentro de las practicas odontológicas y posteriormente descartado sin aplicarle ningún reaprovechamiento se acumula en rellenos sanitarios y vertederos magnificando su impacto al no degradarse, por ello, en términos de problemas ambientales es viable implementar este desecho dentro del concreto disminuyendo la contaminación en el lecho freático, la generación de gases tóxicos y la formación de sustancias perjudiciales para la salud como lo es gas sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Begliardo, Sánchez, Panigatti, & Garrappa, 2013). Colombia, anualmente se encarga de producir más de 22.270.338 toneladas de residuos de construcción y demolición de los cuales el 69% es depositado en lugares autorizados y el 31% restante se encuentra en humedales, zonas verdes y canales. Los residuos generados a partir de materiales de yeso representan el 1% del porcentaje total de los RCD situando al material entre los residuos de menor impacto ambiental (Rocha Pardo, 2020).

Dentro del período académico cursado durante todo el 2019, la decanatura de la facultad de odontología efectuó un análisis cuantitativo donde consolido la cantidad de yeso consumido

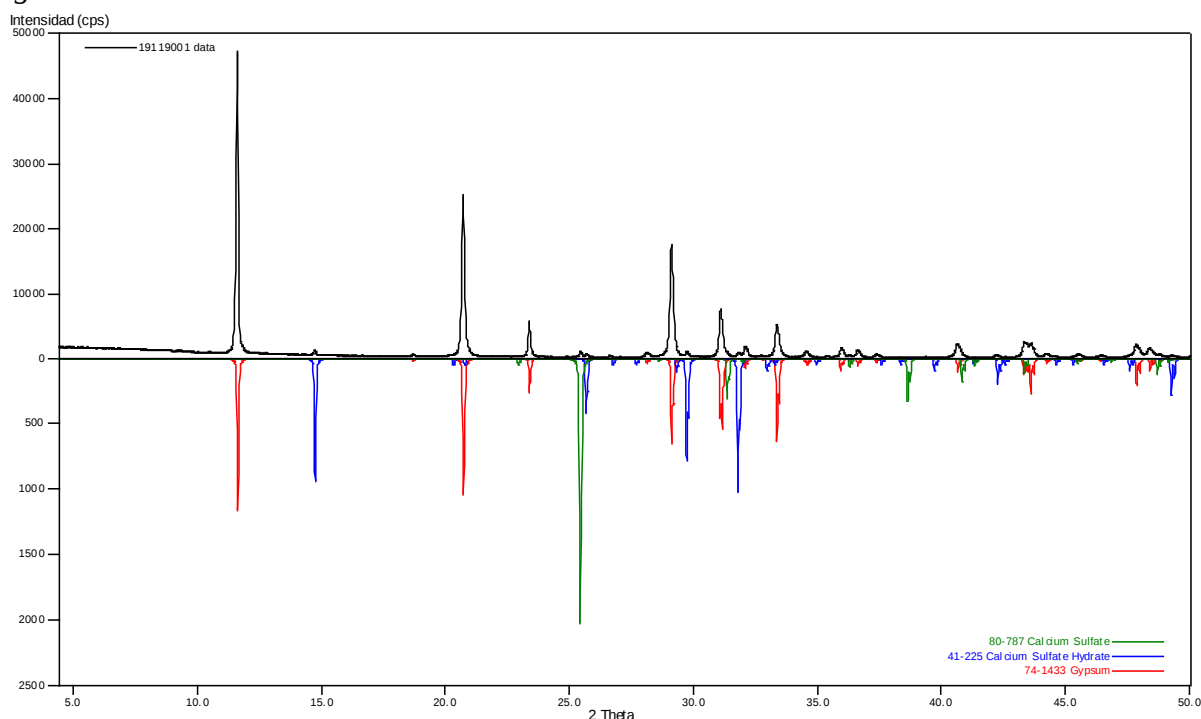
dentro de todas las actividades y laboratorios ofrecidos por la facultad. Se calculó una totalidad de 19010 unidades de material consumidas (1615 t), donde pregrado y preclínicas produce cerca del 75% de esta totalidad, siendo los principales consumidores y productores de residuos de material a base de yeso.

4.2 Caracterización Química

Las materias primas empleadas en la preparación del nuevo material denominado bloques de concreto con inclusión de yeso residual fueron analizados empleando la técnica de difracción de rayos X de muestras policristalinas donde se obtuvieron los perfiles de difracción del yeso residual odontológico, del cemento hidráulico de uso estructural y de la arena como agregado. Cada perfil de difracción se muestra a continuación con su respectiva composición química (análisis cualitativo).

Las reflexiones de los perfiles de difracción obtenidos fueron comparadas en la base de datos Powder Diffraction File 2 (*pdf-2*) donde se encuentran reportadas las fases cristalinas de los minerales con el propósito de verificar que la posición de las señales más intensas correspondiese.

Figura 32. Perfil de difracción por DRX de muestras policristalinas de yeso residual odontológico.



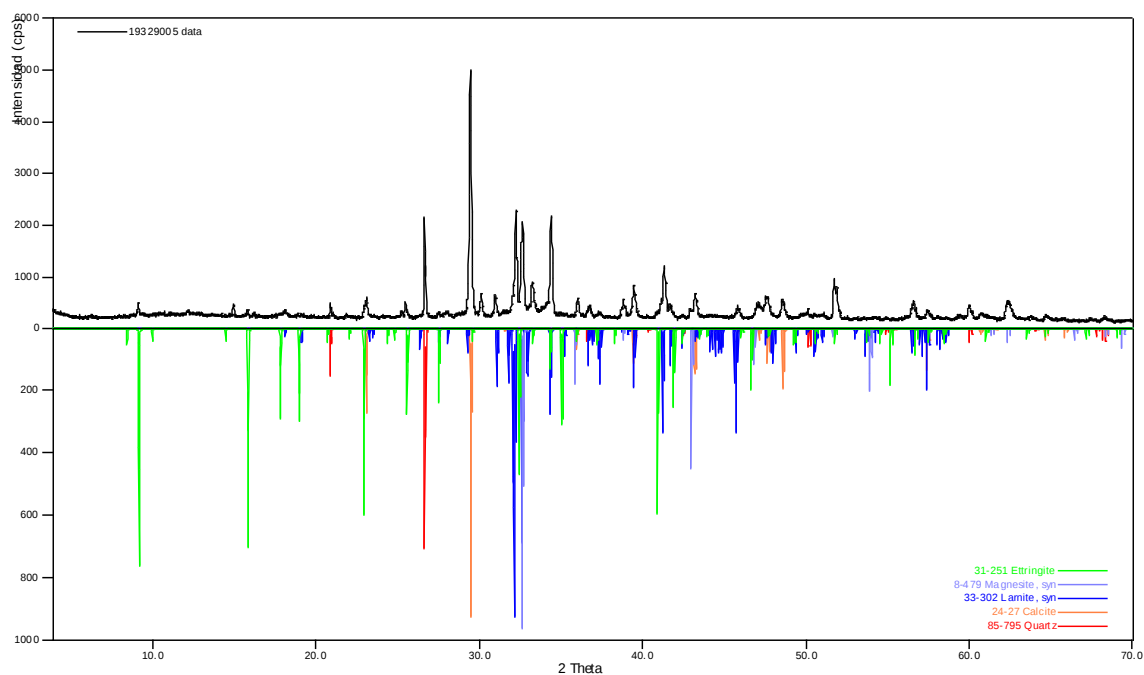
En la figura 32 se presenta el difractograma de la muestra de yeso residual odontológico incorporado en el nuevo material donde se observó que los principales minerales correspondían a los presentes en el yeso natural utilizado en la producción de cemento. Generalmente se encuentra constituido por sulfatos, principalmente por sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, PDF-2:80-787) exhibiendo las señales de difracción más intensas, otra de sus fases típicas fue el sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, PDF-2:74-1433) distintivo del yeso odontológico por el proceso de deshidratación que sufre el mineral el cual presentó señales de menor intensidad dentro del perfiles de difracción (Xamtec, 2020).

La tabla 6 presenta las 3 fases cristalinas más importantes encontradas en la muestra analizada.

Tabla 6. *Principales fases cristalinas presentes en el yeso residual.*

Fases cristalinas yeso residual		PDF-2
Fase cristalina	Fórmula	
Yeso	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	74-1433
Sulfato de calcio hidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.62 \text{H}_2\text{O}$	41-225
Sulfato de calcio	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	80-787

La figura 33 exhibe el perfil de difracción del cemento hidráulico (Cemex) el cual indica que está compuesto principalmente por carbonatos y silicatos. Las reflexiones de mayor intensidad corresponden a la calcita (CaCO_3 , PDF-2:24-27), destacando la señal de $29,4^\circ$ en 2Theta que corresponde a la más intensa de esta fase cristalina. Adicionalmente se aprecian las reflexiones características de menor intensidad asociadas a esta fase cristalina. La larnita (Ca_2SiO_4 , PDF-2:33-302), mineral compuesto por silicatos de calcio, presentó sus picos más intensos entre 31° - 35° y 46° 2Theta. El cuarzo (SiO_2 , PDF-2:85-795), presentó la señal más intensa de su perfil de difracción aproximadamente en $26,8^\circ$ 2Theta. Los demás minerales presentaron señales de baja intensidad demostrando la presencia de las fases cristalinas pero encontradas en baja proporción.

Figura 33. Perfil de difracción por DRX de muestras policristalinas del cemento.

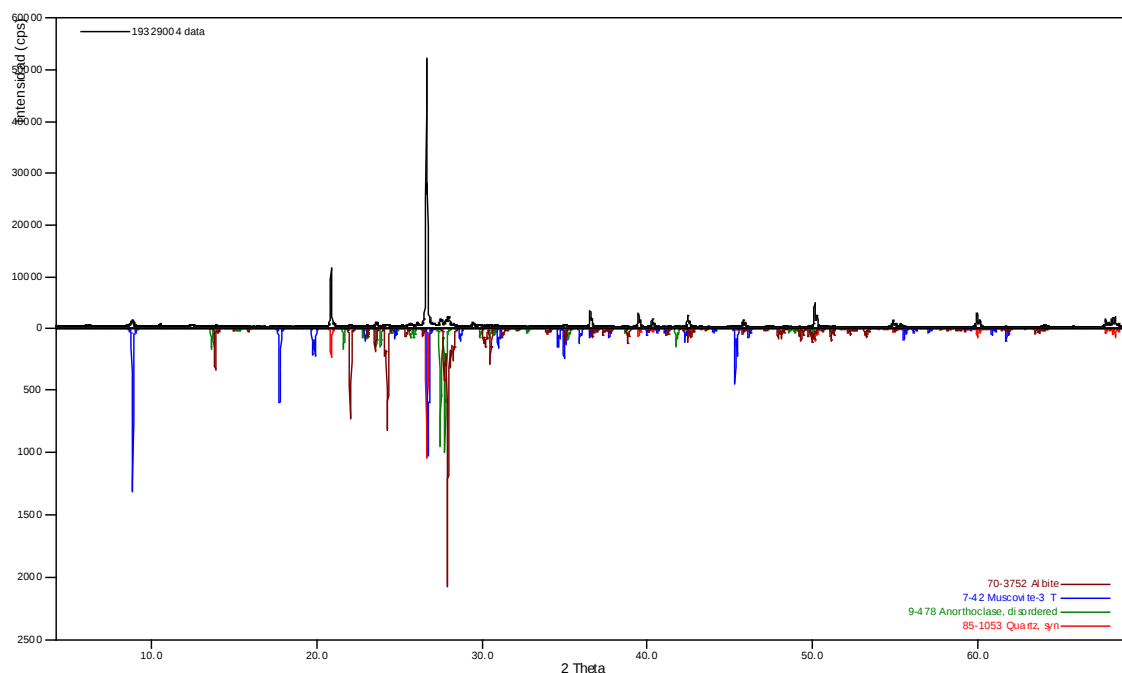
La tabla 7 presenta los minerales con las señales más intensas dentro del perfil de difracción del cemento hidráulico.

Tabla 7. Principales fases cristalinas del Cemento Hidráulico (Cemex).

Fases cristalinas del Cemento Hidráulico		PDF-2
Fase cristalina	Fórmula	
Cuarzo	SiO ₂	85-795
Calcita	CaCO ₃	24-27
Silicato de calcio	Ca ₂ SiO ₄	33-302
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	8-479
Etringita	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄ ,SiO ₄ ,CO ₃) ₃ (OH) ₁₂ *26H ₂ O	31-251

En la figura 34 se presenta el difractograma de la composición del agregado fino (arena) utilizado en la elaboración de concreto, principalmente se encontró que está constituido por silicatos, tal como se reporta en la literatura (Gonzalez Neri, 2015). En la arena la fase cristalina más abundante es el cuarzo (SiO_2 , PDF-2: 85-1053), con el pico más intenso ubicado en $26,8^\circ$ de 2θ , los demás minerales cristalinos presentaron señales de difracción de baja intensidad, pero apreciables en la comparación realizada con la base de datos PDF-2 tanto en su posición como en la relación de intensidades.

Figura 34. Perfil de difracción por DRX de muestras policristalina de arena.



La tabla 8, exhibe las fases cristalinas identificadas en el análisis cualitativo del perfil de difracción.

Tabla 8. *Principales Fases Cristalinas de los Agregados Finos.*

Fases Cristalinas del Agregado Fino		PDF-2
Fase Cristalina	Fórmula	
Cuarzo	SiO_2	85-1053
Anortoclasa	$(\text{Na}, \text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$	9-478
Moscovita	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	7-42
Albita	$(\text{Na}_{0.98}\text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02}\text{Si}_{2.98}\text{O}_8)$	70-3752

Las fases cristalinas de los bloques de concreto diseñados con la incorporación del yeso residual fueron analizados por medio de la técnica difracción de rayos X, lo que permitió identificar minerales cristalinos (Tabla 9) y evidenciar el impacto del yeso al aumentar su dosis dentro del nuevo material.

Tabla 9. *Influencia de la inclusión de yeso residual en las fases cristalinas del nuevo material no estructural.*

Fase Cristalina	Fórmula	Porcentaje de yeso incorporado (%)			
		0%	20%	40%	60%
Albita	Na (AlSi ₃ O ₈)	8.1(4)	9.0(3)	7.0(4)	9.3(4)
Anita	K _{0.956} Fe _{2.918} (AlSi ₃ O ₁₀) (OH) ₂	3.0(4)	5.4(4)	5.9(5)	3.0(3)
Brianroulstonita	Ca ₃ (B ₅ O ₆ (OH) ₆) (OH) C ₁₂ (H ₂ O) ₈	1.01(18)	0.34(14)	0.36(16)	0.39(15)
Calcita	CaCO ₃	3.0(3)	2.7(2)	1.6(2)	1.3(2)
Calcopirita	Cu (FeS ₂)	0.38(10)	0.30(8)	0.34(9)	0.39(8)
Cordierita	(Mg _{1.86} Fe _{0.14}) (Na _{0.28} Ca _{0.19}) (Al _{3.39} Be _{0.61} Si ₅ O ₁₈) (H ₂ O) _{0.92}	4.0(4)	1.2(3)	3.9(6)	4.1(5)
Cuarzo	SiO ₂	57.8(7)	57.3(7)	55.2(7)	43.4(10)
Donbasita	Al _{4.5} (Al _{0.8} Si _{3.2}) O ₁₀ (OH) ₈	0.7(4)	1.3(4)	0.7(3)	0.5(3)
Etringita	Ca ₆ (Al (OH) ₆ (H ₂ O) ₁₂) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂	3.28(13)	0.55(8)	0.46(11)	0.43(12)
Microclina	(K _{0.904} Na _{0.085}) (Al _{0.95} Si _{3.05} O ₈)	7.1(5)	14.0(7)	7.0(4)	12.1(5)
Moscovita	K _{0.94} Na _{0.06} Al _{1.83} Fe _{0.17} Mg _{0.03} (Al _{0.91} Si _{3.09} O ₁₀) (OH) _{1.65} O _{0.12} F _{0.23}	5.0(4)	2.3(4)	6.6(4)	11.8(17)
Nacrita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1.3(4)	1.1(4)	1.7(4)	1.3(3)
Portlandita	Ca (OH) ₂	11.21(11)	0.52(8)	0.33(9)	0.4(3)
Yeso	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	1.8(3)	4.0(3)	9.0(3)	10.5(4)

El yeso es un material poroso constituido principalmente por sulfato de calcio (CaSO₄) el cual al variar su proporción dentro de la mezcla de concreto exigió una mayor demanda de agua. La mezcla al ser hidratada permite que se incorporen los primeros hemidratos en la solución y se forman los hidratos de silicato de calcio y aluminato tricálcico, dicha hidratación incorpora agua a la red cristalina de yeso provocando una expansión de su estructura cristalina (Sanchez Henao, 2003) de la pasta fraguada favoreciendo su relleno ya que la disolución redondea los vértices de

los cristales depositando yeso en las caras laterales del material (Albrecht, 1965), por consecuencia del rápido crecimiento de los cristales (Sanchez Henao, 2003) lo que a condiciones de resistencia provoca el rompimiento de la pasta endurecida por incremento en su porosidad, tal expansión es ocasionada por una lenta hidratación, o debido a la reacción de cal libre, magnesia o sulfato cálcico presente en el cemento (Rodríguez, Salazar Rodríguez, Escobar M, & Ovalle C, 1984). Continuando con la formación de cristales el proceso se desarrolla con rapidez por presentar una composición uniforme en hemihidratos hasta llegar a un aumento de resistencia (Samperio Gómez, Cortés Escobedo, Bolarín Miró, & Hernandez Cruz, 2012).

Además, se logra evidenciar que al aumentar la proporción de yeso dentro de las muestras de concreto se alteró directamente el porcentaje de cuarzo (SiO_2), reduciéndolo de un 57,8% (0%) a un 43,4% (60%) lo que tiene sentido puesto al adicionar yeso aumentan los óxidos de calcio y se reduce la cantidad de sílice de la mezcla, lo que provoca que la plasticidad de las masas y su contracción por secado disminuyan. Así mismo, debido a los cambios estructurales del cuarzo se ejerce un control sobre la porosidad generando problemas de agrietamiento y deformación de las piezas (Alvarez Rozo, Sánchez Molina, Corpas Iglesias, & Gelvez, 2018).

Por otro lado, la moscovita se alteró de manera aleatoria por espécimen evaluado. Los aceites, empleados en la preparación de las probetas en estudio, no atacan la superficie de la moscovita; no obstante, en unión de agua y otros líquidos penetran entre las láminas de mica por capilaridad produciendo alteraciones en sus propiedades eléctricas y mecánicas modificando su dureza (Instituto geológico y minero de España, 1975).

La formación de calcita y etringita se vio debilitada al aumentar las proporciones de yeso en el concreto favorecido por el ataque a los sulfatos lo que provocó la presencia del mineral dentro del concreto (Davila & Vanderley, 2018). En el caso de la etringita, un producto formado en las primeras etapas de hidratación del cemento Portland por la reacción entre el aluminato de calcio y el sulfato de calcio, su formación aumentó considerablemente como resultado por el exceso de yeso dentro de las probetas provocando fisuración y pérdida de resistencia (Jiménez & Prieto, 2010).

Figura 35. *Formación de Etringita a partir de alto contenido de yeso.*



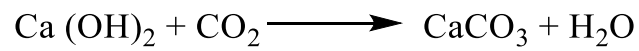
Tomado de (Gázquez, Bolívar, Vaca, García Tenorio, & Mena Nieto, 2012).

Nota: *AC₃-hace referencia a los aluminatos tricálcicos, CsH₂-se refiere a los silicatos de calcio (yeso) y el C₆As₃H₃₂-hace referencia a la etringita formada.*

El endurecimiento del concreto se debe principalmente a dos compuestos químicos que conforman el 75% del cemento Portland: Silicatos tricálcicos (C₃S) y Silicatos dicálcicos (C₂S) dichos compuestos son hidrolizados al entrar en contacto con el agua formando hidróxido de calcio (Ca (OH)₂) en forma de plaquetas hexagonales delgadas que se depositan entre los poros (Giraldo & Tobón, 2006). La portlandita compuesta por hidróxido de calcio, es un mineral común en el cemento, el cual se vio alterado al aumentar el porcentaje de yeso dentro de las muestras analizadas lo que se ve reflejado en la resistencia del material. Se considera un cambio de fase por la formación de carbonatos de calcio a partir de la portlandita debido a su estructura cristalina con

redes estratificadas de empaquetamiento hexagonal (Gómez Villalba, López Arce, Álvarez de Buergo, & Fort, 2010).

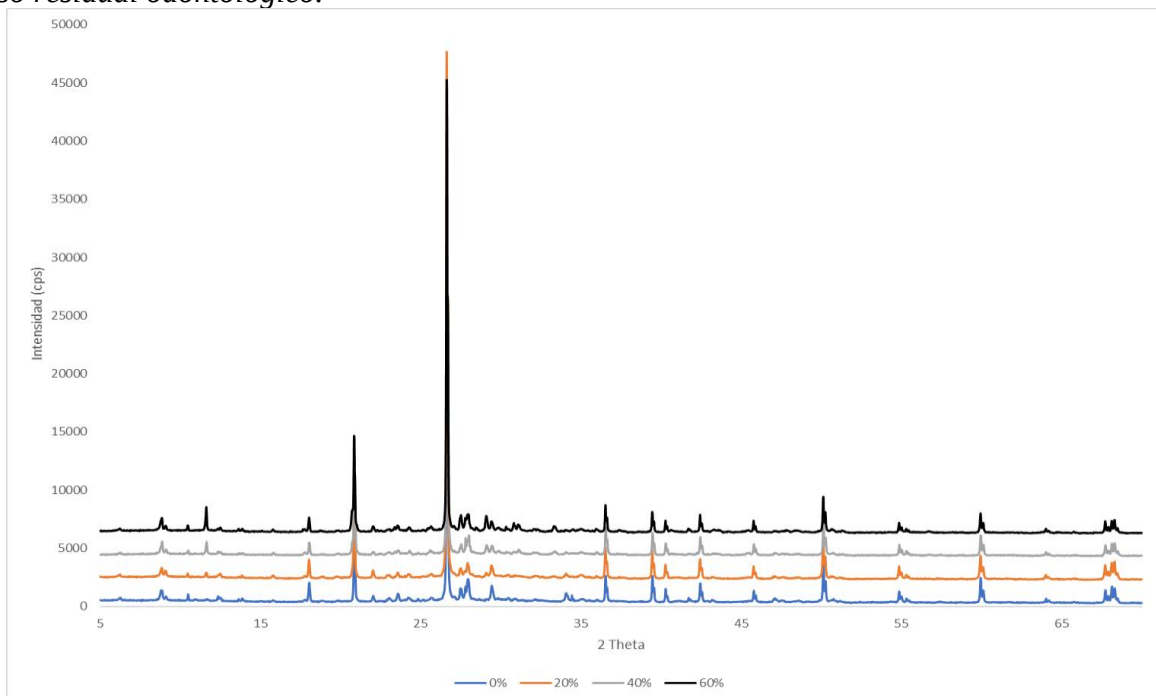
Figura 36. *Formación de carbonatos a partir de Portlandita.*



Tomado de (Gómez Villalba, López Arce, Álvarez de Buergo, & Fort, 2010).

En la gráfica (Figura 37) se aprecia la superposición de los patrones de difracción de los bloques de concretos curados a 28 días a diferentes porcentajes de yeso residual odontológico.

Figura 37. *Superposición de perfiles de difracción de los bloques de concreto con inclusión de yeso residual odontológico.*



Los perfiles de difracción de los bloques de concreto con inclusión de yeso residual (Figura 37) coincidieron en la posición de las señales con el perfil de difracción de referencia (sin inclusión de yeso residual), pero se aprecian notables diferencias en sus intensidades. Es decir, se presentan las mismas fases cristalinas con cambios en su composición porcentual.

Las reflexiones de mayor intensidad presentes en los perfiles de difracción corresponden a la fase cristalina de Cuarzo (SiO_2). El análisis cuantitativo evidenció que en todos los casos el cuarzo tiene una composición superior al 40% (Santillán, Villagrán Zaccardi, Alderete, Zega, & De Belie, 2016).

4.3 Caracterización Mecánica

Las dimensiones de los bloques de concreto (Tabla 10) evaluados según los lineamientos establecidos por la norma NTC-673 para el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto en laboratorio fueron tabulados y exhibidos junto a las respectivas resistencias a compresión de cada probeta con inclusión de yeso.

Tabla 10. Resistencias a compresión de los bloques de concreto con incorporación de yeso residual.

% Yeso	Altura prom (mm)	Diámetro (Ø) prom (mm)	Carga (KN)	Fuerza Teórica (Mpa)			Resistencia Prom (MPa)
0%	304	152	150	151,7	328,3	18,17	18,18
0%	301	150	150	150,3	322,5	18,18	
20%	303	150	151	151	69,1	3,86	4
20%	299	152	152	152,3	75,4	4,14	
40%	303	153	151	152	31,6	1,74	1,74
40%	301	153	153	153	31,8	1,73	
60%	303	150	151	151	13,8	0,77	0,77
60%	300	152	153	152,7	14,1	0,77	

Las probetas preparadas por lo estipulado en la norma técnica colombiana “*Icontec*” NTC-1377:1994 y evaluada con la NTC 673:2010, presentó bloques de concreto que exhibían dimensiones de altura que oscilaba entre 209-304 mm y diámetros entre 150-153 mm. (ICONTEC, 1994) (ICONTEC, 2010).

Las resistencias de los bloques de concreto con incorporación de yeso residual dieron como resultado la reducción en sus fuerzas de compresión, a medida que se aumentaba la cantidad de yeso residual se disminuía la carga o fuerza soportada por los bloques, señalando la resistencia máxima alcanzada en cada ensayo.

Los factores que influenciaron en lo sucedido fueron: el alto contenido de agua, una alta relación agua-yeso causando una baja interconexión entre la fase cristalina de yeso con los demás sustratos del concreto y la rápida solidificación de la mezcla (Zak, Ashour, Korjenic, Korjenic, & Wu, 2016).

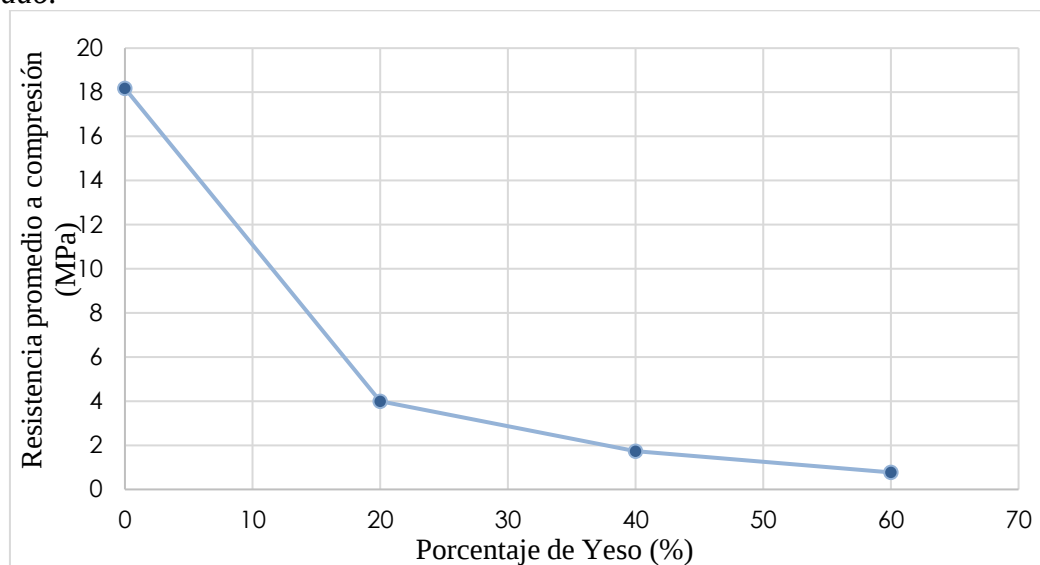
El yeso dentro de la mezcla suele requerir más agua debido a la densidad aparente del material por lo cual absorbe más agua a comparación de las otras materias prima evitando que las partículas se aglomeren de la forma correcta debilitando la masa, aumentando así la porosidad y la expansión de fraguado (Samperio Gómez, Cortés Escobedo, Bolarín Miró, & Hernandez Cruz, 2012).

Al material requerir una alta demanda de agua, se tendrá una mayor porosidad por lo que será menos resistente. Sin embargo, el agua excedente es necesaria para humedecer todas las partículas durante la mezcla (Díaz Díaz, 2014).

Otro factor para considerarse en la reducción de la resistencia tiene que ver con el secado de las probetas las cuales son alteradas por las condiciones del lugar tales como humedad relativa del aire, temperatura, las dimensiones y forma de la probeta. Es muy frecuente que durante las primeras horas o días se consiga una reducción del 10 al 20% de la resistencia húmeda (Albrecht, 1965).

Las resistencias a compresión alcanzadas fueron graficadas evidenciando el impacto provocado por el yeso residual a medida que se aumentaba su porcentaje dentro de los bloques. las fuerzas alcanzadas fueron confirmadas a través de análisis de fuerza teórica donde los esfuerzos logrados por los bloques fueron similares.

Figura 38. Comportamiento de la resistencia de los bloques de concreto respecto al yeso incorporado.



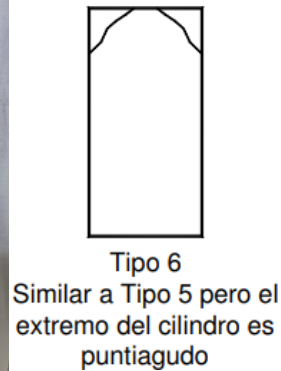
Se evidenció un patrón en el comportamiento de la resistencia de los bloques de concreto donde a medida que se aumentaba la cantidad de yeso residual incorporado,

disminuía la resistencia a compresión soportada por el nuevo material (Figura 38). Esto ocurre ya que el exceso de sulfato de calcio dihidratado y hemihidratado conlleva a problemas de falso fraguado, fraguados instantáneos, y expansión por exceso de sulfatos ocasionando problemas de formación de grumos en el producto terminado (Cifuentes Girard, 2015).

La baja resistencia obtenida compromete la durabilidad, no sólo afectando su aspecto superficial sino también su estabilidad por agrietamientos internos (Gutiérrez de López, 2003). Además, la porosidad del yeso no permitió que se conglomeraran las materias primas ocasionando que después del respectivo tiempo de curado (28 días) los bloques siguieran húmedos proporcionando un material inconsistente y de menor resistencia.

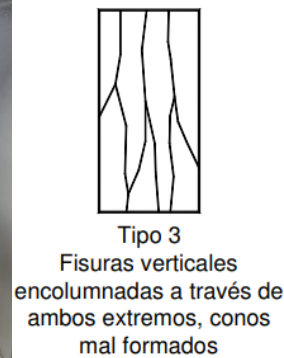
Los bloques de concreto presentaron dos tipos de fractura: falla Tipo 6 (Figura 39) y falla Tipo 3 (Figura 40).

Figura 39. *Bloque de concreto con falla Tipo 6.*



Tomado de (ICONTEC, 2010).

Figura 40. *Bloque de concreto con falla Tipo 3.*



Tomado de (ICONTEC, 2010).

Los bloques tradicionales (Sin inclusión de yeso residual) tuvieron una falla Tipo 6 por error al aplicar la carga, donde las fracturas fueron en las partes superior del cilindro. Por otro lado, los bloques con adicción de yeso residual presentaron una falla Tipo 3, la cual fue completamente

explosiva característica de un concreto sin reforzar, donde se formaron fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos de los bloques preparados (ICONTEC, 2010).

5 Conclusiones

La caracterización mineralógica realizada empleando la técnica de difracción de rayos-X de muestras policristalinas, fue una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento del nuevo material formado debido a que permitió conocer la composición mineralógica de cada uno de los materiales formados con la inclusión del yeso residual.

Las propiedades de los bloques de concreto con exceso de sulfato de calcio se vieron modificadas comprometiendo su resistencia y capacidad de soportar cargas limitando la aplicabilidad del nuevo material, debido a que dicho exceso no permitió que los compuestos constituyentes de la mezcla se unificaran con las moléculas de yeso.

La baja relación agua-yeso fue uno de los principales factores por los cuales el material no presentó las características esperadas, ya que, al momento de ensayar las probetas estas continuaban húmedas provocando inconsistencias en los bloques con mayor proporción de yeso incorporado.

Por otro lado, las resistencias alcanzadas fueron capaces de convertirlo en un material cementoso secundario de baja resistencia (MCSR) encontrándose dentro del límite prescrito (>8.3 MPa) brindándole al residuo la capacidad de ser empleado como material de relleno, de reforzamiento, entre otras aplicaciones.

Es de resaltar que el yeso residual presentó la misma composición química del yeso natural pero diferente composición porcentual lo que fue indispensable para establecer las falencias estructurales del material obtenido y plantear soluciones al respecto.

Los resultados de este proyecto constituyen una alternativa importante para contribuir al aprovechamiento de residuos sólidos generados en la universidad con beneficio a la comunidad.

Referencias

- Aciu, C., Cobirzan, N., & Balog, A. (2014). Recycling of Paper Waste in the Composition of Plastering Mortars. *Procedia Technology*, 12.
- Albrecht, W. (1965). Las propiedades de los yesos de molde y enlucidos y sus ensayos. *Materiales de Construcción*, 26-36.
- Álvarez Rozo, D. C., Sánchez Molina, J., Corpas Iglesias, F., & Gelvez, J. (2018). Characteristics of the raw materials used by the companies of the ceramic sector of the metropolitan area of Cúcuta (Colombia). *Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 247-256.
- ASTM. (2002). *standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third point loading)*. Obtenido de Standards Worldwide International: https://www.astm.org/america_latina/sp/index.html
- Atkins, & Jones, L. (2006). *Principios de Química: Los caminos del descubrimiento*. Medica Panamericana S.A.
- Ávila Arias, J., & Alcón Condori, G. N. (2013). Yesos odontológicos (gypso). *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 30.
- Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Ingeniería de construcción*, 30(2).
- Begliardo, H. F. (2015). Reutilización del valorización del yeso residual de construcciones. *Universidad Tecnológica Nacional*, 45-56.

- Begliardo, H., Sánchez, M., Panigatti, C. M., & Garrappa, S. (2013). Reutilización de yeso recuperado de construcciones: un estudio basado en requisitos de aptitud de normas argentinas y chinas. *Revista de la construcción*.
- Chandara, C., Azizli, K., Ahmad, Z., & Sakai, E. (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. *Waste Management*, 1675-1679.
- Chaverri Carvajal, W. (s.f). *Reciclaje de yeso dental*. Recuperado el 15 de Mayo de 2020, de Universidad Latinoamerica De Ciencia Y Tecnología: <https://docplayer.es/9299624-Reciclaje-de-yeso-dental.html>
- Chun, Y.-m., Naik, T., & Kraus, R. (2008). *Recycling Opportunity for Gypsum Wallboard in Concrete*. Obtenido de UNIVERSITY OF WISCONSIN : https://www.wisconsin.edu/waste-research/download/final_reports/2008_final_reports/08%20MIL%20NaikGypsumWallboard%20in%20concrete.pdf
- Cifuentes Girard, M. F. (Enero de 2015). *Determinación del grado de deshidratación del yeso en la producción de cemento por medio de análisis termogravimétrico*. Obtenido de Universidad de San Carlos de Guatemala: <https://core.ac.uk/download/pdf/35292359.pdf>
- Coppola, L., Coffetti, D., Crotti, E., Marini, A., Passoni, C., & Pastore, T. (2019). Lightweight cement-free alkali-activated slag plaster for the structural retrofit and energy upgrading of poor quality masonry walls. *Cement and concrete composites*, 104.
- Cortes, H. F., Martinez Yepes, P. N., & Albeiro, V. H. (2006). *Fundamentos de la cristalografía*. Elizcom.

- Davila, F. J., & Vanderley, J. (2018). FORMACIÓN DE ETRINGITA TARDÍA EN ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. *Revista colombiana de materiales*, 231-237.
- Díaz Díaz, P. (2014). *Estudio experimental sobre manipulación y propiedades físico-mecánicas de los productos derivados del yeso usados en odontología*. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid: <https://eprints.ucm.es/28426/1/T35745.pdf>
- Díaz Martinez, F. (2005). *Análisis Experimental de la Contracción por Secado en Mezclas de Concreto Hidráulico*. Cholula, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Escalante-García, J., Magallanes-Rivera, R., & Gorokhovskiy, A. (2009). Waste gypsum–blast furnace slag cement in mortars with granulated slag and silica sand as aggregates. *Construction and Building Materials*, 23, 2851–2855.
- Garg, Mridul; Minocha, A; Jain, Neeraj. (2011). Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials. *Construction and building construction*, 25, 944-949.
- Gaspar-Tébar, D. (1980). Normalización del cemento. Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo. *Materiales de Construcción*, 30(178).
- Gázquez, M., Bolívar, J., Vaca, F., García Tenorio, R., & Mena Nieto, A. (2012). Use of the red gypsum industrial waste as substitute of natural gypsum for commercial cements manufacturing. *Materiales de construcción*, 183-198.
- Geraldo, R., Souza, J., Campos, S., Fernandes, L., & Camarini, G. (2018). Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components. *Construction and Building Materials*, 191, 136-144.

- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). MINERALOGICAL EVOLUTION OF PORTLAND CEMENT DURING HYDRATION PROCESS. *Dyna rev.fac.nac.minas*, 73(148).
- Godinho-Castro, A., Testolin, R., Janke, L., Corrêa, A., & Radetski, C. (2012). Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. *Waste managament*, 153-157.
- Gomá, F. (1979). *El cemento portland y otros aglomerantes*. Barcelona, España: Editores técnicos asociados, s.a.
- Gómez Villalba, L. S., López Arce, P., Álvarez de Buergo, M., & Fort, R. (2010). Comportamiento Cristalino de nanopartículas de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en condiciones de Alta Humedad Relativa. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 103-104.
- Gonzalez Neri, M. (8 de Mayo de 2015). *Control de calidad de concretos para acondicionamiento de fuentes radiactivas gastadas*. Obtenido de UNIVERSIDAD MEXIQUENSE DEL BICENTENARIO:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/087/47087235.pdf
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia:
http://bdigital.unal.edu.co/6167/5/9589322824_Parte1.pdf
- ICONTEC. (27 de Julio de 1994). *ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO*. Obtenido de Norma Técnica Colombiana:

https://www.academia.edu/32426842/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_1377_INGENIER%C3%8DA_CIVIL_Y_ARQUITECTURA._ELABORACI%C3%93N_Y_CURADO_DE_ESPEC%C3%8DMENES_DE_CONCRETO_PARA_ENSAYOS_DE_LABORATORIO

Icontec. (16 de Diciembre de 2008). *Concretos. Aditivos químicos para concretos*. Recuperado el 17 de Abril de 2020, de Norma Técnica Colombiana NTC-1299: https://www.academia.edu/41298666/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_1299

ICONTEC. (17 de Febrero de 2010). *ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO*. Recuperado el 8 de Abril de 2020, de Norma Técnica Colombiana: <https://www.studocu.com/in/document/itm-university/circuitos-electricos/practical/ntc673-concretos-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto/4717071/view>

Instituto geológico y minero de España. (1975). Estudió económico y tecnológico para la explotación y aprovechamiento de las rocas industriales. *Ministerio de Industria*, 42-43.

Jiménez, A., & Prieto, M. (2010). Incorporación de Se(VI) en Etringita $\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2[(\text{SO}_4),(\text{SeO}_4)]_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). *Revista de la sociedad española de minerología*, 127-128.

Karami, S., Claisse, P., Ganjian, E., & Sadeghi, H. (2007). *Use Of Waste Gypsum As Construction Low Strength Materials*. London: Taylor & Francis.

- Ledesma, E., Jiménez, J., Fernández, J., Galvín, A., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 71, 289-298.
- López, J., & Alarcón, M. (2011). Sulfato de calcio: propiedades y aplicaciones clínicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 4(3), 138-143.
- Ma, Y., Nie, Q. X., Hu, W., Han, B., Polaczyk, P. A., & Huang, B. (2020). Experimental investigation of utilizing waste flue gas desulfurized gypsum as backfill materials. *Construction and Building Materials*, 245.
- Maya Sánchez, M., Cardenas, C., & Forero, C. F. (2000). *Las rocas y minerales industriales de Colombia en Rocas*. CYTED.
- Ministerio de ambiente y desarrollo. (28 de Febrero de 2017). *Resolución 472* . Obtenido de Minambiente: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>
- Ministerio del medio ambiente. (14 de Diciembre de 1994). *Resolución 541*. Obtenido de Minambiente: https://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Resoluciones/res_0541_141294.pdf
- Morales Martinez, L. M. (1 de Septiembre de 2010). *Reutilización de residuos de edificación para el desarrollo de materiales cementantes con características especiales*. Obtenido de Universitat Politècnica de Catalunya: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12171>

- Morán del Pozo, J., Valdés, J., Aguado P, J., Guerra, M., & Medina, C. (2011). Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. *Informes de la Construcción*, 63(521), 89-95.
- Mun, K., So, S., & Soh, Y. (2006). The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 1576–1582.
- Navarro Martínez, F. (2018). *Caracterización de los factores hidrogeológicos, hidrológicos y antrópicos que condicionan la interacción aguas superficiales-subterráneas en el río Andarax*. UAL: Universidad de Almería.
- Nieto Escalante, J. A. (25 de Abril de 2011). *Resolución 2397 de 2011*. Obtenido de Ambiente Bogota:
<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/RESOLUCI%C3%93N+2397+DE+2011.pdf>
- Nolhier, M., & Mallart, J. (Julio de 1986). El yeso, un material apropiado para una construcción barata. *Consejo superior para investigaciones científicas*, 38(382), 1-6.
- Pineda-Higueta, S., Moreno Callejas, S., & Flórez Rivera, J. (2018). Conocimientos y prácticas sobre el manejo del yeso dental en estudiantes de laboratorio dental. *Revista virtual ciencia y salud*, 15-23.
- Poole, A., & Sims, I. (1998). *Concrete petrography: A handbook of investigative technique*. Taylor & Francis group.

- Quintana Nodarse, D., & Martínez Ochoa, Y. (2014). Analisis y perspectiva de las producción de yeso en Cuba. *CENIC*, 45(1), 106-112.
- Raghavendra, T., & Udayashankar, B. (2015). Engineering properties of controlled low strength materials using flyash and waste gypsum wall boards. *Construction and building construction*, 548-557.
- Reyes Vélazquez, J. O. (8 de Mayo de 2018). *Los yesos en odontología*. Obtenido de Percano: <https://percano.mx/blog-percano/los-yesos-en-odontologia/>
- Rocha Pardo, J. R. (2020). *Elementos de construcción a partir de residuos de construcción y demolición en Bogotá*. Obtenido de Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24803/1/ELEMENTOS%20DE%20CONSTRUCCION%20A%20PARTIR%20DE%20RESIDUOS%20DE%20CONSTRUCCION%20Y%20DEMOLICION%20EN%20BOGOTA.pdf>
- Rodríguez, C. A., Salazar Rodríguez, H., Escobar M, J., & Ovalle C, L. (1984). Efectos de la calidad del agua en la resistencia del concreto. *Ingeniería e Investigación*, 29-34.
- Rudeli, N., & Santilli, A. (2017). Medición de resistencia a tempranas edades del hormigón: método que mejor se ajusta para la determinación de tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón. *Obras y Proyectos*.
- Samperio Gómez, I., Cortés Escobedo, C., Bolarín Miró, A., & Hernandez Cruz, L. (2012). Estudio de la absorción de agua en moldes con diferente composición de yeso y yeso-cemento, para el vaciado de suspensiones. *CONACYT*.

Sanchez Henao, J. C. (20 de Noviembre de 2003). *Materiales fibrosos de base conglomerada*.

Obtenido de Universidad Nacional de Colombia:

http://bdigital.unal.edu.co/5751/1/70750530.2003_1.pdf

Sánchez, N. L. (2013). *Fraguado y Endurecimiento del hormigón (Concreto)*. Recuperado el 17

de Abril de 2020, de Civilgeeks: <https://civilgeeks.com/2013/12/13/fraguado-y-endurecimiento-del-hormigon-concreto/>

Sanjuán Barbudo, M. Á., & Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Alicante, España: Universidad de Alicante.

Santillán, L., Villagrán Zaccardi, Y., Alderete, N., Zega, C., & De Belie, N. (2016). Cuantificación mineralógica de cemento mediante análisis Rietveld de DRX análisis cruzado de difractogramas experimentales y programas de refinamiento . *Asociación Argentina de tecnología del hormigón*, 529-536.

Tanikela, P. (Febrero de 2010). *The use of x ray diffraction and scanning electron microscopy in high volume blended cements*. Obtenido de Purdue University: <ftp.ecn.purdue.edu> > PTanikela > Data > Information

Virginie, M. (2011). *Los caminos del reciclaje*. Editoriales S.L.

WhipMix. (2018). *Yesos*. Obtenido de Biodentales:

https://www.biodentales.com/Catalogos/Yesos_WhipMix-2018.pdf

Xamtec. (2020). *Identificación de fases del yeso por difracción de rayos X*. Recuperado el 10 de

Febrero de 2021, de <http://www.xamtec.com/files/editor/files/XRD%20-%20Identificaci%C3%B3n%20de%20fases%20en%20yesos.pdf>

- Xu, L., Wu, K., Li, N., Zhou, X., & Wang, P. (2017). Utilization of flue gas desulfurization gypsum for producing calcium sulfoaluminate cement. *Journal of Cleaner Production*, 161, 803-811.
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2016). The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and Building Materials*, 179-188.