

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de la huella de carbono en la producción industrial de cemento
con adición de Arcillas Calcinadas

Trabajo de Graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado
por María Regina Méndez Castillo para optar al grado académico de
Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de la huella de carbono en la producción industrial de cemento
con adición de Arcillas Calcinadas

Trabajo de Graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado
por María Regina Méndez Castillo para optar al grado académico de
Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

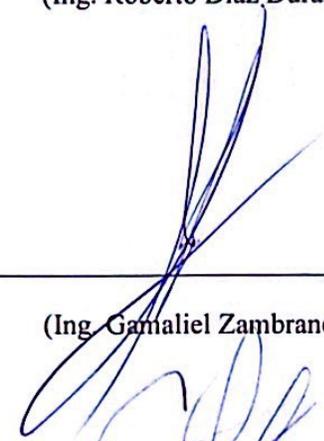
2021

Vo.Bo. :

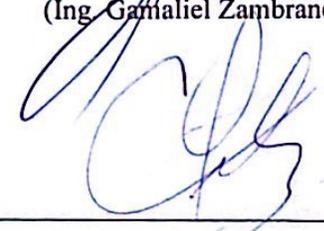
(f) 

(Ing. Roberto Díaz Durán)

Tribunal Examinador:

(f) 

(Ing. Gamaliel Zambrano)

(f) 

(Ing. Carmen Ortiz)

(f) 

(Ing. Roberto Díaz Durán)

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de Diciembre del 2021

ÍNDICE

Lista de cuadros	iv
Lista de figuras.....	vi
Agradecimientos a	viii
Resumen.....	x
I. Introducción	1
II. Objetivos.....	3
III. Justificación	4
IV. Marco teórico	6
V. Antecedentes	30
VI. Metodología	33
VII. Resultados	39
VIII. Análisis de resultados	44
IX. Conclusiones.....	49
X. Recomendaciones	50
XII. Bibliografía	51
XIII. Anexos	55

Lista de cuadros

Cuadro 1. Coeficientes de emisión de CO ₂ e de la generación de energía por tipo de combustible.....	25
Cuadro 2. Coeficiente de emisión de CO ₂ e de la generación de energía eléctrica nacional guatemalteca	26
Cuadro 3. Resultados de porcentaje de agua combinada.....	39
Cuadro 4. Resultados de resistencia a la compresión	39
Cuadro 5. Matriz de Leopold del proceso de producción de cemento a nivel industrial..	40
Cuadro 6. Resultados de emisión de Dióxido de Carbono por la producción de cemento Portland ordinario vs. cemento adicionado con arcilla calcinada.....	42
Cuadro 7. Resultado de la reducción en la huella de Carbono por la producción industrial de cemento con la adición de arcilla calcinada.....	43
Cuadro 8. Pesos inicial y final por arcilla para el análisis de agua combinada	55
Cuadro 9. Datos del proceso de producción industrial de cemento Portland ordinario en el año 2019.....	56
Cuadro 10. Porcentaje de agua combinada de arcilla calcinada por triplicado	63
Cuadro 11. Desviación Estándar de los triplicados de porcentaje de agua combinada de arcilla calcinada	63
Cuadro 12. Cantidad neta y composición de harina cruda para la producción de cemento Portland ordinario	63
Cuadro 13. Composición del cemento adicionado con arcilla calcinada.....	63
Cuadro 14. Cantidad neta y composición de harina cruda para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada	64
Cuadro 15. Composición de componentes utilizados como explosivo para la extracción de materias primas en la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada.....	64

Cuadro 16. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de calcinación para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada.....	64
Cuadro 17. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de molienda de arcilla para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada.....	64
Cuadro 18. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de secado de arcilla para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada.....	64
Cuadro 19. Identificación de código de color para diagrama de bloques.....	65
Cuadro 20. Caracterización de arcillas calcinadas por fluorescencia de rayos X.....	67
Cuadro 21. Caracterización de arcillas calcinadas por difracción de rayos X.....	67
Cuadro 22. Datos técnicos de equipo para resistencia a la compresión ToniZEM.....	67
Cuadro 23. Datos técnicos de equipo para perla fundida Claisse M4	67
Cuadro 24. Datos técnicos de equipo para fluorescencia de rayos X	68
Cuadro 25. Datos Técnicos de equipo para difracción de rayos X Panalytical	68

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de fabricación de cemento industrial	7
Figura 2. Evolución del calor de hidratación liberado en función del tiempo	19
Figura 3. Correlación entre el porcentaje de agua combinada y la resistencia a la compresión de un material	20
Figura 4. Balance de masa con frontera.....	27
Figura 5. Balance de masa y energía	28
Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Portland ordinario	65
Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento adicionado con arcilla calcinada	66
Figura 8. Resistencia a la compresión ToniZEM.....	68
Figura 9. Equipo para perlas fundidas Claisse M4	69
Figura 10. Difracción de rayos X Epyrean PANalytical	70
Figura 11. Casete con muestra para análisis de difracción de rayos X (DRX).....	71
Figura 12. Fluorescencia de rayos X ARL OPTIMIX.....	71
Figura 13. Correlación entre el porcentaje de Caolinita y la resistencia a la compresión de un material	72
Figura 14. Arcillas evaluadas por medio de la técnica de agua combinada	72
Figura 15. Caracterización de arcillas por fluorescencia de rayos X.....	73
Figura 16. Creación del medio básico para la técnica de agua combinada.....	74
Figura 17. Mezcla para técnica de agua combinada, en frascos para su solidificación	74
Figura 18. Mezcla de arcilla solidificada desenfrascada, lista para cortar en pastillas.....	75
Figura 19. Otras mezclas de arcilla solidificadas, listas para cortar	75

Figura 20. Ejemplo de mezclas que no solidificaron, al presentar una separación de fases líquida-sólida.....	76
Figura 21. Pastillas cortadas horizontalmente con un grosor aproximado de 1 centímetro en triplicado	77
Figura 22. Mufla utiliza para elevar la temperatura de las pastillas a 400°C	77
Figura 23. Horno utilizado para llevar las pastillas a una temperatura de 110°C.....	78
Figura 24. Balanza Analítica empleada para pesar las pastillas para la técnica de agua combinada.....	78
Figura 25. Apariencia de la pastilla luego de pasar por el proceso de calentamiento para la técnica de agua combinada	79
Figura 26. Morteros de cemento Portland ordinario.....	79
Figura 27. Morteros de cemento adicionado con arcilla calcinada.....	80

Agradecimientos a

- Dios** Por ser padre y guía espiritual, que siempre está conmigo para permitirme seguir adelante y alcanzar mis metas.
- Mi madre** Claudia Lorena Castillo Rivas, por ser mi ejemplo a seguir e inspiración, por su amor, paciencia, esfuerzo y dedicación para darme la oportunidad de estudiar y forjar mi educación.
- Mi padre** José Alejandro Méndez Barillas, por su amor incondicional.
- Mi hermana** María Paula Méndez Castillo, por todo el amor, cariño y apoyo brindado, y por ser mi fuente de inspiración.
- Mis abuelos** Jaime Horacio Castillo Mont, Julia Yolanda Rivas Salazar y Guadalupe Barillas Moreno, por todo su amor, cariño, y creencia en mis capacidades.
- Mi novio** Martín Andrés Velásquez Bonilla, por su amor y apoyo en todo momento, y por hacer de cada momento de lucha, uno agradable.
- Mi asesor** Ing. Roberto Díaz Durán, por su orientación y asesoría en el presente trabajo de graduación.
- Colaboradores** Lic. Luis Alberto Velásquez Coronado y Ing. Juan Francisco Chajón Villatoro, por su colaboración para la revisión del presente trabajo de graduación.

**Universidad del Valle
de Guatemala**

Por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional y tener el privilegio de recibir educación de excelencia.

**Cementos Progreso
S.A.**

Por darme los recursos, medios e instalaciones para desarrollarme como profesional, en el área de investigación y control de calidad.

Resumen

El presente trabajo de graduación pretende analizar la huella de carbono de la producción industrial de Cemento Adicionado con Arcilla Calcinada, y compararlo con la de un Cemento Portland Ordinario, para evaluar el impacto ambiental. Dentro de 5 muestras de arcillas de la región guatemalteca, caracterizadas y analizadas, se seleccionó la de correlativo número 4, para realizar el estudio. Esto se debe a que presentó el mayor porcentaje de agua combinada, siendo este de $9.4971\% \pm 0.0048$ y una Resistencia a la Compresión de 6,460 psi a 28 días de edad, lo cual cumple con la norma NTG 41095. Para evaluar la huella de carbono, se realizó el análisis de Ciclo de Vida, el cual fue de tipo simplificado, de cuna a puerta, y se delimitó desde la etapa de la extracción de materia prima, hasta el proceso de producción. De acuerdo con el análisis realizado, se determinó que la implementación de Arcilla Calcinada como Material Cementante Suplementario (SCM), reduce la huella de carbono en un 40.11%.

I. Introducción

Como componente clave del hormigón, el cemento es fundamental para la construcción. Es uno de los productos más consumidos por el ser humano a nivel global, debido a su alta resistencia a la compresión. Sin embargo, también es uno de los contribuyentes de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), responsables del cambio climático. El desarrollo de nuevas tecnologías para descarbonatar el cemento posiblemente ni sea escalable en años. Por lo que se buscan nuevas estrategias reducir su impacto. Una de las estrategias, es la adición de Materiales Cementantes Suplementarios (SCM), para la formulación de cementos de bajo carbono. Algunos de estos materiales son: puzolana, escoria de alto horno, ceniza volante, arcilla, humo de sílice, entre otros. No obstante, en este estudio se hace énfasis en la reducción de la huella de carbono, con la adición de arcilla en su forma calcinada, como SCM.

Actualmente, se habla de un nuevo producto llamado LC³-50, conocido como cemento de bajo carbono. Se encuentra constituido por arcilla calcinada y caliza, lo cual provee varias ventajas, entre ellas, la alta resistencia a la compresión, y, por ende, la reducción del agrietamiento de morteros, al poseer una microestructura más densa. Además, incrementa la resistencia a cloruros y sulfatos. Este producto, logra reducir 50% del factor *Clinker* y hasta 40% de las emisiones de CO₂ a nivel industrial, lo cual podría ser una alternativa factible (*Scrivener et al, 2017*). El presente trabajo de graduación busca determinar el impacto ambiental de la implementación de arcilla calcinada como adición en el cemento, por medio de la estimación de la huella de carbono generada a nivel industrial durante el proceso de producción. El propósito de cuantificar la huella de carbono es comparar el beneficio ambiental que produciría incorporar este material suplementario en el cemento,

con el proceso convencional de cemento, conocido como cemento portland ordinario. Para ello se implementarían las proporciones, que conforman el cemento LC³-50.

II. Objetivos

A. General

1. Estimación de la huella de carbono de la producción a nivel industrial de cemento portland ordinario y cemento adicionado con arcilla calcinada, para evaluar su incidencia en el impacto ambiental.

B. Específicos

1. Determinar la reactividad hidráulica de diferentes arcillas calcinadas, por medio del método experimental de “Agua Combinada” a nivel laboratorio, para seleccionar la arcilla de mayor rendimiento.
2. Realizar un análisis de Ciclo de Vida de la producción de cemento con adición de la arcilla seleccionada, para determinar su huella de carbono.
3. Comparar la huella de carbono estimada del proceso de producción de cemento portland ordinario y cemento adicionado con la arcilla calcinada seleccionada.

III. Justificación

Dada la creciente contaminación ambiental, las industrias buscan procesos productivos amigables con el medio ambiente. Actualmente, el Programa para el medio ambiente de la Organización de las Naciones Unidas, registra una concentración aproximada de 416 ppm de CO₂ en el aire para el año 2020 (UNEP, 2020). Esta concentración se ha elevado con el tiempo, puesto a que antes del año 2000, la concentración más alta obtenida fue de 3 ppm. Dicha emisión destruye de la capa de ozono, y por lo tanto, aumenta el calentamiento global de la tierra, lo cual incrementa las sequías, la acidificación de aguas que daña la naturaleza, entre otras consecuencias severas.

La industria cementera es uno de los emisores de CO₂, responsable del 8% de las emisiones globales, proveniente de la descarbonatación de la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato tricálcico (CaCO₃). El procedimiento libera este gas de efecto invernadero, para dar lugar a la formación de *Clinker*. Asimismo, contaminantes de combustión son liberados por el horno, durante la calcinación. El cemento es el componente clave del hormigón, ubicándolo como el material de construcción más utilizado alrededor del mundo, en especial el cemento Portland. Sin embargo, este conglomerante hidráulico se encuentra compuesto en su mayoría de *Clinker* y una porción de yeso.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron creados para garantizar el bienestar de las personas y del planeta, por medio de un equilibrio sostenible del ámbito social, económico y ambiental. Cada objetivo establece metas para su alcance alrededor del año 2030. El presente trabajo de graduación se encuentra relacionado con dos ODS. El primero lleva nombre de "Ciudades y Comunidades Sostenibles" y es el número once. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), "En el 2050, [la cifra de habitantes en el mundo] habrá aumentado a 6,500 millones", lo cual conforma un incremento dos tercios de la humanidad actual (PNUD, 2021). Por lo tanto, "no es posible lograr un desarrollo sostenible sin transformar radicalmente la forma en la que construimos y administramos lo espacios urbanos" (PNUD, 2021). La "Acción por el Clima" es el ODS

número trece, el cual también se encuentra ligado al trabajo desarrollado. Según la ONU, “Las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando y hoy son un 50% superior al nivel de 1990”, lo cual potencializa el cambio climático y sus efectos adversos (PNUD,2021).

Por ende, es necesario contribuir a la búsqueda de materiales de construcción de menor huella de carbono y hace más eficiente la forma en la que se construyen nuevos proyectos, como la producción de cementos de bajo carbono, haciendo énfasis en la reducción del factor *Clinker* del cemento. Esto implica adiciones que sustituyan cierto porcentaje y mantengan los estándares de calidad, especialmente las propiedades fisicoquímicas del material. Con el paso de los años, se han creado cementos adicionados, utilizando materiales cementantes suplementarios (SCMs), tales como: caliza, ceniza volante (Flyash), escoria de alto horno, puzolana, entre otros. Asimismo, se ha iniciado a trabajar con arcilla calcinada y caliza, que logra sustituir 50% del contenido del *Clinker* original. Sabiendo que este material es capaz de disminuir considerablemente la cantidad de *Clinker* en la formulación y considerando el consumo extra de energía para la calcinación, es necesario cuantificar el impacto ambiental de este tipo de cemento adicionado. Esto, por medio del cálculo de la huella de carbono, lo cual permitirá asegurar que la alternativa reduce significativamente las emisiones del proceso de producción de cemento.

IV. Marco teórico

A. Cemento

Se reconoce como conglomerante hidráulico o cemento, al material artificial inorgánico, finamente molido, que al reaccionar con el agua forma una pasta que fragua y endurece con el tiempo. Esto genera un producto con alta resistencia a la compresión y mecánicamente estable. Dichas propiedades surgen de la formación de silicatos cálcicos y aluminatos hidratados, dada la reacción agua-cemento. Este material se ha convertido en un componente básico para la construcción de infraestructuras.

Para poder ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, se han creado varios tipos, que se adicionan con el fin de adecuarse a la obra que se desea realizar. El cemento portland y sus derivados son los más utilizados en la industria. Algunos de ellos se mencionan a continuación:

Tipo 1: Cemento Portland ordinario, a base de *Clinker* y yeso. Se aplica en varias obras ingenieriles.

Tipo 2: Cemento modificado, con resistencia a sulfatos moderada, para evitar corrosión. Se utiliza para obras de alcantarillados, canales, tubos y zonas industriales, en donde existe contacto constante con agua.

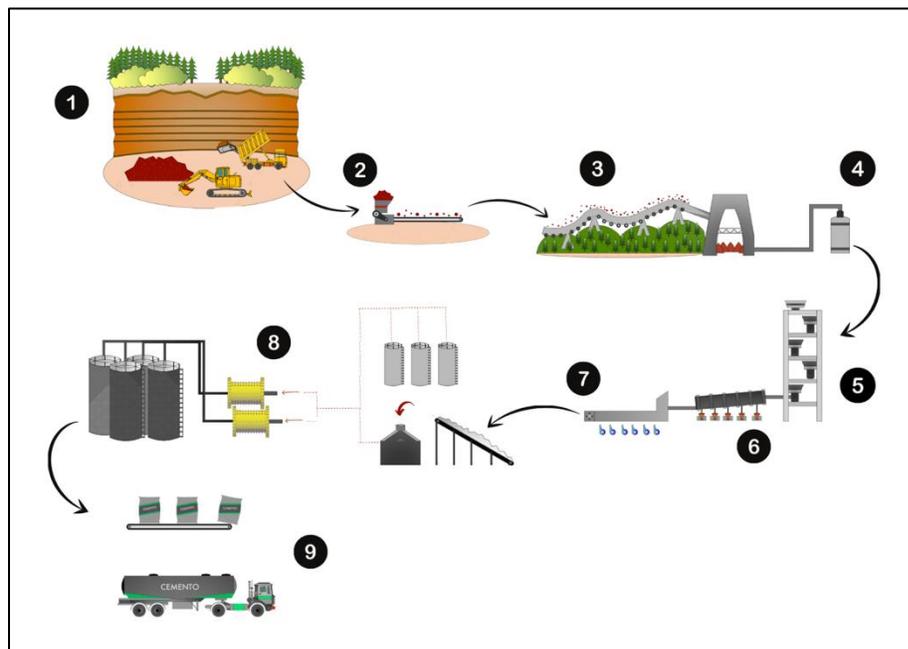
Tipo 3: Cemento de alta resistencia inicial, el cual se recomienda para proyectos en los que se requiera una resistencia acelerada.

Tipo 4: Cemento de bajo calor de hidratación, el cual gana resistencia lentamente. Se emplea para la fabricación de túneles, presas, entre otros.

Tipo 5: Cemento altamente resistente a sulfatos, para evitar corrosión. Comúnmente utilizado para obras marinas y estructurales hidráulicas. Debido a que se encuentran en contacto con sales, se reduce la proporción de aluminato tricálcico, al ser susceptible.

1. Proceso de fabricación del cemento Portland ordinario

Figura 1. Proceso de fabricación de cemento industrial



Fuente: Elaboración propia

Tomando como base, la **Figura no. 1**, el proceso de fabricación del cemento conlleva las siguientes etapas, mencionadas a continuación. Da inicio con la extracción (**etapa 1**) y trituración (**etapa 2**) de la materia de prima desde la cantera, principalmente calizas y arcillas, para ser transportadas a la planta. Para ello, se emplean voladuras controladas y retroexcavadoras. Una voladura es la fragmentación de una superficie, ya sea suelo, roca o estructura, que se desprende del sitio en el que se encuentra, mediante el uso

de explosivos. La maquinaria utilizada para poder excavar y recoger el material fragmentado, lleva el nombre de retroexcavadora.

Una banda transportadora pasa la materia por un analizador de rayos gamma (PGNAA), equipo en línea que comunica el porcentaje de óxidos al sistema. Dependiendo del cumplimiento de la siguiente relación de desviación poblacional de óxidos, la acepta o descarta, y continua a la fase de prehomogenización (**etapa 3**).

Ecuación 1. Relación de la desviación poblacional de óxidos

$$\sigma_m \leq \sigma_N \sqrt{\frac{N}{m}}$$

(DeGroot, M. & Schervish, M., 2014)

Luego el material es almacenado y dosificado, con el fin de corregir caliza y minerales de hierro. Esto da paso a la molienda (**etapa 4**), en donde se pulveriza el material, hasta generar una especie de harina y pasar al silo de homogenización. Esta harina es la que se conoce como harina cruda y debe precalentarse por medio de una torre de ciclones (**etapa 5**). Para la fabricación del *Clinker*, la harina cruda se lleva a altas temperaturas, hasta su calcinación (**etapa 6**), lo cual la transforma en una piedra oscura cristalizada. Una vez culminado el proceso de *clinkerización*, se enfría rápidamente por medio de un enfriador (**etapa 7**), que inyecta aire frío para reducir su temperatura de 1450°C a 100°C.

Una vez frío, el *Clinker* pasa por la premolienda, para reducir el tamaño de partícula, utilizando un molino de rodillos. Una faja introduce el *Clinker* listo dentro del molino de bolas (**etapa 8**), otra faja introduce cierta proporción de yeso y también se introducen aditivos, que pueden variar de acuerdo al tipo de cemento fabricado. La

molienda culmina, una vez alcanzada la fineza esperada. Posteriormente, el producto es envasado o empacado a granel (**etapa 9**), para su despacho.

2. Equipos industriales involucrados en el proceso de producción de cemento

a. Trituradora de rodillos

Es una máquina que somete el material introducido, a un esfuerzo radial de compresión. Se encuentra compuesto por dos cilindros o rodillos en posición horizontal en ejes paralelos. Estos giran en sentido opuesto y rotan a la misma velocidad, triturando en forma de V. Esta trituradora se encarga de desmenuzar la materia, hasta que este sea capaz de pasar por el espacio que separa ambos cilindros. El tamaño de trituración es medio y fino, dependiendo de la dureza de mismo, que, en el caso del proceso del cemento, reduce la granulometría para poder hacer más eficiente la molienda. Uno de los cilindros puede ser regulable, en caso sea necesario graduar la abertura en forma de V. Se emplea para reducir el tamaño de la materia prima (Ramos y Vega, 2015).

b. Prehomogenizadora

Emplea la técnica de análisis gamma por activación rápida de neutrones, para clasificar las materias primas provenientes de cantera, de acuerdo a su composición química. Asimismo, es capaz de detecta si se encuentra dentro de los estándares de composición adecuados. De lo contrario, realiza ajustes por medio de un factor de corrección. El equipo se encarga de apilar el material y luego dosificar la cantidad adecuada al molino (Sanjuán y Yepes, 2018).

c. Molino de rodillos vertical

Equipo utilizado para la molienda de piedra caliza, *Clinker*, escoria, yeso, entre otras materias primas. Un grosor de hasta 30 mm puede ser reducido a grano muy fino. Cuenta

con un sistema de 6 rodillos moledores que ruedan sobre una vía de molienda giratorio sobre el eje. Se aplican fuerzas a presión necesarias por medio de una palanca oscilante y un sistema de sujeción hidroneumático. Luego, la harina cruda pasa por una cámara separadora que se encarga de clasificar arenas gruesas y el producto terminado. Es importante mencionar que tiene bajas tasas de desgaste. Es considerado más eficiente que un molino de bolas, puesto a que, a finales de los años 90, se han introducido en molienda de cemento, donde se requieren de productos aún más finos (Fahrland, 2013).

d. Torre de ciclones

Se encuentra conformada por ciclones en serie, conectados entre sí. La caída de presión entre ciclón es baja y poco requerimiento de mantenimiento, dado que está diseñado con tecnología que lo permite. Este equipo se encarga de precalentar la materia, previo a su ingreso al horno. Se desea lograr un intercambio de calor óptimo, para aumentar la temperatura de la harina cruda hasta 1000°C. Conforme el material, va descendiendo en la torre, pasa por los ciclones, por lo que cada uno de ellos aumenta la temperatura consecutivamente. En contra corriente, el aire caliente proveniente del horno, asciende la torre para hacer más eficiente el precalentamiento. Vale la pena recalcar que, para su funcionamiento, se necesita un alto consumo de energético (FICEM, 2017).

e. Horno rotativo

Es una cámara cilíndrica que rota sobre su propio eje (30 a 120 revoluciones por hora) y se encuentra inclinada para permitir que el material cocido dentro del mismo, pueda descender por gravedad para continuar en la línea del proceso productivo. Al manejar temperaturas elevadas consideradas de alto horno, se encuentra revestido por ladrillos refractarios, resistentes a la corrosión de gases generados. Este trabaja con energía eléctrica. Sin embargo, también consume energía térmica, generada por los quemadores de combustible. La calidad y características de la flama, dependen del por calorífico del tipo

de combustible. En este trabajo, se toma en cuenta un horno rotatorio que quema a 2000°C, PetCoque, Búnker y Sólidos AF (en su mayoría considerado polietileno de alta densidad). Asimismo, se utiliza para la calcinación de Harina Cruda a 1450°C, para su conversión a *Clinker*.

f. Enfriador de Parilla (Fuller)

Se conoce como enfriador Fuller, al ser desarrollado en Fuller, Pennsylvania, Estados Unidos. Este fue creado para ser instalado a la salida de hornos rotatorios, especialmente en fábricas de cemento. Este permite el rápido enfriamiento inicial de *Clinker*, lo cual es importante para la formación de silicato tricálcico. En este tipo de enfriadores, el rendimiento térmico se puede llevar hasta 75%, llevando el producto a una temperatura de 65°C, lo cual permite que sea molido inmediatamente al salir. Para ello, consta de una estructura cerrada, en la cual el aire es inyectado a corriente transversal, mediante la insuflación de aire del ambiente, a través de la capa de *Clinker*. En este trabajo, se toma en cuenta un Enfriador de Parilla, el cual logra disminuir la temperatura del *Clinker* a la salida del horno, de 1450°C hasta 100°C (Niels, 2012).

g. Molino de bolas

Es una herramienta cilíndrica que se ha usado en la industria para la molienda de cemento y reducir el tamaño de partícula del mismo, y así poder incrementar su fineza. Su principio de funcionamiento es el impacto y la fricción. El molino gira alrededor de un eje horizontal. En su interior, contiene bolas de acero cromado, las cuales deben ocupar entre un 30% y 55% del volumen interior. Estas, con el tiempo se desgastan, por lo que deben irse compensando con nuevas o con otras de diferentes tamaños. La pared superficial debe estar recubierta de un material resistente a la abrasión, de carburo de silicio o acero de magnesio. En la actualidad, pueden tolerarse temperaturas hasta de 200°C en la entrada del molino (Barrios, 2015).

h. Ensacadora

Es una máquina rotatoria de 8 bocas, que se encarga de llenar sacos con el producto con un sistema de turbinas verticales. El equipo cuenta con un pesaje simultáneo, por lo que al alcanzar un peso de 42.5 kg, el saco es expulsado para que continúe el proceso. Luego, una paletizadora se encarga de apilar en tarimas los sacos para su almacenamiento. Se cuenta con una capacidad de producción de 2400 sacos por hora (Rivas, 2017).

3. Materias Primas

Todos los elementos que se transforman para la elaboración de un producto se conocen como Materias Primas. Su característica principal es que se encuentran en su estado natural, por lo que no han sido sometidas previamente, en actividades industriales por parte del ser humano. Los componentes principales del cemento son yeso y *Clinker*, este último está echo básicamente de Piedra Caliza y Esquisto. Según el tipo de cemento, también es necesario adicionar materiales cementantes suplementarios. Cada una de estas materias primas, se encuentra desarrollada a continuación.

a. Piedra Caliza

La roca sedimentaria, también conocida como material calcáreo, es la materia que proporciona mayoritariamente el Carbonato de Calcio (CaCO_3), para el proceso de Clinkerización. También consta de trazas de Magnesita (MgCO_3), Hematita (Fe_2O_3), Cuarzo (SiO_2), entre otros minerales. Económicamente hablando, es un material viable, dada su abundancia y accesibilidad. Esta es extraída de cantera con el uso de explosivos. No solo se utiliza para la producción de *Clinker*, sino también como Material Cementante Suplementario, sin ser calcinada (Chavarría, 2004).

b. Esquisto

Se conoce como roca metamórfica, que proporciona los Aluminosilicatos en la Clinkerización. Estos provienen de los minerales presentes, los cuales son: Moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), Cuarzo (SiO_2), Clorita ($(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3(OH)_6$), Biotita ($K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)_2$), siendo estos los predominantes (Fernández y Marcías, 1984).

c. Yeso

Este mineral está compuesto de Sulfato de Calcio Hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), el cual se encuentra en yacimientos de agua de mar, donde hay presencia de rocas sedimentarias enriquecidas con sales marinas, formadas cuando el agua de mar se satura y se evapora. Su función es de vital importancia en el proceso de fabricación de cemento, debido a que regula su hidratación. Al ser un conglomerante hidráulico, reacciona, endureciéndose al entrar en contacto con agua. Es por ello que, la adición de yeso, permite retardar el tiempo de fraguado, para que pueda ser trabajado durante la aplicación en obras, y así, cuando sea mezclado con agua, pueda ser moldeado y colocado adecuadamente (Álvarez, 2017).

El término fraguado hace referencia al momento en el que el cemento se endurece y pierde su plasticidad (Álvarez, 2017).

4. Materiales Cementantes Suplementarios

Los materiales inorgánicos que presentan propiedades cementantes como lo es la reactividad hidráulica, son reconocidos como Materiales Cementantes Suplementarios (SCM). Estos pueden ser adicionados por varias razones en una mezcla de cemento. Una de las razones es la necesidad de producir un cemento de bajo carbono. Asimismo, la

producción de un tipo de cemento que requiera dicha adición por su función, como en el caso del cemento de uso general, el cual emplea puzolana.

Estos pueden ser divididos en materiales naturales y artificiales. Las puzolanas o sedimentos volcánicos, pertenecen al tipo natural, mientras que las cenizas, escorias, humo de sílice, etc., pertenecen al tipo artificial, por ser subproductos de reacciones, como residuos de combustión.

a. Puzolana

Esta roca volcánica, también conocida como Toba, contiene minerales silíceos y aluminosilíceos. Es una sustancia capaz de reaccionar con óxido de calcio para formar compuestos cementantes. Se puede encontrar en depósitos de arena procedente de erupciones volcánicas. Su adición es de beneficio al disminuir la relación agua-cemento, al liberar menor calor de hidratación, etc. (Papadikas y Tsimas, 2002).

b. Arcillas

Se clasifican como rocas sedimentarias o grupo de aluminosilicatos hidratados. El color que presenten, depende de las impurezas presentes (colores rojizos, naranjas, rosados, etc.). Posteriormente, este trabajo profundiza en su utilización como SCM (Alastuey, 1991).

c. Ceniza volante (Flyash)

Este material proviene de la combustión de carbón pulverizado, por lo que es un residuo sólido fino de 50 micras. Estas pueden ser silíceas o calcáreas, según su

procedencia. Según una agrupación de fabricantes de cemento de España, las cenizas volantes, producen un ahorro económico y energético considerable (Abascal, 2008).

d. Escoria de alto horno

Es una combinación un subproducto de la fundición de hierro y cenizas de azufre proveniente de Coque. Está compuesto de una variedad de óxidos, entre ellos sílice, aluminio, hierro, magnesio y calcio. Se conoce por ser reforzar las propiedades del cemento, al mejorar la resistencia a la compresión, otorgar alta permeabilidad al agua y reducir la relación agua-cemento requerida (Cabrera-Madrid et al, 2016).

e. Humo de Sílice

Es un subproducto que se obtiene en los condensados de la fabricación de aleaciones metálicas de silicio y ferrosilicio. Según el Trabajo Fin de Máster de Lurdes Morejón, "comparado con un mortero de cemento convencional... las adiciones en el cemento, aportan un 5% de incremento en la resistencia a la compresión a 28 días de edad" (Morejón, 2015).

B. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el esfuerzo máximo soportado por un material al ser sometido a carga de aplastamiento. Esta característica física se emplea principalmente para determinar si una mezcla de mortero o concreto cumple con los requerimientos de resistencia especificada, para fines de control de calidad. En el caso de requerir el análisis de cemento, es necesaria la creación de cubos hechos de agua, arena y cemento, curados a diferentes edades (1, 3, 7, 28, 56 días), para luego poder pasar por la máquina encargada de generar carga de aplastamiento sobre dichos cubos. El término curado, hace referencia al proceso por el cual el cemento madura y se endurece con el tiempo. La carga se presenta

en Libras por pulgada cuadrada (psi) o en Megapascales (MPa). Por otro lado, también se realiza este análisis para concreto, por lo que se debe de construir cilindros hechos de agregados, arena, cemento y agua. Estos suelen poseer una mayor resistencia que los morteros de cemento, por la combinación de agregados proporcionados. La decisión de que tipo de mortero analizar, depende del fin que se desee (Céspedes, 2003).

C. Arcilla Calcinada

Las partículas de las arcillas se encuentran compuestas de cientos de capas, que contienen estructuras de sílice y alúmina. Existe una variedad de arcillas naturales, ricas en minerales, que sirven como fuente primaria. Caolinita, Illita y Montmorillonita son tres de las arcillas más abundantes. Al calcinar dichos materiales, se obtiene una deshidroxilación, lo cual forma una nueva estructura, colapsada y desordenada, llamada metacaolin. Esto hace que el material alcance una mayor reactividad. El metacaolin es un aluminosilicato activado térmicamente, por medio de la calcinación. Dependiendo de la pureza de las arcillas, así es la calidad y reactividad que se obtiene, con una relación directamente proporcional. Por lo tanto, se realizan estudios geológicos para evaluar el potencial de los depósitos, previo a su extracción y utilización.

Altos costos energéticos se asocian al proceso, por la energía requerida para llevar a cabo el proceso de calcinación, dado que la temperatura de activación es elevada. Usualmente, se emplean temperaturas en un rango de 700 a 800°C. Sin embargo, la Caolinita se activa en un rango de 400-650°C. Para maximizar la cantidad y aumentar el grado de desorden del metacaolín, debe pasarse del límite superior. Es importante mencionar, que la temperatura óptima de activación depende también de la pureza del material. Muchas veces se encuentra mezclada con calcita, lo cual afecta su desempeño durante la calcinación (Alastuey, 1991).

Cabe resaltar que estos materiales mejoran tanto la resistencia mecánica de morteros y hormigones, como su durabilidad. Esto se debe a que favorecen la formación de productos de hidratación más estables, lo cual actúa en contra de la acción de mecanismos de degradación. Aumenta la presencia de poros, por lo que mejora la absorción capilar y la sorptividad.

Los geopolímeros han surgido como una nueva alternativa de adición para sustituir el uso del cemento Portland y mantener una baja emisión de CO₂. Al considerar un material como cementante suplementario, se espera que provea altos beneficios medioambientales reduciendo el factor *Clinker*. Para comparar su efectividad, es necesario realizar pruebas de reactividad hidráulica (Fernández-Jiménez et al, 2015).

1. Equipos industriales adicionales para el pretratamiento de la Arcilla Calcinada

Para que la Arcilla Calcinada pueda utilizarse como Material Cementante Suplementario, debe pasar por un proceso de pretratamiento para poder activar la arcilla. Esto involucra un proceso de secado, para eliminar en la humedad presente. Luego, debe molerse para hacer más eficiente el proceso de calcinación, puesto a que, aumenta la superficie de contacto de las partículas. Esto involucra el mismo molino de rodillos vertical utilizado para la molienda de materia prima, mencionado anteriormente. Por último, el mismo secador es emplea para poder llevar a cabo la calcinación, que constituye la Activación de la Arcilla.

a. Secador rotativo

Este equipo se incorpora en el proceso se encarga de reducir el contenido de agua en los materiales a 110°C. En el caso de la arcilla, se utiliza también para poder activarla a una temperatura de 850°C. Se encuentra conformado por un cilindro rotatorio con una

ligera inclinación. Una corriente caliente producida por una combustión, generada por la quema de combustibles. Esta corriente ingresa dentro del equipo para aumentar su temperatura y luego remover la humedad (Morejón-Mesa et al, 2020).

D. **Actividad puzolánica**

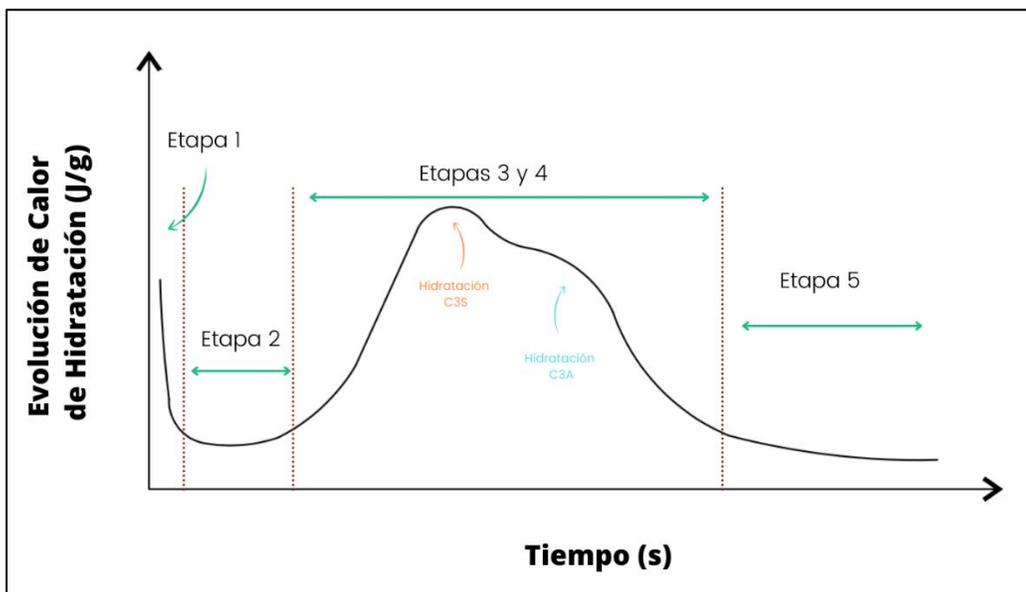
La actividad puzolánica es la reacción química ácido-base. En el cemento, esta reacción se da entre el hidróxido de calcio y el ácido silícico. Los materiales que presentan este comportamiento son aquellos con estructura amorfa, que se componen químicamente de SiO_2 , Al_2O_3 o Fe_2O_3 , los tres óxidos principales. Para esta evaluación se pueden utilizar varios métodos, entre ellos, calorimetría isotérmica y análisis de agua combinada (Alujas, 2016).

El primero se basa en la medición de liberación de calor por el proceso de hidratación, el cual es una reacción exotérmica. Aumentar la temperatura, acelera la reacción puzolánica, manteniendo el mismo conjunto de compuesto hidratos. El Calor de Hidratación es aquel liberado por la reacción que existe cuando el cemento entra en contacto con el agua (**ver Figura 2**). La cantidad de calor liberada es directamente proporcional a la composición química del cemento, entendiéndose como la cantidad de especies disponibles para formar C-S-H y C-A-S-H. Conforme su formación, se libera calor.

Asimismo, se consideran factores de temperatura de exposición y fineza del mismo. La liberación de calor es máxima en los tres primeros días. El calorímetro debe estabilizarse a la temperatura que se desee trabajar. El proceso consta de cinco etapas. Primero se da la hidrólisis inicial, que es hidratación. El periodo de incubación relacionado al tiempo de fraguado inicial sucede en la etapa dos. Luego, se observa una reacción acelerada de producto de hidratación, en la cual se determina el tiempo de fraguado final. En la etapa 4,

desacelera la formación de los productos y se establece la resistencia inicial del material. Por último, se mantiene una formación de productos estable y incrementa la resistencia a edades avanzadas. Como se observa en la Figura no. 1, los picos corresponden al aluminato tricálcico (C3A) y silicato tricálcico (C3S).

Figura 2. Evolución del calor de hidratación liberado en función del tiempo

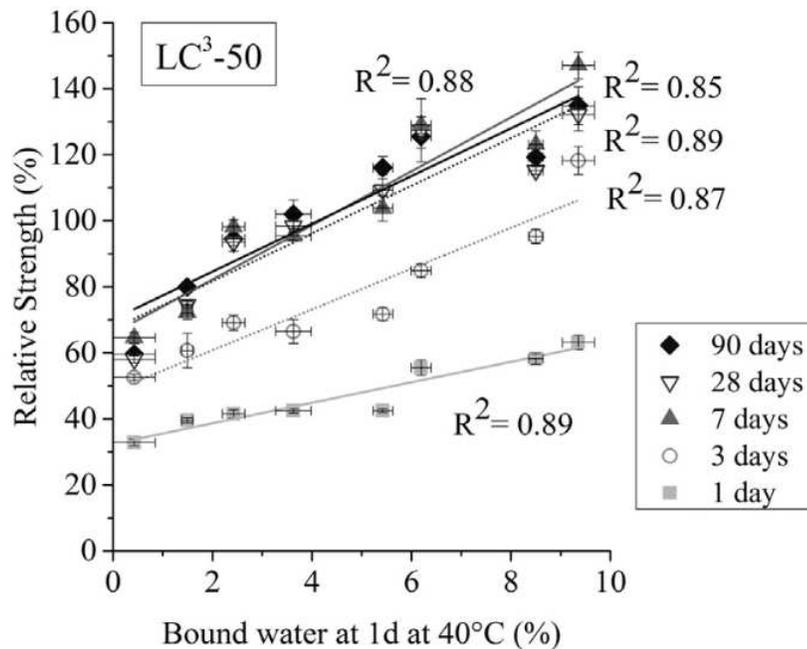


Fuente: *Elaboración propia*

En el año 2016, *Karen Scrivener*, experta en materiales cementantes, propuso una metodología alternativa, basada en termogravimetría, conocido como protocolo R³, por ser rápido, relevante y confiable. Dicho protocolo, involucra el análisis de agua combinada como método alternativo para conocer la reactividad hidráulica de un material, dada la correlación con la resistencia a la compresión. La ventaja principal, radica en que el requerimiento de equipo de laboratorio es mínimo. Se desea simular el ambiente químico de una mezcla hidráulica, ajustando los niveles de sulfato y álcalis, lo cual reproduce el pH de la solución y acelera la reacción puzolánica. Además, se conduce a la formación de

productos de reacción similares a las mezclas de cemento reales (fases de gel C-A-S-H, etringita, alúmina, óxido férrico y monosulfatos). A continuación, se observa la **Figura 3**, la que se puede observar que desde 1 día de edad, la resistencia muestra una correlación de 0.89.

Figura 3. Correlación entre el porcentaje de agua combinada y la resistencia a la compresión de un material



Fuente: Scrivener et al, ELSEVIER, 2016.

E. Análisis de ciclo de vida

El ciclo de vida de un producto es la secuencia cronológica que transcurre desde su lanzamiento en el mercado hasta su aparición. Este análisis es un método cuantitativo que permite evaluar el cargo ambiental asociado a un proceso, producto o actividad. Para ello deben evaluarse las entradas y salidas. El estudio de las entradas, incluye las materias primas y la energía requerida para su manufactura. Por otro lado, las salidas incluyen tanto el producto final y su potencial, como los impactos ambientales ocasionados por el mismo.

Entre los impactos se encuentra el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, acidificación, eutrofización, entre otros.

Hoy en día, es una herramienta clave para las empresas y el gobierno, al permitirles gestionar los riesgos que conllevan las distintas industrias al ejecutar sus procesos de producción o actividades diarias del ser humano. El estudio ha sido relevante en varios aspectos, uno de ellos es la promoción de la sustitución de los combustibles fósiles, para mitigar el cambio climático. Abordando el agotamiento de las existencias de dicha fuente, se promueve el uso de biocombustibles. Asimismo, con el agotamiento de los recursos naturales del planeta, la creciente contaminación y la pérdida de biodiversidad (Castillo, 2016).

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se puede abordar desde tres puntos de vista:

1. *ACV de cuna a puerta*. Se conoce como análisis intermedio, al considerar únicamente las entradas y salidas desde materias primas hasta su distribución. Es por ello que no se considera el impacto ambiental el uso dado por el consumidor final o su deposición luego de ser desechado.
2. *ACV de cuna a tumba*. Considera todas las entradas y salidas del producto, de acuerdo a su ciclo de vida completo, especificadas como se muestra a continuación.

Materias Primas: extracción, manufactura y transporte.

Fabricación: conversión de la materia prima en producto, por medio de diferentes actividades de transformación.

Distribución: transporte del producto hacia las manos del consumidor final.

Utilización: función dada al producto terminado.

Deposición: residuo que finalmente se deposita en el medio ambiente.

3. *ACV de cuna a cuna*. Se enfoca en la idea en que la vida del producto no llega a su fin con su deposición, sino induce a que el residuo se utilice para obtener nuevas materias primas para volver a reiniciar el ciclo de vida del producto.

La estructura común incluye la definición del alcance, los objetivos, el análisis de inventario de ciclo de vida y la evaluación del impacto. Cada parte debe ser interpretada para facilitar la comprensión del consumidor final. Es importante que el estudio provea una conclusiones y recomendaciones al respecto. Este tipo de análisis se puede aplicar en distintas áreas, como el ecodiseño, la estrategia empresarial, *marketing* ambiental, políticas públicas y declaraciones ambientales del producto (DAO). Esta herramienta permite calcular la huella de carbono y la huella hídrica que se implanta.

Para clasificar un Análisis de Ciclo de Vida, es fundamental conocer el nivel de detalle al que se trabaja. Es por ello, que se pueden diferencia tres tipos diferentes del mismo:

1. *ACV Conceptual*. estudio cualitativo que identifica los impactos potenciales, considerados significativos y críticos del proceso, según las etapas (eurofins, 2021).
2. *ACV Simplificado*. Empleo de datos cuantitativos limitados, para analizar un proceso de forma superficial, dado que, solo se centran las etapas más importantes y relevantes, para el impacto generado (eurofins, 2021).

3. ACV Completo. Análisis a nivel cuantitativo y cualitativo, tomando en cuenta a totalidad, las etapas del proceso y los datos disponibles (eurofins, 2021).

F. Matriz de Leopold

Para identificar el impacto ambiental inicial de un proceso, existe el método sistemático cualitativo, llamado Matriz de Leopold. Este fue diseñado para ser el precursor de posibles proyectos, dado a que evalúa de forma preliminar los impactos que puedan derivarse. El sistema se basa en una matriz, en donde la primera columna contiene las acciones del ser humano que pueden alterar con el ambiente y la primera fila posee los factores ambientales susceptibles. Luego de la primera columna, en una segunda y tercera columna deben de colocarse las componentes y subcomponentes que especifican el ámbito en el que afectan dicho factor ambiental, respectivamente. Esto se encuentra preestablecido por la Matriz de Leopold utilizada como base. Según esto, se pueden establecer las interacciones existentes según el proceso. Una línea diagonal debe dividir las casillas en donde los impactos de la acción sobre medio ambiente se consideren significativos. La calificación es de 1 a 10, siendo 1 bajo y 10 el más alto.

La casilla se encuentra dividida por una diagonal. En la división superior se coloca el valor de la magnitud del impacto y en la parte inferior, el valor de la importancia del mismo. Estos valores los asigna el investigador según su criterio. Los de la magnitud del impacto varían entre +1 hasta +10 si el impacto es positivo. Cuando el impacto se evalúa como negativo se asignan valores entre -1 a -10. El número de referencia de la importancia del impacto sobre el ambiente debe ser siempre positivo.

Se tienen 100 actividades y 88 efectos ambientales, de lo que resultan 8,800 interacciones. Es importante mencionar que no todas son relevantes y deben de considerarse para proyectos en particular.

G. Huella de carbono

La huella de carbono es el indicador del conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, de forma directa o indirecta, por organizaciones, individuos, productos, actividades, entre otros. El efecto invernadero es la destrucción de la capa de ozono que aumenta la temperatura de la atmósfera. Dicha huella, cuantifica el impacto en el cambio climático, por medio unidades de Dióxido de Carbono equivalentes (CO_{2e}). Los gases de efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Existen tres clases de alcances de mediciones en una organización:

1. **Emisiones directas.** Los gases se emiten directamente, por medio de reacciones químicas en procesos de producción o por pérdidas de refrigerantes.
2. **Emisiones indirectas.** Se produce indirectamente, ya que las emisiones se dan por la energía requerida y su origen energético de la red proveniente.
3. **Absorciones.** Engloba a aquellas empresas que emite directamente, pero contrarresta las emisiones generadas.

El Protocolo de Kioto (PK) fue propuesto por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC). Este es un acuerdo en el que su objetivo era reducir las emisiones de los seis gases de efectos invernadero en un 5%, del año 2008

al 2012. Para ello, se establecieron metas para 37 países industrializados. Más adelante, nació el tratado del Acuerdo de París en el año 2015, con el fin de mantener por debajo de dos grados centígrados el incremento de temperatura global ocasionado por el calentamiento global. Este fue firmado por varias naciones en la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas (COP21).

Para calcular este indicador, se pueden utilizar diferentes protocolos y directrices. La técnica utilizada depende del alcance de la misma; IPPC, PAS 2050, GHG Protocolo y la ISO 14064. Este último es de alta confiabilidad y, facilita la certificación y comercialización de las emisiones. Además, permite monitorear el rendimiento y el avance de proyectos de reducción. Los usuarios certificados bajo la ISO 14064, tiene la oportunidad de participar en mercados de carbono, reportar a entidades gubernamentales y participar en registros voluntarios de gases de efectos invernadero. La gestión de la huella de carbono requiere de la medición del inventario y la línea base, la generación del plan de acción y la ejecución para la reducción de las emisiones y compensación voluntaria (MEM, 2017).

Los coeficientes de emisión son calculados en función de las emisiones por cada tipo de combustible, expresadas en CO_{2e}. Estos se encuentran en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Coeficientes de emisión de CO_{2e} de la generación de energía por tipo de combustible

Tipo de combustible	Coefficiente de emisión (kgCO_{2e} / GJ)
Coque	107.00
Búnker	77.4
Plástico	90.55

Fuente: IPCC, Informe de Inventarios GEI 1990-2018, España.

Cuadro 2. Coeficiente de emisión de CO₂e de la generación de energía eléctrica nacional guatemalteca

Tipo de combustible	Coeficiente de emisión (kgCO ₂ e / kg)
Red Nacional ANOVA	0.3913

Fuente: Balance Energético 2019, Ministerio de Energía y Minas.

H. Balance de masa y energía

Llevar un producto a escala industrial, con lleva un proceso de planificación y diseño de la planta, en base a la identificación de las operaciones unitarias involucradas en el proceso productivo. Una operación unitaria es una etapa en la que un equipo transforma de forma química, biológica o físicamente, las propiedades de un material. Las etapas que no realicen alguno de estos tipos de transformación, únicamente son componentes del proceso productivo, las cuales son analizadas por aparte. Es indispensable tener un control sobre la calidad del producto y la efectividad del proceso productivo. Para ello, se emplean balances de masa y energía, en cada operación unitaria (Castelló et al, 2020).

1. Balance de masa

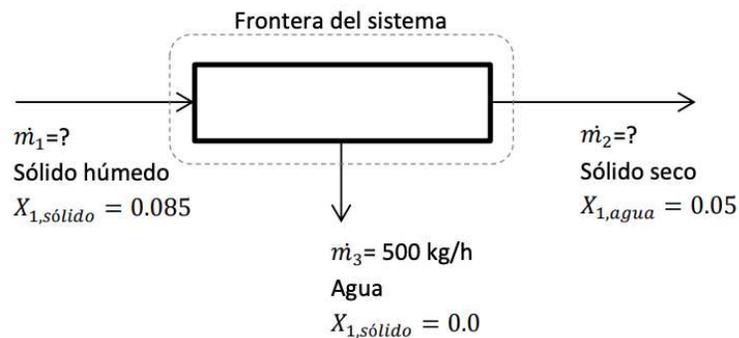
Según la Ley de la conservación de la masa, la materia no se crea ni se destruye. Sin embargo, si es capaz de transformarse. Es por ello que, en procesos industriales, este balance pretende analizar los flujos de masa entrantes y salientes, y así conocer sus transformaciones. Esto permite conocer las cantidades requeridas de materia prima y la magnitud del producto total que se obtendrá, y así determinar el rendimiento del proceso. Las corrientes deben contar tanto con cantidades totales como con sus composiciones, es decir, si ingresan 1000 kg de Materia Prima en general, hay que especificar que 800 kg son de Tipo A y 200 kg son de Tipo B (UNADM, 2021).

La ecuación general de balance de masa se escribe de la siguiente manera:

$$[Entrada - Salida] + [Generación - Consumo] = Acumulación$$

El balance puede delimitarse por medio de frontera, con el fin de unir o separar operaciones unitarias para facilitar sus cálculos, como se muestra a continuación (ver Figura no. 4).

Figura 4. Balance de masa con frontera

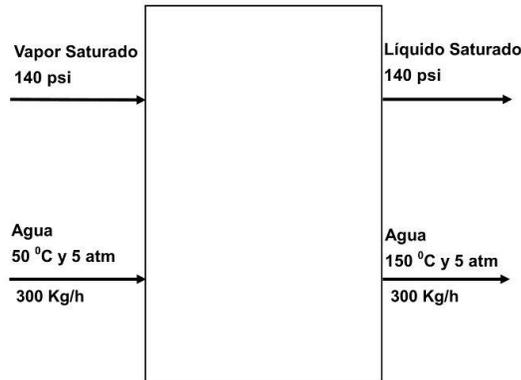


Fuente: Universidad Abierta y a Distancia de México, 2021.

2. Balance de energía

Existen varios tipos de energía: mecánica, cinética, eléctrica, potencial, interna, entalpía, calor o trabajo. En un balance energético, la energía se conserva, por lo que se determina si la energía se transforma en calentamiento, potencia, enfriamiento, movimiento, etc. Es necesario analizar si se trabaja con un sistema cerrado o abierto, puesto a que va a depender del intercambio de masa con el entorno (UNADM, 2021). La Figura no. 5, representa tanto un balance de masa, como de energía.

Figura 5. Balance de masa y energía



Fuente: Universidad Abierta y a Distancia de México, 2021.

En un sistema cerrado, la ecuación de balance general de energía es la siguiente:

$$[Entrada - Salida]_{a\ traves\ de\ las\ fronteras} = [Acumulaci3n]_{dentro\ del\ sistema}$$

Por otro lado, si el sistema es abierto, la ecuaci3n de balance general de energa es la siguiente:

$$[Entrada - Salida]_{a\ traves\ de\ las\ fronteras} + [Generaci3n - Consumo]_{dentro\ del\ sistema} = [Acumulaci3n]_{dentro\ del\ sistema}$$

La energa tambi3n puede ser transferida por calor mediante mecanismos termodinámicos, los cuales se conocen como: conducci3n, convecci3n y radiaci3n. Estos son los responsables de p3rdidas energ3ticas en un proceso.

Conducci3n: es el calor resultante de la interacci3n de dos cuerpos con vibraci3n de las mol3culas, de los cuales, uno posee mayor temperatura que el otro. La transferencia de calor siempre es generada de un gradiente de mayor temperatura a uno de menor (Jim3nez, 2017).

Convección: es el calor resultante de la interacción entre el movimiento de un fluido con propiedades térmicas y una superficie, en donde prevalece un gradiente de temperatura. Se puede clasificar como: natural o forzada (Jiménez, 2017).

Radiación: es el calor resultante de la emisión de ondas electromagnéticas, cuando sin necesidad de contacto, la energía radiante es transferida a otro cuerpo. Esta es invisible a simple vista, sin embargo, es perceptible (Jiménez, 2017).

V. Antecedentes

La industria del cemento es una de las principales fuentes de emisión de CO₂, el 8% a nivel mundial, por procesos de descarbonatación involucrados, altos consumos energéticos eléctricos y la quema de combustibles para la obtención de energía térmica. Esto los ha hecho investigar formas de reducir sustancialmente las emisiones, por tonelada de cemento producido. Es por ello que, se ha implementado el mantenimiento constante de los equipos, para aumentar su uso eficiente de energía eléctrica. Así como, el reemplazo de combustibles fósiles, por combustibles alternativos, de menor emisión por combustión. Incluso, se promueve el uso de materiales “neutrales en carbono” (Barker et al, 2009).

Adicional, la descarbonatación de la piedra caliza, para la formación de *Clinker*, también es un factor que se busca reducir por medio del uso de aditivos. Estos aditivos con propiedades hidráulicas y cementantes, como la reactividad puzolánica. Estos aditivos llevan el nombre de Materiales Cementantes Suplementarios (SCM). En la actualidad, la accesibilidad de los SCM convencionales, es limitada. A diferencia, la arcilla es un material abundante en la corteza terrestre, al existir grandes depósitos que se ajustan a la demanda. Estudios recientes prueban que las arcillas potenciales, son aquellas con alto contenido de Caolinita, que debe ser calcinado para aumentar su efectividad en el cemento. Se sabe que con una correlación lineal de 0.88 (ver **Figura 12, Anexos**), el porcentaje de Caolinita es proporcional a la reactividad hidráulica y la resistencia a la compresión con el tiempo (Scrivener et al, 2017).

El proceso de calcinación de las arcillas, es un pretratamiento de activación, que demanda consumo energético eléctrico y térmico, por lo que, en términos económicos, dificulta la sustitución. Es por ello que la investigación y desarrollo, ha creado innovaciones que posibilitan la incorporación de las arcillas calcinadas en el proceso de producción de cemento. El cemento LC³-50 es un nuevo tipo de cemento creado por la

Swiss Agency for Development and Cooperation, a través de su “Programa Global sobre el Cambio Climático”. Sus siglas se deben al nombre extendido, “Limestone Calcined Clay”.

Este cemento se basa en la mezcla de piedra caliza y arcilla calcinada, que de los cuales se puede disponer abundantemente por su disponibilidad y rentabilidad en la corteza terrestre. Además, no requiere modificaciones considerables en las plantas de cemento existentes. El objetivo del desarrollo de este producto es convertirlo en un cemento estándar y común en el mercado a nivel mundial, que impulse la sostenibilidad ambiental y económicamente accesible (LC3 Project, 2014). Es por ello que se han realizado estudios exhaustivos para establecer los tipos de arcilla que pueden ser utilizados por sus propiedades reactivas y que mantengan la resistencia a la compresión. El Cemento Portland Ordinario debe presentar resistencias a la compresión mayores a 3480 psi, a los 3 días de edad, según la norma NTG 41095.

Por otro lado, la materia prima, también debe cumplir con requisitos de calidad para poder ser empleada. En el caso de los SCM, deben presentar reactividad química al entrar en contacto con agua y un medio básico, por medio de pruebas de actividad hidráulica o reactividad puzolánica. Karen Scrivener es una experta en química de los materiales. Actualmente, es reconocida por sus investigaciones y trabajos exitosos con respecto a materiales cementantes. Se ha desempeñado como editora en jefe de la revista “*Cement and Concrete Research*”, durante 15 años. El 25 de febrero de 2016, desarrollo un artículo en conjunto con otras entidades de Suiza, Bélgica, Cuba y Alemania; dónde dio a conocer un protocolo rápido, relevante y confiable, nombrado R³. Este es útil para predecir la reactividad puzolánica de arcillas calcinadas con contenido de caolinita que oscilan de 0 a 95%. Indica que existe una correlación entre la reactividad hidráulica del material en un sistema simple y la resistencia a la compresión en mezclas de mortero. De esta manera, se busca evaluar el potencial de las arcillas, para se uso como Material Cementante Suplementario (*Scrivener et al*, 2016).

El sistema simple utilizado por el protocolo R³, implica la arcilla calcinada que se desea evaluar, y una pasta de piedra caliza con niveles de sulfato/álcalis para ajustar el medio similar al ambiente de reacción del conglomerante hidráulico adicionado con 50% *Clinker* (LC³-50). La pasta conlleva un proceso de hidratación por 6 días a 20°C o bien, 1 día a 40°C. En el estudio se mencionan dos metodologías para determinar la reactividad hidráulica de la arcilla. La primera es la técnica convencional de calorimetría isotérmica, en la cuál el indicador sería la cantidad de calor liberado durante la reacción.

Por otro lado, se propuso una segunda metodología conocida como Agua Combinada, en la cual, la muestra debe prepararse en pastillas y ser sometida a dos temperaturas, primero la de calentamiento 400°C y luego la de enfriamiento a 110°C, con el fin de tomar el peso estabilizado a 110°C y el peso frío a 110°C sin estabilizar. Vale la pena mencionar que, el peso estabilizado que se registra es aquel en donde la variación es menor al 0.5%, de acuerdo con la Norma ASTM-C642. En este caso, el porcentaje de la diferencia entre el peso estabilizado y el peso frío sin estabilizar, es el agua que se combinó (% de Agua Combinada). Mientras mayor sea el calor liberado o el porcentaje de Agua Combinada, mayor reactividad hidráulica presenta la arcilla calcinada.

VI. Metodología

A. Selección y extracción de arcilla

Este procedimiento fue descrito de forma general por el equipo de Geólogos de Cementos Progreso, llamado CETEC (Cemento Progreso, 2019).

1. Estudiar los posibles yacimientos, por medio de la utilización de equipo de ultrasonido, el cual verifica la presencia de material en el territorio.
2. Tecnología de rayos X es utilizada por el laboratorio para
3. Determinar una aproximación de la extensión del depósito del material disponible para su utilización a nivel industrial.
4. Dependiendo de la dureza del material arcilloso, emplear voladuras para perforar depósito y extraer con retroexcavadoras.
5. Luego de su extracción, el material se encuentra listo para ser trasladado al laboratorio para su preparación.

B. Preparación de arcillas

1. Cuartear la muestra de arcilla según la norma ASTM C702 (C-125). Reducir el tamaño de la muestra hasta llegar a un aproximado de 500 g.
2. Secar la muestra de arcilla en un horno por 4 horas a 110°C, para eliminar la humedad.
3. Moler muestra de arcilla en un molino de discos, hasta obtener partículas de tamaño máximo por debajo de 90 μm .
4. Determinar fineza en tamizadora tipo alpine, utilizando el tamiz no. 170 de 90 μm . Obtener una fineza por encima del 90%.

C. Caracterización de arcillas por Fluorescencia de rayos X (FRX)

Este procedimiento fue realizado y descrito el laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso, llamado CETEC (Cemento Progreso, 2008).

1. Análisis de Pérdida al Fuego

- a. Pesar 1.000 g de muestra en un crisol de platino a tarado temperatura ambiente (P1).
- b. Introducir el crisol con la muestra, dentro de una mufla a 1100°C, durante 15 minutos.

- c. Sacar de la mufla y colocar 10 minutos en desecadora para enfriar.
- d. Pesar crisol y anotar (P2).
- e. Calcular el porcentaje de pérdida al fuego por diferencial de peso, como se muestra a continuación:

Ecuación 2. Porcentaje pérdida al fuego

$$\%Pérdida\ al\ Fuego = (P_1 - P_2) * 100$$

- f. Calcula la cantidad de material a pesar, con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Porcentaje pérdida al fuego

$$Peso = \left[\frac{0.7000}{100 - \%Pérdida\ al\ Fuego} \right] * 100$$

*ver Datos Técnicos y fotografía del equipo en Anexos

2. Análisis de Fluorescencia de rayos X

- a. En un crisol de platino oro, pesar la cantidad obtenida de la ecuación 3, de la muestra proveniente del análisis de pérdida al fuego.
- b. Pesar y agregar los fundentes sobre la muestra en el crisol de platino oro (0.0500 g de LiBr y 7.7000 g de Fluorex).
- c. Homogenizar con varilla de vidrio
- d. Colocar crisol dentro de la máquina Claisse M4, para la formación de pastilla (ver Anexos).
- e. Programar equipo a 1100°C por 10 minutos.
- f. Dejar enfriar por 8 minutos.
- g. Retirar pastilla y colocar en molde de equipo Espectrómetro de rayos X DY 1511 (ver Anexos).
- h. Programar equipo para leer curva de óxidos presentes.
- i. Obtener caracterización de óxidos.

*ver Datos Técnicos y fotografía del equipo en Anexos

D. Caracterización de arcillas por Difracción de rayos X (DRX)

Este procedimiento fue realizado y descrito el laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso, llamado CETEC (Cemento Progreso, 2017).

1. Arranque del XRD

- a. Encender el chiller ($18 \pm 1^\circ\text{C}$) y el compresor de aire.
- b. Encender botón de energía general.
- c. Esperar a que el panel de control, la tensión y el corriente (kV y mA) muestren ambos "0". Espere 20 minutos para activar la alta tensión.
- d. Encender las lámparas en cada esquina deben de estar encendidas.
- e. Espere hasta que el generador llegue a 30 kV/ 10mA.

2. Preparación de muestras

- a. En un casete de prensa, colocar muestra, con fineza menor a $25 \mu\text{m}$ para asegurar que suficientes granos de varios compuestos contribuyan a la reflexión del rayo.
- b. Esparcir muestra dentro del anillo del casete.
- c. Presionar el cilindro apisonador por 5 segundos.
- d. Enrasar con cuchilla, para eliminar exceso de muestra.
- e. Voltrear la prensa manual, presionar el botón lateral para liberar el casete

3. Medición de XRD

- a. Colocar casete dentro del equipo Empearn Panalytical.
- b. Presionar Lift Up \rightarrow Apply
- c. Leer la muestra en el equipo y observar difractograma en pantalla.

*ver Datos Técnicos y fotografía del equipo en Anexos

4. Selección de arcilla: Protocolo R3- Método experimental de "Agua Combinada"

- a. Precalentar reactivos por 24 h a la temperatura de análisis, 75 g de Hidróxido de Calcio (CaOH) y 25 g de muestra, en relación 3:1.
- b. Preparar agua de amasado, disolviendo 5.96 g Hidróxido de Potasio (KOH) y 8.162 g Sulfato de Potasio (K₂SO₄).
- c. Mezclar reactivos con agua de amasado hasta formar pasta.
- d. Colocar pasta en recipiente cilíndrico.
- e. Dejar reposar mezcla en recipiente por 72 h a temperatura de análisis.
- f. Cortar cilindros endurecidos en pastillas en tamaños similares.
- g. Colocar pastillas en mufla a 400°C por 2 h.
- h. Sacar de la mufla y enfriar en desecadora por 15 minutos.
- i. Colocar pastillas en horno a 110°C por 24 h.
- j. Sacar pastillas del horno y enfriar en desecadora por 15 minutos.

- k. Pesar pastillas individualmente en balanza analítica ($m_{110^{\circ}C,estabilizada}$).
- l. Dejar por otras 24 h, hasta alcanzar peso constante (ASTM C642).
- m. Pesar pastillas individualmente en balanza analítica ($m_{110^{\circ}C,frío}$).
- n. Calcular porcentaje de agua combinada por diferencial de peso como se muestra a continuación:

Ecuación 4. Porcentaje de agua combinada

$$\% \text{ Agua Combinada} = \frac{(m_{110^{\circ}C,estabilizada} - m_{110^{\circ}C,frío})}{m_{110^{\circ}C,estabilizada}} * 100$$

- o. Solicitar una prueba de Resistencia a la Compresión de mortero de cemento adicionado con arcilla calcinada, hecho por el Laboratorio de control de calidad CETEC, bajo la norma NTG 41003 h3.
- p. Verificar que cumpla con la Resistencia a la Compresión mínima aceptada por la norma NTG 41095, para Cemento Portland Ordinario.

*ver Fotografía del equipo y arcillas en Anexos

E. Determinación de resistencia a la compresión

Debido al tipo de ensayo y a su complejidad, este fue realizado por un analista certificado del laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso, llamado CETEC.

1. Preparación de Mortero de Cemento según el método de ensayo de la Normativa NTG 41003 h4.
2. Ensayo de Resistencia a la Compresión según el método de ensayo de la Normativa NTG 41003 h4.

*ver Datos Técnicos y fotografía del equipo en Anexos

F. Realización de la Matriz de Leopold

1. Colocar por fila, de forma horizontal, los factores ambientales que afecta el proceso de producción y desglosar cada subcomponente que representa los distintos ámbitos en los que se puede ver afectado dicho factor ambiental preestablecidos por la Matriz de Leopold (Eliminar los que no sea necesario colocar).

2. Colocar por columna, de forma vertical, las acciones llevadas a cabo en el proceso de producción.
3. Trazar una diagonal, en cada casilla que indica una parte del proceso, conformado por un factor y una acción.
4. Indicar el valor de la magnitud del impacto en la parte superior izquierda.
5. Calificar de 1 a 10, siendo 1 bajo y 10 el más alto.
6. Indicar la importancia en la parte inferior derecha.
7. Calificar de 1 a 10, siendo 1 bajo y 10 el más alto.
8. Encerrar los dos valores de la casilla con un círculo, en el caso que el impacto de la acción sea negativo, con el fin de destacar los efectos negativos y poder reconocerlos fácilmente.
9. Marcar las celdas de la matriz, en dónde se ocasione un efecto secundario.

G. Estimación de la huella de carbono del proceso de producción de cemento (ISO 14064 - 2018)

1. Cemento Portland ordinario

- a. Establecer las etapas involucradas en el proceso de Fabricación de Cemento.
- b. Utilizar la Matriz de Leopold para delimitar el análisis de ciclo de vida, de acuerdo con las actividades más relevantes.
- c. Realizar Diagrama de Bloques con las operaciones unitarias delimitadas, tanto para un Cemento Portland Ordinario como para un Cemento Adicionado con Arcilla Calcinada.
- d. Colocar fronteras para facilitar los cálculos.
- e. Identificar los equipos involucrados y sus capacidades.
- f. Establecer entradas y salidas del proceso, de acuerdo a las fronteras.
- g. Ingresar datos de Planta Industrial de Cemento Portland Ordinario.
- h. Balancear la materia de cada etapa.
- i. Determinar consumos de energía térmica y eléctrica empleada cada operación unitaria de enfoque.
- j. Utilizar el Cuadro 1 y 2, con los factores de emisión de CO₂e, para cuantificar emisiones, de acuerdo al tipo de combustible empleado, a la energía eléctrica requerida y proceso de descarbonatación del proceso productivo.
- k. Cuantificar las emisiones de las operaciones no incluidas en el balance, al no ser operaciones unitarias.
 - 1) Estimar CO₂e por consumo de Diésel por transporte
 - 2) Estimar CO₂e por consumo de kWh por equipo

- l. Sumar todas las emisiones del proceso cuantificadas y determinar la emisión de Dióxido de Carbono total.
- m. Comparar la huella de carbono de un Cemento Portland Ordinario con la del Cemento Adicionado con Arcilla Calcinada.

VII. Resultados

Cuadro 3. Resultados de porcentaje de agua combinada

No. de arcilla	% Agua combinada
1	7.6322 ±0.0046
2	N.A.
3	N.A.
4	9.4971 ±0.0048
5	9.3574 ±0.0042

*Muestras analizadas en triplicado

*Las arcillas que se clasificaron como "N.A." en % de Agua Combinada, dado que no reaccionaron en absoluto, por lo que no hubo cuantificación del porcentaje.

Cuadro 4. Resultados de resistencia a la compresión

Tipo de cemento	Edad	Resistencia a la compresión (psi)				
		1 día	3 días	7 días	28 días	56 días
Portland ordinario		3270	4780	5510	6450	6710
Adicionado con arcilla calcinada		1790	3700	5320	6560	6830

*Muestras analizadas en triplicado

	Uso del suelo	-7.5	-6.0	-1.0	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-7.5	-2.5	-77	
	Patrimonio cultural y arqueológico	-5.0	-10.0		-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-2.5	-98
	Estilos de vida	-5.0	-7.5	-5.0	-2.5	-2.5	-2.5	-10.0	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-48
Impacto ambiental por actividad		98	90	41	105	105	110	128	110	105	75	58	56	-744	
Porcentaje de impacto ambiental por etapa		21%			61%						17%				1081

*Límite superior izquierdo: magnitud del impacto, 1 siendo bajo y 10 siendo el más alto.

*Límite inferior derecho: importancia del impacto, 1 siendo bajo y 10 siendo el más alto.

*El alcance de la matriz: desde la extracción de materias primas de cantera, hasta transporte a distribuidores.

Cuadro 6. Resultados de emisión de Dióxido de Carbono por la producción de cemento Portland ordinario vs. cemento adicionado con arcilla calcinada

Parte del proceso		Cemento Portland ordinario (Ton de CO ₂)	Cemento adicionado con arcilla calcinada (Ton de CO ₂)	
Extracción con explosivos		3.68	2.03	
Transporte		1,216.70	671.46	
Secado	Energía Eléctrica	N.A.	4,006.48	
	Energía Térmica	N.A.	133.26	
Prehomogenización & trituración		5,923.69	3,269.14	
Molienda de arcilla		N.A.	1,555.49	
Molienda de harina ruda		6,116.51	3,375.56	
Clinkerización	Energía Eléctrica	4,364.64	2,408.74	
	Energía Térmica por Combustible	PetCoque	91,747.83	50,633.06
		Búnker	2,781.59	1,535.08
	Sólido AF	3,962.43	2,186.75	
Descarbonatación		210,618.02	116,235.03	
Calcinación de arcilla	Energía Eléctrica	N.A.	7,284.85	
	Energía Térmica	N.A.	344.14	
Molienda de cemento		5,096.00	5,096.00	
Toneladas de CO₂ emitidas al año		331,831.09	198,737.07	

Cuadro 7. Resultado de la reducción en la huella de Carbono por la producción industrial de cemento con la adición de arcilla calcinada

Tipo de Cemento	Toneladas de CO₂ emitidas al año	Toneladas de CO₂ reducidas	Porcentaje de toneladas de CO₂ reducidas
Cemento Portland ordinario	331,831.09	133,094.02	40.11%
Cemento adicionado con arcilla calcinada	198,737.07		

VIII. Análisis de resultados

El objetivo general del trabajo de graduación pretendía estimar la huella de carbono de la producción a nivel industrial, tanto de cemento Portland ordinario, como de cemento adicionado con arcilla calcinada, modelado con las proporciones de un LC³-50, con el fin de evaluar su incidencia en el impacto ambiental. Para ello, primero se debía seleccionar la arcilla potencial de mayor rendimiento, luego delimitar el análisis de ciclo de vida, y así poder realizar la comparación de las emisiones de Dióxido de carbono (CO₂) de las etapas implicadas en el proceso. Los objetivos fueron alcanzados satisfactoriamente, de la siguiente manera.

La selección de la arcilla se realizó con base en los resultados de agua combinada obtenidos. Como se puede observar en el **Cuadro 2**, la arcilla que presentó mayor porcentaje de agua combinada fue el de la arcilla no. 4, con 9.4971 ± 0.0048 . El resto de las arcillas presentaron reactividad puzolánica, pero en menores porcentajes de agua combinada, por lo que en esta ocasión se seleccionó la de mayor rendimiento para las maximizar las propiedades físicas resultantes. Esto se debe a que, como se menciona en la sección de antecedentes, existe una correlación lineal directa entre el porcentaje de agua combinada y la resistencia a la compresión, de 0.89 desde 1 día de edad (**ver Figura 3, Marco Teórico**).

No obstante, las arcillas 2 y 3, no presentaron reacción al método de agua combinada. Estas no pudieron ser pesadas por la falta de solidificación luego del transcurso de 72 h establecidas por el Protocolo R³. Según los antecedentes, las arcillas deben contener porcentaje de caolinita en su composición química, para presentar resultados de reactividad puzolánica. Esto se debe a que se sabe que ambos parámetros se correlacionan linealmente con un 0.88, siendo 1.00 el ideal (**ver Figura 12, Anexos**). Es por ello que, la falta de reacción de las arcillas 2 y 3, se pudo deber a que fueron las que presentaron menor

contenido de este mineral, caolinita, según los resultados de la caracterización de las arcillas, por Difracción de rayos X (**ver Cuadro 21, Anexos**).

Es importante mencionar que, para poder seleccionar la arcilla no. 4, también se verificó que la resistencia a la compresión fuera la adecuada como mortero de cemento a 5 edades diferentes (1, 3, 7, 28 y 56 Días), evaluados bajo los ensayos de la norma NTG 41003 h3. Las pruebas de resistencia a la compresión fueron realizadas por un analista certificado del laboratorio de control de calidad de Cementos Progreso. Basados en la norma NTG 41095, un Cemento Portland Ordinario debe presentar resistencias a la compresión mayores a 3480 psi, a los 3 días de edad, en efecto, los resultados fueron positivos, dado que se superó dicho valor con 3700 psi para el cemento adicionado con arcilla calcinada (**ver Cuadro 3**). Incluso, se puede ver que, a partir de los 28 días de edad, este supera la resistencia del Cemento Portland Ordinario con un diferencial de 110 psi, de 6450 a 6560 psi, respectivamente. Solamente a la arcilla seleccionada por el método de aguas combinadas se le realizó prueba de resistencia a la compresión, debido a que era la de mejor desempeño y así evitar costos innecesarios con las arcillas de menor desempeño.

Es por ello que la arcilla no. 4, fue seleccionada para el desarrollo del trabajo y posteriormente, se trató en pruebas industriales, por medio de secado, molienda y activación por calcinación a 650°C, para poder contar con las condiciones aproximadas de humedad, temperatura de calcinación, consumos de kWh/t de los equipos implicados, entre otros datos de operación. Esto se debe a que la arcilla debe ser previamente tratada para poder ser utilizada como adición, y así cumplir su finalidad en el cemento. Las operaciones mencionadas con anterioridad son las que conforman el pretratamiento requerido. Estos datos fueron empleados para la estimación de la huella de carbono del cemento adicionado con arcilla calcinada.

Consecuentemente, la delimitación del análisis de ciclo de vida se realizó por medio de la creación de la Matriz de Leopold del proceso de fabricación de cemento, que abarcó desde la explotación de los recursos, hasta su distribución. Esto fue lo que permitió visualizar las etapas más relevantes del proceso y su impacto ambiental, en especial, respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, equivalentes a toneladas de CO₂. Para ello, se consideraron tres componentes (ámbito abiótico, biótico y antrópico), y se determinó su impacto por actividad, por subcomponente ambiental y el porcentaje de impacto por etapa.

Luego de calcular el porcentaje de impacto por etapa (**ver Cuadro 4**), se observó que el 61% del impacto se encuentra en la etapa del proceso de producción. Aunque el impacto ambiental de la etapa de explotación de recursos es menor, con tan solo 21%, esta también presenta “Emisiones de Gases”, que es el componente de mayor interés de este estudio que se desea identificar en la Matriz. Por lo tanto, se decidió incluir también dentro de la delimitación. Debido a esto, se estableció que el análisis de ciclo de vida sería de tipo simplificado y se realizaría de cuna a puerta, por lo que solo se tomaron en cuenta las etapas más relevantes del proceso, desde la extracción de recursos en cantera hasta el proceso de producción. Las actividades que conforman la preparación de producto final y distribución fueron descartadas.

Originalmente, las etapas seleccionadas fueron 8, sin embargo, los datos proveídos por la planta de cemento industrial para la producción de Cemento Portland Ordinario fueron resumidos en 4 etapas. Esto se debe a que es la forma en la que se cuantifican las entradas y salidas del proceso dentro de la planta. Es por ello que se elaboró un diagrama de bloques con todas las etapas originales y luego se colocaron fronteras, para dividir las etapas en 4, y así, ajustarlas a los datos proporcionados.

Finalmente, para la estimación de la huella de carbono de ambos cementos, se realizó un balance de masa (**ver datos calculados intermedios, Figura 6 y 7**) para determinar la emisión de las actividades clasificadas como operaciones unitarias, que son las que conforman la etapa del proceso de producción. Sin embargo, como la delimitación incluye tanto la etapa del proceso de producción como el proceso de extracción de materias primas, estas últimas fueron analizadas por consumo de explosivos involucrados en la voladura. Asimismo, se realizaron los cálculos de las emisiones, por el diésel consumido para la retro excavación y transporte de materia prima dentro de planta. El transporte fuera de planta no fue considerado, lo que incluye el transporte de yeso y arcilla a planta. Adicional, se agregó al balance las actividades de secado, calcinación y molienda de arcilla, únicamente, para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada.

El punto de partida para la realización de cálculos, fueron los datos proveídos por una Planta de Producción Industrial, específicamente para la producción de Cemento Portland Ordinario (OPC) de Guatemala, en el año 2019, con 90.60% de *Clinker*, 6.70% de Yeso y 2.70% de Caliza. También se realizaron los cálculos correspondientes a un cemento adicionado con arcilla calcinada, con una composición de 50.00% de *Clinker*, 6.00% de Yeso, 4.00% de Caliza y 40% de Arcilla Calcinada (*Scrivener et al*, 2017). Es por ello que, se ajustaron los datos proporcionados de la producción de OPC, con respecto a la composición de cemento adicionado con arcilla calcinada, y se complementó con la información de las pruebas de secado, calcinación y molienda de arcilla, que fue recopilada. Todos los datos y cálculos de esta investigación fueron obtenidos de forma anual.

De acuerdo a los resultados obtenidos (**ver Cuadro 6**), se determinó que la huella de carbono del Cemento Portland Ordinario fue de 331,831.09 Ton de CO₂/año, mientras la del cemento adicionado con arcilla calcinada fue de 198,737.07 Ton de CO₂/año. Se puede observar que se logró reducir un aproximado de 133,094.02 Ton de CO₂/año, lo cual

representa un total de 40.11% de reducción anual. Este resultado fue bastante acertado, ya que coincidió con la reducción del 40%, descrita por *Karen Scrivener*, en su investigación de LC³-50, Cemento de bajo carbono (*Scrivener et al*, 2017). Aunque adicionar este material requiera incluir más operaciones unitarias al proceso que consuman energía, por el pretratamiento de la arcilla, el beneficio de su implementación es grande, porque las toneladas de CO₂ siguen estando por debajo de lo emitido por el proceso convencional de OPC, anualmente.

El cambio climático es una amenaza global, en la que cada entidad responsable de generar emisiones de efecto invernadero, debe buscar alternativas no solo para mitigar el efecto causado, sino también para evitar dicho efecto desde la raíz en la medida de lo posible. Es por ello que, estos resultados obtenidos en este trabajo de graduación confirman que el cemento adicionado con arcilla calcinada, es una alternativa que, en el futuro, puede permitir que la industria del cemento disminuya considerablemente su incidencia ante esta problemática, al reducir cerca del 50% de las emisiones.

IX. Conclusiones

- A. De las arcillas evaluadas, la arcilla no. 4 fue la seleccionada para ser utilizada en el estudio, al presentar mayor rendimiento químico que las demás, con un 9.4971% ± 0.0048 de agua combinada, verificado al presentar una buena resistencia a la compresión de 6450 psi a 28 días de edad.

- B. Los resultados del análisis del Ciclo de Vida, evaluados por la Matriz de Leopold, indicaron que el análisis fue de tipo simplificado y de cuna a puerta, donde se pudo observar que, tanto el 61% del impacto generado por la Fabricación de Cemento que se debe a la etapa del proceso de producción, como el 21% que conforma la etapa de extracción de materias primas, deben ser considerados, debido a que contienen las actividades principales que generan emisión de gases de efecto invernadero a ser cuantificadas.

- C. La implementación de arcilla calcinada como material cementante suplementario, redujo la huella de carbono en un 40.11%, comparado con Cemento Portland Ordinario, con un total de emisión de 198,737.07 Ton de CO₂/año. Esto representaría 133,094.02 Ton de CO₂/año menos que las emitidas por el proceso convencional del Cemento Portland Ordinario, lo cual confirma, que este nuevo tipo de cemento es una alternativa que permitiría que la industria del cemento, disminuya considerablemente su huella de carbono ante la problemática del Cambio Climático.

X. Recomendaciones

- A. Realizar un estudio comparativo del consumo eléctrico del proceso de molienda de cemento, para evaluar las diferencias en la producción de distintas formulaciones de cemento y su impacto en la huella de carbono. Adicional, analizar si variar la fineza de las formulaciones, genera cambios en el consumo, y por ende, en el impacto de la huella de carbono.
- B. Realizar un balance energético, tomando en cuenta pérdidas por fricción, radiación, convección y calor de combustión, con el fin de evaluar eficiencias térmicas, que no constituyen parte del alcance de este trabajo de graduación, pero que presentan una buena oportunidad de ahorros en costos para la industria del cemento.
- C. Realizar el ensayo de Resistencia a la Compresión con todas las arcillas, y no solo con la seleccionada. Esto, para evaluar si la técnica especificada por el Protocolo R3, coincide con el estudio.
- D. Realizar este mismo análisis comparando con otros tipos de cemento diferentes al Cemento Portland Ordinario, para determinar las diferencias en huella de carbón contra la alternativa de cemento adicionado con arcilla activada térmicamente.
- E. Complementar este tipo de estudios con la incorporación de datos de calorimetría isotérmica para la selección de la arcilla, basados en la norma ASTM C1702.
- F. Complementar el impacto total en la huella de carbón para el proceso completo de fabricación, lo cual involucra la distribución de cemento y la totalidad de los aportes de traslados de materias primas externas hacia la planta de proceso, debidos al consumo de combustibles para su traslado y la distancia recorrida.

XI. Bibliografía

Abascal, J. (2008). Las cementeras españolas utilizarán el 20% de residuos como combustibles en el año 2012. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. Extraído de: oficemen.com/las-cementeras-espanolas-utilizaran-el-20-de-residuos-como-combustibles-en-el-ano-2012/

Alastuey, A., Bastida, J., Fernández, J.L., Signes, M. y Querol, X. 1991. *Mineralogía de las arcillas calcinadas de la base de la Fm.* Escucha en el área de Foz-Calanda. AIJU.1-14.

Alujas, A., Avet, F., Ben, M., Scrivener, K. y Snellings, R. 2016. *Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays.* ELSEVIER.1-10.

Alujas, A., Antoni, M., Castillo, R., Martirena-Hernández, J. F. y Scrivener, K. 2010. *Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones.* Laboratory of Construction Materials. EPFL 1-16.

Álvarez, J. 2017. *Aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto.* Universidad de San Carlos de Guatemala. 1-143.

ASTM Book of Standards. 2018. *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size.* ASTM C702 (C-125). USA: Vol. 04.02 2002.

2. ASTM Book of Standards. 2013. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.* ASTM C642. USA: Vol. 04.02 2002.

Avet, F., Maraghechi, H., Scrivener, K., Ston, J. Y Zunino, F. 2018. *Impacto de Factores y Propiedades del LC3.* Laboratory of Construction Materials. EPFL. 1-49.

Barker, D. J., Turner, S. A., Napier-Moore, P. A., Clark, M., & Davison, J. E. 2009. *CO2 Capture in the Cement Industry.* Energy Procedia. 1(1). 87–94. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.0

Barrios, M. 2015. *Optimización de los sistemas de control de un Molino de Bolas.* Universidad de San Agustín. Arequipa, Perú. 1-89.

- Boehm-Courjault, E., Scrivener, K. y Zunino, F. 2020. *Impacto de las impurezas de calcita en arcillas con caolinita, en la reactividad del cemento, después de la calcinación*. RILEM. 1-15.
- Borrajo-Pérez, R., González-Bayón, J.J. y Sánchez-Rodríguez, A. 2012. *Modelación del proceso de calcinación flash durante la activación de arcillas*. Ingeniería Mecánica.15(1).73-82.
- Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J.I. y Magallanes-Rivera, R.X. 2015. *Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura*. ALCONPAT. 5(1). 58-73.
- Cabrera-Madrid, J., Escalante-García, J. y Castro-Borges, P. 2016. *Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno*. ALCONPAT. Vol 6 (1). 64-83
- Castelló, M., Castro, M., Fito, P. y Tarrazó, J. 2020. *Balances de Materia y Energía en ingeniería de bioprocesos*. Editorial, Universidad Politécnica de Valencia. 1-85.
- Castillo, L., Martirena, J.F., Rosa, E.R., Ruíz, Y., Sánchez, S. y Suppen, N. 2017. *Análisis de Ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de Clinker*. 44(2). 77-88.
- Cementos Progreso. 2017. *Compromiso con el Pacto Global. Pacto Global de Naciones Unidas. Guatemala*. 1-59.
- Cementos Progreso. 2008. *Procedimiento para el proceso de análisis en rayos X*. 1-7.
- Cementos Progreso. 2017. *Operación del Software y Equipo de Difracción de rayos X*. 1-7.
- Céspedes, M. (2003). *Resistencia a la compresión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonidos*. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Extraído de: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1338/ICI_100.pdf
- Chavarría, J. 2004. *Efecto del Clinker reducido en el Cemento Portland Ordinario. Cemento Tipo I*. Universidad San Carlos de Guatemala. 1-71
- COGUANOR. 2018. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41095*. Comisión Guatemalteca de Normas. Ministerio de Economía. 1-17.

COGUANOR. 2019. *Norma Técnica Guatemalteca. NTG 41003 h4*. Comisión Guatemalteca de Normas. Ministerio de Economía. 1-31.

Eurofins. (2021). Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve. Envira Ingenieros Asesores. Extraído de: <https://envira.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida/>.

Fahrland, T. 2013. *Los Cementos molidos en los molinos verticales de rodillos, cumplen con las exigencias de calidad del mercado*. Cemento International. Dusseldorf, Alemania. Vol 11.

Fernández-Jiménez, J., García-Lodeiro, I. y Palomo, A. 2015. *Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor Clinker*. ALCONPAT. 5(1). 1-17.

Fernández, M. y Marcías, F. 1984. *Contribución a la Caracterización Químico-mineralógica de los esquistos del "Complejo de Ordes"*. Facultad de Biología. Santiago de Compostela. 469-494.

FICEM. (2017). Optimización del perfil de temperaturas de la torre de precalentamiento para reducir la variabilidad de la descarbonatación a la entrada del horno. XXXIV Congreso Técnico. Ciudad de Guatemala. Extraído de: http://ficem.org/boletines/Boletines_2017/BOLETIN_DE_RESULTADOS_y_Presentaciones_CT_2017/presentaciones/martes_5/2_YVAN%20PECORELLI_CEMENTOS%20PROGRESO/FICEM%20PLANTILLA%20CT%202017%20V2.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (1999). Informe de Inventarios GEI. Extraído de: https://agroambient.gva.es/documents/163279113/163282682/Anexo_7_inventario.pdf/600b60ff-731d-4a0d-a40e-7f118dc2376f. España. Edición 2020. Anexo 7. p 920 .

Jiménez, C. 2017. *Transferencia de Calor*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1-18.

Malvern Panalytical. 2021. *Claisse M4. Keeping ahead through expertise in sample preparation by fusion*. 1-5.

Mindess, S., and Young, J. F. 1981. *Concrete*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Morejón, L. 2015. *Morteros de cemento con Adiciones de humo de sílice y nanosílice*. Universidad Politécnica de Madrid. 1-79.

Ramírez, J., Tobón, J. y Yanguatin, H. 2016. *Reactividad Puzolánica de arcillas caoliníticas*. RIC. 32(2). 13-24.

Morejón-Mesa, Y., Silva-Junco, D. y Reyes-Suárez, Y. 2020. «Design of an Industrial Rotary Cylinder Grain Dryer». *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol 29 (3). 64-74.

Mott, M. 2014. *Detailed Description. Panalytical*. The Analytical X-ray Company. 1-21.

Ramos, F. y Vega, K. (2015). Diseño y Construcción de una máquina trituradora de hojas secas de Guayusa con una capacidad de 6.5 quintales por hora. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Extraído de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10287/3/CD-6137.pdf>

Papadikas, V. y Tsimas, V. 2002. *Supplementary cementing materials in concrete*. Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research*. Vol 32(10). 1525-1532.

Rivas, S. (2017). Robot Paletizador de Sacos. Robotics. Extraído de: <https://rivasrobotics.com/robot-paletizador-de-sacos/>

Sanjuán, M. y Yepes, S. 2018. *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*. Universidad de Alicante. p 1-181.

Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. 2017. *Calcined clay limestone cements (LC3)*. *Cement and Concrete Research*. doi:10.1016/j.cemconres.2017.0

Swiss Agency for Development. (2014). LC³ Project. Extraído de: <https://lc3.ch/>.

Martirena-Hernández, J. F. y Scrivener, K. 2019. *Hacia la sostenibilidad en la producción de cemento en américa latina: Cemento a base de arcillas calcinadas y caliza (LC3)*. Laboratory of Construction Materials. EPFL 1-7.

Schaffer, C. (2013). Analysis of Aqueous Acid Solutions with Thermo Scientific ARL OPTIM'X WDXRF Sequential Spectrometer. ThermoFisher Scientific. 1-2

Tonitechnik. (2021). Technical Data. Compression Test Plant ToniZEM. 1-2.

Organización de las Naciones Unidas. (2020). Programa para el medio ambiente. 1972-2022.

XII. Anexos

a. Datos originales

Cuadro 8. Pesos inicial y final por arcilla para el análisis de agua combinada

No. de Arcilla	$m_{110^{\circ}C,estabilizada}$ (g) ± 0.0001	$m_{110^{\circ}C,frio}$ (g) ± 0.0001
1	3.3700	3.1277
	2.7462	2.5344
	3.1823	2.9279
4	2.7701	2.5064
	2.9755	2.6897
	3.1313	2.8380
5	4.0313	3.6514
	2.5150	2.2639
	3.9484	3.6063

Cuadro 9. Datos del proceso de producción industrial de cemento Portland ordinario en el año 2019

	Cantidad total	23.01 Ton
Explosivos	ANFO	96.14%
	Emulsión	2.00%
	Booster	0.91%
	Ezdet	0.91%
	Ezdtl	0.04%
	Cantidad total	2,271.96 m³
Agua	Evaporada	4%
	Estabilización de suelo	96%
Humedad de arcilla	Arcilla al ingreso de secado	18.53%
	Arcilla al egreso de secado	1.92%
	Arcilla a la salida de molienda	0.44%
Composición de cemento adicionado con arcilla calcinada	<i>Clinker</i>	50%
	Yeso	6%
	Caliza	4%
	Arcilla calcinada	40%
Composición de harina cruda	Piedra caliza	80%
	Esquisto	20%
Factor clinkerización	<i>Clinker</i>	57.26%
	Descarbonatación (CO ₂ emitido)	42.74%
Consumo de Diésel	Transporte de materia prima de cantera a planta	41,762.71 Galones
Producción anual de cemento Portland ordinario	Cemento Portland ordinario total	311,447.00 Ton/año
	Clínker	90.6% 282,170.98 Ton
	Yeso	6.7% 20,866.95 Ton
	Caliza	2.7% 8,409.07 Ton
Combustibles para energía térmica en clinkerización de cemento Portland	Energía térmica total	937,153.82 GJ
	Petcoque	857,456.35 GJ
	Búnker	35,937.87 GJ
Combustibles para energía térmica en secado de arcilla	Plástico	43,759.60 GJ
	Cascabillo de café	499,160.54 GJ
Combustibles para energía térmica en calcinación de arcilla	Cascabillo de café	193,286.54 GJ
Factor de emisión	Cascabillo de café	0.02 kg CO ₂ /kg
	Molienda de cemento	41.82 kWh/Ton
Consumo de energía eléctrica por etapa	Clinkerización	39.53 kWh/Ton
	Molienda de materia prima	31.72 kWh/Ton
	Trituración y prehomogenización	30.72 kWh/Ton
	Calcinación de arcilla	31.72 kWh/Ton
	Molienda de arcilla	31.72 kWh/Ton
	Secado de arcilla	80.61 kWh/Ton

*Los datos proveídos del sistema del Proceso de Producción de Cemento Industrial de la Planta ubicada en El Progreso, Guatemala.

b. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación del promedio del triplicado del porcentaje de agua combinada

$$\frac{9.52 + 9.61 + 9.37}{3} = 9.50\% \text{ Agua Combinada en Arcilla}$$

*Se realizó el mismo cálculo para las demás Arcillas

Cálculo 2. Emisión de Dióxido de Carbono por consumo de Diésel por transporte

$$41,762.71 \frac{\text{gal}}{\text{año}} \left(\frac{36.6 \text{ kWh}}{1 \text{ gal}} \right) = 1,528,515.19 \text{ kWh}$$

$$1,528,515.19 \text{ kWh} \left(\frac{0.7960 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 1,216.70 \text{ Ton de CO}_2$$

*Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción del Cemento Adicionado con Arcilla Calcinada

Cálculo 3. Emisión de Dióxido de Carbono por consumo de energía eléctrica requerida por equipo

$$15,138,478.08 \text{ Consumo de kWh por Trituración y Prehomogenización} \\ \left(\frac{0.3913 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh consumido}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 5,923.69 \text{ Ton de CO}_2$$

$$15,631,267.00 \text{ Consumo de kWh por Molino de Harina Cruda} \\ \left(\frac{0.3913 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh consumido}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 6,116.51 \text{ Ton de CO}_2$$

$$11,154,218.84 \text{ kWh por Clinkerización} \\ \left(\frac{0.3913 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh consumido}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 4,364.64 \text{ Ton de CO}_2$$

$$13,024,713.54 \text{ kWh por Molino de Cemento} \\ \left(\frac{0.3913 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh consumido}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 5,096.00 \text{ Ton de CO}_2$$

*Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción de Cemento Adicionado con Arcilla calcinada, y las operaciones adicionales ligadas al mismo.

Cálculo 4. Emisión de Dióxido de Carbono por tipo de combustible alterno utilizado para producción de energía térmica empleada para el proceso de Clinkerización

$$857,456.35 \text{ GJ de PetCoke} \left(\frac{107.00 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ GJ}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 91,747.83 \text{ Ton de CO}_2$$

$$35,937.87 \text{ GJ de Búnker} \left(\frac{77.40 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ GJ}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 2,781.59 \text{ Ton de CO}_2$$

$$43,749.60 \text{ GJ de Sólido AF} \left(\frac{99.55 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ GJ}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas CO}_2}{1 \text{ kg CO}_2} \right) = 3,962.43 \text{ Ton de CO}_2$$

*Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción de Cemento Adicionado con Arcilla calcinada y la calcinación de Arcilla.

*Se asumió que el Sólido AF era 100% Polietileno de Alta Densidad

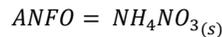
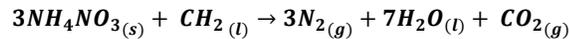
*En el caso de la arcilla se usó Cascabillo de Café

Cálculo 5. Emisión de Dióxido de Carbono por el proceso de descarbonatación durante la Clinkerización

$$(492,789.00 \text{ Ton de Harina Cruda} * 0.4274) = 210,618.02 \text{ Ton de CO}_2$$

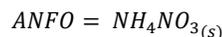
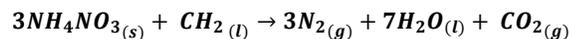
*Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción de Cemento Adicionado con Arcilla calcinada

Cálculo 6. Emisión total de Dióxido de Carbono por la extracción de materia prima en el proceso de producción de cemento Portland ordinario



$$22.12 \left(\frac{1 \text{ kg}}{0.001 \text{ Toneladas}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3}{80.043 \text{ g NH}_4\text{NO}_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol CO}_2}{3 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3} \right) \left(\frac{40.01 \text{ g}}{1 \text{ mol CO}_2} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas}}{1 \text{ kg}} \right) = 3.68 \text{ Ton CO}_2$$

Cálculo 7. Emisión Total de Dióxido de Carbono por la extracción de materia prima en el proceso de producción de cemento adicionado con arcilla calcinada



$$12.21 \text{ Ton NH}_4\text{NO}_3 \left(\frac{1 \text{ kg}}{0.001 \text{ Toneladas}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3}{80.043 \text{ g NH}_4\text{NO}_3} \right) \left(\frac{1 \text{ mol CO}_2}{3 \text{ mol NH}_4\text{NO}_3} \right) \left(\frac{40.01 \text{ g}}{1 \text{ mol CO}_2} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000} \right) \left(\frac{0.001 \text{ Toneladas}}{1 \text{ kg}} \right) = 2.03 \text{ Ton CO}_2$$

Cálculo 8. Emisión total de Dióxido de Carbono por la Clinkerización en el proceso de producción de cemento Portland ordinario

$$\begin{aligned} & (\text{Emisión por Descarbonatación} + \text{Emisión por Energía Térmica consumida} \\ & + \text{Emisión por Energía Eléctrica consumida}) \\ & = \text{Toneladas de CO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (3.68 \text{ Ton CO}_2 + 98,491.85 \text{ Ton de CO}_2 + 4,364.64 \text{ Ton de CO}_2) \\ & = 102,860.17 \text{ Ton de CO}_2 \end{aligned}$$

Cálculo 9. Emisión total de Dióxido de Carbono por la Clinkerización, secado y calcinación en el proceso de producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

$$\begin{aligned} & (\text{Emisión por Descarbonatación} + \text{Emisión por Energía Térmica consumida} \\ & + \text{Emisión por Energía Eléctrica consumida}) \\ & = \text{Toneladas de CO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (2.03 \text{ Ton CO}_2 + 54,832.29 \text{ Ton de CO}_2 + 13,700.07 \text{ Ton de CO}_2) \\ & = 68,534 \text{ Ton de CO}_2 \end{aligned}$$

Cálculo 10. Emisión total de Dióxido de Carbono por el proceso de producción de cemento Portland ordinario

$$\begin{aligned} & (3.68 + 1,216.70 + 5,923.69 + 6,116.51 + 4,364.64 + 91,747.83 + 2,781 + 3,962.43 + 210,618.02 + 5,096.00) \\ & = 331,831.09 \text{ Ton de CO}_2 \end{aligned}$$

**Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción de Cemento Adicionado con Arcilla calcinada, con la suma de las 3 operaciones de pretratamiento de arcilla*

Cálculo 11. Toneladas de emisión de Dióxido de Carbono reducidas al adicionar arcilla calcinada al proceso de producción de cemento industrial

$$331,831.09 \text{ de CO}_2 \text{ OPC} - 198,737.07 \text{ Ton de CO}_2 = 133,094.02 \text{ Ton de CO}_2 \text{ Reducidas}$$

Cálculo 12. Porcentaje de reducción de emisión de Dióxido de Carbono reducidas al adicionar arcilla calcinada al proceso de producción de cemento industrial

$$\frac{133,094.02 \text{ Ton de CO}_2 \text{ Reducidas}}{331,831.09 \text{ de CO}_2 \text{ OPC}} * 100 = 40.11\% \text{ Ton de CO}_2 \text{ Reducidas}$$

c. Cálculos intermedios

Cálculo 13. Determinación del Porcentaje de Agua Combinada

$$\left(\frac{m_{110^{\circ}\text{C,estabilizada}} - m_{110^{\circ}\text{C,frio}}}{m_{110^{\circ}\text{C,estabilizada}}} \right) * 100 = \% \text{ Agua Combinada}$$

$$\left(\frac{2.7701 \text{ g} - 2.5064 \text{ g}}{2.7701 \text{ g}} \right) * 100 = 9.5195\% \pm 0.0051 \text{ Agua Combinada en Arcilla}$$

$m_{110^{\circ}\text{C,estabilizada}}$: Gramos al estabilizar el peso después de 24 h

$m_{110^{\circ}\text{C,frio}}$: Gramos después de enfriamiento a 110°C

*Se realizó el mismo cálculo para las demás Arcillas en triplicado para cada una

Cálculo 14. Determinación de la composición de la harina cruda para la producción del cemento Portland ordinario

$$492,789.00 \text{ Ton de Harina Cruda} \left(\frac{0.8 \text{ Ton de Piedra Caliza}}{1 \text{ Ton de Harina Cruda}} \right) = 394,231.20 \text{ Ton de Piedra Caliza}$$

$$492,789.00 \text{ Ton de Harina Cruda} \left(\frac{0.2 \text{ Ton de Esquisto}}{1 \text{ Ton de Harina Cruda}} \right) = 98,557.80 \text{ Ton de Esquisto}$$

Cálculo 15. Determinación de la composición de los elementos que conforman los explosivos para la producción del cemento Portland ordinario

$$23.01 \text{ Ton de Explosivo} \left(\frac{0.9614 \text{ Ton de ANFO}}{\text{Toneladas de Explosivo}} \right) = 22.12 \text{ Ton de ANFO}$$

$$23.01 \text{ Ton de Explosivo} \left(\frac{0.02 \text{ Ton de Emulsión}}{\text{Toneladas de Explosivo}} \right) = 0.46 \text{ Ton de Emulsión}$$

$$23.01 \text{ Ton de Explosivo} \left(\frac{0.0091 \text{ Ton de Booster}}{\text{Toneladas de Explosivo}} \right) = 0.21 \text{ Ton de Booster}$$

$$23.01 \text{ Ton de Explosivo} \left(\frac{0.0091 \text{ Ton de Ezdet}}{\text{Toneladas de Explosivo}} \right) = 0.21 \text{ Ton de Ezdet}$$

$$23.01 \text{ Ton de Explosivo} \left(\frac{0.0004 \text{ Ton de Ectl}}{\text{Toneladas de Explosivo}} \right) = 9.2 \times 10^{-3} \text{ Ton de Ectl}$$

*Se realizó el mismo cálculo para el proceso de producción de Cemento Adicionado con Arcilla calcinada

*Únicamente, en Nitrato de Amonio (ANFO), tiene factor de emisión de CO₂. El resto son catalizadores de la reacción

Cálculo 16. Determinación de la composición del cemento adicionado con arcilla calcinada

$$41,762.71 \text{ Ton de Cemento Adicionado con AC} \left(\frac{0.50 \text{ Ton de Clinker}}{1 \text{ Ton de OPC}} \right) = 20,881.36 \text{ Ton de Clinker}$$

$$41,762.71 \text{ Ton de Cemento Adicionado con AC} \left(\frac{0.06 \text{ Ton de Yeso}}{1 \text{ Ton de OPC}} \right) = 2,505.76 \text{ Ton de Yeso}$$

$$41,762.71 \text{ Ton de Cemento Adicionado con AC} \left(\frac{0.04 \text{ Ton de Caliza}}{1 \text{ Ton de OPC}} \right) = 1,670.51 \text{ Ton de Caliza}$$

$$41,762.71 \text{ Ton de Cemento Adicionado con AC} \left(\frac{0.4 \text{ Ton de Caliza}}{1 \text{ Ton de OPC}} \right) = 16,705.08 \text{ Ton de Arcilla Calcinada}$$

Cálculo 17. Determinación de las corrientes de las operaciones unitarias de producción de Clinker del proceso de cemento adicionado con arcilla calcinada, en base a las corrientes del cemento Portland ordinario

$$492,789.00 \text{ Ton de Harina Cruda} \left(\frac{0.551876 \text{ Ton Cemento Adicionado con AC}}{1 \text{ Ton Cemento Portland Ordinario}} \right) \\ = 271,958.42 \text{ Ton de harina Cruda}$$

**Se realizó el mismo cálculo para el resto de corrientes del proceso de producción de Clinker del Cemento Adicionado con Arcilla Calcinada, incluyendo consumo de kWh, consumo de Diesel en transporte y combustibles alternos para generación de energía térmica para el proceso de Clinkerización*

Cálculo 18. Determinación de las corrientes de masa molienda para el pretratamiento de la arcilla, por medio de humedades proveídas

$$125,129.37 \text{ Ton de Arcilla Húmeda} \left(\frac{100\% - 0.44\% \text{ Ton de Arcilla}}{100\% \text{ Ton Cemento Portland Ordinario}} \right) = 124,578.80 \text{ Ton de Arcilla}$$

$$125,129.37 \text{ Ton de Arcilla Húmeda} \left(\frac{0.44\% \text{ Ton de Arcilla}}{100\% \text{ Ton Cemento Portland Ordinario}} \right) = 550.57 \text{ Ton de Agua}$$

**Se realizó el mismo cálculo para las corrientes correspondientes a las entradas y salida del Secado y la calcinación del pretratamiento de la Arcilla*

Cálculo 19. Consumo de energía eléctrica por el proceso de molienda para el pretratamiento de la arcilla

$$125,129.37 \text{ Ton de Arcilla Húmeda} \left(\frac{31.72 \text{ kWh}}{1 \text{ Ton}} \right) = 3,969,103.62 \text{ kWh}$$

**Se realizó el mismo cálculo de consumo de energía eléctrica para el Secado y Calcinación de arcilla, con los respectivos consumos de energía dados por la planta*

d. Análisis de error

Cálculo 20. Propagación de error del diferencial de peso estabilizado y el peso frío de agua combinada

$$\Delta y = \sqrt{(\Delta x) + (\Delta z)}$$
$$\Delta y = \pm 0.14 = \sqrt{(\pm 0.01) + (\pm 0.01)}$$

**Se realizó el mismo cálculo para cada valor incluido en cada triplicado por arcilla*

Cálculo 21. Propagación de error del porcentaje de agua combinada

$$\frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2}$$
$$\pm 0.0006 = 0.0952 \sqrt{\left(\frac{\pm 0.14}{0.26}\right)^2 + \left(\frac{\pm 0.01}{2.77}\right)^2}$$

**Se realizó el mismo cálculo para el triplicado de cada arcilla*

Cálculo 22. Media de los triplicados de porcentaje de agua combinada

$$\bar{x} = \frac{\sum n}{N}$$
$$\bar{x} = \frac{(9.5195\% + 9.6051\% + 9.3667\%)}{3} = 9.4971\% \pm 0.0048$$

**Se realizó el mismo cálculo para el triplicado de cada arcilla*

Cálculo 23. Desviación Estándar de los triplicados de porcentaje de agua combinada

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x)^2}{n - 1}}$$
$$s = \sqrt{\frac{0.0290}{2}} = 0.0012\%$$

**Se realizó el mismo cálculo para el triplicado de cada arcilla*

e. Datos calculados intermedios

Cuadro 10. Porcentaje de agua combinada de arcilla calcinada por triplicado

No. de arcilla	Porcentaje de agua combinada (%)
1	7.1899 ±0.0042
	7.7125 ±0.0052
	7.9942 ±0.0044
4	9.5195 ±0.0051
	9.6051 ±0.0048
	9.3667 ±0.0045
5	9.4238 ±0.0035
	9.9841 ±0.0056
	8.6643 ±0.0036

Cuadro 11. Desviación Estándar de los triplicados de porcentaje de agua combinada de arcilla calcinada

No. de arcilla	Porcentaje de agua combinada (%)
1	0.0038
2	0.0041
5	0.0012
6	0.0066

Cuadro 12. Cantidad neta y composición de harina cruda para la producción de cemento Portland ordinario

Compuesto	Cantidad (Ton/año)
Piedra Caliza	394,231.20
Esquisto	98,557.80
Harina Cruda Total	492,789.00
Materia Prima Extraída Total	492,789.00

Cuadro 13. Composición del cemento adicionado con arcilla calcinada

Compuesto	Cantidad (Ton/año)
<i>Clinker</i>	155,723.50
Yeso	18,686.82
Caliza	12,457.88
Arcilla Calcinada	124,578.80

Cuadro 14. Cantidad neta y composición de harina cruda para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

Compuesto	Cantidad (Ton/año)
Piedra Caliza	217,566.74
Esquisto	54,391.68
Harina Cruda Total	271,958.42
Materia Prima Extraída Total	271,958.42

Cuadro 15. Composición de componentes utilizados como explosivo para la extracción de materias primas en la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

Compnente	Cantidad (Ton/año)
ANFO	12.21
Emulsión	0.25
Booster	0.12
Ezdet	0.12
Eztl	5.08 x 10 ⁻³

Cuadro 16. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de calcinación para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

Compuesto	Cantidad (Ton/año)
Arcilla Húmeda	125,129.37

Cuadro 17. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de molienda de arcilla para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

Compuesto	Cantidad (Ton/año)
Arcilla Húmeda	127,017.54

Cuadro 18. Cantidad de arcilla que ingresa al proceso de secado de arcilla para la producción de cemento adicionado con arcilla calcinada

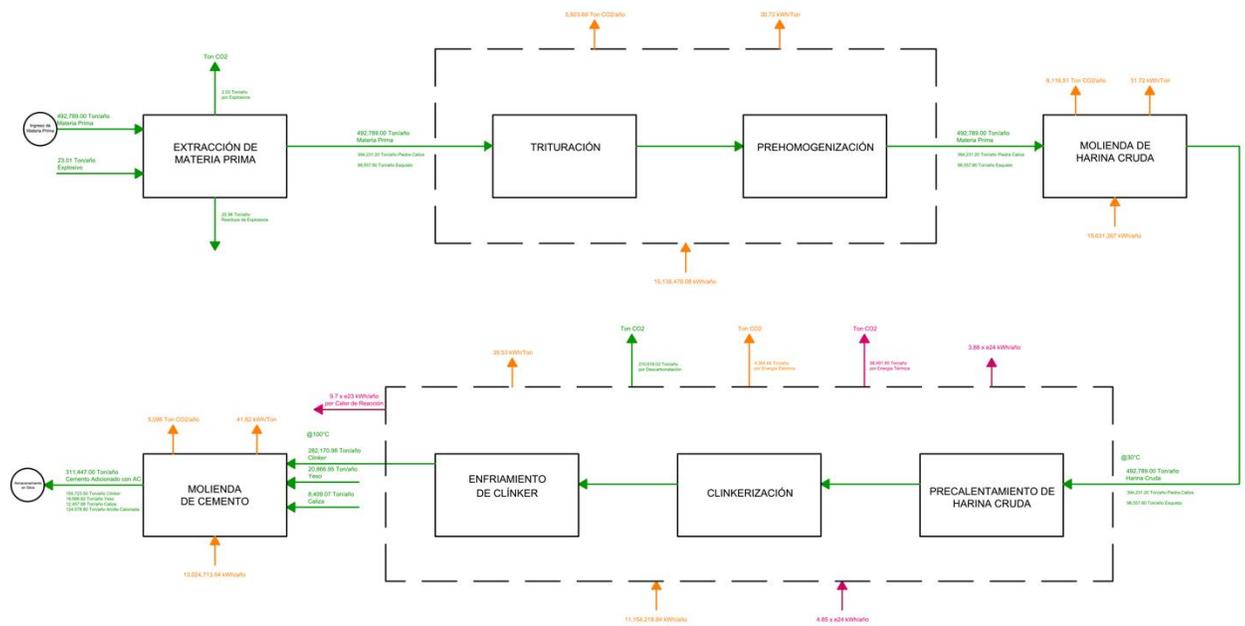
Compuesto	Cantidad (Ton/año)
Arcilla Húmeda	152,913.71

Cuadro 19. Identificación de código de color para diagrama de bloques

Código de color	Corriente correspondiente
	Balance de Masa
	Emisión de CO ₂ por Energía Eléctrica
	Emisión de CO ₂ por Energía Térmica

*En la siguiente página se utilizó este código de color para las Figuras 4 y 5

Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento Portland ordinario

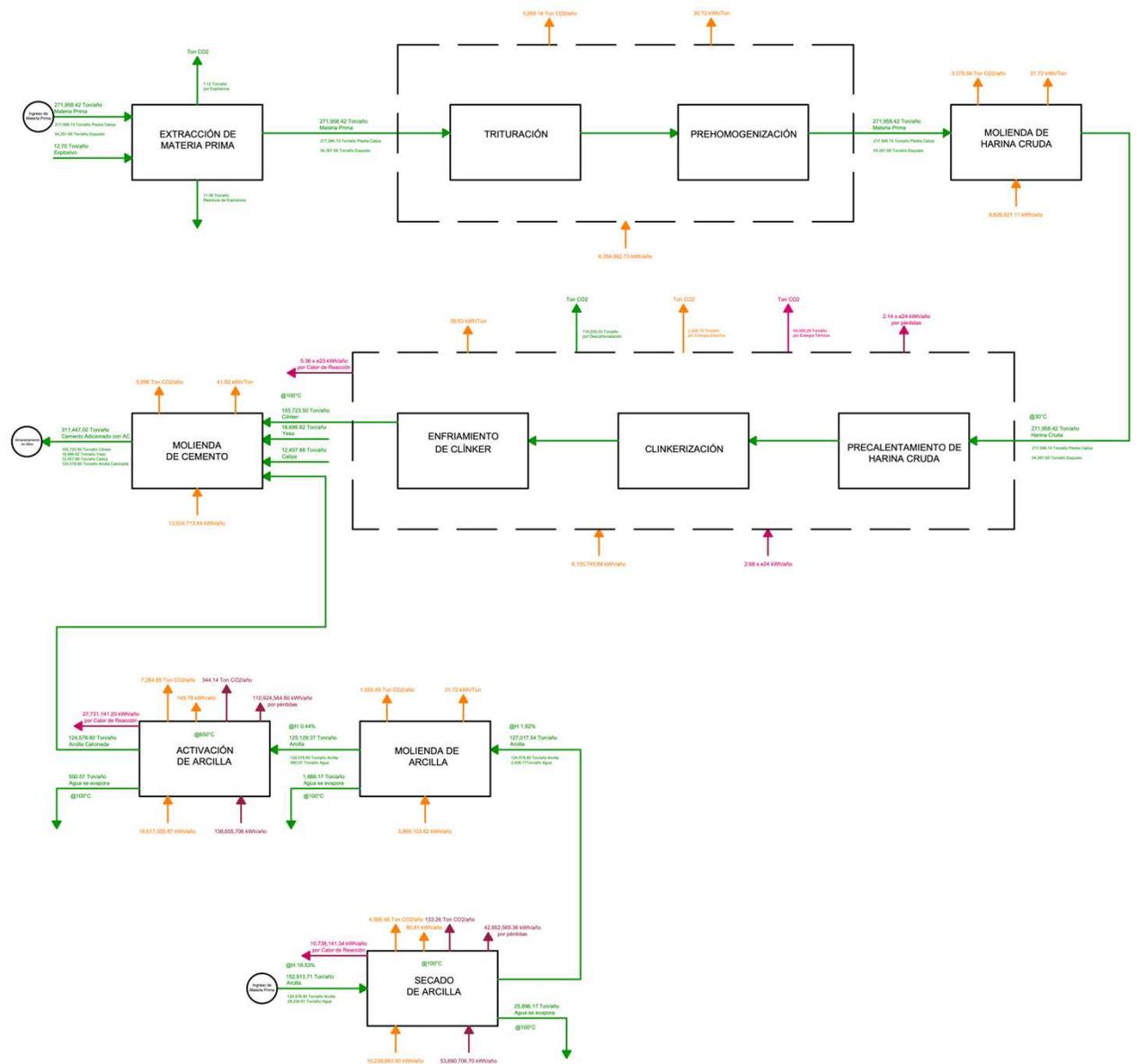


*Se utilizó el Código de Color ilustrado en Cuadro 20

*Los datos fueron brindados por la producción de la Planta Industrial de Cemento de Guatemala, en el año 2019

*Para las Corrientes de salida Energía térmica se asumió un 20% de calor de combustión y 80% de pérdidas (radiación, convección, gases)

Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción de cemento adicionado con arcilla calcinada



*Se utilizó el Código de Color ilustrado en Cuadro 20

*Los datos fueron brindados por la producción de la Planta Industrial de Cemento de Guatemala, en el año 2019

*Para las Corrientes de salida Energía térmica se asumió un 20% de calor de combustión y 80% de pérdidas (radiación, convección, gases)

Cuadro 20. Caracterización de arcillas calcinadas por fluorescencia de rayos X

No. de arcilla	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
1	43.55	24.37	14.35	0.56	0	0	0.81	1.20	0.05	1.91
2	51.34	21.95	9.24	0.36	0	0	0.90	1.45	0.03	1.03
3	64.20	16.78	4.42	2.46	0	0	2.71	3.23	0.03	0.60
4	44.81	32.07	5.63	0.15	0	0	0.37	0.42	0.02	0.83
5	58.59	22.06	5.19	0.24	0	0	0.25	1.21	0.03	0.54

Cuadro 21. Caracterización de arcillas calcinadas por difracción de rayos X

No. de arcilla	Cuarzo	Cristobalita	Caolinita	Microlina	Albita Alta	Lizardita	Hematita	Anortita	Andesina
1	33.2	0	55.8	0	0	0	0.2	0	10.7
2	28	0	3.9	24.1	0	0	1.5	42.2	0
3	27.2	0	32.2	0	0	0	2.4	0	17.1
4	0	0	77.1	0	22.9	0	0	0	0
5	2.3	0	76	0	0	21.6	0	0	0

Cuadro 22. Datos técnicos de equipo para resistencia a la compresión *ToniZEM*

Resistencia máxima medible	300 kN
Potencia	1.8 kW
Frecuencia	50 Hz
Altura de trabajo	1050 mm
Espacio requerido	700x775x1350 mm
Voltaje	3 – 230/400 V

Cuadro 23. Datos técnicos de equipo para perla fundida *Claisse M4*

Voltaje	115 VAC 115-230 VAC
Corriente	1 A
Frecuencia	50-60 Hz
Potencia	120 VA
Gas requerido	Propano

Cuadro 24. Datos técnicos de equipo para fluorescencia de rayos X

Modelo	ARL OPTIM'X
Inclinación de tubo de rayos X	66°
Potencia	200 W
Corriente máxima	10 mA
Voltaje máximo	50 kV

Cuadro 25. Datos Técnicos de equipo para difracción de rayos X *Panalytical*

Modelo	Empyrean
Radio	240 mm
Tubos de rayos X	Cobre 2.2 kW
Filtros beta	Níquel, Radiación K-beta
Ranura sollar	0.04 Radianes
Detectores	PIXcel (13.4, 11.2, 7.5 & 6mm)
Voltaje del compresor máximo	120 V
Frecuencia del compresor	60 Hz

Figura 8. Resistencia a la compresión *ToniZEM*



Fuente: Zwick, Roell, Toni Technik, 2021.

Figura 9. Equipo para perlas fundidas *Claisse M4*



Fuente: Malvern Panalytical, 2021.

Figura 10. Difracción de rayos X Empyrean *PANalytical*



Fuente: Mott, M., Panalytical, 2014.

Figura 11. Casete con muestra para análisis de difracción de rayos X (DRX)



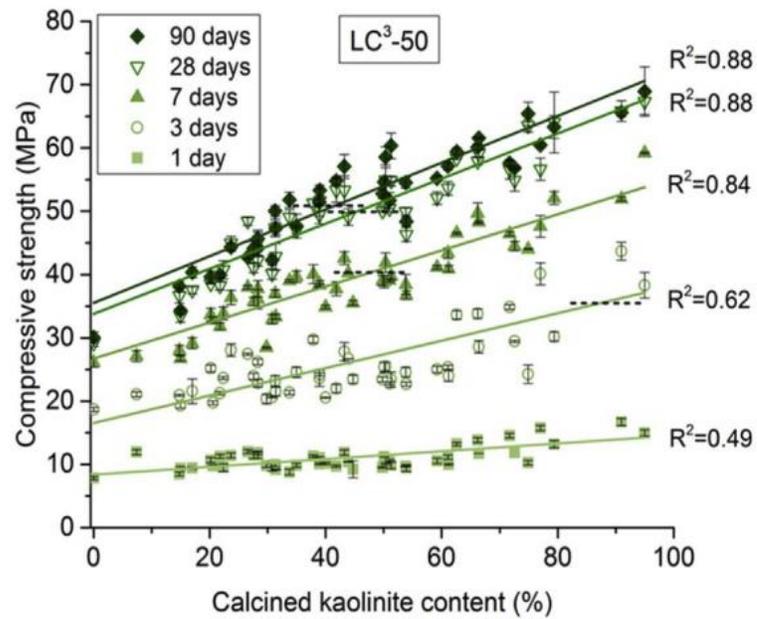
Fuente: Cementos Progreso, 2017.

Figura 12. Fluorescencia de rayos X ARL OPTIMIX



Fuente: Shaffer, C., ThermoFisher Scientific, 2013.

Figura 13. Correlación entre el porcentaje de Caolinita y la resistencia a la compresión de un material



Fuente: Scrivener et al, ELSEVIER, 2017.

Figura 14. Arcillas evaluadas por medio de la técnica de agua combinada



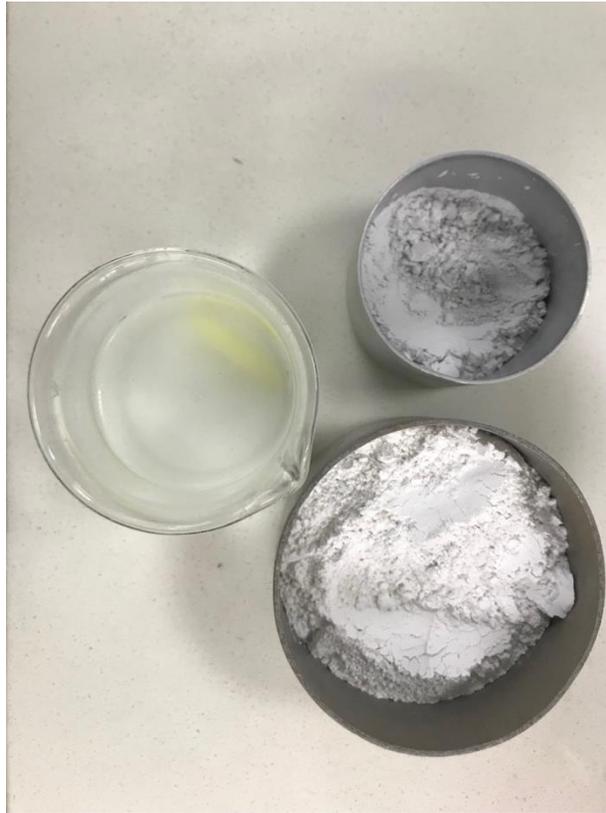
Fuente: propia

Figura 15. Caracterización de arcillas por fluorescencia de rayos X



Fuente: propia

Figura 16. Creación del medio básico para la técnica de agua combinada



Fuente: propia

Figura 17. Mezcla para técnica de agua combinada, en frascos para su solidificación



Fuente: propia

Figura 18. Mezcla de arcilla solidificada desenfrascada, lista para cortar en pastillas



Fuente: propia

Figura 19. Otras mezclas de arcilla solidificadas, listas para cortar



Fuente: propia

Figura 20. Ejemplo de mezclas que no solidificaron, al presentar una separación de fases líquida-sólida



Fuente: propia

*La flecha del lado izquierda señala la fase líquida
*La flecha del lado derecho señala la fase sólida

Figura 21. Pastillas cortadas horizontalmente con un grosor aproximado de 1 centímetro en triplicado



Fuente: propia

Figura 22. Mufla utilizada para elevar la temperatura de las pastillas a 400°C



Fuente: propia

Figura 23. Horno utilizado para llevar las pastillas a una temperatura de 110°C



Fuente: propia

Figura 24. Balanza Analítica empleada para pesar las pastillas para la técnica de agua combinada



Fuente: propia

Figura 25. Apariencia de la pastilla luego de pasar por el proceso de calentamiento para la técnica de agua combinada



Fuente: propia

Figura 26. Morteros de cemento Portland ordinario



Fuente: Propia

Figura 27. Morteros de cemento adicionado con arcilla calcinada



Fuente: propia