

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Evaluación de la alternativa de uso de lutitas en preparaciones de cemento, en la empresa Argos

S.A. Sogamoso

Felipe Andres Fonseca Bustamante

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad practica empresarial

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Tutor

Luis Fernando Rodriguez

Ingeniero Metalúrgico director de Producción Planta Argos S.A. Sogamoso

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Dedicatoria

Dedicado a:

Mi papá Pascual Fonseca Peralta

Mi mamá Luz Elena Bustamante Correa

Mi hermana Carolina María Fonseca Bustamante

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá Luz Elena Bustamante Correa y a mi hermana Carolina María Fonseca Bustamante por el apoyo incondicional en todo sentido, acompañamiento emocional, por estar siempre conmigo cuando más lo necesité y por la ayuda para culminar este proceso como ingeniero.

Agradezco a mi papá Pascual Fonseca Peralta creer en mí, confiar en mis capacidades como persona y como su hijo, ayudarme en este proceso para ser ingeniero; agradezco a mi papá porque gracias a su empeño y a que cree en mi como su hijo, logre entrar a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y terminar mi carrera como ingeniero químico y así, todos mis logros aparte de ser propios son debido a mi papá.

Agradezco al doctor Giovanni Morales Medina mi director de trabajo de grado por la dedicación, esfuerzo y creencia en este proyecto, ya que sin su ayuda y dirección la culminación de este trabajo de grado no se hubiera podido llevar a cabo.

A su vez, agradezco al ingeniero Martin Alberto Monsalve Correa, a la empresa Argos S.A. Sogamoso y al ingeniero Luis Fernando Rodriguez, por permitirme realizar mis prácticas profesionales en su planta donde adquirí el conocimiento de la operación de una planta industrial.

Tabla De Contenido

Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo General:.....	13
1.2. Objetivos Específicos:	13
2. Marco Conceptual	14
2.1. Lutita:.....	14
2.2. Puzolana:.....	14
2.3. Clinker:	14
2.4. Caliza:.....	14
2.5. Yeso:	15
2.6. Proceso De Producción Del Cemento <i>Portland</i>:	15
3. Estado del Arte.....	18
4. Metodología.....	20
4.1. Fase I. Inicio:.....	20
4.2. Fase II. Planeación	20
4.3. Fase III. Ejecución	21
4.4. Fase IV. Seguimiento y Control	22
4.5. Fase V. Cierre	22
5. Resultados.....	23

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

5.1. Caracterización de las lutitas.	23
5.2. Proporciones de adición en las recetas de cemento.	24
5.3. Resultados de la preparación.	27
6. Conclusiones	37
7. Recomendaciones	39
Referencias Bibliográficas	40

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Lista De tablas

Tabla 1 Composición química de las muestras de lutita mina belencito	23
Tabla 2 Recetas de cemento tipo uso general (UG) de la planta Argos S.A. Sogamoso.....	25
Tabla 3 Recetas de cemento tipo estructural max (Emax) de la planta Argos S.A. Sogamoso...	25
Tabla 4 Resultados de las pruebas de resistencia a compresión al cemento UG y cemento estructural Emax.	29

Lista de Figuras

Figura 1	Composición química de las muestras de lutita mina belencito.....	23
Figura 2	Recetas de cemento tipo uso general (UG) de la planta Argos S.A. Sogamoso	26
Figura 3	Recetas de cemento tipo estructural max (Emax) de la planta Argos S.A. Sogamoso.	27
Figura 4	Datos de resistencias a compresión promedio del cemento de uso general UG.	31
Figura 5	Datos de resistencias a compresión del cemento estructural Emax.	31
Figura 6	Datos de Blaine promedio para el cemento de uso general UG	34
Figura 7	Datos de retención en malla #325 de 45 μ m para el cemento de uso general UG	34
Figura 8	Diagrama de flujo de la metodología	43
Figura 9	Resistencias a compresión de los ensayos para cemento de uso general UG	44
Figura 10	Resistencias a compresión de los ensayos para cemento de tipo estructural Emax	45
Figura 11	Resistencias a compresión cemento uso general (UG)	46
Figura 12	Resistencias a compresión ensayo #1 cemento uso general (UG)	46
Figura 13	Resistencias a compresión ensayo #2 cemento uso general (UG)	47
Figura 14	Resistencias a compresión ensayo #3 cemento uso general (UG)	47
Figura 15	Resistencias a compresión ensayo #4 cemento uso general (UG)	48
Figura 16	Resistencias a compresión cemento estructural max (Emax)	49
Figura 17	Resistencias a compresión ensayo #1 cemento estructural max (Emax)	50
Figura 18	Resistencias a compresión ensayo #2 cemento estructural max (Emax)	50
Figura 19	Resistencias a compresión ensayo #4 cemento estructural max (Emax)	51
Figura 20	Resistencia a la compresión de bentonitas calcinadas.....	53

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Lista de Apéndices

Apéndice A. Metodología PMP	43
Apéndice B. Gráficos de Análisis de resistencia para cementos UG y Emax	44
Apéndice C. Pruebas de resistencia de cementos UG	46
Apéndice D. Pruebas de resistencia de cementos Emax	49
Apéndice E. Pruebas de resistencia mecánica	52
Apéndice F. Análisis de resistencia de bentonitas calcinadas	53

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Resumen

Título: Evaluación de la alternativa de uso de lutitas en preparaciones de cemento, en la empresa Argos S.A. Sogamoso*

Autor: Felipe Andres Fonseca Bustamante**

Palabras Clave: Lutita, Cemento, Puzolana, Clinker

Descripción:

“El cemento es un conglomerante hidráulico compuesto de materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que molidos y amasados con agua forman productos hidratados mecánicamente resistentes y estables” (Barbudo y Yepes, 2004). Para la producción del cemento porland son utilizadas diversas materias primas, entre estas se destacan el *Clinker* como componente principal del cemento, caliza como adición ayudando a la molturabilidad, puzolana natural confiriendo resistencia al cemento a largo plazo (7 y 28 días) escoria de alto horno igualmente confiriendo resistencia al material a 7 y 28 días, yeso y lutitas, al utilizar esta última como materia prima de adición caracterizándola y describiendo su composición por medio de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), evaluando su comportamiento en las recetas de cemento en la planta implementando una serie de pruebas de molienda (ensayos) y definiendo su factibilidad por medio de pruebas de resistencia a compresión de los morteros de cemento a 1, 3, 7 y 28 días. Dando como resultado una disminución del consumo de materias primas tales como escoria de alto horno y caliza entre un 7 y 11,5% junto con la mejora en el desempeño de las resistencias a compresión de los cementos en un 6,2 y 13,7% para los diferentes tipos de cemento, cemento tipo uso general (UG) y cemento tipo estructural max (E_{max}).

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina. Tutor Luis Fernando Rodríguez.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Abstract

Title: Evaluation of the alternative use of shales in cement preparations, in the company Argos S.A. Sogamoso.*

Author: Felipe Andres Fonseca Bustamante.**

Key Words: Shale, Cement, Pozzolana, Clinker.

Description:

"Cement is a hydraulic conglomerate composed of artificial materials of inorganic and mineral nature, which ground and kneaded with water form mechanically resistant and stable hydrated products" (Barbudo & Yepes, 2004). For the production of portland cement are used various raw materials, among these are the Clinker as the main component of cement, limestone as an addition helping grinding, natural pozzolana conferring resistance to cement in the long term (7 and 28 days) blast furnace slag also giving resistance to the material at 7 and 28 days, plaster and shales, When using the latter as a raw material for additive characterizing it and describing its composition by means of X-ray diffraction (DRX) and infrared spectroscopy by Fourier transform (FTIR), evaluating its behavior in cement recipes in the plant implementing a series of grinding tests (tests) and defining its feasibility by means of compressive strength tests of cement mortars at 1, 3, 7 and 28 days. Resulting in a decrease in the consumption of raw materials such as blast furnace slag and limestone by between 7 and 11.5% together with the improvement in the performance of the compressive resistances of cements by 6.2 and 13.7% for different types of cement, general purpose type cement (UG) and max structural type cement (Emax).

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina. Tutor Luis Fernando Rodriguez.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Introducción

Los cementos pueden ser preparados con: caliza, puzolana, escoria de altos hornos, yeso y *Clinker* como materias primas (Romero Gonzalez, 2020). La puzolana es uno de los más utilizados debido a su alto índice de reacción con las demás materias primas presentes en la preparación del cemento, a este factor se le llama índice de actividad puzolanico. sin embargo, las propiedades y costos de la puzolana natural pueden restringir su aplicación en la generación de cemento, tanto técnica como económicamente (Reyes *et al.* 2016). Alternativamente, las arcillas como las lutitas pueden ser activadas térmica y mecánicamente creando puzolana artificial, la cual es un material sustituto de la puzolana natural en la producción de cemento (Reyes *et al.* 2016). Esta alternativa ha llamado la atención de empresas como: Argos S.A. Planta Rioclaro, Cemex, Argos S.A. Planta Yumbo.

El objetivo del presente documento fue evaluar el uso de las lutitas en las preparaciones de cemento en la empresa Argos S.A. Sogamoso, por medio de la activación mecánica y térmica de este material. En la metodología se consideró la molienda de la lutitas con otros componentes como el *Clinker*, yeso, caliza, puzolana y escoria de alto horno, evaluando los desempeños de esta mezcla en los diferentes tipos de cemento que produce la planta, (*i.e.* cemento tipo uso general, UG, y cemento tipo estructural max, Emax), según los resultados de pruebas de compresión a diferentes días de fraguado (1, 3, 7 y 28 días) y el cumplimiento de las normas de calidad de la empresa, estipuladas en las respectivas fichas técnicas.

El desarrollo del presente documento considero, asimismo, los lineamientos corporativos de la empresa Argos S.A., particularmente los de la planta Sogamoso. La empresa Argos S.A. Planta Sogamoso (una de las 7 plantas de cemento de la empresa en Colombia), ubicada en la zona franca del municipio de Sogamoso (Boyacá), en el kilómetro 6 vía Sogamoso-Corrales (VYMaps,

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

2022), tiene como productos principales el cemento tipo UG y el cemento estructural Emax, y el mercado objetivo el municipio de Sogamoso y los municipios aledaños, Bogotá y los llanos orientales. La planta toma su materia prima de canteras propias de la empresa Argos S.A., Belencito, San Antonio y Monjas, donde extraen caliza, margas y lutitas. Acerías Paz del Río como el principal proveedor de escoria de alto horno a la planta, y la puzolana natural proveniente de las canteras en paipa (Boyacá). En los lineamientos corporativos la disminución de los costos de producción, así como la conservación de la calidad de los productos son focos de atención primordial durante la operación y planeación en Argos S.A. Por lo anterior, la pregunta directora de la práctica empresarial correspondió a, ¿Cuáles preparaciones de lutitas como puzolana artificial conducen a las preparaciones de UG y Emax con características comerciales?

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

1. Objetivos

1.1. Objetivo General:

Evaluar la alternativa del uso de lutitas en preparaciones de cemento, como material de reemplazo de la puzolana en las recetas de los cementos UG y Emax.

1.2. Objetivos Específicos:

- Caracterizar los bancos de lutitas, por medio de pruebas de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), definiendo lo aplicable del material en la producción de cementos.
- Determinar proporciones de la adición de lutitas en la receta de los cementos UG y Emax de la planta Argos S.A. Sogamoso, considerando las diferentes recetas históricas utilizadas y la caracterización de las lutitas, preparando estas proporciones a nivel piloto.
- Definir la factibilidad del uso de las lutitas en la preparación de los cementos de uso general (UG) y estructural max (Emax), con base a las pruebas de *Blaine*, finura y resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días, hechas al cemento, definiendo el cumplimiento de la normativa de calidad de la empresa y normativa industrial vigente.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

2. Marco Conceptual

2.1. Lutita:

Es una roca sedimentaria compuesta por partículas de tamaño de la arcilla y el limo, “el termino *arcilla* se refiere a aquellos granos con un tamaño inferior a $1/256\text{ mm}$.” Conforme se acumulan el limo y la arcilla, tienden a formar capas delgadas que se conocen como *laminas* orientadas al azar (Tarbuck y Lutgens, 2010).

2.2. Puzolana:

Es un material silicoso o silico-aluminoso, que por sí solo no posee ningún valor cementante, pero que finamente molido y en medio húmedo a temperatura ordinaria, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes (Romero Gonzalez, 2020).

2.3. Clinker:

El Clinker de cemento *Portland* es un material hidráulico que debe estar constituido el menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio $[3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2]$ y $[2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2]$ y por otras fases que contienen aluminio, hierro y otros compuestos (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013).

2.4. Caliza:

La caliza está compuesta fundamentalmente por mineral de calcita (CaCO_3), la caliza es la roca sedimentaria más abundante; se puede formar por medios inorgánicos o como resultado de procesos bioquímicos. Las formas que tienen origen bioquímico marino son las más comunes (Tarbuck y Lutgens, 2010).

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

2.5. Yeso:

El yeso es un conglomerante que se obtiene del Aljez o piedra natural del yeso, constituida por sulfato cálcico dihidratado, es un material poco resistente a la acción de los agentes atmosféricos (lluvia y viento), por lo que se usa preferentemente en obras interiores (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013).

2.6. Proceso De Producción Del Cemento *Portland*:

“El cemento *Portland* es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. A este proceso se le conoce como hidratación” (Cemex, 2019). El cemento tipo 1 o de uso general UG, es apropiado para todo uso ya que no requiere propiedades específicas como otros cementos, es usado como concreto en pavimentos, puentes, unidades de mampostería, entre otros (Cemex, 2019). La fabricación del cemento a nivel industrial es realizada por medio de 4 etapas. Estas etapas son (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013):

- a) Obtención, almacenamiento y preparación de materias primas que son finamente molidas para obtener el crudo. El crudo hace referencia a un polvo finamente molido como resultado de la molienda de caliza alta, caliza marga, lutita y mineral de hierro.
- b) Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1450 °C para la obtención de *Clinker* de cemento.
- c) Molienda del *Clinker* junto con otros componentes (escoria, caliza, puzolana natural, yeso y otras) para obtener el cemento.
- d) Almacenamiento, ensacado y expedición del cemento.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

2.6.1. Obtención De Las Materias Primas. La extracción de las materias primas naturales se hace normalmente en canteras a cielo abierto cercanas a la planta (caliza, puzolana y marga). Las operaciones de extracción incluyen perforación, voladuras y trituración, después se transportan a la planta para su homogeneización y almacenamiento. Otras materias primas se suministran a través de fuentes externas (mineral de hierro) (Neville, 2013)

2.6.2. Almacenamiento y Homogeneización De Materias Primas. La materia prima recibida es sujeta a una homogeneización inicial por apilamiento del material (caliza y marga) y extracción tomando secciones transversales de toda la pila. El almacenamiento promedio se encuentra entre 20.000 y 40.000 toneladas de material para una planta con una producción de *Clinker* de 3.000 ton/día (minas y otros, 2005)

2.6.3. Molienda De Materias Primas. Las materias primas se muelen y se mezclan juntas en proporciones controladas alcanzando la composición química requerida. Los componentes se muelen y se secan hasta lograr un polvo fino, llamado “crudo” o “harina”. En la industria, el sistema de molienda más usado es el molino de bolas con descarga central (Romero Gonzalez, 2020).

2.6.4. Cocción Del *Clinker*. Para la fabricación del *Clinker*, el crudo o harina se lleva al horno donde se seca, se calcina y se clinkeriza para producir *Clinker* de cemento; la clinkerización corresponde a la reacción entre el óxido de calcio con sílice, alúmina y óxido de hierro a altas temperaturas (entre 1400 y 1500°C) para formar silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el *Clinker*. En la cocción, las temperaturas del material en el horno se encuentran entre 1.400 y 1.500 °C. la reacción de clinkerización se realiza en condiciones oxidantes. El *Clinker* cocido se enfría con aire y luego se almacena (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013).

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

2.6.5. Molienda y Almacenamiento De Los Componentes Del Cemento. Los componentes del cemento se almacenan en silos, en naves cerradas (denominadas como *Clinker*) o en patios al aire libre (caliza y adiciones). El cemento *Portland* tipo 1 (CEM I) de la norma europea UNE-EN 197-1, para los cementos con adiciones (caliza, puzolana, yeso y aditivos), se muelen junto con el *Clinker* para obtener el cemento *Portland* tipo 1 uso general (UG). El método de molienda más utilizado en la industria es el molino de bolas en circuito cerrado que separan el cemento con la finura requerida por filtros de aire (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013).

2.6.6. Almacenamiento y Suministro Del Cemento. El cemento se transporta a los silos de almacenamiento por medio de sistemas neumáticos (aerodeslizadores). Los sistemas más utilizados para el transporte del cemento son los aerodeslizadores y los elevadores de cangilones. La descarga del cemento de los silos se realiza con aire comprimido en sacos o cisternas (transporte a granel), los sacos son llevados al centro de almacenamiento, se paletizan y apilan para su transporte final (Barbudo y Yepes, 2004) (Neville, 2013).

3. Estado del Arte

(Castillo *et al.* 2010) presentaron una propuesta de producción de puzolanas artificiales activando arcillas de baja pureza, como una alternativa de producción de metacaolin. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de materiales de construcción (LMC), Suiza, en colaboración con el centro de investigación y desarrollo de las estructuras y los materiales (CIDEM), Cuba. Los autores consideraron dos tipos de arcilla, suelo arcilloso (T120) y arcilla sedimentada (AS-900), los materiales fueron calcinados a 900 °C durante una hora, bajo condiciones controladas de temperatura en un horno de laboratorio y molidos durante 120 minutos en un molino de bolas con capacidad de 600 litros. Según Castillo *et al.* la reactividad mostrada por las puzolanas en las pastas influyó en la resistencia a la compresión de los morteros fabricados presentando un aumento de un 30% en la resistencia a la compresión en edades de 7 y 28 días respecto al sistema *Portland* puro. El trabajo de Castillo *et al.* fue considerado en el presente documento como guía en la implementación de la metodología empleada.

(Tironi *et al.* 2012) analizaron la reactividad de bentonitas calcinadas para su utilización como adiciones en el cemento *Portland*. Las bentonitas fueron trituradas hasta un tamaño inferior a 4 mm para homogeneizar la transferencia de calor. Posteriormente, este material fue calcinado en un horno a 700 °C aumentando 13 °C por minuto y manteniendo la temperatura final por 5 minutos. El material calcinado fue molido hasta un tamaño de partícula menor a 45 µm. Los autores reemplazaron con este material, un 30% en la mezcla de cemento *Portland*. Tironi *et al.* afirman que la mezcla condujo a un aumento en un 21% en las resistencias a 28 días, en los morteros mezclados con bentonitas, tomando como referencia los morteros sin adición. Asimismo, los autores reportan una mejora de un 80% a los 90 días de hidratación. El trabajo de Tironi *et al.*

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

fue considerado en el presente documento como guía para la investigación e implementación de las recetas de cemento propuestas a la empresa.

(Reyes *et al.* 2016) usaron las arcillas calcinadas como material puzolanico para la sustitución de Clinker por materiales cementicios suplementarios (MCS) para minimizar el impacto medioambiental provocado por las emisiones de CO₂. Se tomaron 10 muestras de arcillas y se caracterizaron las muestras por difracción de rayos x (DRX) y espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), las muestras se calcinaron en un horno de laboratorio a temperaturas de 650 °C, 750 °C, 850 °C y 950 °C, temperatura aproximada donde ocurre el fenómeno de recristalización y reorganización estructural, después, las muestras fueron sometidos a una molienda en un molino de bolas en el laboratorio hasta alcanza un tamaño de partícula menor a 90 µm, después se evaluó la actividad puzolánica en las muestras por medio de la medición de sílice y alúmina presentes y posteriormente se determinó la resistencia a compresión de los morteros de cemento a los 3, 7 y 28 días, preparando estos morteros con 30% de arcilla calcinada, 50% Clinker y 15% de caliza, obteniendo un aumento de resistencia para los morteros con arcillas calcinadas entre 650 °C y 850 °C y la máxima resistencia se alcanza a los 850 °C. El trabajo de Reyes *et al.* fue considerado en el presente documento como guía para el análisis instrumental de las muestras de lutita y consecuentemente para la implementación de las recetas del cemento en la empresa Argos S.A. Sogamoso.

(Pérez *et al.* 2012) modelaron la calcinación de las arcillas utilizando un modelo físico para producir puzolanas artificiales como sustitución del *Clinker*. Calcinaron las arcillas fluidizando estas partículas a través de un gas caliente alrededor de 800 °C o mayor temperatura, el conducto de calcinación consistía en una tubería circular de acero refractario con un ventilador de tiro inducido al final de la tubería, la arcilla seca se suministraba por una válvula rotatoria localizada

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

al inicio del conducto de calcinación. El proceso que se simuló fue el de una partícula que se acelera, se calienta y al mismo tiempo se dehidroxila. Obteniendo que la dehidroxilación es dependiente de la temperatura y de la velocidad, y resultando en su completa dehidroxilación al final del conducto con una temperatura de 800 °C en partículas con diámetro similar o menor a 100 µm. El trabajo de Pérez *et al.* fue considerado en el presente documento como guía para el estudio del comportamiento de la fase vítrea de la sílice en la lutita según la temperatura y definir su reactividad al combinarse con las demás materias primas componentes del cemento *Portland*.

Los anteriores artículos y documentos anteriores evidencian que los objetivos propuestos en este documento son viables y alcanzables. Es decir, las anteriores referencias verifican que el uso de lutitas (arcilla) como reemplazo de la puzolana en la fabricación del cemento *Portland* es factible a nivel técnico, alcanzando propiedades comerciales.

4. Metodología

A continuación, se detallan las fases de la metodología *Project Management Profesional* (PMP) del *Project Management Institut* (PMI) y las respectivas actividades. La figura 8 del apéndice A resume estas fases y actividades.

4.1. Fase I. Inicio:

4.1.1. Actividad 1. *Kickoff* del proyecto, definiéndose como una reunión ejecutiva donde se sustenta a todos los interesados el alcance del proyecto.

4.1.2. Actividad 2. Levantamiento de prerrequisitos

4.1.3. Actividad 3. Recepción de insumos para la planeación y ejecución del proyecto.

4.2. Fase II. Planeación

4.2.1. Actividad 1. Análisis de documentación entregada por el director del proyecto

4.2.2. Actividad 2. Análisis histórico de recetas de preparación del cemento

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

4.2.3. Actividad 3. Entendimiento de los costos del proyecto

4.2.4. Actividad 4. Capacitación de muestreo

4.2.5. Actividad 5. Creación del documento “protocolo de prueba industrial estudio de factibilidad del uso de lutitas en los cementos UG y Emax”.

4.2.6. Actividad 6. Entrega, socialización y aprobación del documento de protocolo

4.3. Fase III. Ejecución

4.3.1. Actividad 1. Caracterización de lutitas

4.3.1.1. Subactividad 1. Recolección manual de 6 muestras de lutita utilizando un método de muestreo llamado “paleo fraccionado verdadero” en los bancos de yacimiento de lutitas de las minas de la empresa Argos S.A. Sogamoso.

4.3.1.2. Subactividad 2. Caracterización de cada una de las muestras por medio de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para definir su composición.

4.3.2. Actividad 2. Definición de proporciones y preparación de cementos.

4.3.2.1. Subactividad 1. Proposición de las proporciones para la preparación del cemento usando lutitas, con base en recetas históricas de la planta y composición del material.

4.3.2.2. Subactividad 2. Recepción de las lutitas en el patio de materias primas

4.3.2.3. Subactividad 3. Mezclado de las materias primas (Caliza-Lutita)

4.3.2.4. Subactividad 4. verificación de tolvas vacías para el inicio de la prueba industrial.

4.3.2.5. Subactividad 5. Cargue de la mezcla (Caliza-Lutita) a las tolvas de los molinos de cemento.

4.3.2.6. Subactividad 6. Ejecución de la prueba industrial de molienda

4.3.2.7. Subactividad 7. Toma de muestras de cemento cada hora para su análisis

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

4.4. Fase IV. Seguimiento y Control

4.4.1. Actividad 1. Visitas de control

4.4.1.1. **Subactividad 1.** Patios de materias primas para garantizar la correcta mezcla de las materias primas (Caliza-Lutita).

4.4.1.2. **Subactividad 2.** Sala de control para verificación de la dosificación en las tolvas de los molinos.

4.4.2. Actividad 2. Pruebas de calidad

4.4.2.1. **Subactividad 1.** Análisis de calidad de las muestras tomadas con pruebas de *Blaine*, finura y composición por DRX.

4.4.2.2. **Subactividad 2.** Realización de pruebas de resistencia a compresión de los morteros a 1, 3, 7 y 28 días.

4.4.3. Actividad 3. Análisis de resultados de pruebas de calidad

4.4.3.1. **Subactividad 1.** Análisis de resultados de los datos entregados por las pruebas de calidad de *Blaine*, finura y composición por DRX.

4.4.3.2. **Subactividad 2.** Análisis de los resultados de los datos de resistencia de los morteros a 1, 3, 7 y 28 días.

4.5. Fase V. Cierre

4.5.1. **Actividad 1.** Entrega de análisis de resultados

4.5.2. **Actividad 2.** Sustentación de los resultados finales del proyecto

4.5.3. **Actividad 3.** Cierre del proyecto.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

5. Resultados

5.1. Caracterización de las lutitas.

La Tabla 1 presenta la composición de 6 muestras de lutitas provenientes de la mina belencito de la empresa Argos S.A. Sogamoso. Esta caracterización fue realizada por medio de difracción de rayos X (DRX). Los resultados son ilustrados en la Figura 2.

Tabla 1

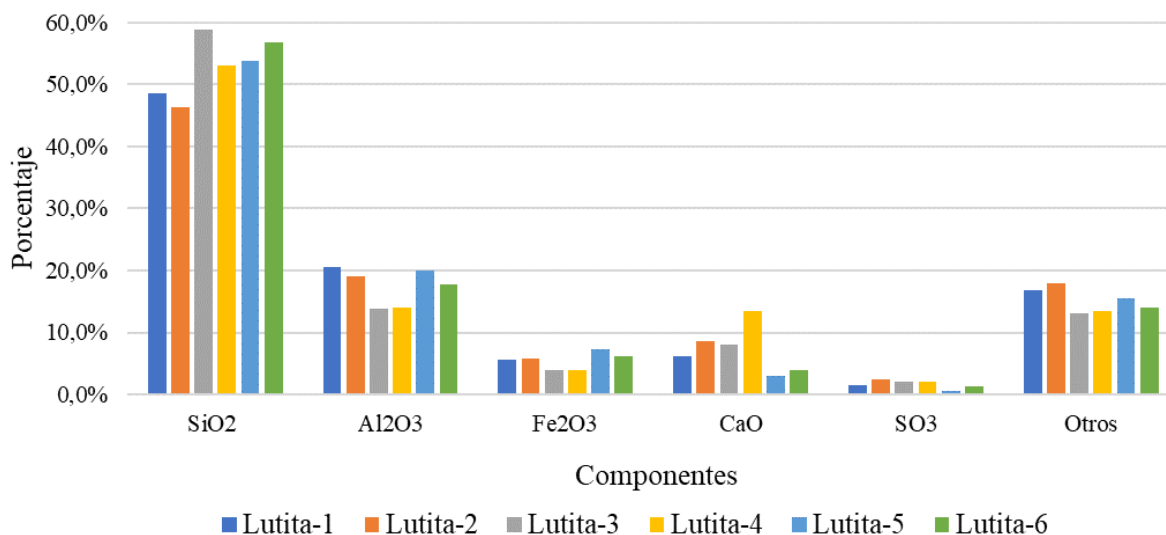
Composición química de las muestras de lutita mina belencito

Identificación	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SO ₃	%Otros	Suma
LUTITA-1	48,628	20,581	5,69	6,198	1,582	16,733	99,999
LUTITA-2	46,246	19,101	5,721	8,524	2,475	17,933	100,00
LUTITA-3	58,914	13,929	3,861	8,098	2,132	13,066	100,00
LUTITA-4	53,054	14,062	3,882	13,376	2,105	13,521	100,00
LUTITA-5	53,742	19,958	7,240	3,055	0,525	15,481	100,00
LUTITA-6	56,813	17,692	6,131	3,997	1,294	14,072	100,00

Nota. en %Otros se sumaron los porcentajes de los siguientes componentes: MgO, Na₂O, K₂O, Mn₂O₃, P₂O₅, TiO₂, Cr₂O₃ y perdidas por calcinación.

Figura 1

Composición química de las muestras de lutita mina belencito



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Según esta figura, la Lutita-1 presenta una composición de alúmina (Al_2O_3) de 20,581% siendo este valor mayor que las demás muestras. La Lutita-2 presenta una mayor composición en óxido de magnesio (MgO), óxido de potasio (K_2O) y los demás componentes que se especifican en “Otros” con un porcentaje de 17.933%. La Lutita-3 presenta el mayor porcentaje en sílice (SiO_2) de un 58,914%, siendo esta la muestra más prometedora de lutita para el uso en cemento ya que, el contenido de sílice en las lutitas genera una mayor reacción de hidratación con los demás componentes del cemento como el *Clinker* para el desarrollo de resistencias (Neville, 2013); (Tironi *et al.*, 2012). Las Lutitas 4, 5 y 6, presentan composiciones muy similares debido a que fueron muestras extraídas de un mismo banco de explotación. Las composiciones reportadas por las lutitas de la Tabla 1 presentan similitud con las composiciones reportadas en los documentos (Tironi *et al.* 2012); (Reyes *et al.* 2016).

5.2. Proporciones de adición en las recetas de cemento.

Las recetas fueron diseñadas con base en los históricos de preparación de la planta y en el reporte de Tironi *et al.* (2012); estos autores aplicaron mezclas considerando porcentajes cercanos al 30% de bentonitas calcinadas, en cemento *Portland*. La Tabla 2 presenta las composiciones para cada receta ensayada en las preparaciones de cemento de uso general, UG. Las recetas de la Tabla 2 son ilustradas en la Figura 3. Según esta figura, el cemento UG fue preparado con 3 recetas diferentes, utilizando *Clinker*, escoria de alto horno, caliza, puzolana, yeso y lutitas.

En los ensayos 1 y 2 de la Tabla 2 para el cemento de uso general UG y en la Tabla 3 para el cemento tipo estructural Emax, en los que no se tuvo en cuenta la puzolana natural como materia prima se le adiciono lutitas y así, completar la proporción de la receta de preparación de los cementos. En la Tabla 2, los ensayos 3 y 4 para el cemento de uso general UG y en la Tabla 3 en el ensayo 4 para el cemento tipo estructural Emax, se planteó la participación de *Clinker*, escoria

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

de alto horno, caliza, puzolana natural, yeso y lutitas; la adición de lutitas conlleva a una reducción en el uso de escoria de alto horno y caliza. Los ensayos 3 y 4 para el cemento de uso general UG y el ensayo 4 para el cemento tipo estructural Emax, utilizaron puzolana natural y lutitas como comparación de los ensayos 1 y 2, los cuales utilizaron solo puzolana.

Tabla 2

Recetas de cemento tipo uso general (UG) de la planta Argos S.A. Sogamoso

Material	Acumulado	Actual	Ensayo #1	Ensayo #2	Ensayo #3	Ensayo #4
	%Composición					
Clinker	37%	45%	45%	45%	45%	49%
Escoria	33%	20%	20%	20%	15%	13%
Caliza	18%	22.5%	19.5%	19.5%	10%	11%
Puzolana	7%	7.5%	0%	0%	15%	11%
Yeso	7%	7%	7%	7%	7%	7%
Lutita	0%	0%	10.5%	10.5%	10%	11%
Suma	102%	102%	102%	102%	102%	102%

La suma de las composiciones de las preparaciones del cemento de uso general UG reporta un valor de 102%, mientras que la preparación del cemento tipo estructural Emax reporta un valor de 101%. La sumatoria superior al 100% se debe a la pérdida de humedad de las materias primas de la receta; la pérdida es ligeramente menor en Emax, ya que el *Clinker* se encuentra en mayor proporción; el *Clinker* es el componente que no contiene humedad y el yeso es el componente que contiene el mayor porcentaje de humedad (Neville, 2013).

Tabla 3

Recetas de cemento tipo estructural max (Emax) de la planta Argos S.A. Sogamoso.

Material	Acumulado	Actual	Ensayo #1	Ensayo #2	Ensayo #4
	%Participación				
Clinker	78%	79%	79%	79%	81%
Escoria	6%	5%	5%	5%	7%
Caliza	7%	7.5%	6.5%	6.5%	2%
Puzolana	3%	2.5%	0%	0%	2%
Yeso	7%	7%	7%	7%	7%
Lutita	0%	0%	3.5%	3.5%	2%
Suma	101%	101%	101%	101%	101%

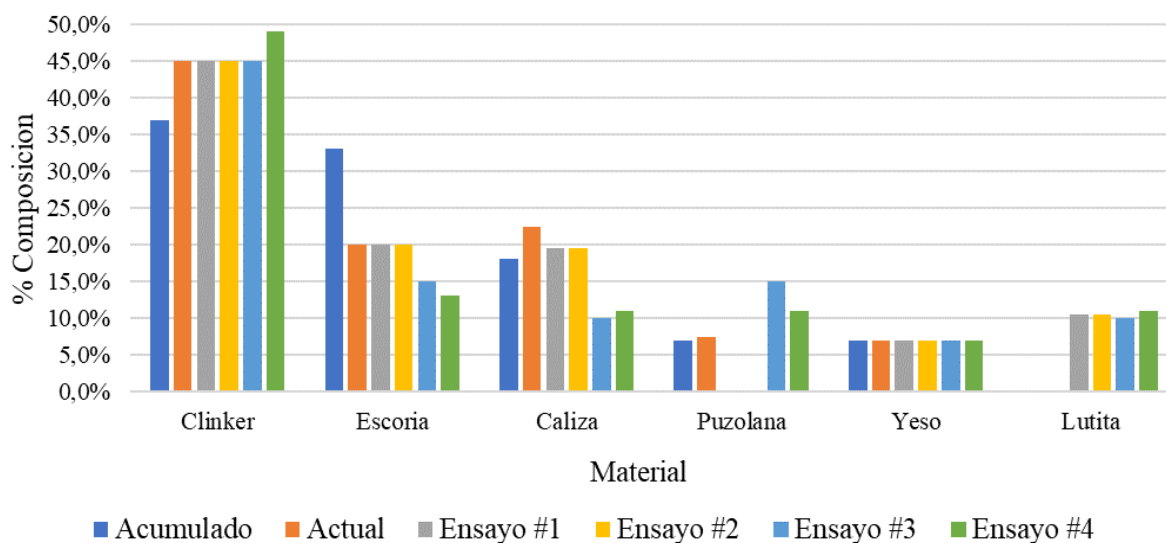
EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Las Figuras 2 y 3 ilustran con gráficas de barras las composiciones mostradas en las Tablas 2 y 3. Las comparaciones entre las composiciones de los ensayos pueden ser realizadas de manera directa en estas Figuras; por ejemplo, de estas Figuras se sigue que la diferencia entre los ensayos 1, 2, 3 y 4 corresponde a la presencia o no de puzolana y de lutita.

La Tabla 3 presenta las composiciones para cada receta ensayada en las preparaciones de cemento de tipo estructural, Emax. Las recetas de la Tabla 3 son ilustradas en la Figura 4. Según esta figura, el cemento Emax será preparado con 2 recetas diferentes, utilizando *Clinker*, escoria de alto horno, caliza, puzolana, yeso y lutitas.

Figura 2

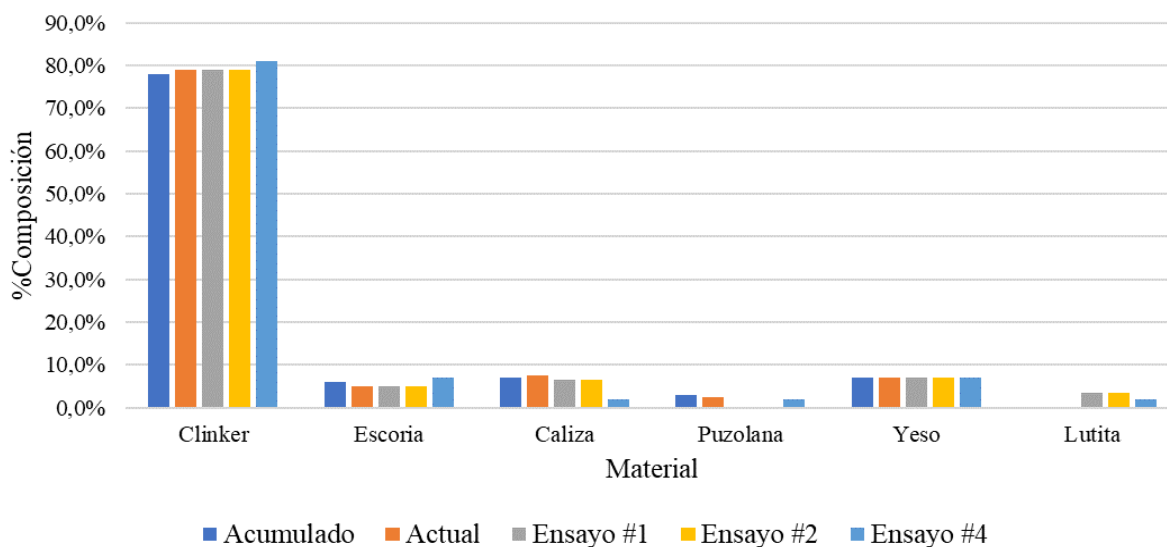
Recetas de cemento tipo uso general (UG) de la planta Argos S.A. Sogamoso



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 3

Recetas de cemento tipo estructural max (Emax) de la planta Argos S.A. Sogamoso.



Los diferentes ensayos preparados fueron sometidos a pruebas de finura por medio de un tamiz de 45 μ m, prueba de *Blaine*, y resistencia mecánica por compresión a tiempos de fraguado a 1, 3, 7 y 28 días. Los resultados de la evaluación mecánica de los cementos derivados de los ensayos son analizados en la siguiente sección.

5.3. Resultados de la preparación.

La prueba de preparación de los cementos fue realizada el día 6 de agosto de 2021 en los molinos de cemento de la planta Argos S.A. Sogamoso. La prueba tuvo una duración de 8 horas de molienda; en el molino de cemento 1 (MC1) se produjo cemento tipo uso general (UG) y el molino de cemento 2 (MC2) se obtuvo cemento de tipo estructural Emax.

Durante la prueba, diferentes muestras de cemento UG y Emax fueron tomadas cada hora (por 8 horas); en total se tomaron 8 muestras de cada tipo de cemento (UG y Emax). Posteriormente, una muestra consolidada del cemento UG fue obtenida por la mezcla de las 8 muestras respectivas; de igual manera, una muestra consolidada del cemento Emax fue obtenida

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

con las correspondientes muestras. Las muestras consolidadas o acumuladas fueron sometidas a los análisis *Blaine*, finura y resistencia mecánica para los tiempos de fraguado de 1, 3, 7 y 28 días; estas pruebas son aplicadas rutinariamente en el control de calidad de las preparaciones de cemento (Barbudo & Yepes, 2004); (Neville, 2013); el Apéndice E, describe de manera sucinta las características principales de estos ensayos. Estas muestras acumuladas fueron denominadas como: UG 1,1 (C-95), UG 1,2 (C-95), UG 2,1 (C-95), UG 2,2 (C-95), UG 3,1 (C-95), UG 3,2 (C-95), UG 3,3 (C-95), UG 3,4 (C-95), UG 4,1 (C-95) y UG 4,2 (C-95) para el cemento de uso general UG, Emax 1,1 (C-247), Emax 1,2 (C-247), Emax 2,1 (C-247), Emax 4,1 (C-247) y Emax 4,2 (C-247) para el cemento de tipo estructural Emax. La denominación descrita para el cemento UG se refiere al número de ensayo y al número de muestra tomada en el presente ensayo. Por su parte, el termino C-95 hace referencia a un tipo de aditivo ayudante de molienda empleado para mejorar la distribución de partículas en el cemento UG. Igualmente, la denominación estipulada para el cemento Emax se refiere al número de ensayo realizado y el número de muestra tomada para ese ensayo. Consecuentemente, el termino C-247 es un aditivo mejorador de calidad utilizado en el cemento de tipo estructural Emax; este aditivo conlleva a una mayor resistencia en el cemento que el aditivo C-95.

Los análisis de las pruebas fueron cotejados con la ficha técnica de cada uno de los tipos de cemento (UG y Emax) de la planta Argos S.A. Sogamoso, obteniendo los resultados de *Blaine*, finura y resistencias a 1, 3, 7 y 28 días, mostrados en la Tabla 4. También se tomó la molienda de cemento del 8 de agosto de 2021 como “blanco” comparativo de las nuevas preparaciones. Los aditivos fueron también adicionados a los respectivos blancos.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Tabla 4

Resultados de las pruebas de resistencia a compresión al cemento UG y cemento estructural Emax.

Cemento UG						
Cemento	Blaine [cm²/g]	% Rtm 45µm	R-1 [Mpa]	R-3 [Mpa]	R-7 [Mpa]	R-28 [Mpa]
Ficha Técnica Blanco	NA 4723	7% ± 0.5% 7,02%	NA 5,51	9,0 11,71	15,0 15,81	24,0 26,94
Resultados ensayo #1						
UG 1,1	4820	8,16%	4,64	10,18	14,91	23,16
UG 1,2	4825	7,75%	4,50	10,34	14,78	23,47
Promedio	4823	7,96%	4,57	10,26	14,85	23,32
Resultados ensayo #2						
UG 2,1	4995	6,24%	5,15	10,16	15,16	25,03
UG 2,2	6510	5,14%	4,38	9,75	14,49	23,56
Promedio	5753	5,69%	4,77	9,96	14,83	24,30
Resultados ensayo #3						
UG 3,1	3970	4,74%	6,22	11,41	16,01	24,69
UG 3,2	4860	4,09%	5,99	13,51	17,63	28,36
UG 3,3	4320	3,95%	6,15	12,16	17,07	28,40
UG 3,4	4610	5,36%	5,95	12,63	16,32	30,11
Promedio	4440	4,54%	6,08	12,43	16,76	27,89
Resultados ensayo #4						
UG 4,1	4880	7,33%	6,2	12,86	17,44	25,7
UG 4,2	4922	7,91%	5,67	13,01	18,55	26,7
Promedio	4901	7,62%	5,94	12,94	18,00	26,20
Cemento Emax						
Ficha Técnica Blanco	NA 4646	2% ± 0,2% 2,1%	14,5-17,5 14,67	25,5- 30,5 25,03	NA 29,04	43,4 42,5
Resultados ensayo #1						
Emax 1,1	4200	1,79%	14,82	27,58	33,30	41,97
Emax 1,2	4553	1,92%	15,43	26,59	32,83	43,41
Promedio	4377	1,86%	15,13	27,09	33,07	42,69
Resultados ensayo #2						
Emax 2,1	4230	2,22%	14,76	24,98	31,18	43,36
Resultados ensayo #4						
Emax 4,1	4490	2,12%	17,96	28,37	35,55	46,99
Emax 4,2	4220	2,06%	17,07	27,42	34,06	45,50
Promedio	4335	2,09%	17,52	27,90	34,81	46,25

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

En la Tabla 4 la columna “%R_{tm} 45 μm” hace referencia al parámetro de finura medido por la retención en la malla #325, la cual filtra partículas de cemento con tamaño mayor a 45μm, asimismo. Las columnas “R-1”, “R-3”, “R-7” y “R-28” corresponden a los datos de resistencias a la compresión de los morteros a un tiempo de 1, 3, 7, 28 días de fraguado respectivamente.

La columna “*Blaine*” corresponde al método de determinación de la finura por medio de la medición de la superficie específica del cemento *Portland* dada en cm²/g. Esta prueba fue diseñada con el fin de determinar el tamaño de los granos menores que pasan por el tamiz de 45 μm. Las partículas finas cumplen un papel muy importante dado que una distribución alta de partículas entre 3 y 30μm conduce a una resistencia mejorada a edades tempranas en la hidratación del cemento (Neville, 2013). Los resultados promedio presentados en la Tabla 4 para los análisis de resistencia mecánica de los cementos UG y Emax son ilustrados en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Según estas figuras, la resistencia mecánica promedio a la compresión para todos los ensayos, tanto en el cemento UG como en el Emax, muestra un aumento con el tiempo de fraguado; este comportamiento era esperado debido a que “la resistencia de un mortero depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de los agregados y de la resistencia del agregado” (Neville, 2013).

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 4

Datos de resistencias a compresión promedio del cemento de uso general UG.

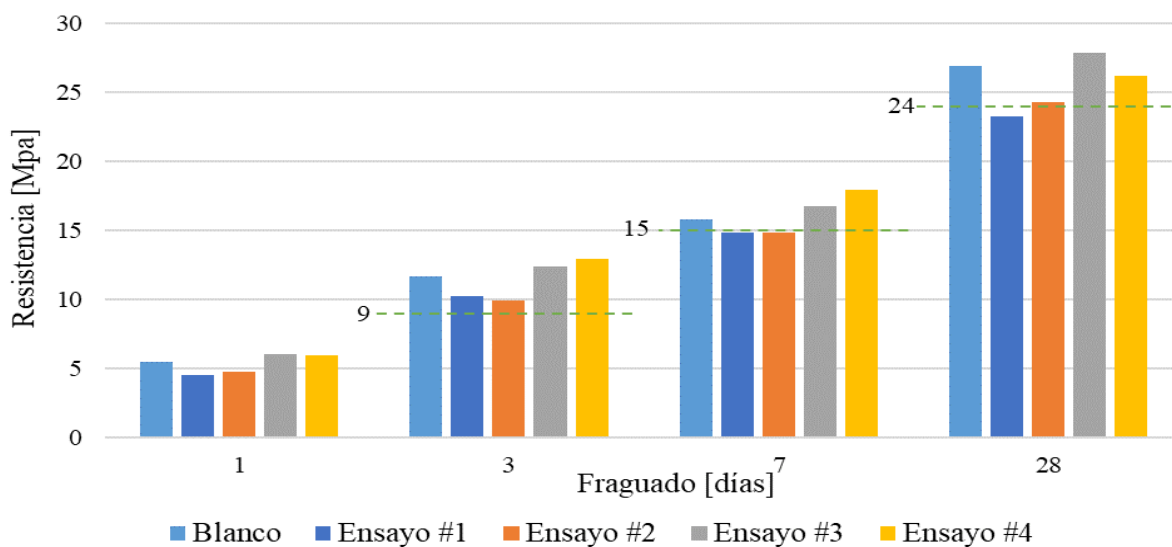
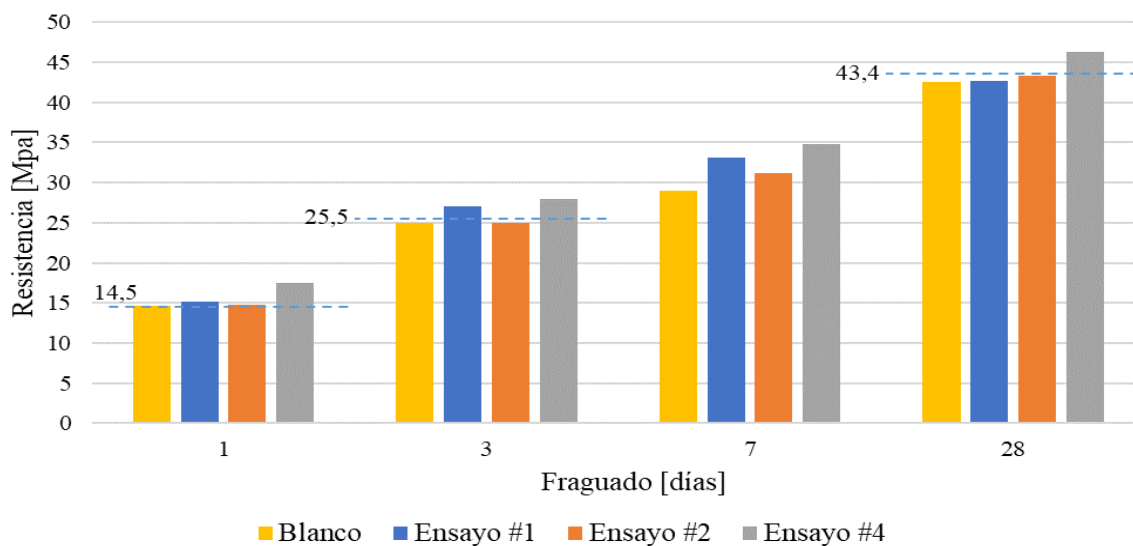


Figura 5

Datos de resistencias a compresión del cemento estructural Emax.



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Por otra parte, según la Figura 4, las preparaciones de cemento UG denominadas ensayos 3 y 4 presentaron mayores valores de resistencia que las respectivas preparaciones 1 y 2. Respecto a los resultados del blanco se obtuvo que el desarrollo de resistencias cumple con los requerimientos de calidad, puesto que, se preparó con la receta habitual de la empresa tomándolo como referencia para los ensayos. Las tendencias anteriormente analizadas se deben a dos factores principalmente; La composición de lutitas y la finura en la preparación del cemento. En las recetas de los denominados ensayos 1 y 2 no se tuvo en cuenta la adición de puzolana natural, siendo esta composición reemplazada en su totalidad por lutitas en dichas recetas. En los ensayos 3 y 4 se adiciono puzolana natural a la receta, resultando en el aumento de la resistencia mecánica a compresión de los morteros a edades avanzadas (7 y 28 días) debido a una mayor efectividad en la reacción de hidratación entre las adiciones (caliza-lutita-puzolana) de los ensayos 3 y 4. Los autores Tironi *et al.* (2012) afirmaron que el uso de bentonitas calcinadas en una proporción de adición de aproximadamente del 30% tuvo una leve mejora en el desarrollo de resistencia mecánica de los morteros a edades avanzadas (7 y 28 días). En cada uno de los ensayos se tuvo en cuenta la proporción de adición del 30% puesto que, para el cemento UG en los respectivos ensayos, se trabajó con proporciones de adición entre el 30 y 33%.

Tironi *et al.* (2012) obtuvieron un desarrollo de resistencia mecánica de los morteros a 7 días de 22 Mpa aproximadamente; y resistencias entre 30 y 33 Mpa aproximadamente para 28 días. Estos datos se especifican en la Figura 20 del Apéndice F.

De otro lado, según la Figura 5, la receta de cemento Emax denominada ensayo 4 presentó mayores valores de resistencia que las respectivas preparaciones 1 y 2. El blanco se tomó como referencia al ser preparado con la receta estipulada por la empresa teniendo un punto de comparación para los ensayos teniendo un desarrollo de resistencias mecánicas favorables para el

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

cemento de tipo estructural Emax. Uno de los factores que se consideraron en el desarrollo de resistencia mecánica del cemento fue la adición de puzolana en la mezcla. Ya que, la adición de este material a la mezcla causa un aumento en la organización de la estructura química de las lutitas lo que conlleva a la mejora de la resistencia mecánica debido a la mayor efectividad en la reacción de hidratación del cemento (Neville, 2013) (Tironi *et al.* 2012).

Las Figuras 4 y 5 presentan el valor mínimo de resistencia definido en la ficha técnica, para cada tipo de cemento; en las figuras el valor se denota con una línea horizontal segmentada. Según la Figura 4, las preparaciones de los ensayos 3 y 4 cumplen con la calidad estipulada por la empresa Argos S.A. Sogamoso. Con una leve mejora en la resistencia mecánica del cemento UG preparado en estos ensayos. El blanco para el cemento UG presenta valores que cumplen con la calidad por el uso de la receta propuesta históricamente por la empresa. Según la Figura 5, las preparaciones del cemento de tipo estructural Emax en los ensayos 1 y 2 no llegan al valor mínimo de calidad a comparación del ensayo 4 que presenta una mejora en el desempeño de resistencia mecánica del cemento Emax, cumpliendo con la calidad estipulada. El blanco en este caso se tomó como referencia para los ensayos; este fue preparado con la receta histórica para el cemento de tipo estructural Emax propuesta por la empresa. sin embargo, los valores de resistencia de esta preparación de cemento no llegan al valor mínimo por una diferencia muy pequeña. Por lo analizado anteriormente, es posible mencionar que las preparaciones que conducen al cumplimiento son, para el cemento de uso general UG las recetas usadas en la preparación de los cementos de los ensayos 3 y 4 teniendo resistencias mecánicas a la compresión más altas. La preparación del ensayo 4 para el cemento Emax de la Figura 5 resulta en el cumplimiento de la ficha técnica como también dando una leve mejora en el desarrollo de resistencia mecánica a la compresión.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 6

Datos de *Blaine* promedio para el cemento de uso general UG

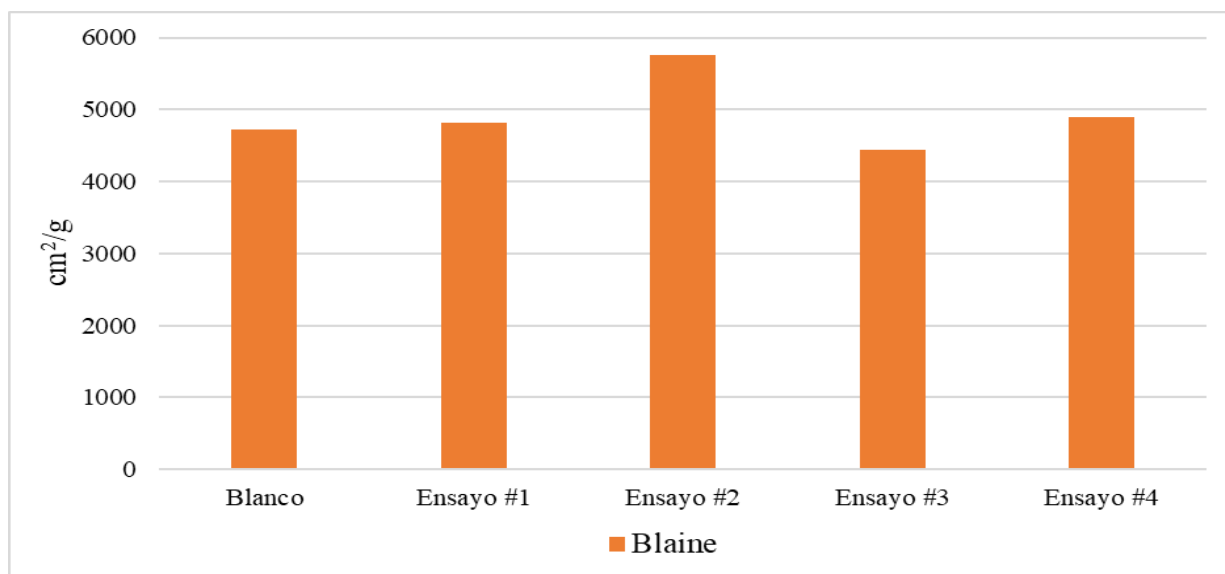
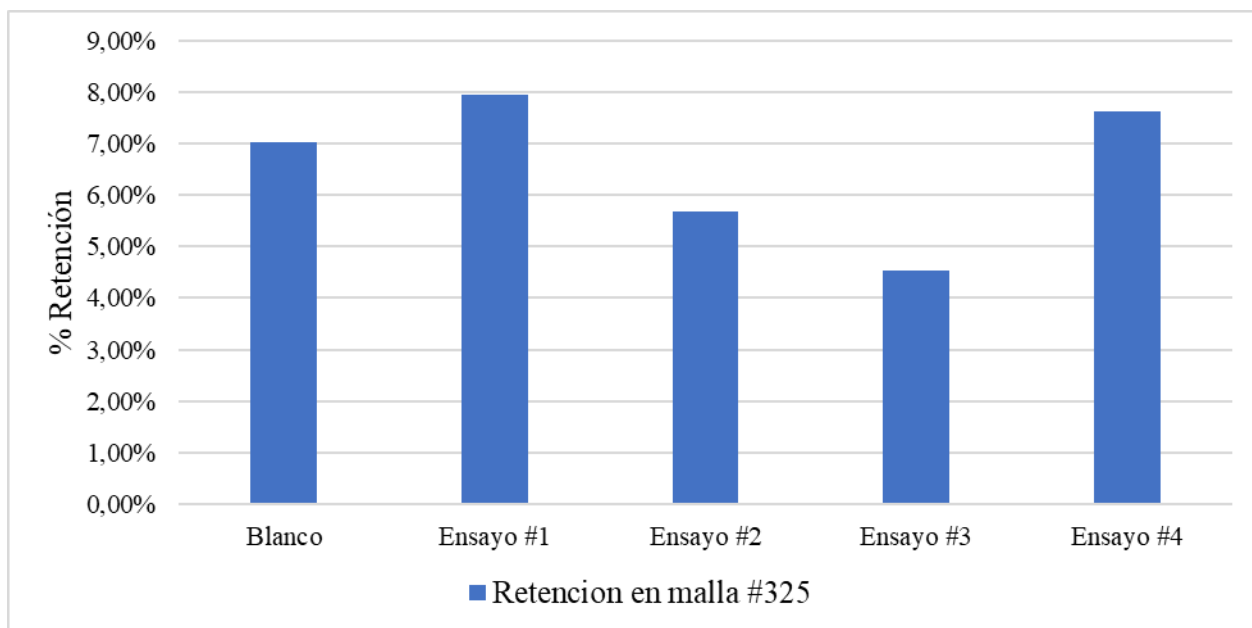


Figura 7

Datos de retención en malla #325 de 45 μ m para el cemento de uso general UG



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

La finura del cemento en estos ensayos (ensayos 1 y 2) fue trabajada entre un 6 y 8% de partículas mayores a $45\mu\text{m}$, causando un desarrollo de resistencias levemente bajo comparadas con el blanco de la Figura 4. Por otra parte, en los ensayos 3 y 4 se trabajó la finura del cemento entre un 4 y 8% de partículas mayores a $45\mu\text{m}$ causando una mejora leve en el desarrollo de la resistencia mecánica a compresión de los cementos a edades tempranas (1 y 3 días). El aumento en el desarrollo de resistencia mecánica del ensayo 4 de la Figura 5, es debido a los factores de finura. Puesto que, la finura efectuada en este tipo de cemento oscila entre el 1,5 y 2,2% de partículas mayores a $45\mu\text{m}$ lo que conlleva a una distribución de partículas más finas en el cemento causando una mejor cohesión y adhesión en los morteros y por consecuencia un mejor desarrollo de resistencia mecánica a edades tempranas (1 y 3 días). La prueba *Blaine* se tiene en cuenta en los cementos, como requisito de calidad de la empresa; resultando un valor de superficie específica del cemento; esta prueba nos dice el tamaño de partícula en el cemento para obtener un resultado del nivel de adhesión y cohesión para la pasta de los respectivos morteros, puesto que, el área superficial de la fase solida del cemento aumenta durante la hidratación y gran cantidad de agua libre es absorbida en esta superficie (Neville, 2013). Según (Neville, 2013), Los valores de *Blaine* normalmente aceptados para el cemento *portland* se encuentran entre 3500 y $3800 \text{ cm}^2/\text{g}$; siendo este un valor muy por debajo al analizado en los cementos de la empresa Argos S.A.

En los Apéndices B, C y D se muestran las gráficas de los datos de las pruebas de resistencias de los cementos tipo uso general (UG) y estructural max (Emax) generales y de cada uno de los experimentos.

Respondiendo a la pregunta directora de la practica empresarial, la adición de lutitas como puzolana artificial que conducen a las preparaciones de UG y Emax con características comerciales son las mencionadas en la sección de UG y Emax de los ensayos #4 de la Tabla 4, que especifica

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

que para el cemento de uso general UG se usara una composición de: 49% *Clinker*, 13% Escoria de alto horno, 11% Caliza, 11% Puzolana natural, 7% Yeso, 11% Lutita como puzolana artificial, valores de *Blaine* entre 4880 y 4922 cm²/g y una finura con retención de partículas mayores a 45µm entre el 7 y 8%, y para el cemento de tipo estructural Emax una composición de: 81% *Clinker*, 7% Escoria de alto horno, 2% Caliza, 2% Puzolana natural, 7% Yeso, 2% Lutita como puzolana artificial, con valores de *Blaine* entre 4490 y 4220 cm²/g y una finura con retención de partículas mayores a 45µm entre el 2 y 2,5%.

6. Conclusiones

- Según las pruebas de difracción de rayos X (DRX) las lutitas presentaron un alto contenido de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), un 52,9% en masa de sílice (SiO_2) y 17,5% en masa de alúmina (Al_2O_3), junto con otros componentes en los que se destacan óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO) junto con óxido de azufre (SO_3) importantes para llevar a cabo la reacción de hidratación en el cemento.
- En las recetas planteadas en los experimentos de cada uno de los tipos de cemento las proporciones óptimas son las planteadas en el ensayo #4, implementando para el cemento de uso general (UG) la siguiente proporción: 49% *Clinker*, 13% *Escoria* de alto horno, 11% *Caliza*, 11% *Lutita*, 11% *Puzolana*, 7% *Yeso*, valores de *Blaine* entre 4880 y 4922 cm^2/g y una finura con retención de partículas mayores a $45\mu\text{m}$ entre el 7 y 8%. La receta para el cemento tipo estructural max (E_{max}) utilizada fue: 81% *Clinker*, 7% *Escoria* de alto horno, 2% *Caliza*, 2% *Puzolana*, 2% *Lutita*, 7% *Yeso*, con valores de *Blaine* entre 4490 y 4220 cm^2/g y una finura con retención de partículas mayores a $45\mu\text{m}$ entre el 2 y 2,5%. Ya que estas proporciones en cada uno de los cementos (UG y E_{max}) resultaron en el mayor desarrollo de resistencias a 1, 3, 7 y 28 días.
- El desarrollo de resistencias de cada uno de los cementos en el ensayo #4 fue el óptimo cumpliendo con la normativa de calidad de la empresa expresada en la ficha técnica expresando el desempeño de las resistencias de cada uno de los tipos de cemento, para el cemento tipo uso general (UG) las resistencias a 3, 7 y 28 días son 9, 15 y 24 Mpa respectivamente. Para el cemento tipo estructural max (E_{max}) las resistencias son entre 14,5 y 17,5 Mpa a un día, entre 25,5 y 30,5 Mpa a 3 días y 43,4 Mpa a 28 días. superando los datos del cemento tomado como referencia (blanco) además de la comparativa con los

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

demás experimentos, siendo este ensayo el mejor en tema de resistencia mecánica del cemento y la reducción de consumo de escoria de alto horno.

- En la planta Argos S.A. Sogamoso es viable utilizar la lutita como materia prima en la preparación de los cementos uso general (UG) y estructural max (Emax), con la mezcla de caliza, lutitas y puzolana en igual proporción, reaccionando las tres materias primas y aumentando la resistencia mecánica de los cementos, reduciendo el consumo de escoria de alto horno y caliza, reduciendo estos en 7% y 11,5% respectivamente y cumpliendo con la normativa de calidad de la empresa evidenciando una mejoría de un 6,2% en el desarrollo de resistencias del cemento tipo uso general (UG) y resultando en una mejoría de un 13,7% en el desarrollo de resistencias para el cemento tipo estructural max (Emax), también teniendo en cuenta que no se registra cambio en el color ni molturabilidad del material hidráulico.
- Según los resultados de resistencias a compresión hechas a los morteros de los ensayos realizados, se concluye que las composiciones de las materias primas en el cemento óptimas son las especificadas en los ensayos #4 de las Tablas 2 y 3, donde se mencionan que se tiene una participación de lutita como puzolana artificial del 11% en el cemento de uso general, UG, del mismo modo, una participación del 2% en el cemento de tipo estructural, Emax.

7. Recomendaciones

- Utilizar las lutitas de los yacimientos en los bancos H e I de la mina belencito propiedad de la empresa Argos S.A. Sogamoso, ubicadas en la berma 2830 MSNM. Y tomar muestras periódicamente después de que se cambie de berma de explotación en esta mina, teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas de las lutitas utilizadas en los experimentos.
- Se recomienda a la empresa Argos S.A. Sogamoso utilizar las recetas de preparación de cemento en las tablas 2 y 3 para cemento de uso general (UG) y estructural max (Emax) para reducir el consumo de clinker y escoria de alto horno y disminuir el costo del cemento.
- Se recomienda mezclar las materias primas caliza, puzolana y lutitas en igual proporción en la misma tolva de alimentación al molino para aumentar su índice de actividad puzolanico y la hidratación de los cementos producidos
- Se aconseja mantener el parámetro de *Blaine* en valores entre 4000 y 5000 cm^2/g y el parámetro de finura entre los valores de $7\% \pm 0,5\%$ para el cemento usgo general (UG) y $2\% \pm 0,2\%$ indicados por la ficha técnica de cada uno de los tipos de cemento.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Referencias Bibliográficas

- Almenares Reyes, R., Alujas Diaz, A., Poll Legra, L., Bassas Noa, P., Betancourt Rodriguez, S., Martirena Hernandez, J., & Leyva Rodriguez, C. (2016). Evaluación de arcillas caoliniticas de Moa para la producción de cemento de base clinker- arcilla calcinada . *Revista Minería y Geología*, 63-76.
- Argos, C. (2021). *Contexto*. <https://argos.co/contexto/>
- Argos, G. (06 de Junio de 2019). *Nosotros Grupo Argos*. <https://www.grupoargos.com/es-co/nosotros/grupo-argos>
- Argos, G. (03 de octubre de 2020). *360 en concreto*. 360 en concreto: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/category/cemento/191qu233-es-la-puzolana>
- Barbudo, M. A., & Yepes, S. (2004). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. San Vicente: UNE Union de editoriales universitarias españolas.
- Borrajo Perez, R., Gonzalez Bayon, J., & Sanchez Rodriguez, A. (2012). Modelación del proceso de calcinación flash durante la activación de arcillas. *Revista ingeniería mecánica*, 73-82.
- Castillo, R., Fernandez, R., Antoni, M., Scrivener, K., Alujas, A., & Martirena, J. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista ingeniería de construcción*, 329-352.
- Cemex, P. (19 de junio de 2019). *Cemex*. <https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland>
- DANE. (2019). *Encuesta anual manufacturera*. Bogotá: DANE.
- Española, R. A. (20 de junio de 2022). *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/sinterizar?m=form>

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Fonseca , F. A., Rodriguez, L. F., & Rincon, P. (2021). *Optimizacion de procesos Protocolo de prueba industrial Estudio de factibilidad del uso de lutitas en los cementos UG y Emax.*

Sogamoso: Planta Argos S.A.

Fonseca, F. A., Rincon, P., & Rodriguez, L. F. (2021). *Analisis de resultados de ensayos de molienda con lutitas.* Sogamoso: Argos S.A.

Garside, M. (1 de Abril de 2022). *global cement production volume: statista.* statista: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

minas, D. d., D. d., Comité Ambiental de la industria del cemento, & Instituto colombiano de productores de cemento. (2005). *Guía Minero Ambiental De La Industria Del Cemento.* Bogotá: Ministerio de minas y energia; , Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

Neville, A. (2013). *Tecnología del concreto.* Soledad Moline Venazi. <https://doi.org/622>

Romero Gonzalez, A. Y. (2020). *Determinación del índice de actividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios disponibles en el mercado colombiano.* Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito. <https://doi.org/43>

S.A., C. A. (2013). *Mision, vision y valores webnode.* <https://cementos-argos-s-a3.webnode.es/vision-y-mision/>

Sogamoso, A. S. (2021). *Calizas planta sogamoso.* Sogamoso: Argos S.A.

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2010). *Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física.* Madrid: Pearson education & Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Tironi, A., Trezza, M., Irassar, E., & Scian, A. (2012). Activacion termica de bentonitas para su utilizacion como puzolanas. *revista de la construccion*, 44-53.

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Uribe Velez, A., Mejia Castro, L., Duque Montoya, B., Suarez Perez, S., Arevalo Correa, C.,

Gaitan Perez, L., & Ossa Moreno, C. (2005). *Guía Minero Ambiental De La Industria Del
Cemento*. Bogotá: Ministerio de minas y energia, ministerio de ambiente, vivienda y
desarrollo territorial, instituto colombiano de productores de cemento.

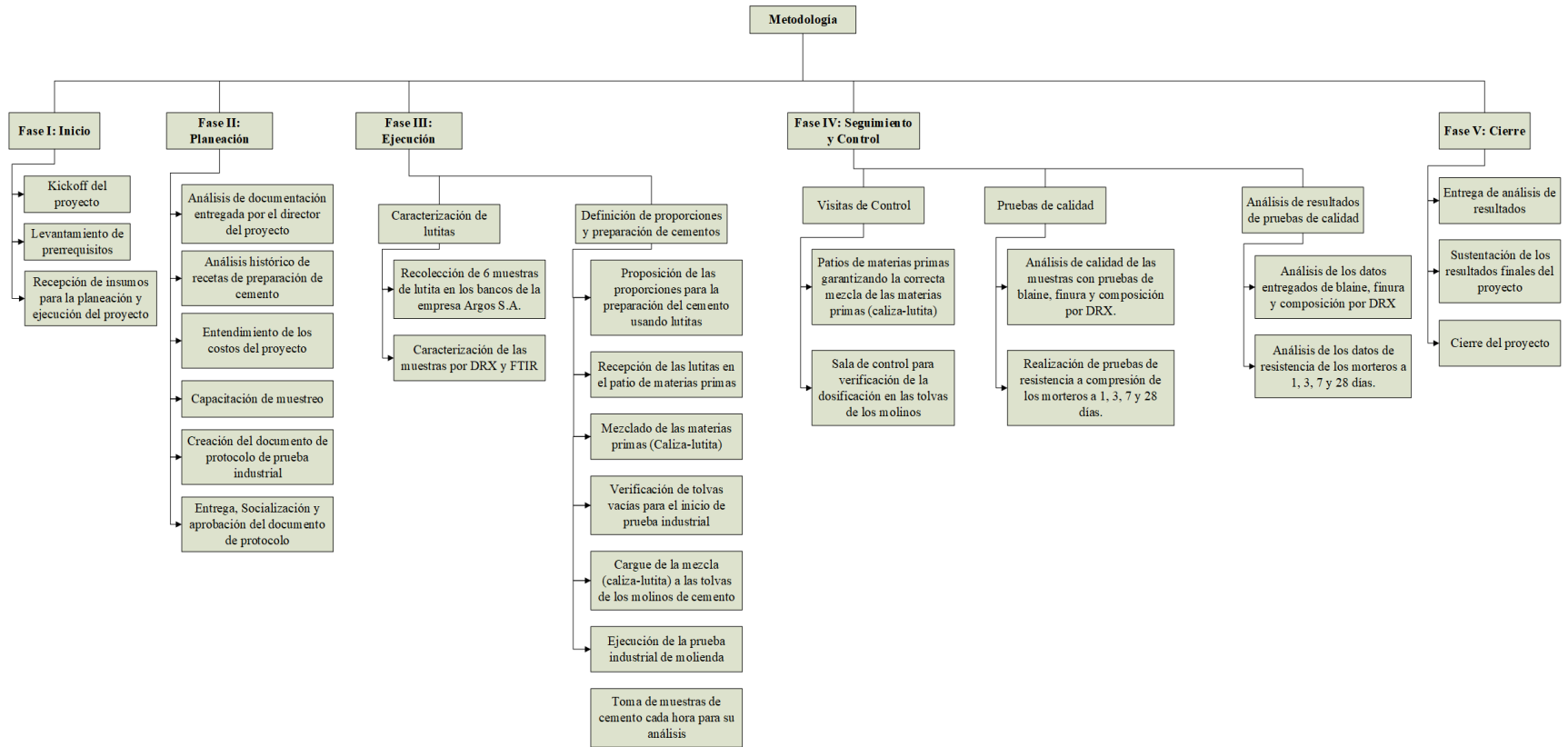
VYMaps. (2022). *Cementos Argos S.A. Planta Sogamoso*. <https://vymaps.com/CO/Cementos-Argos-S-A-Planta-Sogamoso-1801970746535680/>

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice A. Metodología PMP

Figura 8

Diagrama de flujo de la metodología

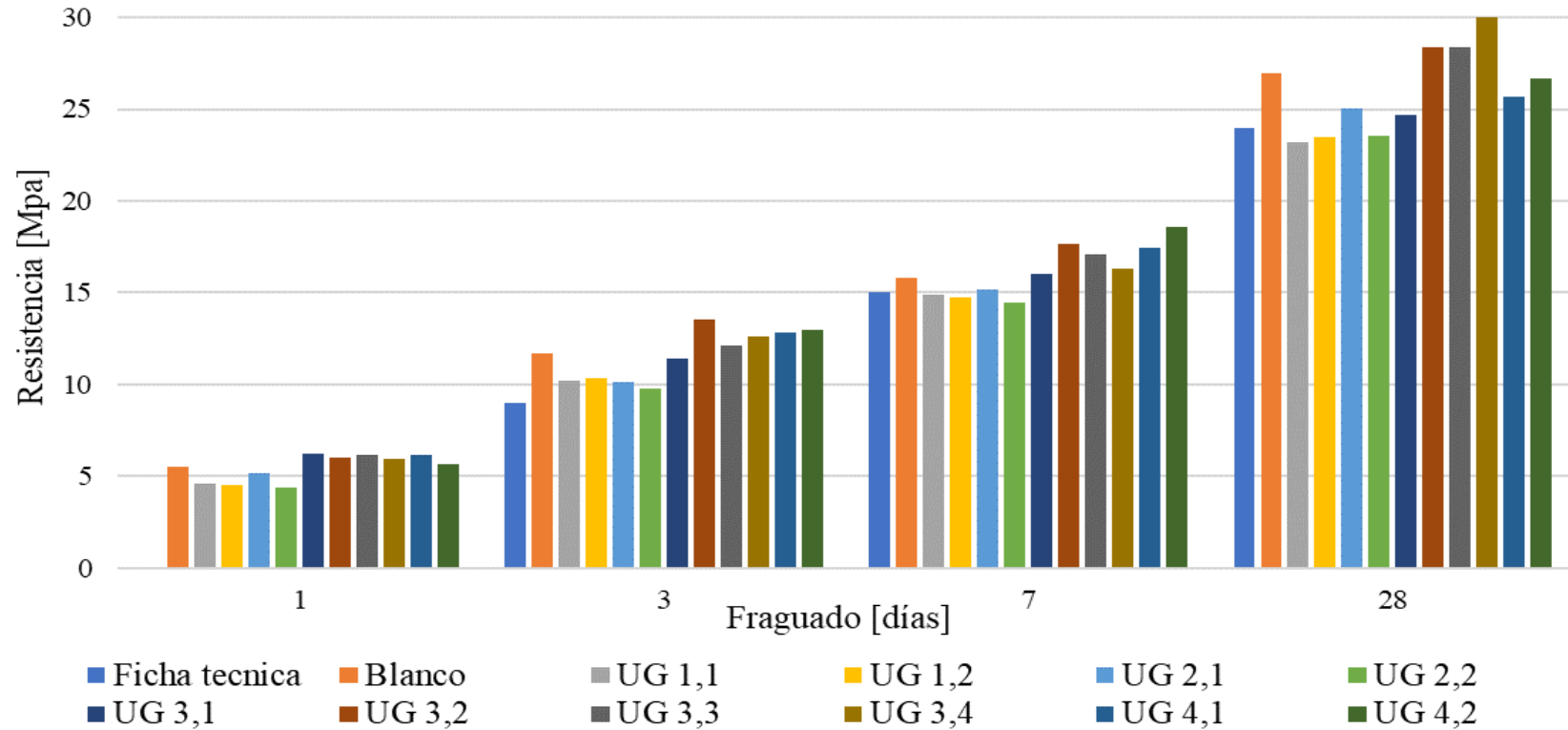


EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice B. Gráficos de Análisis de resistencia para cementos UG y Emax

Figura 9

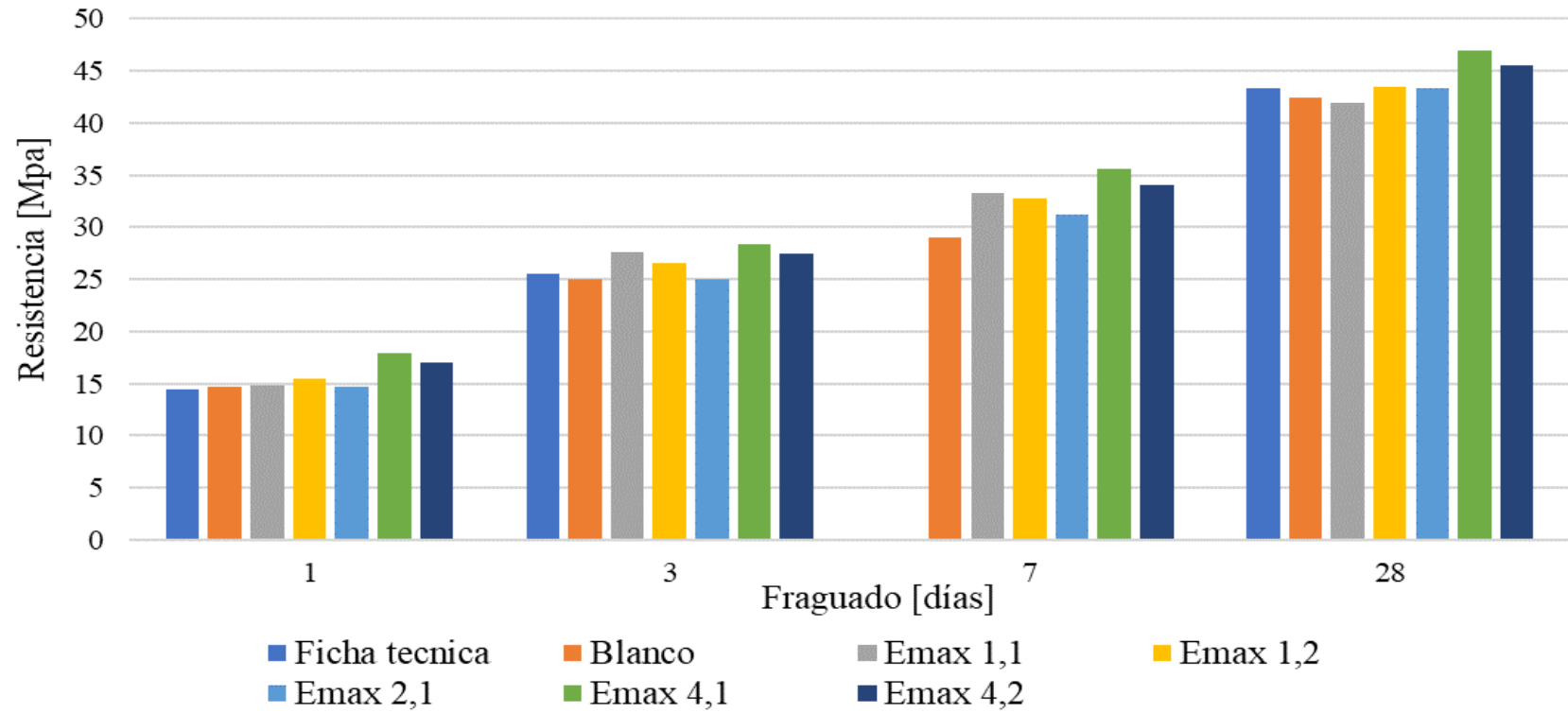
Resistencias a compresión de los ensayos para cemento de uso general UG



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 10

Resistencias a compresión de los ensayos para cemento de tipo estructural Emax



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice C. Pruebas de resistencia de cementos UG.

Figura 11

Resistencias a compresión cemento uso general (UG)

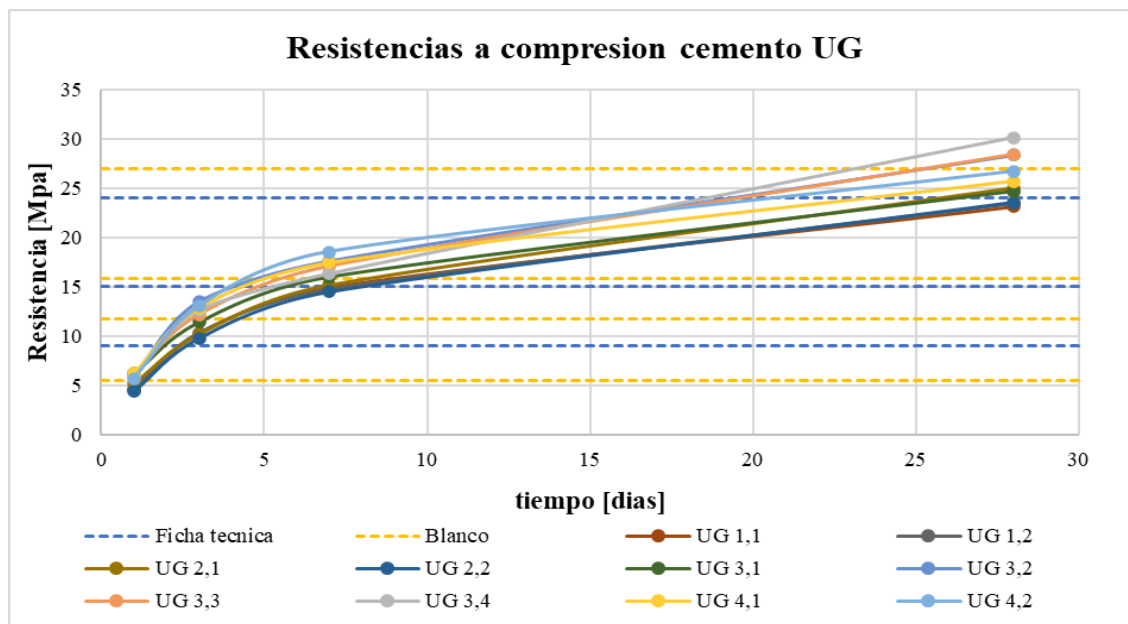
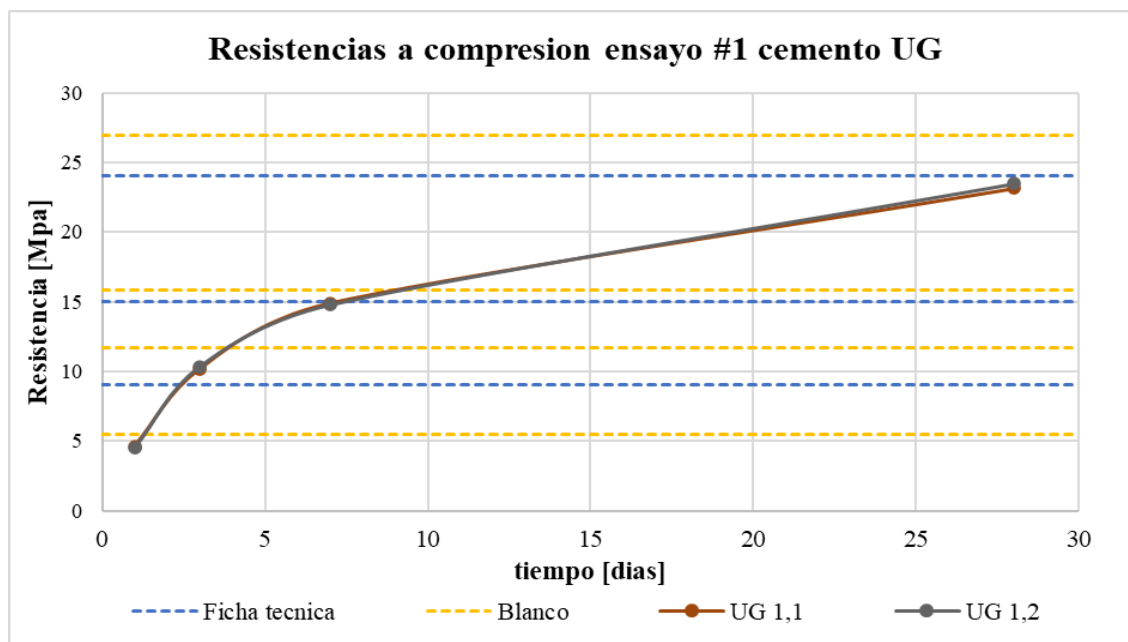


Figura 12

Resistencias a compresión ensayo #1 cemento uso general (UG)



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 13

Resistencias a compresión ensayo #2 cemento uso general (UG)

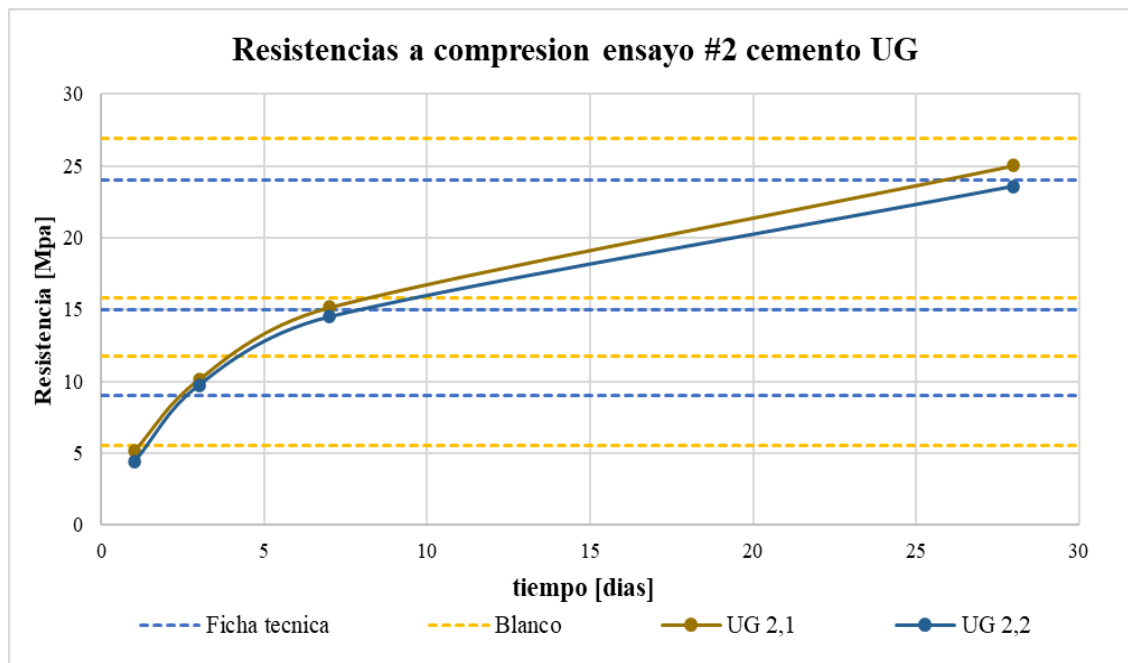
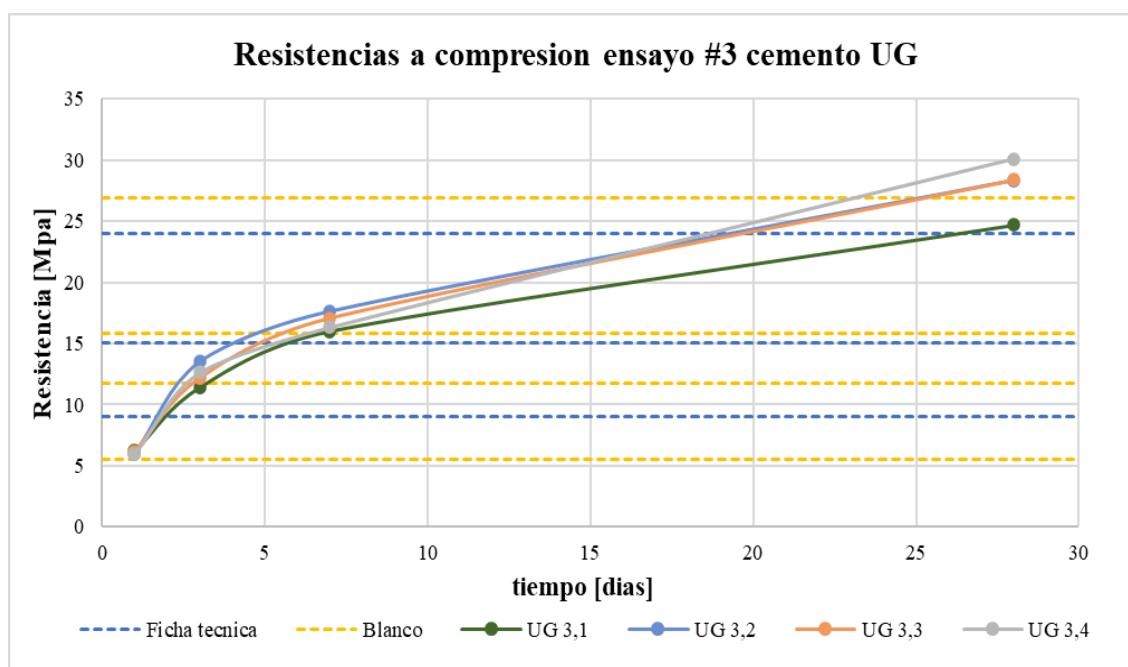


Figura 14

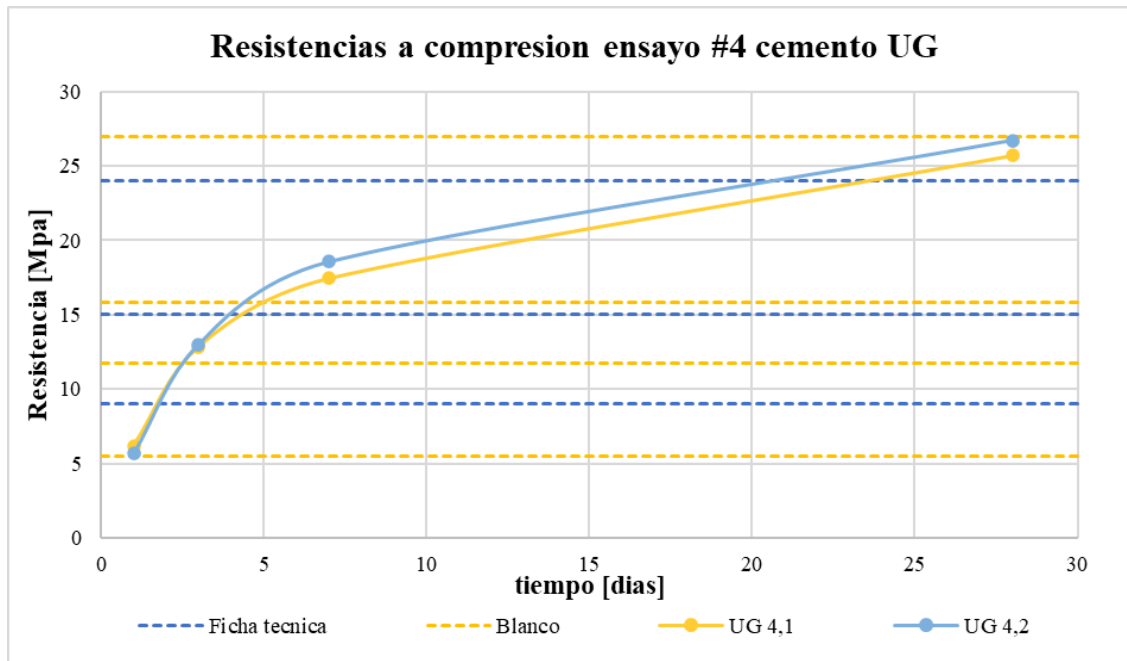
Resistencias a compresión ensayo #3 cemento uso general (UG)



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 15

Resistencias a compresión ensayo #4 cemento uso general (UG)

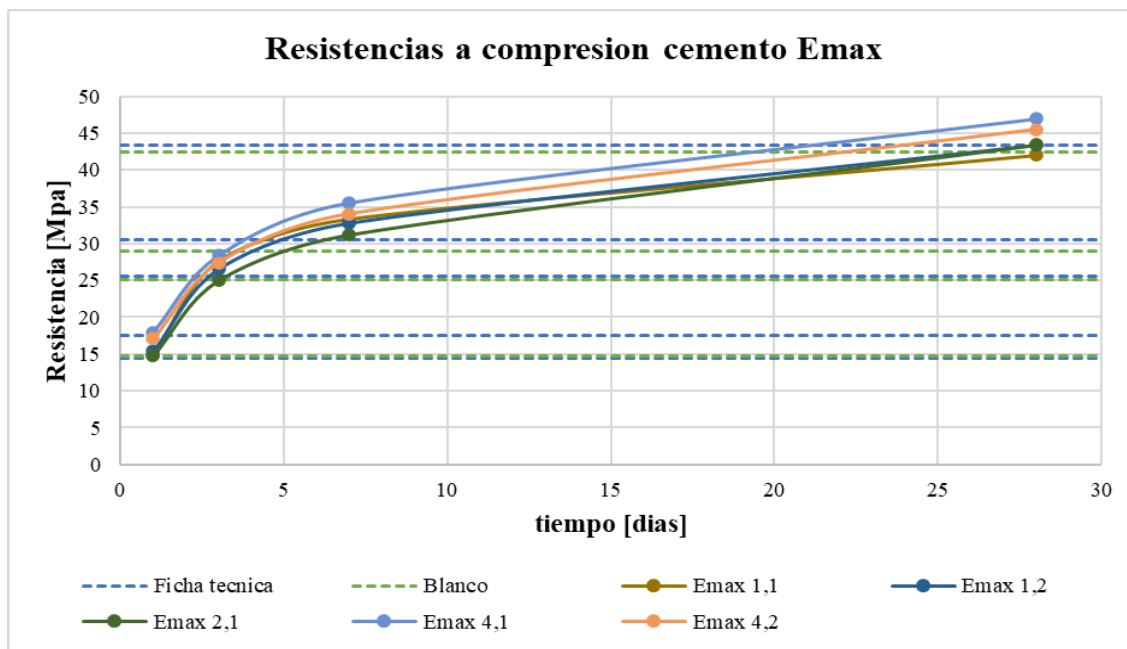


EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN
PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice D. Pruebas de resistencia de cementos Emax.

Figura 16

Resistencias a compresión cemento estructural max (Emax)



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 17

Resistencias a compresión ensayo #1 cemento estructural max (Emax)

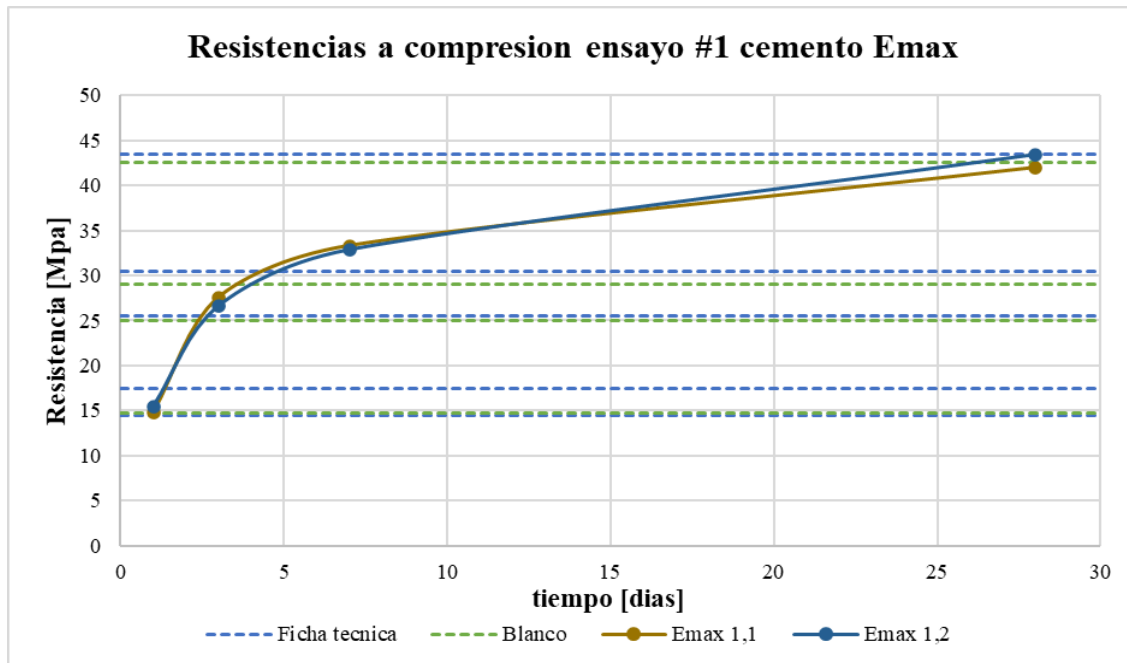
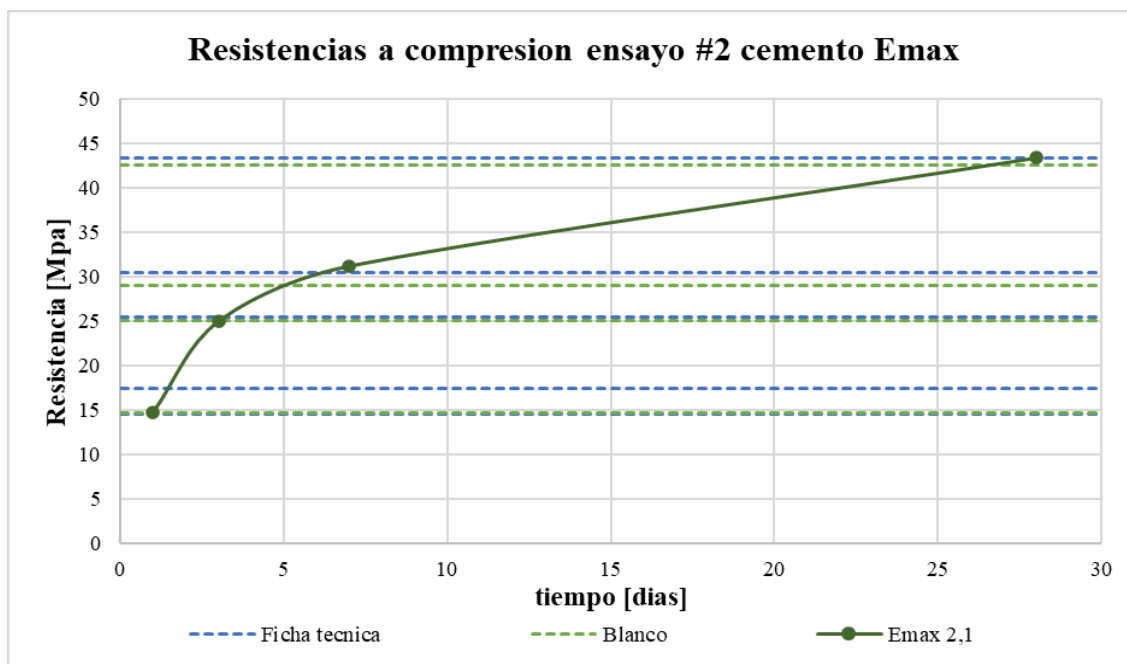


Figura 18

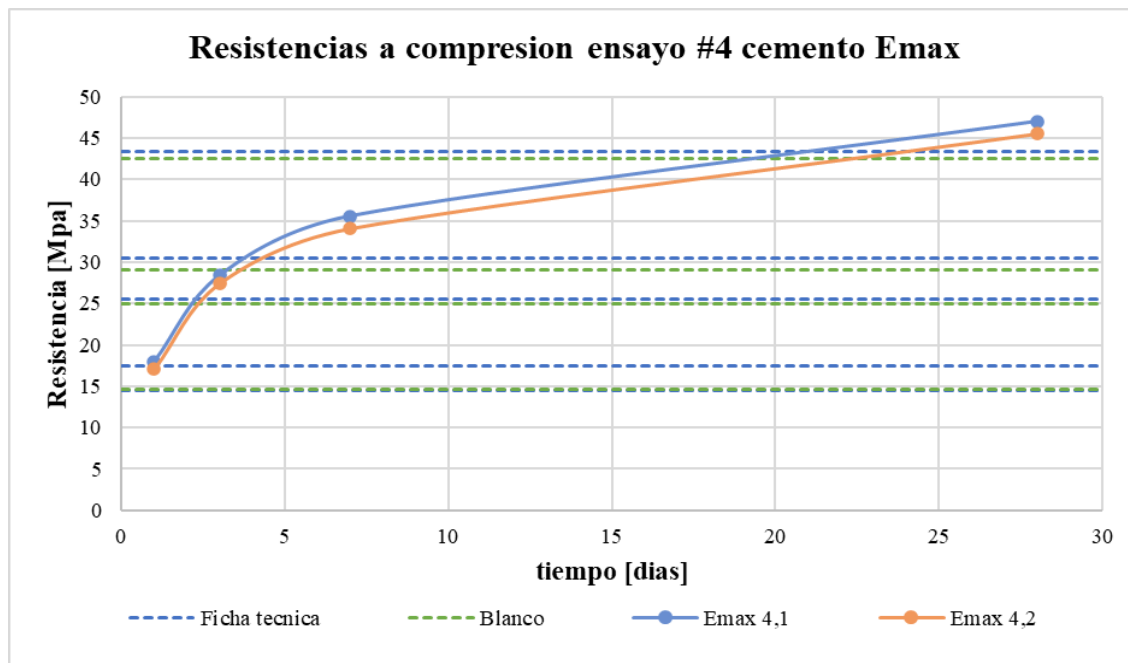
Resistencias a compresión ensayo #2 cemento estructural max (Emax)



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Figura 19

Resistencias a compresión ensayo #4 cemento estructural max (Emax)



EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice E. Pruebas de resistencia mecánica

La resistencia mecánica del cemento endurecido se indica en todas las especificaciones del cemento, esta resistencia de los morteros depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de las adiciones. Existen diversas formas de prueba de resistencia: tensión directa, compresión directa y flexión (Neville, 2013).

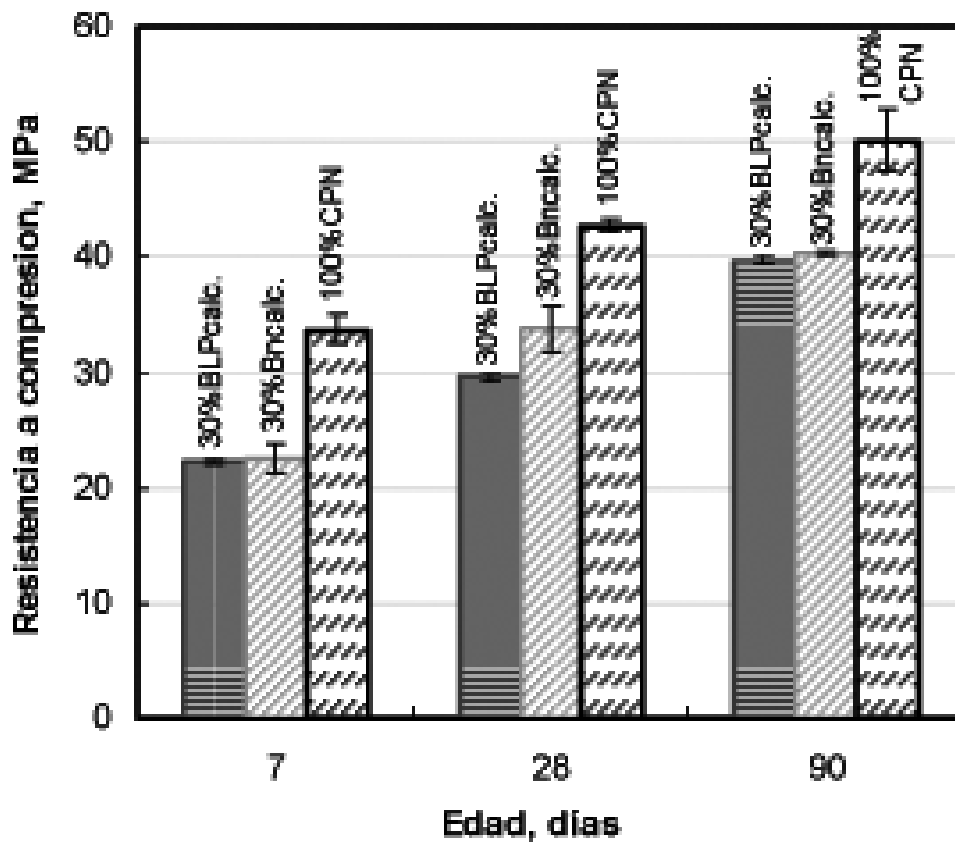
La prueba de resistencia a la compresión en los morteros describe que los morteros son probados como cubos de equivalentes de 40 mm, estos morteros son preparados con arena natural en una relación arena/cemento de 3 y una relación agua/cemento de 0,5. Estos morteros se mezclan en una revolvedora de paletas y se compactan en una mesa vibratoria y se desmoldan después de 24 horas en una atmosfera húmeda, de ahí en adelante para ser curados en agua a 20°C (Neville, 2013). para luego, ser sometidas a compresión por una prensa hidráulica hasta su fallo en cada una de las edades (1, 3, 7 y 28 días).

EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA DE USO DE LUTITAS EN PREPARACIONES DE CEMENTO

Apéndice F. Análisis de resistencia de bentonitas calcinadas

Figura 20

Resistencia a la compresión de bentonitas calcinadas



Nota. Adaptado de Tironi *et al.* (2012).