



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR

Universidad de la República
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Diploma en Construcción de Obras de Arquitectura

TESINA DE DIPLOMA

**INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DEL CEMENTO PÓRTLAND
UTILIZANDO ARCILLA CALCINADA COMO POSIBLE
SOLUCIÓN PARA MEJORAR LA ECOEFICIENCIA EN LA
INDUSTRIA CEMENTERA**

María Cecilia Álvarez

Montevideo, Uruguay

Agosto de 2024



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DEL CEMENTO PÓRTLAND UTILIZANDO ARCILLA CALCINADA COMO POSIBLE SOLUCIÓN PARA MEJORAR LA ECOEficiencia EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

Autor: María Cecilia Álvarez

Tesina de Diploma presentada al Programa de Posgrado Maestría y Especialización en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Diplomado.

Tutor: Dra. Arq. Gemma Rodríguez Baccino

Montevideo, Uruguay

Agosto de 2024

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, la profesora Gemma Rodríguez por su dedicación y apoyo durante el proceso de elaboración de mi tesina. Su pasión por la enseñanza y su profundo conocimiento en el tema han sido fundamentales para mi camino profesional.

A todos los profesionales y especialistas que me brindaron su tiempo, experiencias y conocimientos ampliando mi comprensión en la materia.

A Gustavo W. Silva, dueño de la cantera visitada, por abrirme las puertas de su cantera, por su amabilidad y disposición para responder a todas mis preguntas.

A las funcionarias de Biblioteca por su dedicación, paciencia y ayuda.

A mi hermano, cuyo constante estímulo ha sido fundamental en mi despertar hacia la conciencia ambiental en el ámbito del cemento. Gracias por haber sido fuente de inspiración en dicha tesina.

Por último, quisiera expresar mi sincero agradecimiento a mi compañera por su constante apoyo y por brindarme el aliento necesario para seguir adelante.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	3
LISTA DE TABLAS.....	5
LISTA DE ABREVIATURAS.....	6
RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
1.2 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.3 METODOLOGÍA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	12
2. CEMENTOS CON ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIAL SUSTENTABLE	
2.1 CEMENTO PÓRTLAND.....	13
2.2 CEMENTO EN LA ACTUALIDAD	15
2.3 ECOEFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO.....	21
2.4 ADICIONES MINERALES	23
2.5 ARCILLAS CALCINADAS	25
2.5.1 ARCILLAS DISPONIBLES.....	25
2.5.2 LA TECNOLOGÍA DE LA CALCINACIÓN EN LA ARCILLA.....	29
2.6 CEMENTOS CON ARCILLAS CALCINADAS	32
2.6.1 CEMENTO LC ³	34
2.6.2 ESTUDIO Y ENSAYOS	41
3. ESTUDIO DE CASOS.....	43
3.1 CASO 1: URUGUAY.....	43
3.1.1 ARCILLAS DISPONIBLES PARA LA ELABORACIÓN DE CEMENTO.....	49
3.1.2 ANÁLISIS Y VISITA A UNA CANTERA VIGENTE.....	51
3.2 CASOS EN OTROS PAÍSES	57
3.2.1 INDIA.....	58
3.2.2 CUBA.....	59
3.2.3 BRASIL.....	60
3.2.4 OTROS PAÍSES.....	62
3.3 ANÁLISIS Y SÍNTESIS FINALES DE LOS CASOS.....	63
4. CONSIDERACIONES FINALES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS.....	73

ANEXO I Doc. Ing. Gustavo Sánchez.....	74
ANEXO II Enrique Zubeldía.....	76
ANEXO III Gustavo Walter Silva García.....	77
ANEXO IV Ing. Luciano Gutiérrez.....	80
ANEXO V Ing. Matías Camou.....	81
ANEXO VI Ing. Virginia Hernández.....	82
ANEXO VII Fichas técnicas de los cementos.....	86

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1 Diagrama de flujo del proceso en seco para la fabricación del cemento Pórtland
- FIGURA 2.2 Consumo mundial del cemento por año
- FIGURA 2.3 Bolsas de cemento comercializados en Uruguay
- FIGURA 2.4 Mapa de Uruguay con la ubicación de las fábricas de Cemento locales
- FIGURA 2.5 Comparación de las resistencias de los cementos con la Norma UNIT 20:2022
- FIGURA 2.6 Utilización futura proyectada de combustibles alternativos en la industria del cemento
- FIGURA 2.7 Porcentaje de arcilla según tipo de suelo a nivel mundial
- FIGURA 2.8 Distribución de las arcillas más abundantes en el mundo
- FIGURA 2.9 Rango de temperaturas de deshidroxilación de algunas de las arcillas más representativas
- FIGURA 2.10 Rango de temperaturas y reacciones durante la calcinación de la arcilla
- FIGURA 2.11 Horno rotatorio de dos cuerpos para calcinar arcilla
- FIGURA 2.12 Porcentaje de compuestos de un LC³, el CPC 40 y un CPN
- FIGURA 2.13 Producción del LC³
- FIGURA 2.14 Comparativa entre CPN y el LC³
- FIGURA 2.15 Desarrollo de la resistencia a la compresión en los LC³ comparados con otros cementos
- FIGURA 2.16 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para la mezcla A-70 y A-40
- FIGURA 2.17 Resistividad superficial del hormigón para mezclas de 70 y 40 MPa con diferentes aglomerantes
- FIGURA 2.18 Resistencia a la compresión en microhormigones
- FIGURA 2.19 Absorción de agua en microhormigones
- FIGURA 3.1 Mapa de Uruguay con la ubicación de las canteras de arcilla
- FIGURA 3.2 Mapa de Uruguay con la ubicación de las canteras de arcilla y las fábricas de cemento
- FIGURA 3.3 Perfil de la columna del suelo de la cantera de Gustavo W. Silva
- FIGURA 3.4 Fotografía de la arcilla clara
- FIGURA 3.5 Arcilla con contenido de carbonilla vegetal
- FIGURA 3.6 Fotografía panorámica de la cantera
- FIGURA 3.7 Fotografía de la cantera

FIGURA 3.8 Fotografía de la cantera

FIGURA 3.9 Fotografía de la cantera

FIGURA 3.10 Proyección de la producción estimada del cemento en años

FIGURA 3.11 Casa Jhansi en India

FIGURA 3.12 Oficinas de la Embajada Suiza en India

FIGURA 3.13 Composiciones de cemento P-35, LC3-35 y LC3-50

FIGURA 3.14 Casa modelo en Santa Clara, Cuba

FIGURA 3.15 Presa de Jupíá en Brasil

FIGURA 3.16 Construcción del Templo Suelo Sagrado en Brasil

FIGURA 3.17 Fotografía actual del Templo Suelo Sagrado en Brasil

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 Producción de cemento anual en Uruguay

TABLA 2.2 Tipos de cementos y composición (NORMA UNIT 20:2022)

TABLA 2.3 Características y propiedades de los cementos locales en comparación a la Norma UNIT 20:2022

TABLA 2.4 Calor teórico calculado para arcillas calcinadas y materiales de comparación

TABLA 2.5 Velocidad de la tasa de corrosión

TABLA 3.1 Canteras según las distancias, de menor a mayor, a ANCAP Minas y Cementos Artigas

TABLA 3.2 Canteras según las distancias, de menor a mayor, a ANCAP Paysandú

TABLA 3.3 Canteras según las distancias, de menor a mayor, a la planta de cemento Charrúa en Treinta y Tres

TABLA 3.4 Canteras según las distancias, de menor a mayor, a la planta de Cielo Azul en Treinta y Tres

TABLA 3.5 Tabla resumen con los datos de las canteras y sus distancias a las fábricas de cemento

TABLA 3.6 Canteras locales de arcillas según dimensiones y estado

TABLA 3.7 Resultados de los elementos químicos de la arcilla de la cantera de G. W. Silva

TABLA 3.8 Resultado de la concentración de elementos de la arcilla de la cantera de G. W. Silva

TABLA 3.9 Comparativa de los requisitos químicos y mineralógicos de las arcillas caolinitas con la cantera de G. W. Silva

LISTA DE ABREVIATURAS

Al Aluminio

ANCAP Administración Nacional de Combustible Alcohol y Pórtland

AMs Adiciones minerales

AC Arcilla calcinada

ATG Análisis termogravimétrico

BIS Oficina de Estándares de la India

CA Calcio

CIDEM Centro de Investigación de Desarrollo de las Estructuras y los Materiales

CIMSA Compañía Industrializadora de Minerales Sociedad Anónima

CO₂ Dióxido de carbono

COSUDE Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación

CP Cemento Pórtland

CPII-Z Cemento Pórtland compuesto con material puzolánico

CP IV Cemento Pórtland puzolánico brasilero

CPC Cemento Pórtland Compuesto

CPE Cemento Pórtland con escoria

CPF Cemento Pórtland con Filler

CPN Cemento Pórtland Normal

CPN 50 Cemento Pórtland Normal de alta resistencia de Cementos Artigas

CPP Cemento Pórtland con puzolana

CSH Silicatos de Calcio Hidratados

DAT Diferencial de análisis térmico

DINAMIGE Dirección Nacional de Minería y Geología

DRX Difracción de rayos X

Fe Hierro

FICEM Federación Interamericana del Cemento

GEI Gases de efecto invernadero

H₂O Agua

IAP Índice de actividad puzolánica

ICPA Instituto del Cemento Pórtland Argentino

IEM Instituto de Ensayos de Materiales, Facultad de Ingeniería, UDELAR

IRAM Instituto Argentino de Normalización y Certificación

ISO Organización Internacional de Normalización

K Potasio

LCC Low Carbon Cement

LC³ Cemento de arcilla calcinada con piedra caliza

MA Minerales arcillosos

MIEM Ministerio de Industria, Energía y Minería

MCS Materiales Cementicios Suplementarios

Mg Magnesio

Na Sodio

NBR Norma Brasileira para productos químicos

ABNT Asociación Brasileira de Normas Técnicas

Si Sílice

Ti Titanio

TRC Centro de Recursos Tecnológicos

OH Hidroxilos

P Puzolana

PPI Pérdida por ignición

Ton. Tonelada

µm milésima de milímetro

UNIT Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

RESUMEN

La producción del cemento se ubica en uno de los sectores de mayor consumo energético en la industria de la construcción, pero también es uno de los mayores consumidores de recursos naturales y emisor de gases contaminantes. Para abordar estos desafíos, se han desarrollado diferentes tipos de cemento Pórtland, entre los cuales este trabajo tiene como objetivo la introducción y exploración del cemento Pórtland Compuesto (CPC) utilizando arcilla calcinada (AC) como posible solución para mejorar la ecoeficiencia en la construcción. Al permitir el uso de múltiples adiciones, este tipo de cemento facilita la reducción del clínker necesario en comparación con la utilización de una única adición.

El método de análisis de esta investigación consiste en una revisión de referencias bibliográficas orientadas a la utilización de arcillas calcinadas como componente clave en la formulación de CPC. Además, se realizaron entrevistas a especialistas y profesionales involucrados en la temática de las arcillas y los cementos en Uruguay.

La arcilla calcinada se implementa para reducir el uso del clínker en la fabricación del cemento, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental en de la industria de la construcción manteniendo las propiedades y el rendimiento del material.

Los resultados de esta investigación aportan al conocimiento en ecoeficiencia en la construcción, generando una mirada alentadora en la aplicación práctica del CPC con arcilla calcinada. El enfoque de este trabajo tiene como objetivo demostrar cómo se podría reducir el impacto ambiental de la industria del cemento y así poder promover políticas más sostenibles en el sector.

PALABRAS CLAVE

Cemento Pórtland compuesto, arcilla calcinada, ecoeficiencia.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La producción de materiales para la construcción implica grandes consumos de recursos naturales y emisiones de gases contaminantes. En los últimos años hubo una mayor concientización respecto al impacto ambiental en la fabricación y el consumo que los mismos dejan en el planeta. El mundo está atravesando un momento de transición energética, donde a través de la eficiencia energética y las energías renovables se busca disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los expertos aseguran que, para lograr el acuerdo histórico climático de París¹, el cual pretende mantener la temperatura media mundial por debajo de los dos grados centígrados (2°C), es necesario cambiar el modo de producir y consumir energía en todos los ámbitos (IRENA, 2018).

En el sector de la construcción, el hormigón es el material más versátil y con mayor utilización en la industria, el mismo se compone de una mezcla tripartita de agua, áridos y cemento. Una de sus mayores virtudes es su capacidad de poder soportar grandes cargas de compresión y su habilidad de moldearse en cualquier encofrado. Es por esta razón que varios autores, entre ellos Mehta y Monteiro (2006), comentan que el cemento, componente aglomerante del hormigón, es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial para la industria de la construcción. La producción de cemento Pórtland (CP), más comúnmente con composición a base de clínker, es una de las mayores generadoras de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial, después de la industria automotriz (Davidovits, 1994).

La emisión de estos gases contaminantes es la mayor responsable en colaborar con el calentamiento global, motivo por el cual existe una necesidad de reducir este tipo de contaminación y desarrollar técnicas sostenibles en la industria del cemento. Por cada tonelada producida de cemento se emite otra igual de dióxido de carbono a la atmósfera (Aitcin, 1998 entre otros). Asimismo, cuando el cemento se elabora a base de clínker, la calcinación se genera a grandes temperaturas que oscilan entre los 1.450°C, este proceso requiere de una gran cantidad de energía donde se libera el CO₂. Todo ese consumo energético produce un alto impacto ambiental que busca ser reducido mediante la aplicación de técnicas más sostenibles.

La industria cementera es uno de los campos de mayor crecimiento a nivel mundial. Abdul Aleem y Arumairaj (2012) indican que por año se utilizan alrededor de dos mil seiscientos millones de toneladas de cemento (2.600:000.000 Ton). Es evidente que esta cantidad irá aumentando a medida que pasen los años, en efecto ellos estiman que dentro de los próximos años esta cantidad aumentará en un 25%. Por un lado, aumenta su producción, pero, por otra parte, disminuye su materia prima; la piedra caliza, principal recurso para producir cemento Pórtland

¹ El acuerdo de París es el primer compromiso verdaderamente global para luchar contra la crisis climática. En 2015, 195 países y la Unión Europea firmaron un extenso y único acuerdo que tiene como objetivo mantener el calentamiento global muy por debajo de los 2°C (3.6°F), incluso los 1.5°C (2.7°F). World Wild Life Organization [WWL]. (2022, 01 de noviembre) <https://www.worldwildlife.org/discubre-wwf/historias/el-acuerdo-de-paris>

normal (CPN), sufrirá una importante escasez dentro de los próximos 25 años (Abdul Aleem, Arumairaj, 2012).

Conociendo estos detalles es inevitable pensar en materiales disponibles a nivel global que no emitan estas cantidades de gases contaminantes a la atmósfera y que no requieran de grandes consumos de energía y recursos naturales para producirse. De ahí que se detecta un grave problema climático que lleva a la búsqueda de la implementación de materiales ecológicos y amigables con el medio ambiente. Es por esta razón que la búsqueda de la sustitución del clínker por adiciones minerales (AMs) resultarían una solución a estos problemas ambientales.

Dentro de las AMs se encuentran las arcillas que abundan en el mundo y cualquiera sea su tipo, una vez calcinadas, se pueden utilizar para la fabricación del cemento. El cemento compuesto con arcilla calcinada resulta ser una buena alternativa para sustituir al cemento Portland normal (CPN). Con la producción de cementos con adiciones minerales se reduce la huella de carbono generada por la emisión de gases de efecto invernadero producidas de la quema de los combustibles fósiles de los hornos. A su vez, se consume menos cantidad de energía ya que las arcillas se calcinan a temperaturas mucho más bajas que el clínker. Los países que cuentan con grandes yacimientos de arcilla tienen la ventaja de la cercanía de la materia prima, logrando así, reducir la contaminación generada por el transporte del material.

La producción de cementos con arcilla calcinada se considera una vía prometedora hacia la ecoeficiencia por sus beneficios ecológicos (Castillo Lara et al., 2011). Al reducir el clínker en la fabricación del cemento, se disminuyen las emisiones de gases contaminantes y se reduce el consumo de energía porque requiere menos cantidad de temperatura para la calcinación. La sustitución del clínker en la fabricación del cemento, por otros materiales suplementarios, viene acompañado de varios beneficios a nivel ecológico y los mismos están asociados a ventajas económicas. Estas adiciones, cuando se agregan a hormigones, también mejoran sus propiedades mecánicas y su durabilidad. Es probable que aún falte la aprobación por parte del consumidor final, un tanto conservador, que se maneja por sus usos y costumbres, pero ya es inevitable la necesidad de reducir el impacto ambiental de esta industria.

1.2 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación es comprender y difundir las posibilidades de elaboración de cementos con arcillas locales, entendiendo las ventajas de su utilización en la industria de la construcción local.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Explorar las particularidades del cemento.
- Aportar conocimiento sobre la ecoeficiencia en la industria del cemento.
- Mostrar propiedades del CP con arcilla calcinada.
- Mencionar cómo se calcina y dónde se consiguen las arcillas.
- Aportar conocimiento sobre las adiciones minerales.

- Realizar un acercamiento para detectar dónde se pueden conseguir arcillas en Uruguay.
- Explorar las propiedades de la arcilla calcinada como material potencial para la elaboración del CP.
- Entender cómo el uso de la arcilla calcinada podría beneficiar a la industria cementera.
- Analizar experiencias en el uso de arcillas calcinadas en Uruguay y en otros países.
- Presentar conclusiones basadas en los hallazgos de la investigación para promover la adopción de CP con arcilla calcinada en la industria de la construcción.

1.3 METODOLOGÍA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la investigación es de carácter principalmente exploratorio, no es experimental. El diseño de la investigación se limita a estudiar los usos y propiedades de los cementos con arcillas calcinadas, así como también los posibles lugares de obtención de dichas arcillas para abastecer a las fábricas de cemento locales. Los mismos fueron elegidos por su impacto positivo en el medio ambiente y por la necesidad de que futuros trabajos puedan seguir avanzando e indagando hacia el desarrollo y posible empleo de estos cementos en nuestro país.

Con esta investigación se pretende generar conciencia del daño ambiental que genera la producción de cemento Pórtland Normal a base de clínker. A su vez, se intenta abordar la necesidad de empleo y desarrollo de nuevos cementos con menor huella de carbono y mejores propiedades a nivel constructivo.

Esta investigación indagará en el cemento compuesto con arcilla calcinada en diferentes países como así también en Uruguay. Se analizarán distintos ejemplos donde se haya empleado dicho cemento en obras de arquitectura.

El diseño de dicha investigación se basa en una extensa revisión de referencias bibliográficas especializadas en la temática de los cementos con arcilla calcinada; así como la realización de encuestas a especialistas, profesionales y técnicos locales involucrados con la temática de las arcillas y los cementos. Se localizaron canteras locales de arcillas, así como las distancias de ellas a las fábricas de cemento. Mediante la visita a una cantera se presentó información recopilada de la misma.

Las entrevistas realizadas fueron utilizadas como fuente de datos. A continuación, se detallan los entrevistados:

Doc. Ing. Gustavo Sánchez, delegado titular en representación de la Universidad de la República (UDELAR) en la Comisión Nacional de Evaluación Científica y Técnica. Profesor agregado y jefe del Departamento de Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de Facultad de Ingeniería (26 de julio, 2023). Comunicación personal.

Enrique Zubeldía, ex director de la División de Ingeniería y Obras de COMACO Refractarios (1 de julio, 2023). Comunicación telefónica.

Gustavo Walter Silva García, dueño encargado de la cantera padrón 789 (29 de julio, 2023). Comunicación personal y visita a la cantera de arcilla.

Ing. Luciano Gutiérrez, jefe de Minería y Geología ANCAP (28 de agosto, 2023) Comunicación personal.

Ing. Matías Camou, Gerente General de CIMSA (23 de mayo, 2024). Comunicación personal y visita a la planta de Peñarol, Montevideo.

Ing. Quim. Virginia Hernández, Química de Cementos Artigas (27 de julio, 2023). Comunicación personal.

Se dejará para un estudio futuro la factibilidad de producción de cemento Pórtland compuesto utilizando arcilla calcinada en el país. Estudiando la posibilidad de crear una producción a nivel industrial gracias a los yacimientos de materia prima en el país. Se postergará, para un estudio posterior, la prefactibilidad de la ecoeficiencia de la producción de este cemento compuesto con arcilla calcinada comparada con la ecoeficiencia de los cementos que se han comercializado y elaborado durante años en Uruguay, tales como los cementos Pórtland normales (CPN) y los Cementos Pórtland con filler calcáreo (CPF), tomando en cuenta que en Uruguay la empresa Cementos Artigas y la empresa CIMSA, está última más recientemente, ya producen el CPC.

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La tesina se compone de 4 capítulos.

El primer capítulo con una introducción donde se justifica la temática a investigar junto a los objetivos generales y específicos. Se describe también, la metodología y el alcance de la investigación.

El segundo capítulo abarca la temática del cemento y el concepto de ecoeficiencia, indicando cómo se compone el mismo y los tipos de cementos que se fabrican en el país haciendo mención a la norma UNIT 20:2022. Se trata la temática de las adiciones minerales introduciendo la arcilla calcinada como material sustentable para la fabricación del cemento. Se introduce el concepto de los cementos bajos en carbono: LC³, se indaga en los estudios y ensayos a los que se someten estos cementos.

En el tercer capítulo se presentan y analizan casos de estudio sobre empleo de cementos compuestos con arcilla calcinada en diferentes países y el empleo de los mismos en construcciones contemporáneas. Se analiza el empleo del CPC con arcilla calcinada en Uruguay y se efectúa un análisis de toda la información recopilada en la visita a una de las canteras actualmente vigentes en el país.

En el cuarto capítulo se presentan las consideraciones finales y sugerencias para futuras investigaciones.

Por último, se presentan las referencias bibliográficas y anexos.

2. CEMENTOS CON ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIAL SUSTENTABLE

2.1 CEMENTO PÓRTLAND

El cemento es un material inorgánico que data de principios del siglo XIX y sigue siendo uno de los principales productos utilizados en la industria de la construcción hasta la actualidad. Como mencionan Ruíz Rosa et al. (2017) este material al mezclarse con agua produce una pasta capaz de adherirse a materiales rocosos y endurece de manera progresiva aumentando su resistencia.

La norma UNIT 20 (2022) define al cemento Pórtland de la siguiente manera:

Conglomerante hidráulico obtenido como producto en una fábrica, que contiene al clínker como constituyente necesario. Es un material inorgánico finamente dividido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (pág. 6)

El cemento Pórtland se obtiene de la calcinación de la piedra caliza, arcilla y minerales a una temperatura aproximada de 1.450°C, produciendo el producto final llamado clínker. Este material se mezcla y es molido con aditivos como el yeso, para formar el cemento. Como bien hacen mención Castillo Lara et al. (2010), el clínker es el principal componente del cemento y el mismo se fabrica, principalmente con materiales que generan mucha contaminación al quemarse emitiendo grandes dosis de gases de efecto invernadero.

La producción de cemento Pórtland está asociada a la emisión de gases de efecto invernadero por el consumo de combustibles fósiles, el uso de energía eléctrica, y como mencionan Van Deventer et al. (2011) por la descomposición de la piedra caliza en el proceso de obtención del clínker. En ese proceso de descarbonatación de la piedra caliza, para dar el calcio necesario para formar silicatos y aluminatos en clínker, se liberan 0,53 toneladas de CO₂ por tonelada de clínker. Esta emisión de gases representa el 60%, el 40% restante está atribuido al consumo de energía.

El clínker está conformado, principalmente, por cuatro componentes principales: silicato tricálcico (C₃S), silicato bicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y ferritoaluminato tetracálcico (C₄AF). A su vez, existen otros componentes secundarios, como sulfatos alcalinos, óxido de magnesio y óxido de calcio (Castañón et al. 2012). Los materiales primordiales, como bien informan Mehta y Monteiro (2006), empleados en la fabricación del cemento deben contener un porcentaje de calcio (Ca), sílice (Si), hierro (Fe) y aluminio (Al). Estos materiales, provienen de la piedra caliza y de la arcilla, y allí se encuentran en forma de óxidos: óxido de calcio (CaO), óxido de sílice (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃).

Para facilitar la formación de los compuestos deseables dentro del cemento Pórtland es necesaria la presencia del clínker para lograr homogenizar la mezcla cruda antes del tratamiento térmico (Mehta y Monteiro, 2006). Los autores hacen mención a la necesidad de someter a estos materiales a una serie de operaciones que incluyen la trituración, la molienda y el mezclado de dichos componentes. Dicha materia prima se muele en molinos en forma de bolas o rodillos para convertirse en pequeñas partículas. Actualmente, como se observa en la figura 2.1, se utiliza para la molienda y la homogeneización de la materia prima hornos de proceso en seco que son energéticamente más eficientes que los hornos de proceso húmedo. Utilizando el proceso en seco se elimina el paso de evaporar el agua, logrando así reducir en gran medida el consumo energético. El proceso en seco consume combustibles fósiles en el orden de los 800kcal/kg de clínker cuando un horno con proceso húmedo requiere de 1.400 kcal/kg.

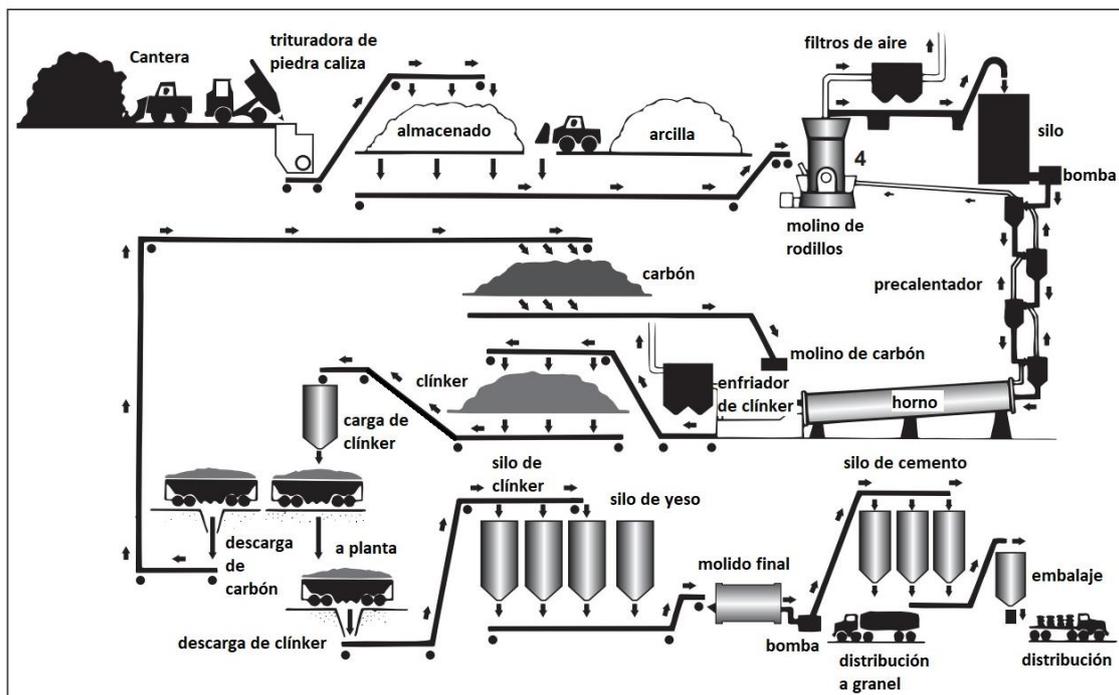


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso seco para la fabricación del cemento Pórtland.
(Fuente: Mehta y Monteiro, 2006).

La ilustración de Mehta y Monteiro (2006) describe el proceso de elaboración del cemento iniciando en la extracción de la materia prima, la piedra caliza, en la cantera. Una vez fraccionado el material se lo traslada en camiones a la trituradora para reducir su tamaño donde se lo va almacenando para luego mezclarlo con la arcilla logrando homogenizar el crudo en seco. Este material pasa del molino al horno a través un proceso de precalentado llegando al horno cilíndrico rotatorio. Al horno se le inyectan los combustibles fósiles, en la zona de quemado, donde las temperaturas alcanzan entre 1.450 a 1.550°C. Es aquí donde sucede la reacción química que completa el proceso de la formación del cemento Pórtland. Después de salir del horno, el clínker se somete a un proceso de enfriamiento a través del enfriador. El paso final en la producción consiste en pulverizar el clínker en partículas pequeñas entre 10 a 15 μm (milésimas de milímetro). Antes de llegar al molino final, al clínker se le agrega un 5% de yeso que ayuda a controlar el comportamiento del fraguado en el cemento.

Una vez terminado el proceso se consigue el producto final del cemento que se comercializa a granel o en bolsa. Cuando el cemento está seco, se encuentra en forma de polvo y no tiene propiedades de resistencia ni durabilidad. Mehta y Monteiro (2006) explican el proceso

mediante el cual el cemento desarrolla sus propiedades estructurales mediante la hidratación, una reacción química donde el cemento, al entrar en contacto con el agua, forma compuestos químicos conocidos como silicatos de calcio hidratado (CSH). Además, los aluminatos presentes en el cemento, reaccionan para formar etringita y monosulfato, los cuales influyen en el fraguado y el endurecimiento del cemento.

Es importante detallar que el cemento, por sí solo, no tiene capacidad de adquirir propiedades aglomerantes, por este motivo es que requiere combinarse con agua para reaccionar químicamente y así lograr unirse con los demás áridos de la mezcla.

2.2 CEMENTO EN LA ACTUALIDAD

Como bien se mencionó anteriormente, el cemento Pórtland cumple un rol muy importante en la industria de la construcción. Por año se consumen millones de toneladas de cemento a nivel mundial. En la figura 2.2 (FICEM, 2021) se puede observar la evolución del consumo del cemento a lo largo de la última década, incluyendo los años 2012 hasta 2021. Se puede ver una leve caída del consumo en los años 2015, 2017, 2018 y 2020 que pueden estar asociados a crisis económicas y a la pandemia sufrida por el SARS-CoV-2, pero a grandes rasgos los valores se mantienen constantes. También, se puede observar un pronóstico en aumento del consumo para el año 2021, lo que da como dato que el consumo del mismo es probable que se mantenga en aumento con el pasar de los años.

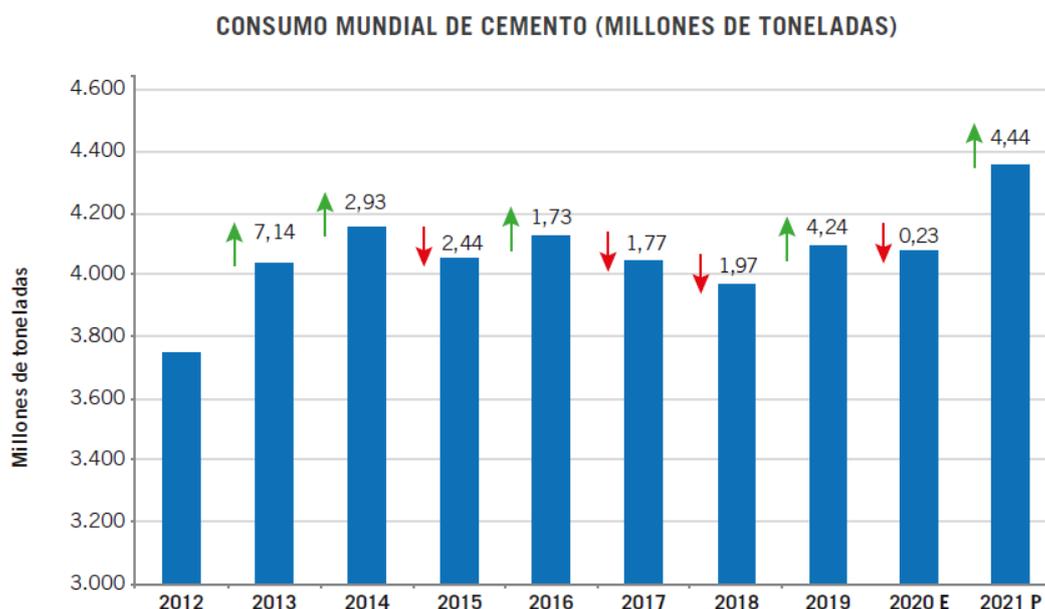


Figura 2.2 Consumo mundial del cemento por año (Fuente: FICEM, Informe estadístico 2021).

En cuanto al contexto de Uruguay en la tabla 2.1 (FICEM, 2021) se puede visualizar la cantidad de toneladas de cemento que se fabrican por año, siendo los años 2020 y 2021 valores estimados. Solo el año 2019 muestra una disminución sutil en la producción, pero se estimó un salto en lo que fueron los años siguientes. Con estos datos se podría decir que con el correr de los años será necesario ir produciendo mayor cantidad de cemento a nivel local para abastecer a la industria de la construcción uruguaya.

PRODUCCIÓN DE CEMENTO (MILES DE TONELADAS)

PAÍS	2017	2018	2019	2020 E	2021 E	% Var 2018/2017	% Var 2019/2018	% Var (E) 2020/2019	% Var(E) 2021/2020
Uruguay	720	812	737	826	893	12,8	-9,2	12,1	8,1

Tabla 2.1 Producción de cemento anual en Uruguay (Fuente: FICEM, Informe estadístico 2021).

Existen diferentes tipos y composiciones de cementos admitidos en Uruguay que la Norma UNIT 20 detalla y muestra en la tabla 2.2. La Norma uruguaya muestra cinco tipos de cementos según su composición. Los tipos de cemento son: cemento Pórtland normal (CPN), cemento Pórtland con filler calcáreo (CPF), cemento Pórtland puzolánico (CPP), cemento Pórtland con escoria (CPE) y el cemento Pórtland compuesto (CPC). En Uruguay casi que se ha dejado de fabricar el CPN y se está comercializando cemento Pórtland con filler (CPF) y cemento Pórtland compuesto (CPC), los cuales disminuyen las emisiones de CO₂, entre otras cosas. Actualmente, y hace relativamente poco, en Uruguay existe una empresa que produce y comercializa cementos con arcillas calcinadas donde las arcillas que utilizan se consiguen localmente, esta empresa es Cemento Artigas (Hernández, entrevista anexo VI). Por otro lado, la empresa CIMSA está desarrollando un cemento similar, pero aún se encuentra en etapa de experimentación.

Tipo de cemento	Designación	Composición (g/100 g)				
		Componentes principales				Componentes minoritarios
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento pórtland normal	CPN	100-95				0-5
Cemento pórtland con filler calcáreo	CPF	94-75			6 - 25	0-5
Cemento pórtland Puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento pórtland con Escoria	CPE	94-65		6 -35		0-5
Cemento pórtland Compuesto (1)	CPC	94-65	dos o tres componentes, con P + E + F entre 6 y 35 % y con F ≤ 25			0-5

(1) En los cementos pórtland compuestos, tanto en la bolsa como en el remito para el caso del cemento a granel, se deben indicar los nombres de las adiciones que se hayan incorporado (puzolana, escoria, filler calcáreo) en orden decreciente de contenido.

Tabla 2.2 tipos de cementos y composición (Fuente: Norma UNIT 20:2022)

En Uruguay, hace algunos años atrás, solamente existían dos marcas conocidas de cemento: Cementos Artigas y Cementos ANCAP. Actualmente la cantidad se duplicó y se incorporaron: Cielo Azul y Cementos Charrúa, de la empresa CIMSA. Con este dato se podría estimar que, en los próximos años, se pueda ver un aumento de las fábricas de cemento locales o de las plantas de las empresas ya existentes.



Fig. 2.3 Bolsas de cemento de: CPC 40 Cemento Artigas, CPF 40 ANCAP, CPC 40 Cemento Charrúa y CPF 40 Cielo Azul (Fuente: Ficha técnica Cemento Artigas, ANCAP, CIMSA y Cielo Azul 2024)

Cementos Artigas, como menciona su página web (2023), fue fundada el 15 de mayo de 1919 donde se instaló la Planta Industrial en el barrio de Sayago, departamento de Montevideo. Una vez finalizada la instalación de la planta comenzó la producción de Cemento Pórtland Artigas. En 1991 vendieron un paquete accionario de la Compañía Uruguaya de Cemento Pórtland a la firma Cementos Avellaneda S.A. con sede en Argentina. Según menciona la química de Cementos Artigas Ing. Hernández (entrevista, anexo VI), Cementos Artigas trabaja de forma colaborativa con Cementos Avellaneda de Argentina en sus plantas de Olavarría y San Luis. También comenta que la fabricación del clínker en Sayago está en desuso y están montando un nuevo molino en Minas, donde tendrá base la fábrica de Cemento.

La empresa ANCAP lleva sus siglas por ser la: Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Pórtland. La firma, como describe su propia reseña histórica (2023), es un Ente industrial del Estado creada el 15 de octubre de 1931. En lo que refiere a la fabricación del Pórtland, se autorizó la producción del mismo para cubrir las necesidades de la construcción de obras públicas. En 1956 se inauguró la primera planta de cementos ANCAP en Minas, y en 1962 se abrió la segunda planta en Paysandú. ANCAP, junto a Cementos Artigas, comparten espacio en el comité de cemento para las normas técnicas. Ambas empresas son la que cuentan con mayor peso a nivel Nacional, (Hernández entrevista personal, anexo VI).

La firma CIMSA (Compañía Industrializadora de Minerales Sociedad Anónima) comenzó comercializando con cemento sin pulverizar importado desde Turquía. Desde el año 2018, la sede de Montevideo ubicada en el Camino José Durán 4105, comenzó a expandirse y hoy en día se ha convertido en el centro de molienda y paletización del cemento que fabrican (Camou entrevista personal, anexo V). La empresa cuenta con una planta de fabricación de cemento donde fabrican el clínker por vía semihúmeda en el Departamento de Treinta y Tres, ubicada en la ruta 8, kilómetro 306. Según menciona el Gerente General de CIMSA (entrevista, anexo V), en esta planta se produce los distintos cementos Charrúa y también cuentan con su propio laboratorio.

La empresa Cielo Azul Cementos, como se detalla en su página web (2023), es una empresa joven creada en el año 2011. La planta cementera se ubica en el Departamento de Treinta y Tres, la misma se ubica en Camino la Pacífica Km 5. La empresa tiene una capacidad de 600.000 toneladas (Ton.) de cemento anuales. Actualmente la expansión de esta fábrica ha sido notable. Además de la fábrica operativa en Uruguay, que comercializada gran cantidad de hormigón, la empresa cuenta con otra planta en la Ciudad de Asunción, en Paraguay.

En el mapa de la figura 2.4 se visualizan las cuatro empresas de cemento existentes en Uruguay, localizados según su dirección. Cementos Artigas se ubica en Ruta 8 Km 114, Camino al Verdún 30.000 Minas, Lavalleja, Uruguay. ANCAP cuenta con dos plantas, la de ANCAP Minas ubicada justo al frente de Cementos Artigas en Ruta N8 km 113 y ANCAP Paysandú en el acceso al puente internacional General José Artigas. CIMSA cuenta con una planta en el Departamento de Treinta y Tres, ubicada en la ruta 8, kilómetro 306. Por otra parte, la planta de Cielo Azul en Uruguay se encuentra en Camino la Pacífica Km 5, en Treinta y Tres.



Fig. 2.4 Mapa de Uruguay con la ubicación de las fábricas de Cemento locales (producción propia)

En Uruguay Cementos Artigas antes elaboraba cemento Pórtland compuesto (CPC) con clínker mayoritariamente, luego filler calcáreo y un pequeño porcentaje de escoria importada, este cemento está aprobado y tabulado por las normas locales (Hernández, entrevista anexo VI). La escoria que utilizaban provenía de Brasil ya que no había materia prima local y con el tiempo todo se complejizó ya que los precios comenzaron a subir. No solo el problema era el costo de la escoria sino también la pandemia complejizó las conexiones y traslados entre países, obligándolos a indagar en recursos locales. A su vez, desde la firma de Cementos Artigas, que trabaja colaborativamente con Cementos Avellaneda de Argentina, utilizan combustibles alternativos en los hornos buscando la sustitución del clínker y así disminuir las emisiones de CO₂.

Actualmente la firma Cementos Artigas es la única empresa local que comercializa cementos compuestos con arcillas calcinadas, a la par de mantener la producción de un cemento Pórtland de alta resistencia, conocido como CPN 50. La empresa trabaja en colaboración con la firma Argentina Cementos Avellaneda S.A. y entre ambas han avanzado en el estudio de los cementos con filler calcáreo y puzolanas resultantes de la calcinación de arcillas (Bonavetti et al. 2018).

Como bien menciona la empresa en sus publicaciones técnicas, ellos han desarrollado en la fábrica argentina de Olavarría, el CPC-OL disponible en el mercado argentino desde febrero 2018, así como el CPC 40, disponible en Uruguay. Mediante avances en el estudio de los cementos con filler calcáreo y arcillas calcinadas, han llegado a la conclusión de que estos cementos aumentan la vida útil de las estructuras de hormigón y además contribuyen de manera positiva con el medio ambiente.

Este cemento Pórtland compuesto, de Cementos Artigas, se comercializa a granel y en bolsas de 25kg bajo el nombre de CPC 40. Como menciona su ficha técnica (CPC 40 Cemento Artigas, 2023) dicho cemento se obtiene por la molienda de clínker Pórtland, filler calcáreo, puzolanas, pequeñas cantidades de yeso y aditivos mejoradores de calidad. El CPC 40 está constituido por puzolanas artificiales, que se las denomina así porque adquieren sus propiedades puzolánicas mediante un tratamiento térmico industrial que transforma su naturaleza. Dicha puzolana artificial surge de la calcinación de arcillas, que, combinadas con el filler, el clínker, el yeso y aditivos dan como resultado el CPC 40. Este producto es considerado de eficiencia energética gracias a que se consume menos energía para la combustión, se generan menos CO₂ y consume menos piedra caliza en su fabricación.

Por otro lado, la firma ANCAP comercializa dos tipos de cementos: Cemento Pórtland Normal (CPN 40) y Cemento Pórtland con filler (CPF 40). El CPN 40, como bien mencionan ellos en su ficha técnica (2023) se obtiene de la molienda conjunta del clínker Pórtland, piedra caliza de alta pureza y sulfato de calcio. Este cemento se comercializa a granel y en bolsas de 25kg. También, fabrican el CPF 40 que se vende en bolsas de 25kg. Este cemento cuenta con la particularidad de contener filler calcáreo dentro de sus adiciones.

La empresa CIMSA comercializa el cemento Charrúa, incluyendo varios tipos de cemento. El Pórtland normal (CPN 40) se presenta en bolsas negras de 25kg, bolsones de 1.500kg y a granel. Además, ofrecen el cemento de albañilería en bolsas rojas de 20kg. También producen el cemento Pórtland con filler calcáreo (CPF 40), disponible en bolsas azules de 25kg, bolsones y a granel. Recientemente, comenzaron a comercializar el cemento Pórtland compuesto (CPC 40). Este cemento se obtiene a partir del clínker fabricado mediante el proceso semihúmedo, filler calcáreo, puzolanas importadas de Brasil, piedra caliza, escoria y pequeñas cantidades de yeso. El CPC 40, reconocido por su baja emisión de carbono, se comercializa en bolsas verdes de 25kg, así como en bolsones y a granel. Actualmente, están experimentando con cementos elaborados con arcillas calcinadas, sin embargo, estos productos aún no se comercializan ya que se encuentran en fase de desarrollo (Camou entrevista personal, anexo V).

Por otra parte, la fábrica de Cielo Azul trabaja con dos tipos de cemento: un cemento de albañilería, comercializado en bolsas de 20kg, y un cemento Pórtland con filler calcáreo (CPF 40). El CPF 40 se comercializa en bolsas de 25kg, bolsones de 1.500kg y a granel en camiones.

Conociendo los diferentes tipos de cemento de la industria uruguaya se pueden evaluar sus características y propiedades para determinar cuál es el que mejor se adapta a las necesidades que busca el mercado. En la tabla 2.3 se pueden comparar los distintos tipos de cemento de cada marca de la industria local con la Norma UNIT 20:2022.

	CEMENTOS ARTIGAS*	ANCAP*	CEMENTO CHARRÚA**	CIELO AZUL*	UNIT
Tipo de cemento	CPC 40	CPF 40	CPC 40	CPF 40	UNIT 20:2022
Tiempo de fraguado inicial (min)	196	-	240	205	>= 60
Tiempo de fraguado final (min)	-	-	5	240	-
Sup. Específica (m ² /kg)	346	-	390	445	>= 250
Retenido #200 (75μ)%	-	-	6	0,02	<= 15
Resistencia a la compresión 2 días	27,00 MPa	10,00 MPa	16,00 MPa	25,00 MPa	>= 10 MPa
Resistencia a la compresión 7 días	42,00 MPa	-	-	38,40 MPa	-
Resistencia a la compresión 28 días	52,00 MPa	40,00 MPa	42,00 MPa	47,70 MPa	>= 40 MPa

* Información suministrada por las fichas técnicas disponibles en las páginas web de cada empresa.

** Información suministrada por el Gerente General de la empresa.

Tabla. 2.3 Características y propiedades de los cementos locales en comparación a la Norma UNIT 20:2022 (Producción propia)

En la figura 2.5 se puede observar como el cemento CPF 40 de ANCAP cumple rigurosamente los requisitos establecidos por norma, logrando la menor resistencia a la compresión tanto en los primeros días como después de los 28 días. En contraposición, Cementos Artigas se destaca de todos los demás cementos alcanzando una mayor resistencia a la compresión tanto en los primeros días como al cumplir los 28 días de edad. Cementos Charrúas como Cielo Azul demuestran un buen comportamiento en términos de resistencia a la compresión, dando resultados prometedores. En conclusión, siendo el CPC 40 de Cementos Artigas el único cemento con arcilla calcinada se observa, que este tipo de cemento, cumple de manera satisfactoria con los requisitos de la norma UNIT: 20:2022.

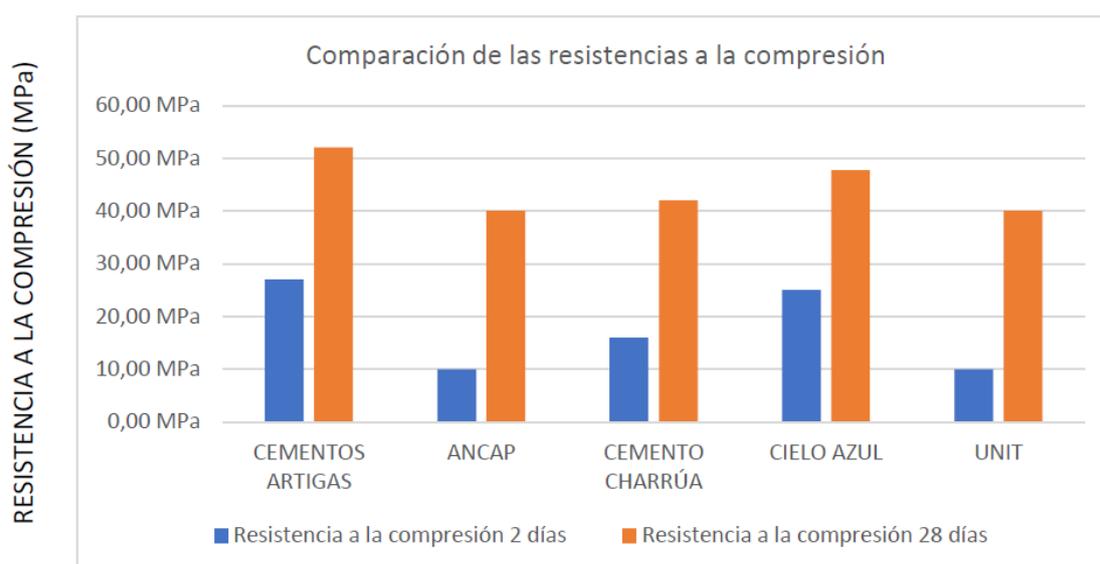


Fig. 2.5 Comparación de las resistencias a la compresión de los cementos de Uruguay con la Norma UNIT 20:2022 (Producción propia)

2.3 ECOEFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Actualmente, la industria del cemento como muchas otras industrias, se ven en la obligación de actuar de manera ecoeficiente con el planeta. La sociedad actual tiene mayor conciencia ambiental y evidencia interés en el cuidado del medio ambiente. Hoy en día los problemas ambientales se aprenden en las escuelas y son noticia constante en los medios de comunicación. Es por esta razón que se exige que todo proceso productivo este acompañado por políticas que conduzcan el desarrollo respetuoso con el medio ambiente. Por este motivo surge el término de ecoeficiencia en la producción del cemento.

Según la Norma ISO 14045:2012 de Gestión Ambiental de la Ecoeficiencia de sistemas productivos (2012), la ecoeficiencia es un concepto que busca la optimización de los recursos naturales y la minimización de los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso. En la industria del cemento este concepto es tendencia, la búsqueda constante de intentar reducir el maltrato que sufre el medio ambiente como así también lograr una producción del cemento más sostenible. ¿Cómo este concepto se ha trasladado a la fabricación del cemento? La materia prima es la primera fase de su producción, se está trabajando en la búsqueda de materiales sostenibles, como puzolanas o escorias, que pueden reemplazar al clínker, reduciendo así la cantidad de energía necesaria para la producción y las emisiones de CO₂ asociadas.

Por otro lado, se están implementando mejoras en la eficiencia energética durante los procesos de producción del cemento. Gracias a las nuevas tecnologías se han conseguido optimizar los hornos y sistemas de precalentamiento, utilizando y recuperando calor residual para reducir el consumo energético. FICEM (2018) hace mención al proceso de coprocesamiento en los hornos cementeros y lo describe como la sustitución parcial de los combustibles fósiles por combustibles alternativos de menor impacto ambiental. Se utilizan residuos del proceso industrial que sirven como energía térmica para la fabricación del cemento. La ventaja de utilizar estos residuos es que no se generan nuevos y se eliminan de manera eficiente los que se producen.

Actualmente la tecnología empleada en muchos países de Europa utiliza energía proveniente de residuos para los hornos de cementos. Localmente esta tecnología no está tan desarrollada, pero aspira a alcanzar grandes niveles de ecoeficiente en los próximos años. Según se ilustra en la figura 2.6, se estima que para el año 2030, numerosas regiones en vías de desarrollo logren superar el umbral del 10-20% de energía ecoeficiente en la fabricación del cemento, con proyecciones que sugieren un incremento del 35% para el año 2050. En los países más desarrollados se estima que estos porcentajes podrían alcanzar un 60% para el año 2050.

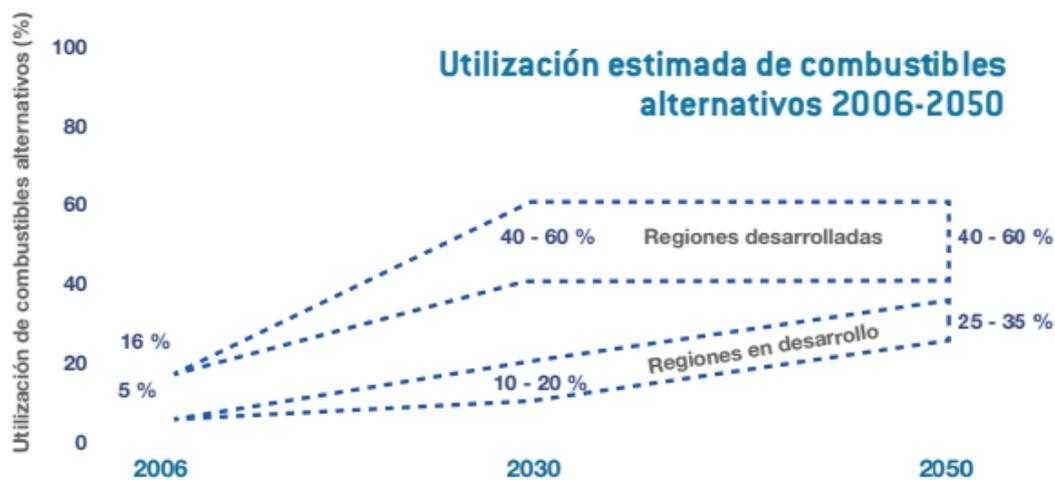


Figura. 2.6 Utilización futura proyectada de combustibles alternativos en la industria del cemento (Fuente: FICEM, 2018)

En la producción de cemento se estima que más del 50% de las emisiones de CO₂ son causadas por la descarbonización de las materias primas en la producción del clínker, el resto del porcentaje son el resultado del consumo de energía eléctrica y la quema de combustible (Ruíz Rosa et al. 2017). Es por esta razón que se entiende como buena alternativa, para disminuir las emisiones de CO₂, intentar lograr la reducción del clínker en el proceso de fabricación del cemento Pórtland. Una manera es buscando, sin perder las propiedades del mismo, sustitutos que sean medioambientalmente más amigable.

Aún no se ha encontrado la posibilidad de sustituir al 100% el clínker, pero una opción es utilizar materiales cementicios suplementarios (MCS), también denominados como adiciones minerales (AMs). Como bien detalla Alujas (2010), estos materiales, pueden ser las cenizas volantes (partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para generar energía) o las escorias de alto horno (proviene de desechos en los procesos industriales). El empleo de estas AMs conlleva la ventaja de reducir la permeabilidad de los hormigones, aumentando su durabilidad frente a agentes ácidos y potenciando su resistencia a edades tempranas.

En la construcción, cuando se emplea el cemento, se utiliza muchas cantidades de agua potable. El agua forma parte de la producción de la mezcla para formar la base cementicia, pero también se la utiliza para el lavado de equipos y para el curado del material. Con el cambio climático que está sufriendo el planeta no deja de ser un factor clave, para la ecoeficiencia del sistema, el cuidado del agua. Otro dato importante para reducir la contaminación es la logística eficiente, poder lograr reducir u optimizar el transporte en la distribución y en el proceso de fabricación también son puntos claves. Evitar largas distancias para el recorrido del transporte utilizando materia prima que se encuentra de manera abundante en la zona a trabajar sería una manera eficiente de reducir dicha contaminación.

Según la Norma ISO 14045 existen indicadores que miden la ecoeficiencia del proceso productivo, donde se pueden cuantificar y medir los resultados de aquellas categorías que tienen un elevado impacto ambiental. Los autores Ruíz Rosa et al. (2017), para poder evaluar

estos indicadores en la industria del cemento, experimentaron con cementos de varios tipos, donde concluyeron que los cementos con mayor porcentaje de arcilla calcinada (AC), sustituyendo parcialmente el clínker, se comportaban mejor a la reducción del impacto ambiental. Una estrategia, en la búsqueda de los profesionales para generar un aumento en los indicadores de la ecoeficiencia, fue la disminución en el consumo de electricidad en el proceso de molienda de los materiales para la obtención de AC.

En resumen, la ecoeficiencia en la fabricación del cemento implica una serie de medidas que sirven para lograr reducir el impacto ambiental de su producción. Dentro de estas medidas está la optimización de recursos naturales, la reducción de los gases contaminantes, la gestión sostenible y la implementación de prácticas más sostenibles con el entorno. Estos esfuerzos buscan hacer que la industria cementera sea más respetuosa con el medio ambiente.

2.4 ADICIONES MINERALES

En la búsqueda de la ecoeficiencia, en la fabricación del cemento, nace la incorporación de las adiciones minerales (AMs) para la composición del cemento. Según Mehta y Monteiro (2006) estas adiciones pueden ser clasificadas por su grado de reacción puzolánica, como, por ejemplo: ceniza volante, escoria de alto horno, sílice activa o arcillas calcinadas. Las AMs para la construcción, pueden dividirse entre adiciones naturales, las cuales se emplean en su estado natural provenientes de rocas volcánicas y minerales, y adiciones artificiales, que han sido sometidas a modificaciones químicas y mineralógicas con el fin de adquirir propiedades puzolánicas.

Hidalgo (2015) es su trabajo de tesis menciona que un material se clasifica como puzolánico cuando, ya sea de origen natural o artificial, es de naturaleza inorgánica compuesto principalmente por sílice o aluminio-silíceo. Por sí solo, este material no muestra propiedades hidráulicas; sin embargo, cuando se reduce su fineza y entra en contacto con agua a temperatura ambiente, el mismo reacciona con el hidróxido de calcio favoreciendo el proceso de hidratación (Castillo Lara et al., 2011). La actividad puzolánica se hace evidente cuando los elementos activados presentes en la adición mineral reaccionan con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación de los silicatos del cemento Pórtland. El hidróxido de calcio, que aporta muy poco a la resistencia de la pasta se disuelve rápidamente en agua, crea huecos y reduce la resistencia de los morteros. El filler reduce la porosidad y aumenta la compacidad, mientras que las puzolanas, además de esto, generan silicato de calcio hidratado, el cual posee una densidad menor que ayuda a mejorar la resistencia. Es por esta razón, que la gran ventaja de los materiales silíceos finamente pulverizados, como la puzolana, radica en su capacidad para combinarse con el cemento, reaccionando con el hidróxido de calcio libre y generando compuestos hidráulicos que disminuyen la porosidad, aumentan la compacidad de las mezclas y mejoran su resistencia.

Las cenizas volantes son un subproducto resultante de la quema de carbón en plantas industriales. Como menciona Joshi (2010) a medida que el carbón se quema, las impurezas minerales y los materiales no combustibles se funden convirtiéndose en pequeñas partículas finas. Estas partículas se componen de óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3), calcio (CaO) y otros compuestos minerales. El CPC obtenido a partir de ceniza volante, en comparación a los CPN, de las pruebas de laboratorio realizadas por Duxson et al. (2007), demuestran que son materiales más durables y resistentes que pueden reducir la cantidad de

clínker en el cemento. La ventaja de los CPC a base de ceniza volante, es que actúan como fuente de aluminosilicato, ofrecen beneficios económicos y mejoras prometedoras en relación al cemento Portland convencional (Norton, Provis, 2020).

Las escorias de alto horno, como describen Soliman et al. (2010), son subproductos obtenidos en el proceso de elaboración de hierro en los altos hornos industriales. Estas escorias contienen varios componentes, incluyendo óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), calcio (CaO), magnesio (MgO) entre otros. Una de sus aplicaciones más comunes es como adición mineral en la producción del cemento, donde pueden mejorar las propiedades del cemento y reducir la cantidad de clínker, disminuyendo las emisiones de CO_2 . Nasvi, Ranjith y Sanjayan (2014), se refieren a la preparación de cementos especiales con la escoria activada alcalina mencionando que la misma reduce la necesidad de silicato de sodio y por ende los impactos ambientales asociados a su uso. El uso de esta adición permite un mejor desarrollo de la resistencia temprana a temperaturas ambiente, reduciendo el elevado calor inicial del curado de estos cementos. Los CPC a base de escoria granulada han demostrado tener mayor resistencia temprana que el CPN a temperatura ambiente (Hassan, Arif y Shariq, 2019).

El humo de sílice, también conocido como sílice fume o microsilica, y según detallan Mehta y Monteiro (2006), es un subproducto de la producción de silicio metálico y de la fabricación de ferrosilicio y silicio metálico. Consiste en partículas extremadamente finas de sílice amorfo que se obtienen a través de la combustión de material de sílice en hornos eléctricos. Esta adición tiene diversas aplicaciones, pero primordialmente se la utiliza en la industria del cemento por su excelente capacidad de resistencia a la compresión (Mazloom et al. 2004). Con referencia al humo de sílice se ha comprobado que a medida que aumenta el porcentaje en que se emplea esta adición también se aumenta la resistencia del CPC. Esta adición juega un rol importante en el desarrollo de su resistencia, como señala Okoye (2016), el tamaño de partícula fina del humo de sílice aumenta la estructura densa, lo que hace que la mezcla compuesta sea más homogénea aumentando así la reacción y su resistencia.

Por otro lado, caso de estudio de este trabajo, existe la arcilla calcinada (AC) que es un material cerámico que se obtiene a través de la cocción controlada de arcilla a altas temperaturas. Durante el proceso de calcinación la arcilla sufre una serie de modificaciones en su composición expandiéndose y formando una estructura porosa. La AC tiene variedad de aplicaciones en la industria de la construcción debido a su baja densidad y propiedades aislantes, es ideal para cuando se requiere un material liviano y aislante.

Las AMs pueden modificar las propiedades del cemento contribuyendo en la obtención de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. La influencia de las AMs en la composición y rendimiento de los cementos forman un papel importante en el desarrollo de la reducción del impacto ambiental en la industria de la construcción. Todas las adiciones minerales contribuyen a la disminución del clínker en la producción del cemento, es por esta razón que proporcionan un efecto positivo para el medio ambiente. Actualmente se está orientando al uso de arcillas calcinadas por su fácil acceso ya que arcillas hay en todas partes del mundo y cualquiera sea su tipo se las puede utilizar para fabricar cemento. A diferencia de las otras AMs, en Uruguay la AC se puede obtener localmente sin necesidad de importarla o de implementar tecnologías de avanzada.

2.5 ARCILLAS CALCINADAS

2.5.1 ARCILLAS DISPONIBLES

A nivel global existen distintos tipos de adiciones minerales (AMs). Davidovits (1994) comenta que la mayoría de ellas son recursos cada vez más escasos, es por esta razón que la arcilla calcinada (AC) surge como una solución alentadora. La principal razón por la cual la AC promete un uso positivo en la fabricación del cemento es porque la arcilla se encuentra de manera abundante en el mundo y para la composición del cemento se puede utilizar arcilla calcinada de cualquier tipo (Hanein et al., 2022).

Los minerales arcillosos (MA) se obtienen de la parte superior de la corteza terrestre (Diaz et al., 2022). El término arcilla presenta una diferencia con el término de arcilla mineral. La definición de arcilla es presentada por Diaz et al. (2022) como una sustancia natural compuesta principalmente por minerales de grano fino, que bajo el efecto de agua es plástica pero cuando se la cocina se endurece. En cambio, los minerales arcillosos se definen como filosilicatos y otros minerales que brindan plasticidad a la arcilla y ofrece dureza bajo el efecto de la cocción. Los filosilicatos comparten una capa de estructura cristalina e incorporan agua. Esta agua se presenta entre las capas como uniones débiles de moléculas de agua (H₂O) y de manera más fuerte como grupos de hidroxilos (OH) que forman parte de las capas. Cuando la arcilla se cocina, estos grupos de OH y el agua se remueven del material.

Los MA son el resultado natural de muchos de los silicatos formados de rocas. Estos se suelen formar como producto de la interacción de silicatos y agua en condiciones ambientales. Generalmente los MA se forman como granos sueltos y son fácilmente erosionados y transportados por las mareas y corrientes de agua o aire formando grandes depósitos de arcilla gruesa. En estos depósitos, donde los minerales también están enterrados, los mismos pueden seguir sufriendo cambios químicos y transformaciones en su mineralogía. Los depósitos de arcilla se originan de dos maneras principales. Los depósitos primarios se forman mediante la alteración in situ de rocas areniscas, mientras que los depósitos secundarios se desarrollan a partir de la erosión y posterior acumulación de arcillas redepositadas (Diaz et al., 2022).

Existen diferentes tipos de arcilla a nivel global, Ito & Wagai (2017) describen diez tipos de grupos de arcillas a nivel mundial: gibbsita, caolinita, illita/mica, esmectita, vermiculita, clorita, óxido de hierro, cuarzo, no cristalino entre otros. Los autores comentan que la arcilla se encuentra en la corteza terrestre, en los sedimentos del océano y en la atmósfera. La arcilla es uno de los componentes principales del suelo terrestre. La arcilla contiene propiedades de plasticidad y viscosidad en suelos húmedos, y la misma puede encontrarse en formato de polvo en el aire.

En la figura 2.7 se puede apreciar el porcentaje de cada tipo de arcilla, tanto en la capa superior del suelo como en la capa subterránea del mismo, revelando su composición en ambas profundidades. Se puede apreciar que la composición mineral de la arcilla difiere ampliamente en los diferentes órdenes del suelo.

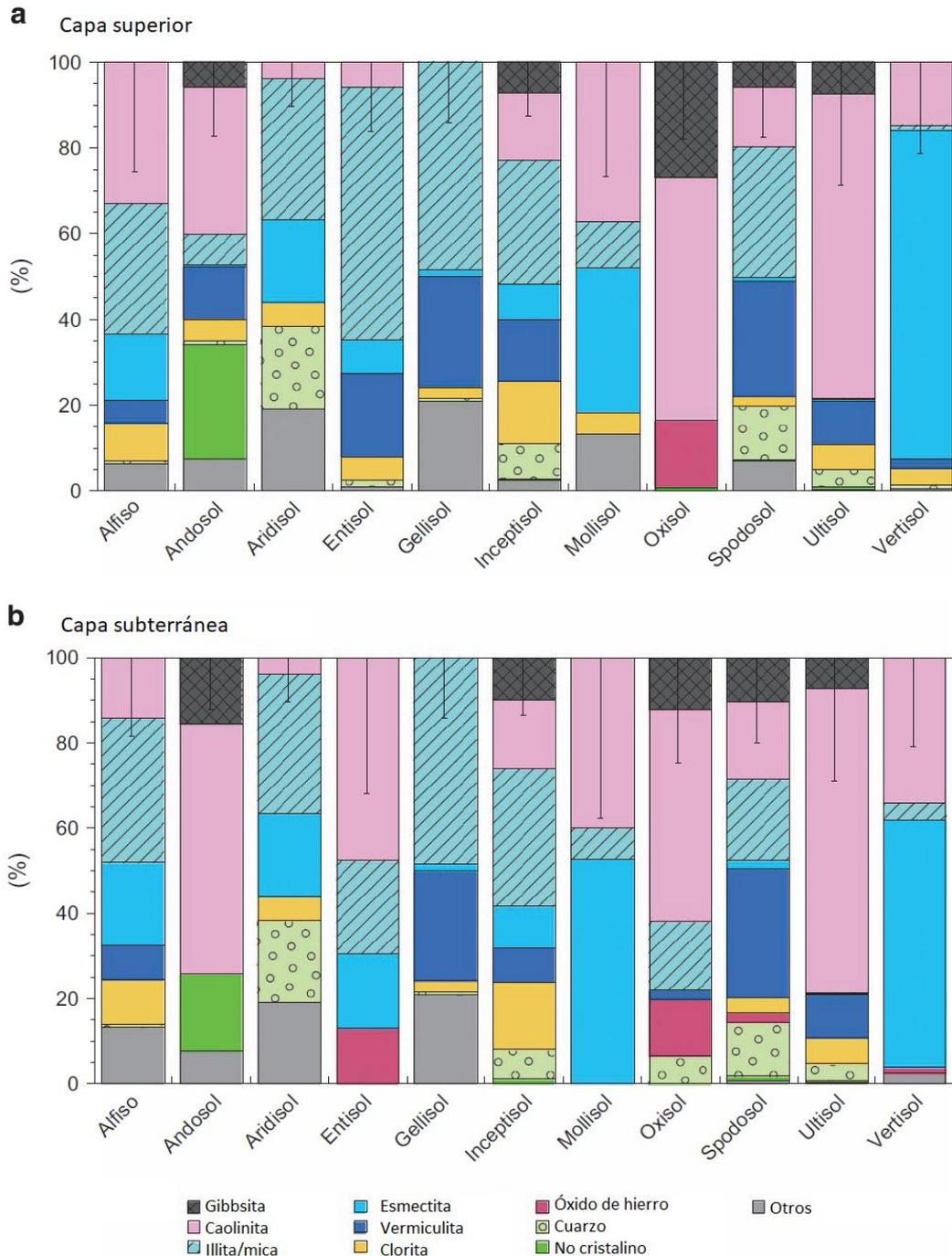


Figura. 2.7 Porcentaje de arcilla según tipo de suelo a nivel mundial (Fuente: Ito y Wagai, 2017)

Los autores recopilaban literatura variada sobre las arcillas en el mundo, y mediante un conjunto de datos del mapa global se elaboraron, mediante softwares científicos, mapas con la distribución de arcilla a nivel mundial. Ellos recopilaban información de todos los tipos de arcillas,

llegando a la conclusión de que las arcillas que más abundan en el mundo son: la illita/mica, la caolinita, la esmectita y la vermiculita. En la figura 2.8 se puede valorar como estos minerales están distribuidos por el planeta de manera abundante, tanto en la capa superior del suelo como en la inferior. Gracias a este mapa, se puede estimar que, en la región de América del sur, los dos tipos de arcilla más predominantes son la illita/mica, la caolinita y algo de esmectita. Este fenómeno se debe a las características del suelo y a la humedad de la zona.

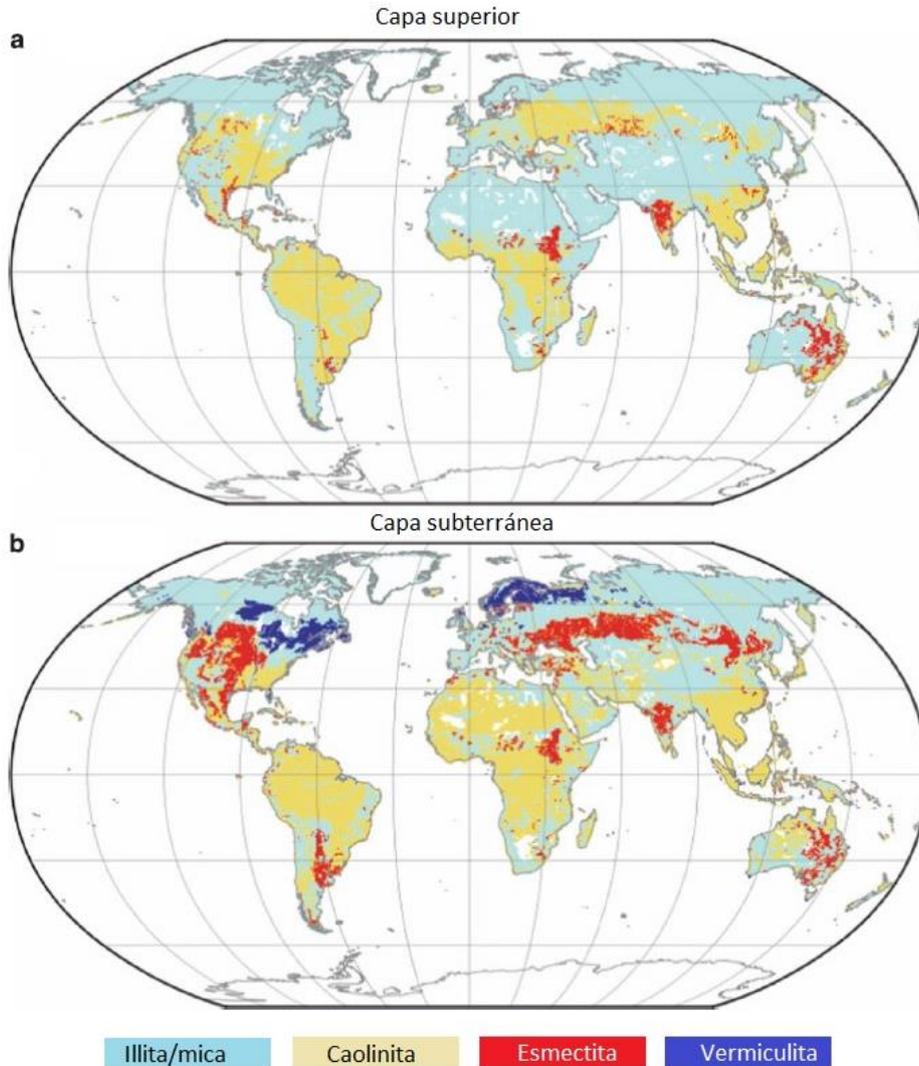


Figura. 2.8 Distribución de las arcillas más abundantes en el mundo (Fuente: Ito y Wagai, 2017)

Diaz et al. (2022) reconocen a la caolinita y la esmectita como las arcillas más utilizadas para las AMs, también éstas son los productos finales más comunes de la descomposición de rocas que no son de naturaleza sedimentaria. Los autores expresan que los climas fríos favorecen la formación de illita y clorito, mientras que los climas más tropicales benefician la formación del grupo de las caolinitas. La caolinita puede generarse a partir de una variada gama de aluminosilicatos, con un PH relativamente ácido, una actividad de sílice moderada y niveles bajos de álcalis. Por otra parte, el otro conjunto de minerales arcillosos de la familia de las esmectitas, utilizado para las AMs y las rocas que contienen una abundancia de estos minerales,

suelen ser nombradas como bentonitas. Las bentonitas se originan a partir de la transformación del vidrio volcánico presente (Diaz et al., 2022). La formación de esmectitas requiere una alta proporción de agua y una fuente de magnesio en relación a la roca. Esto se da, por ejemplo, cuando las cenizas volcánicas se depositan en aguas marinas. Por esta razón, es común encontrar presencia de esmectitas en zonas volcánicas del planeta.

Las arcillas caolínicas no siempre son de colores blancos ya que pueden contener cierta cantidad de otros minerales. En los depósitos de arcillas caolínicas suelen encontrarse micas, esmectitas y cloritos. Otros minerales asociados a estos depósitos de arcillas son los óxidos, hidróxidos de hierro y el aluminio. Cuando la arcilla caolinita es activada de manera correcta es la que mejores propiedades muestra para ser utilizada como AMs. De todos modos, los estudios recientes mencionados por Diaz et al. (2022), han demostrado que no es necesario altos niveles de pureza en las arcillas. Se ha demostrado que utilizando arcillas con un 40% en peso de minerales arcillosos (MA) del grupo de la caolinita se llega a una resistencia mecánica equivalente al CPN con un reemplazo del clínker en un 30% a los 7 días. La presencia de impurezas, como los carbonatos, pueden llevar a efectos muy positivos en la reactividad de la arcilla calcinada.

Las arcillas del grupo de las caolinitas son consideradas como buenas candidatas para el uso de AMs cuando las mismas son calcinadas. No pasa lo mismo con las arcillas de las illitas y cloritos, ya que estas han demostrado un rendimiento más bajo en lo que respecta a los AMs cuando son calcinadas. Este fenómeno se debe al proceso de cocción y cómo se comporta la estructura interna del mineral ante la calcinación. Este último grupo de arcillas requiere de temperaturas más altas que la caolinita lo que da como resultado una reacción puzolánica lenta. Se ha estudiado que las arcillas caolínicas son las que mejor rendimiento y reacción puzolánica han demostrado. Sin embargo, estudios recientes han confirmado un gran potencial en arcillas impuras y comunes (Diaz et al., 2022). Los minerales arcillosos del grupo caolinita tienen una estructura de capas diferente al grupo de las illitas y esmectitas.

Como bien detallan Diaz et al. (2022), los cementos compuestos de arcilla calcinada que contienen principalmente minerales de esmectita y un poco de caolinita suelen presentar una actividad puzolánica y reacción más lenta en comparación a los cementos compuestos con caolinita. Sin embargo, ellos han explicado que la pureza de la arcilla no es necesaria para la fabricación de CPC con arcilla calcinada, como tampoco es contraproducente el uso de minerales no arcillosos o arcillas con pocas cantidades de AM de caolinita. Es importante tener en cuenta que, debido a la estructura cristalina, las arcillas “comunes” son menos reactivas y requieren de mayores temperaturas durante el proceso de calcinación, aunque estas temperaturas siguen siendo significativamente inferiores a las necesarias para la producción del clínker. En la figura 2.9 se detallan las diferentes temperaturas requeridas para calcinar las distintas arcillas.

	ΔOH^- (wt.%)	Mineral de arcilla	Temperatura de deshidroxilación (°C)								
			300	400	500	600	700	800	900	1000	
Grupo de caolinitas	~ 14.0	Caolinita	█	█	█	█	█	█	█	█	█
		Diquita	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Grupo de esmectitas	4.3 – 5.0	Nontronita	█	█	█	█	█	█	█	█	█
		Montmorillonita	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Micas verdaderas y frágiles	4.5 – 5.3	Muscovita	█	█	█	█	█	█	█	█	█
		Illita	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Figura. 2.9 Rango de temperaturas de deshidroxilación de algunas de las arcillas más representativas (Fuente: Snellings et al., 2022)

2.5.2 LA TECNOLOGÍA DE LA CALCINACIÓN EN LA ARCILLA

Los depósitos de arcilla, como bien se mencionó anteriormente, se encuentran en la naturaleza mezclados con minerales arcillosos (MA) y no arcillosos. Hanein et al. (2022) en el estudio que hacen sobre la tecnología de la calcinación de la arcilla, hacen mención a las propiedades de estos minerales según su tipo. Las arcillas, según su valor industrial, se clasifican por lo general por su estructura interna y por su tamaño en cuatro grupos. Existe un primer grupo, el caolín industrial, con mayor contenido de los minerales del grupo de los caolines, que tiene propiedades para el uso de cementos refractarios. En segundo lugar, la arcilla bentonítica que contiene un alto porcentaje del grupo de la arcilla esmectita, apreciada por su capacidad de expansión volumétrica. Está el tercer grupo de arcillas, denominadas de “paligorskitesepiolita”, que son utilizadas por sus propiedades superficiales y de reactividad. Por último, están las arcillas “comunes”, que están mezcladas con diferentes minerales arcillosos, como son la illita, esmectitas, caolinitas y minerales asociados. Este último grupo es un componente clave de la investigación que aborda la calcinación de la arcilla para su uso como AMs.

La cantidad de arcilla existente en el planeta es suficiente para cubrir la demanda de la producción del cemento. La arcilla calcinada (AC) contiene propiedades puzolánicas que logran mejorar las características físicas, químicas y de sostenibilidad del cemento (Hanein et al., 2022). Remontando a la historia, el uso de la arcilla se remonta a los inicios de la construcción, empleándola en la fabricación de ladrillos, que continúa siendo uno de los productos más utilizados hasta el día de hoy.

Los autores Hanein et al. (2022) indican que existen distintas etapas para lograr la elaboración de la AC. En primer lugar, está la obtención de la materia prima: la arcilla. Este mineral se extrae de canteras o depósitos naturales con maquinarias y equipamiento adecuado. El terreno se limpia y se remueve la capa de suelo vegetal por encima de la capa de arcilla. La extracción tiene que ser hecha con cuidado prestando mucha atención para asegurar la calidad del material extraído. Una vez extraída la materia prima se la deposita al aire libre y se la mezcla con las otras arcillas, en algunos casos, dependiendo del tipo de arcilla, es necesario triturarlas para homogenizar la mezcla y conseguir partículas más pequeñas.

La extracción de la arcilla puede generar varios residuos de minerales que se tienen que desechar al extraer la arcilla. Por suerte, en muchos casos, se reutilizan todas las capas de tierra para darles otro uso sin generar desperdicios. La primera capa de suelo vegetal puede usarse como relleno para cubrir las excavaciones abiertas que ya no se necesitan. Por otro lado, la roca que se obtiene de las extracciones puede utilizarse como material de revestimiento o agregados gruesos en la industria de la construcción (entrevista personal, anexo III). Mientras mayor sea la calidad de arcilla que se quiera obtener, mayor será su desperdicio, ya que en este proceso hay que desechar varios minerales de la extracción para conseguir una arcilla más pura.

Hanein et al. (2022) explican que antes de la calcinación, la arcilla tiene que ser secada y molida. Un método común es dejarla secar al sol al aire libre de manera natural; es importante tener en cuenta la época del año para evitar periodos con mucha humedad. Otra manera de secarla es mediante un tratamiento térmico en hornos de pre-secado. De todos modos, el tipo de secado a utilizar siempre estará sujeto a las propiedades y locación de la arcilla.

En cuanto a la calcinación de la arcilla, Hanein et al. (2022) argumentan que ocurren tres fenómenos en la etapa de calcinación: la deshidratación, deshidroxilación y la recristalización

como se puede observar en la figura 2.10. En la figura se resume las distintas reacciones que se llevan a cabo durante la calcinación. Durante la deshidratación se libera agua que estaba acumulada en los poros del material y el mismo pierde masa. En la etapa de deshidroxilación se liberan los hidroxilos (OH) formados por un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno, estos requieren de mayor temperatura para removerse. Una vez que la arcilla se calcina a altas temperaturas (entre 350-950°C), un grupo de hidroxilos se desprenden y son liberados como agua. Este proceso donde se rompe la estructura cristalina es llamado deshidroxilación. Por último, Snellings et al. (2022) mencionan que ocurre la recristalización a temperaturas superiores a los 850°C, donde la estructura desordenada se convierte en fases cristalinas más estables.

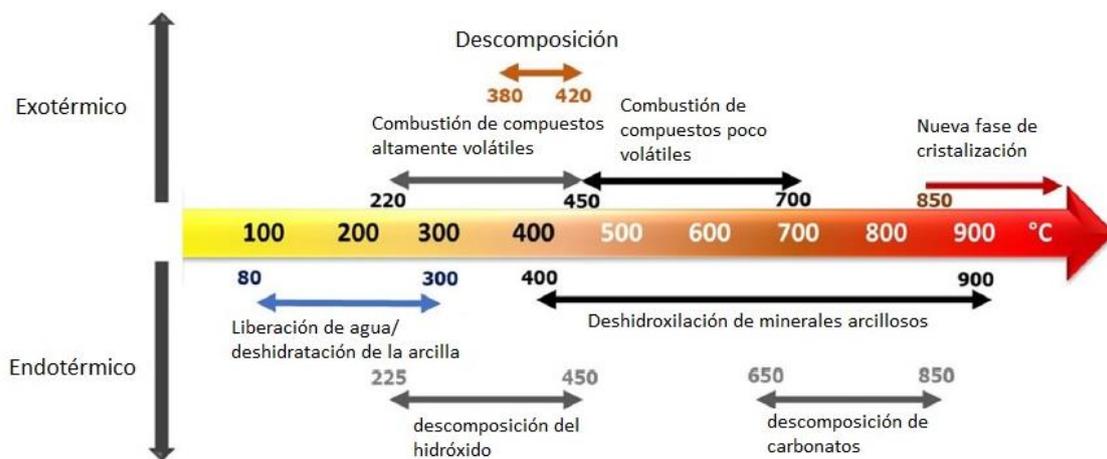


Figura. 2.10 Rango de temperaturas y reacciones durante el proceso de calcinación de la arcilla (Fuente: Hanein et al., 2022)

Según Hanein et al. (2022), las reacciones resultantes de la calcinación varían en función del tipo de arcilla y se han reportado diferentes niveles de temperatura necesarios. Por ejemplo, se ha observado que la caolinita requiere de temperaturas que oscilan entre 400 y 600°C para que reaccione a la deshidroxilación, mientras que la illita precisa de temperaturas que van desde 450 hasta 700°C para experimentar dicha reacción. De todos modos, para que se produzcan estos fenómenos hay varios factores a tener en cuenta como son: la finura del mineral, la presión atmosférica, la humedad y la estructura interna de la arcilla. Hanein et al. (2022) sostienen que hay que evitar temperaturas iguales o superiores a los 950°C en las caolinitas y las illitas porque se pierde el poder de puzolanicidad. Para que la reactividad sea favorable y la arcilla se active, es importante mantener un control de la temperatura según el tipo de arcilla a implementar.

Para el proceso de calcinación se utilizan diversos métodos de cocción. El horno rotatorio es el más usual y el que mejor resultados de uniformidad brinda (Sharma et al., 2021). En la figura 2.11 se visualiza el esquema de un horno rotatorio de dos cuerpos. La arcilla se introduce en la entrada del horno, generalmente en la parte superior. El horno es un cilindro que gira sobre su eje longitudinal asegurando que la arcilla rote en su interior y se exponga de manera uniforme a las altas temperaturas. Este tipo de horno está dividido en dos partes, el primer cuerpo donde se alimenta con el material crudo y el segundo cuerpo de descarga de mayor calor que es donde se encuentra la llama. La arcilla es sometida al proceso de calcinación en la zona de mayor temperatura y es aquí donde se elimina el agua y las impurezas presentes en la arcilla. Durante

todo este recorrido la arcilla experimenta cambios químicos que la vuelven más estable. A medida que la arcilla avanza la misma se conduce a través del horno hacia la zona de enfriamiento. Es en este sector donde el mineral se enfría de manera gradual para salir del horno como arcilla calcinada.

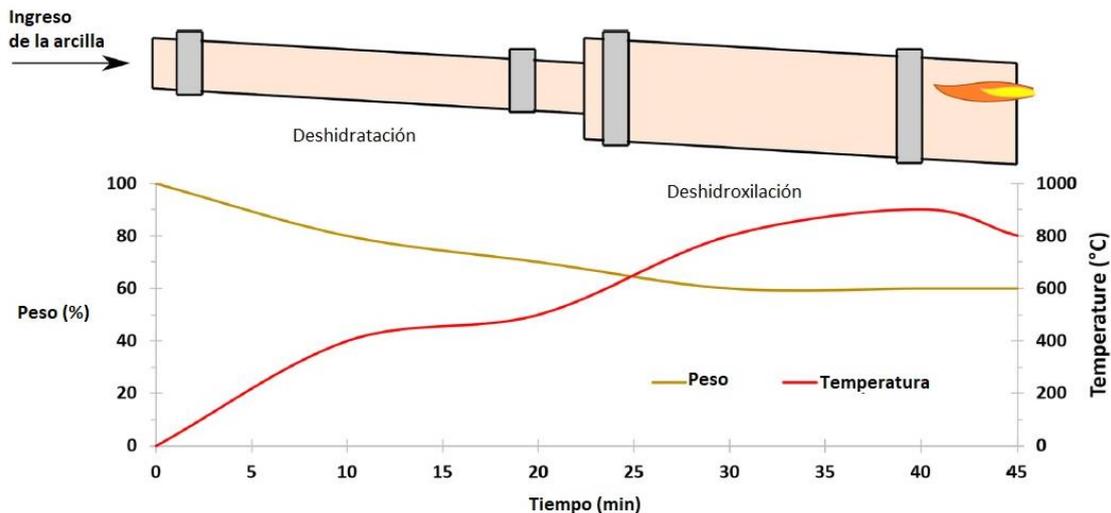


Figura. 2.11 Horno rotatorio de dos cuerpos para calcar arcilla (Fuente: Hanein et al., 2022)

Además del horno rotatorio, existe otro método de calcinación, llamado calcinación “flash” y como su nombre lo indica es una calcinación que sucede muy rápida, se le transfiere calor con gas sólido tan solo en segundos. Para este tipo de calcinado la materia prima tiene que ser tratada previamente en un polvo seco y fino. Hanein et al. (2022) reportaron que para obtener un material con alta puzolanicidad, a partir de la calcinación de la caolinita, se consigue que en 0,5 segundos se lleguen a temperaturas de 950°C siendo estas las condiciones más adecuadas. Este tipo de calcinación puede ser más eficiente energéticamente en ciertas aplicaciones al tener menor tiempo de residencia en comparación al horno rotatorio.

La elección entre el tipo de calcinación a utilizar dependerá siempre del tipo y las propiedades de arcilla a utilizar como también los recursos disponibles. Por lo general, es más común el uso del horno rotatorio pero la calcinación por gas sólido puede resultar más eficiente según los escenarios, pero también requiere de mayor tecnología y por ende de mayor costo de inversión. Siempre la decisión final estará dada por las necesidades y recursos económicos de cada planta.

Una vez terminado el proceso de calcinación generalmente la arcilla se enfría para continuar su proceso. El método más común utilizado para enfriamiento es la utilización de aire, pero también existe el enfriamiento húmedo, que consiste en utilizar agua fría. La ventaja de utilizar aire es que puede permitir la recuperación del calor para reutilizarse como aire de combustión para el precalentamiento brindando eficiencia energética al sistema. Hanein et al. (2022) mencionan que, luego de la calcinación y dependiendo del proceso utilizado, la arcilla calcinada logrará una finura deseada. Sin embargo, la AC puede llegar a requerir pasar por un proceso de molienda.

De la entrevista con la Ing. Hernández (entrevista personal, anexo VI) se aludió los desafíos que enfrentan las empresas al utilizar arcilla calcinada en la producción de CPC. Definir qué tipo de proceso de calcinación se utilizará es uno de los principales desafíos. Por otro lado, existen otros puntos que tienen que ver con las habilitaciones locales y trámites necesarios ante los entes gubernamentales. Otro de los factores a tener en cuenta es el color de la arcilla, cuando tienen mucho óxido de hierro se ponen de un tono rojizas causando rechazo en el consumidor final que suele ser tradicional y se maneja por sus usos y costumbres.

Hanein et al. (2022) han demostrado que la calcinación de la arcilla tiene un efecto mucho menor de huella de carbono que otros materiales. Como mencionan los autores, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dependen de varios factores a tener en cuenta, por un lado, el transporte del material puede ser uno de los contaminantes con mayor influencia en el sector. Por otro lado, la molienda y el secado de los materiales tienen un significativo consumo de energía que también está asociado a la emisión de estos gases contaminantes. Es por esta razón que hay que considerar y estudiar en conjunto todos los procesos que forman parte de la producción de un material para considerar si es realmente amigable con el medio ambiente.

2.6 CEMENTOS CON ARCILLAS CALCINADAS

Después de explorar el proceso de calcinación y cómo se obtiene la AC, es fundamental comprender cómo esta materia prima transformada puede desempeñar un papel importante en la fabricación de cementos sostenibles. La AC, se ha convertido en un componente esencial en la formulación de cementos que ofrecen ventajas en términos de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. En este contexto, se indagará en los cementos con AC y su impacto en la industria de la construcción.

La puzolana, en este caso la arcilla calcinada, desempeña un papel importante cuando la misma es incorporada al cemento, mejorando la resistencia mecánica y su durabilidad (Bonavetti et al., 2018). Con esta incorporación existen cambios en la estructura de poros de la pasta cementicia donde la pasta se vuelve más homogénea y uniforme, mejorando así su permeabilidad. La incorporación de puzolanas en el cemento puede reducir la demanda de clínker, lo que puede hacer que la producción de cemento sea más sostenible. No hay que dejar de lado que los efectos de la puzolana en el cemento varían según el tipo de puzolana utilizada.

La puzolana tiene grandes ventajas para el cemento, actúa bien ante los ataques químicos y se logra hormigones más compactos, lo que los hacen menos porosos (Hernández, entrevista anexo VI). A medida que se aumenta la cantidad de puzolana las propiedades del cemento también mejoran. Uno de los puntos a tener en cuenta, es que estos cementos con arcilla calcinadas tienen una reacción puzolánica lenta lo cual genera que, a edades tempranas, las resistencias sean bajas. El proceso de ganancia de la resistencia aumenta y mejora recién a partir de los siete días de edad. Una manera de mejorar la reacción puzolánica es utilizando una molienda más fina, o sea aumentando la finura del material, de esta manera se logra mejor índice de actividad puzolánica. Para entender las propiedades de las puzolanas se realizan pruebas y estudios para determinar las propiedades de estas adiciones.

Para el proceso de la elaboración del CPC con arcilla calcinada se parte de la piedra cruda, las mismas cuentan con un alto porcentaje de sílice y aluminio. Primero se tritura la materia y por último se la activa con temperatura. Una vez calcinada, se acopia el material, puede ser a cielo

abierto o bajo techo. En el proceso de fabricación se carga el material al molino del cemento junto con el resto de las adiciones, yeso y filler calcáreo (Hernández, entrevista anexo VI).

Como menciona el Dr. Ing. Sánchez (entrevista, anexo I) y según a lo expuesto anteriormente, la temperatura de cocción de la arcilla variará según su composición. Cuanto menor es la calidad de la misma mayor es la temperatura que requiere, así y todo, la calcinación genera menos temperatura que calcinar el clínker. El Ingeniero también comenta que el clínker se cocina a altas temperaturas, cerca de 1.350°C a 1.450°C, generando gases contaminantes y mucho consumo energético para lograr esas altas temperaturas. El proceso de fabricación, en su conjunto, resulta en costos significativos; en definitiva, la producción del clínker se torna muy costosa. Por otro lado, la arcilla, que se calina a menor temperatura, reduce en cierta manera el consumo energético y no produce los gases contaminantes de la quema producidos en la producción del clínker. En la tabla 2.4 de Hanein et al. (2022) se puede apreciar las temperaturas prácticas de calcinación para arcillas y materiales de comparación.

Producto	Reactivo (s)	Materia prima por producto kg/kg ^b	Temperatura práctica de calcinación (°C)
Metacaolín	Caolín (1:1 arcilla)	1.16	600–950
Pirofilita deshidroxilada (Anhídrido de pirofilita)	Pirofilita (2:1 arcilla)	1.05	800–950
BCSA clínker ^c	Piedra caliza, arcilla, y yeso	1.46	1250–1300
CP clínker	Piedra caliza y arcilla	1.66	1425–1500
MgO	Magnesita	2.09	600–900
CaO	Calcita	1.78	800–1000

^aSin considerar la humedad

^bSin considerar la humedad ni los desechos mineros

^cSuponiendo un clínker compuesto por 30% de yeelimita, 60% de belita y 10% de ferrita (en peso); BCSA significa calcio belítico sulfoaluminato

Tabla 2.4 calor teórico calculado para arcillas calcinadas y materiales de comparación. (Fuente: Hanein et al., 2022).

Como se mencionó anteriormente, el componente principal del clínker es la piedra caliza que se extrae de la naturaleza, por lo cual hay que estudiar muy bien sus componentes. Para ajustar la producción del clínker, que se forma de calcinar la piedra caliza con la arcilla, hay que ajustar las arcillas de interés. Por ejemplo, como indica Sánchez (entrevista, anexo I), si se obtiene la caliza de la zona del Departamento de Treinta y Tres en Uruguay, que generalmente presenta un bajo contenido de alúmina, será necesario utilizar arcilla con alto contenido de óxido de alúmina, la cual suele completarse con arena.

Las prácticas de mejoras en la industria del cemento se centran en la sustitución parcial del clínker, reduciendo el consumo energético de su fabricación, en lugar de introducir procesos químicos completamente nuevos (Sharma et al. 2021). Como bien mencionan los autores, el reemplazo del clínker por AMs permite una reducción en el impacto ambiental. Entre estas AMs disponibles, como la ceniza volante, su capacidad de sustitución del clínker está limitada a un porcentaje tope; las mismas están escaseando en algunas zonas del mundo y se estima que habrá menos a medida que se vayan eliminado las centrales térmicas de carbón (revista LC³, 2022). Por otro lado, las escorias, que permiten mayor proporción de sustitución, son escasas a nivel mundial.

2.6.1 CEMENTO LC³

Los cementos conocidos como LC (Low Carbon), que aún no se comercializan en Uruguay ni están mencionados en las normas de cementos del Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, son cementos con baja emisividad de CO₂. Scrivener (2010) menciona que este cemento propone una alternativa sustentable al medio ambiente reduciendo en un gran porcentaje las emisiones de CO₂, traduciéndose en menor producción de clínker y por ende menor consumo energético.

Sharma et al. (2021) introducen el concepto de uno de los cementos desarrollados recientemente: el LC³ un cemento bajo en carbono de arcillada calcinada con piedra caliza; el número tres se debe a la cantidad de compuestos que tiene. En estos cementos, la alúmina de la AC y los carbonatos presentes en la piedra caliza reaccionan conjuntamente, en combinación con la reacción puzolánica de la arcilla calcinada (AC) y el efecto filler de la caliza, creando una interacción entre los tres componentes principales: clínker, el filler y la arcilla calcinada. Esta sinergia es lo que permite la sustitución del clínker en un gran porcentaje.

La reducción de CO₂ en los cementos LC³ puede alcanzar más de un 30% en comparación con los cementos normales, y esto varía según la composición del cemento. La arcilla calcinada mejora la durabilidad de los cementos LC³ en un 40%, esto es resultado de su bajo contenido de calcio (Antoni et al. 2012).

La norma UNIT 20:2022 permite la elaboración de cementos con filler calcáreo, sustituyendo hasta un 25% del clínker por filler. Los cementos LC³ están compuestos por 50% de clínker, 30% de arcilla calcinada, 15% de piedra caliza y 5% de yeso (Forero, 2020). Estos cementos tienen la particularidad de tener mayor cantidad de AC en relación al filler, que es menor. En cambio, en los cementos CPC que se fabrican en Uruguay, el filler está en mayor proporción que la arcilla calcinada. En la figura 2.12 se puede ver un esquema de una bolsa de cemento LC³, una bolsa de CPC 40 de Cementos Artigas y un cemento CPN, donde se puede apreciar la diferencia en los porcentajes del filler de la piedra caliza entre las dos primeras bolsas. Al comparar estos cementos con el CPN es posible observar la diferencia del porcentaje de clínker entre los tres tipos de cemento.

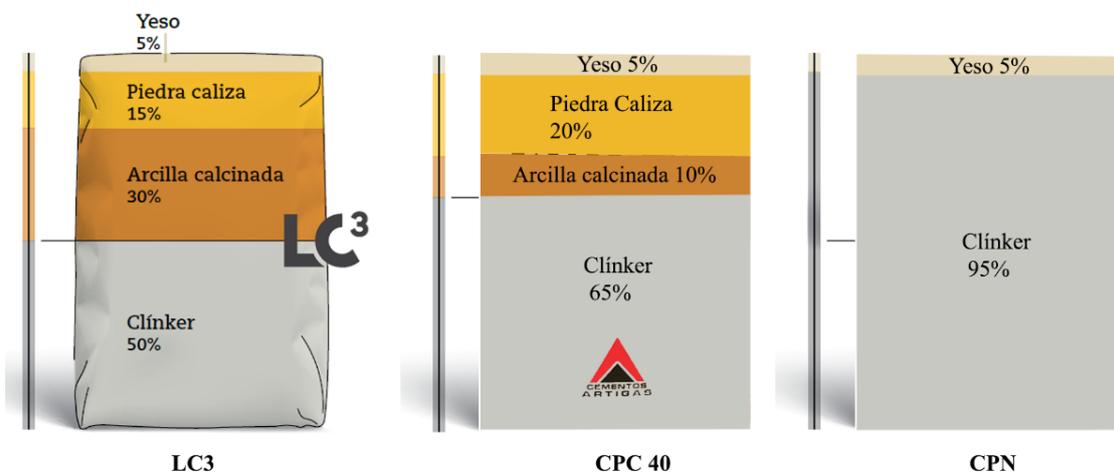


Figura. 2.12 Porcentaje de compuestos en un LC³ y un CPC 40 vs el CPN (Fuente: comité del LC³, 2022 y producción propia)

Actualmente se está estudiando la posibilidad de reducir el clínker en un porcentaje menor al 50%, para poder así reducir aún más las emisiones de CO₂. Los autores de la revista anual del comité de los LC³ de la Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación (2022), dan cinco razones por las cuales sería positivo adoptar este cemento reducido en clínker. En primer lugar, al reducir el clínker se consigue reducir en un 40% las emisiones de CO₂ y el consumo energético que el mismo necesita para su fabricación. En segundo lugar, existe gran cantidad de AMs disponibles a nivel mundial lo cual reduce el consumo de recursos naturales que escasean. En el puesto número tres está la rentabilidad, se ahorra hasta un 25% de los costos ya que calcinar arcilla es más económico que calcinar el clínker. En cuarto lugar, hablan del rendimiento igual o superior a un CPN con la ventaja de que el LC³ tiene una mejor estructura de poros lo cual lo hace más resistente a los ataques de cloruros protegiendo la armadura interna del hormigón. Por último, la eficiencia en los recursos, para la producción de este cemento bajo en carbono se pueden utilizar arcillas de toda clase sin importar que sean o no arcillas cerámicas.

La producción del LC³ tiene procesos que van en paralelo, por un lado, está la producción de la AC y por el otro lado la producción del clínker. En la producción de la AC se extrae la arcilla de las canteras, la misma se selecciona y se la calcina a temperaturas que van de 700-800°C (dependiendo del tipo de arcilla) en los hornos según el sistema escogido, usualmente se usan hornos rotatorios como se mencionó anteriormente. Una vez que la arcilla se enfría se le incorpora la piedra caliza, previamente triturada en partículas finas (cuanto más fina mejor será la reacción). En paralelo se fabrica el clínker extrayendo arcilla y piedra caliza de las canteras. La calcinación de las materias primas para fabricar el clínker requieren de temperaturas más elevadas que oscilan entre 1400-1500°C. Una vez finalizado el proceso de calcinación el material se enfría y se le incorpora el yeso en un porcentaje muy bajo. Por último, el clínker con el yeso se mezcla con la AC y la piedra caliza y se los somete a una última instancia de molienda para asegurar que los ingredientes sean más finos y que la mezcla quede homogénea (Fig. 2.13).

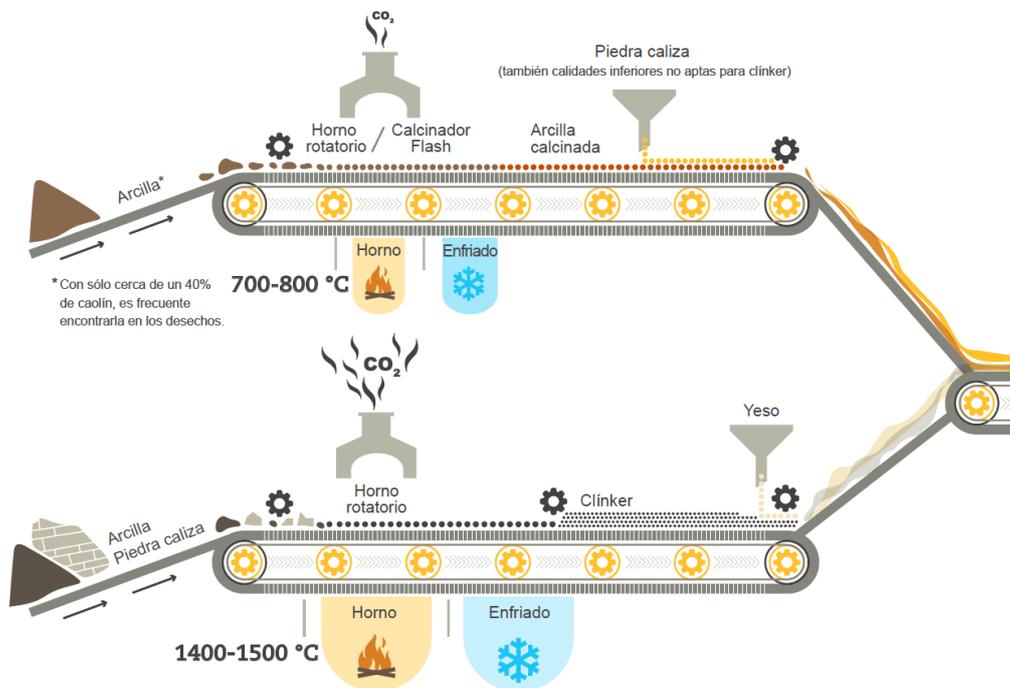


Figura. 2.13 Producción del LC³ (Fuente: comité del LC³, 2022)

Para la fabricación de los LC³ se han utilizado arcillas de todas partes del mundo, de diferentes fuentes de origen. Lo positivo de este tipo de cemento es que se pueden utilizar las mismas tecnologías que para la fabricación del cemento Pórtland normal, sin incorporar procesos complejos o pocos conocidos. En la figura 2.14 Sharma et al. (2021) hacen una comparativa entre el CPN y los cementos LC³. En la misma se puede apreciar como los cementos normales tienen un mayor impacto ambiental en comparación al LC³. La sustitución de parte del clinker reduce de manera significativa las emisiones de dióxido de carbono durante la producción.

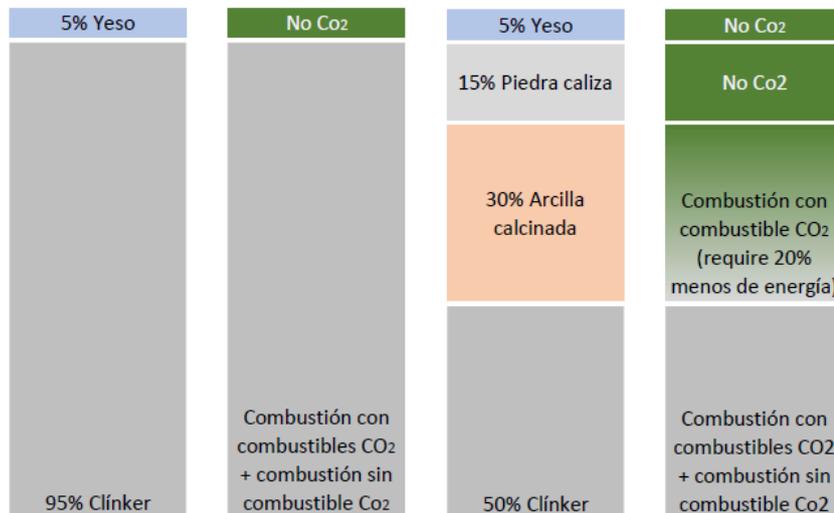


Fig. 2.14 Comparativa entre un CPN y un LC³ (Fuente: Sharma et al., 2021)

Mucha de la literatura estudiada por Sharma et al. (2021) menciona que la gran mayoría de los cementos compuestos contienen un 50% de clinker en su composición, pero el porcentaje ideal estará sujeto a las propiedades físicas y químicas del clinker. También, se ha reportado que los cementos LC³ que contienen un 50% de clinker logran resistencias a la compresión similares a los CPN a los 28 días.

Este tipo de cemento bajo en clinker se produce por la trituración de todos sus componentes, mezclados conjuntamente hasta obtener una mezcla homogénea. Sharma et al. (2021) comentan que muchos de los estudios basados en estos cementos, bajos en carbono, se llevaron a cabo utilizando arcillas ricas en caolinita como principal mineral. También hay estudios basados en illita y montmorillonita, aunque la reactividad de estos últimos minerales ha demostrado ser menor que la obtenida con la caolinita.

La arcilla al calcinarse varía en color, pasa de un tono grisáceo a un color de tonalidad roja. El color rojizo se da por el porcentaje de hierro en la mezcla, cuanto mayor hierro contenta mayor será el color rojo en ella. Como se ha mencionado anteriormente, el color es un factor clave para el consumidor final, ya que el color fuera de lo que se considera estándar para el mercado puede ser una barrera a la hora de comercializarlo. Sharma et al. (2021) señalan que se han llevado a cabo estudios que demuestran que la calcinación de arcillas con hierro como impureza en condiciones reductoras conducen a la formación de magnetita en lugar de hematita. Esto resulta en que tanto la arcilla como el cemento adquieran un color gris más similar al de los cementos convencionales que se encuentran en el mercado. Aún no se ha demostrado de manera concluyente que el color de la arcilla sea un factor determinante en la resistencia a la compresión de los LC³, pero puede llegar a jugar un papel significativo.

Una de las grandes virtudes de estos nuevos cementos se da por la sustitución del clínker sin reducir la resistencia del material. Sharma et al. (2021) comparan las resistencias a edades tempranas de los cementos utilizando AMs. En la figura 2.15 se puede observar el desarrollo a la compresión de estos cementos y en la mayoría de los resultados demuestran que el LC³ tiene una resistencia a los 3 días más baja que los CPN. A los 7 días el LC³ ha comprobado tener una resistencia similar o superior que los CPN, mejorando ampliamente a los 28 días de edad. Esto sugiere que la finura de las partículas, la composición del clínker, la temperatura y el contenido de álcalis juegan un papel importante en el desarrollo de la resistencia del cemento.

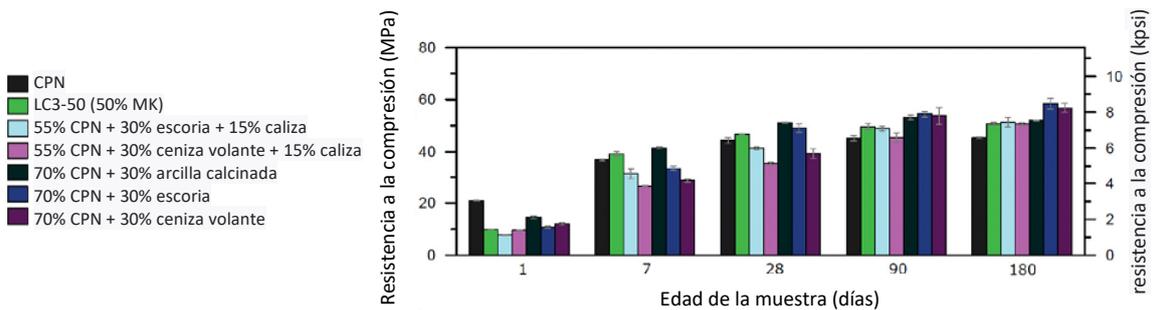


Fig. 2.15 Desarrollo de la resistencia a la compresión en los LC³ comparados con otros cementos (Fuente: Sharma et al., 2021)

Sirangi y Prasad (2023), realizaron investigaciones de gran escala para explorar la tecnología de este nuevo cemento como un posible sustituto del CPN dando como resultado que estos cementos, a los 90 días, muestran una resistencia un 10% mayor que un CPN. Ellos comentan que el avance en la resistencia en estos cementos puede estar dada por la presencia de la AC que genera la reacción puzolánica a nivel de su microestructura. También, han analizado la estructura interna de poros, demostrando un aumento en la resistencia de la penetración del agua, dando como resultado un cemento de mayor durabilidad.

Sirangi y Prasad (2023) ensayaron varios tipos de cementos para comprobar y comparar la resistencia, del LC³ con un CPN y con un CP con puzolana (CPP), utilizando una mezcla A con resistencia de 70 MPa y una mezcla B con resistencia de 40 MPa. El estudio ilustra el desarrollo y la resistencia a la compresión de diversas mezclas. Los resultados en la figura 2.16 demuestran que el LC³ es la opción de mejor resistencia a la compresión para una resistencia de 70 MPa como para una de 40 MPa.

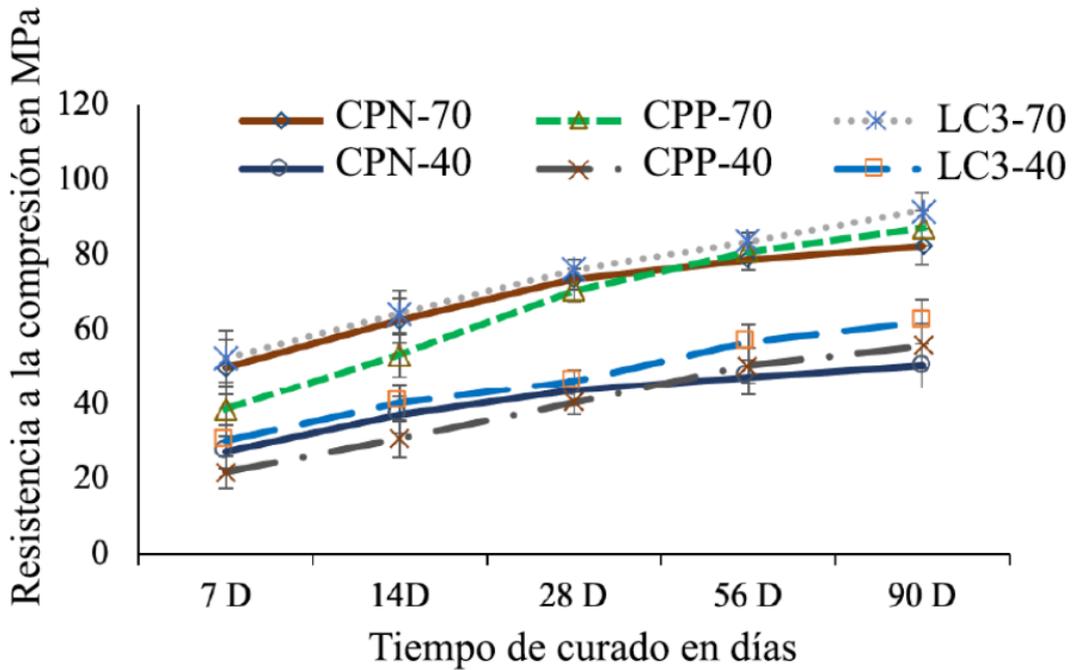


Fig. 2.16 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para la mezcla A-70 y A-40 (Fuente: Sirangi y Prasad, 2023)

Para estos autores, los cementos LC³ son resistentes a la expansión causada por la reacción de la sílice alcalina, esto es comprensible debido a su menor alcalinidad en comparación a los CPN, así como la liberación de alúmina en los poros durante el proceso de calcinación. Otro fenómeno que puede observarse en estos cementos, es la resistencia a los sulfatos, la misma aumenta a medida que se aumenta la sustitución de clínker con el aumento de AC y de la piedra caliza.

Sirangi y Prasad (2023) también obtuvieron resultados de la durabilidad que están relacionados al sistema de poros de cada material y a la capacidad de resistir el ingreso iónico. La tabla 2.5 muestra cómo la velocidad de corrosión varía en función de diversos niveles de resistividad eléctrica. La figura 2.17 presenta la resistividad eléctrica de las muestras de cemento con la mezcla de 70 MPa y de 40 MPa en diferentes edades de curado. La figura muestra que los resultados señalan mayor resistencia en la mezcla de 70 MPa en comparación con la de 40 MPa, sin embargo, esta disparidad es aún más notable en el caso de los cementos LC³. En fin, el LC³ demuestra una mayor resistencia a los ataques externos debido al desarrollo de su microestructura de poros que lo hace menos permeable.

Tasa de corrosión (ASTM G57-06)	Muy alta	Alta	Moderada	Baja
Resistividad Eléctrica (kΩ-cm)	< 5	05 to 10	10 to 20	>20

Tabla 2.5 Velocidad de la tasa de corrosión (Fuente: Sirangi y Prasad, 2023)

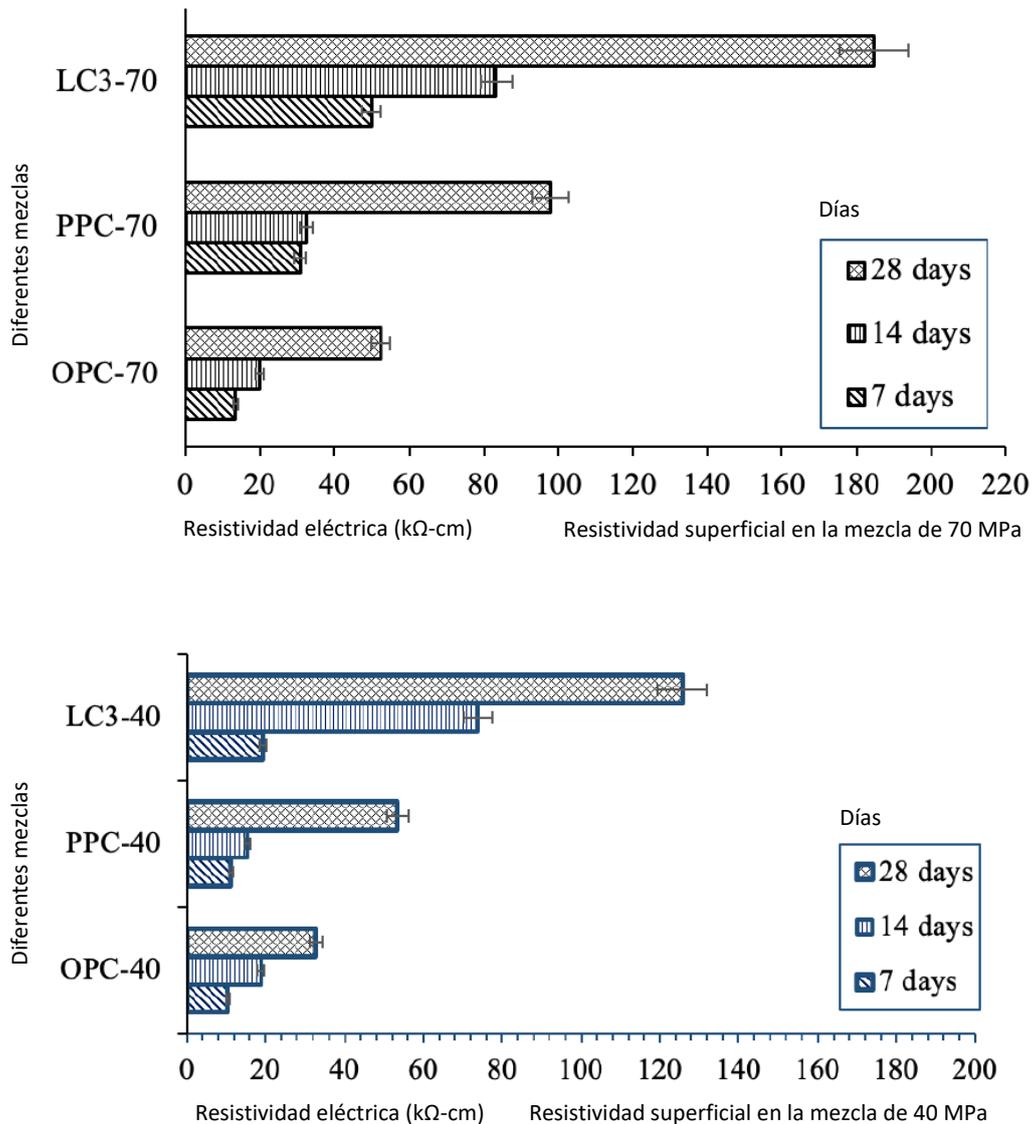


Figura 2.17 Resistividad superficial del hormigón para mezclas de 70 y 40 MPa con diferentes aglomerantes (Fuente: Sirangi y Prasad, 2023)

En resumen, Sirangi y Prasad (2023), concluyen que el LC³ muestra una mayor resistencia en las etapas iniciales de desarrollo de fuerza en comparación con otros tipos de cemento. Además, presentan valores de resistividad más elevados durante las etapas de curado y una mayor resistencia contra la entrada de iones de cloruro. En conclusión, el cemento LC³ ha demostrado ser más duradero en comparación con los tipos de cements convencionales. De todos modos, para los autores, aún queda mucho camino por recorrer en el mercado local (India) para llegar a elaborar un cemento que sustituya al clínker en un 100% con mayor porcentaje de arcilla que de filler calcáreo.

Castillo Lara et al. (2011) han investigado sobre las ventajas en las mejoras en la resistencia mecánica y la durabilidad asociadas al empleo de cementos con AC. Mediante ensayos observaron que la finura de la puzolana afecta a la estructura interna de los poros capilares, dando como resultado una mayor impermeabilidad. A medida que disminuye la permeabilidad del material, también disminuye la posibilidad de que agentes químicos agresivos penetren en él, lo que aumenta su vida útil.

La figura 2.18 presenta los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión para varias muestras de Castillo Lara et al. (2011). Para dicho estudio se emplearon dos tipos de arcilla: una proveniente de suelo arcilloso, denominada como T-120 y otra de arcilla sedimentada, formada por la sedimentación de ese suelo y designada como AS 900. Ambas arcillas fueron sometidas a una temperatura constante de calcinación de 900°C durante 1 hora y luego fueron molidas. Para el CPN se utilizó un cemento cubano P350. Para evaluar el efecto de las adiciones minerales activas, se incluyó una serie en la que se mantuvo constante la cantidad de cemento y se sustituyó parte de este por un filler calcáreo (F). Se puede apreciar que todas las muestras superaron los 45 MPa a los 28 días de edad. Incluso, la muestra con AC y sedimentada (AS 900) alcanzó el valor máximo de 80 MPa.

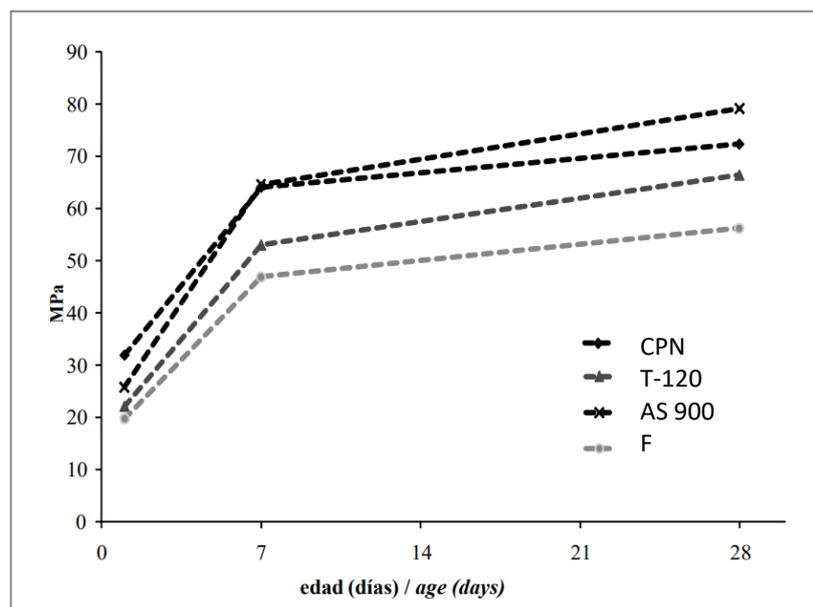


Figura 2.18 Resistencia a la compresión en microhormigones (Fuente: Castillo Lara et al., 2011)

Con respecto a la durabilidad del hormigón, que está directamente relacionada con los cambios en su estructura de poros, Castillo Lara et al. (2011) ilustran en un ensayo de capilaridad su desarrollo y comportamiento en el tiempo. Mediante un ensayo de absorción de agua por capilaridad se puede observar y medir los valores de sorptividad de cada muestra (Figura 2.19). La muestra T-120 exhibe una menor absorción de agua a los 28 días de edad, lo que sugiere que la alta finura de esta adición desempeña un papel fundamental en la compactación de los poros y sugiere ser la muestra más durable.

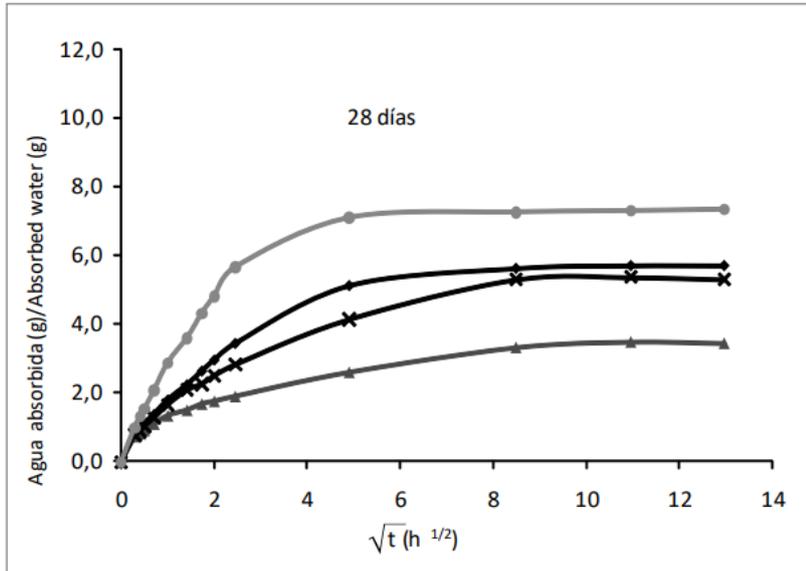


Figura 2.19 Absorción de agua en microhormigones (Fuente: Castillo Lara et al., 2011)

Estos hallazgos presentados por Castillo Lara et al. (2011) demuestran la capacidad de la AC, incluso en aquellas de pureza relativamente baja, para mejorar la durabilidad y la resistencia de los hormigones. El agregado de AC, como sustituto del clínker, mejora el proceso de hidratación del cemento lo que ocasiona la creación de fases hidratadas más estables. En este contexto, emplear AMs activos en la producción de hormigón ha demostrado ser una práctica efectiva para mejorar las propiedades duraderas de este material. Esto se debe a un incremento en los productos de reacción, impulsados por la reacción puzolánica, lo que resulta en una menor porosidad capilar y, por ende, una mayor resistencia y durabilidad.

2.6.2 ESTUDIOS Y ENSAYOS

La arcilla ha sido utilizada por la industria de la construcción como materia prima para la producción del clínker por su contenido de sílice y alúmina. Sin embargo, los requerimientos para la arcilla utilizada en la fabricación de clínker son distintos a las arcillas que se utilizan como AMs. Los requerimientos químicos y mineralógicos para utilizar la arcilla como AMs son poco exigentes en comparación de otras aplicaciones (Díaz et al., 2022).

En el caso de las arcillas calcinadas para la fabricación del cemento, existen varias técnicas para estudiar las propiedades de la arcilla y a continuación se mencionarán las tres más comunes al alcance de los laboratorios. Estas técnicas son difracción de rayos X (DRX), análisis térmico y espectroscopia infrarroja (Snellings et al., 2022). Para cada ensayo, cuanto más heterogénea sea la muestra mayores pruebas habrá que hacerle a la arcilla. Por esta razón se suele hacer un proceso previo de mezclado manual para homogenizar la muestra a estudiar. Cuando llega el material al laboratorio se lo seca en hornos a 105°C para retirar la humedad y así el material se puede maniobrar más fácil. Otro paso es reducir la finura de la arcilla a 1mm, en este proceso hay que tener cuidado y evitar eliminar polvo de la muestra.

Dentro del análisis químico Snellings et al. (2022) mencionan algunos elementos que se pueden encontrar en la arcilla como, por ejemplo: Si, Al, Fe, Mg, Ca, sodio (Na), potasio (K), titanio (Ti),

entre otros que pueden ser estudiado gracias a la técnica de DRX. La difracción de rayos X permite un análisis más detallado de la composición y microestructura de la arcilla, ya que con el uso de herramientas geológicas convencionales sería muy difícil. En consecuencia, la incorporación de DRX permite una caracterización de la mineralogía de la arcilla. Snellings et al. (2022) mencionan, en base a la literatura recopilada, que para poder investigar la reactividad y rendimiento de las arcillas como AMs es necesario conocer la composición mineralógica de la arcilla cruda. Ellos comentan que incluso las arcillas de baja calidad, con contenidos de caolinita del 30%-40% y otros tipos comunes de arcilla impura pueden mostrar propiedades cementantes aceptables después de la calcinación.

Por otro lado, están los análisis térmicos que se le hacen a la arcilla al someterla a temperatura, donde la muestra se deshidrata y la masa cambia de peso. Snellings et al. (2022) comentan varios métodos para evaluar la pérdida de masa en la arcilla, dos de ellos son: el análisis termogravimétrico (ATG) y la curva diferencial de análisis térmico (DAT) que se suelen utilizar en conjunto. Ambas técnicas proporcionan información valiosa sobre la composición de la arcilla, su contenido de agua y su comportamiento térmico. Ambos procesos consisten en calentar la arcilla a una temperatura constante mientras se mide su cambio de masa en función a la temperatura o el tiempo. El resultado final se mide de la muestra seca y no de la arcilla previa a calentarse. La diferencia de ambos métodos está en la información que proporcionan, el gráfico de ATG muestra una curva de pérdida de masa en función a una temperatura o tiempo. El gráfico de DAT representa la velocidad en la que se pierde esa masa en función de la temperatura. Los autores también comentan sobre la técnica de pérdida por ignición (PPI) donde la arcilla se quema a una temperatura constante de 1.000°C por un determinado tiempo (1 hora) y la pérdida de peso se mide antes y después de la ignición. Con este método se puede obtener información sobre el contenido de materia orgánica y el contenido de agua.

Por último, está la técnica analítica de la espectroscopia infrarroja, que se utiliza para estudiar la composición química y la estructura de materiales. La muestra se somete a radiaciones infrarrojas dando información sobre las vibraciones moleculares y los enlaces químicos presentes en la arcilla. El espectro infrarrojo que se obtiene de este método puede brindar información sobre los tipos de minerales presentes, la presencia de agua, materia orgánica y otros componentes.

Para estudiar la evolución del proceso de calcinación de la arcilla se hacen estudios de laboratorio, un ejemplo que se hace a nivel local es el ensayo de Frattini. Como señala la Ing. Silvia Gómez en su trabajo de pasantía de grado en Ingeniería química en el marco del programa de intercambio MARC de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), ella define al ensayo de Frattini de la siguiente manera:

Ensayo que mide el consumo de especies químicas correspondientes a las reacciones puzolánicas, y el índice de resistencia mecánica que determina el índice de actividad puzolánica por comparación de la resistencia a la compresión entre las condiciones con y sin incorporación del material considerado en una formulación de mortero normalizada. (pág. 1)

Estos análisis y ensayos no solo validan la viabilidad del empleo de la arcilla calcinada como componente clave en la producción de cemento, sino que también resaltan el potencial para mejorar la ecoeficiencia en la industria de la construcción. Los hallazgos de estos estudios no solo respaldan la factibilidad de su implementación, sino que también subrayan la importancia de seguir explorando y perfeccionando la innovación en el sector de la construcción.

3. ESTUDIO DE CASOS

En este capítulo se lleva a cabo un análisis de casos que ilustran la aplicación práctica del uso de arcilla calcinada en la fabricación del cemento, abordando principalmente la situación específica en Uruguay y se resumen brevemente experiencias internacionales en países como India, Cuba, Brasil, entre otros.

El estudio se inicia con un enfoque en Uruguay, donde se examina la disponibilidad de arcilla y se presenta una investigación de campo realizada en una cantera existente. Este capítulo proporciona una visión de la temática de la tesina en el contexto local.

Posteriormente, se exploran casos en otros países, en los que se examinan diferentes enfoques y aplicaciones de la arcilla calcinada en la producción del cemento. Estos ejemplos internacionales ofrecen una comprensión de posibles aplicaciones y beneficios a nivel global.

A través de este capítulo, se busca no solo presentar ejemplos concretos de la implementación de la arcilla calcinada en la industria del cemento, sino también extraer lecciones aprendidas y recomendaciones que puedan informar futuras prácticas y políticas en el sector de la construcción, tanto a nivel nacional como internacional.

3.1 CASO 1: URUGUAY

Ante la urgencia de reducir la huella de carbono y el consumo energético asociados al cemento Pórtland normal, se están introduciendo en el mercado nacional diversas alternativas de cemento. La ventaja de utilizar la arcilla calcinada está en la reducción de la cantidad de clínker y su efecto contaminante. Los cementos puzolánicos incrementan tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad de estos materiales cementicios.

Como bien se mencionó anteriormente en la tabla 2.1, la norma UNIT 20:2022 detalla CPF y CPC admitidos por la norma local. El CPC con AC solo se comercializa por la empresa Cementos Artigas y su uso es muy nuevo en el mercado local. La arcilla que emplea actualmente Cementos Artigas para producir CPC proviene de Minas, en la base del Cerro Verdún, en el mismo predio donde se ubica la planta de cemento de ellos (entrevista, anexo VI). La arcilla es un mineral que se encuentra de manera abundante en Uruguay. En los Departamentos de Durazno, Cerro Largo y Canelones existen varios yacimientos de arcilla que han sido explotados o cuyos permisos de explotación han caducado. Sin embargo, según registros geológicos, se ha identificado presencia de arcilla en otros lugares del país.

A través del visualizador geológico minero de la plataforma de búsqueda de DINAMIGE (Dirección Nacional de Minería y Geología)² se consultaron los expedientes con los permisos y empresas que extraen arcilla en Uruguay. En la figura 3.1 se situaron las canteras dentro del mapa de Uruguay por color, con el nombre de la empresa, su número de padrón y el tema de cada una para ubicarlas en relación a la distancia de las fábricas de cemento.

² [https://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy/Dinamige MVC2/](https://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy/Dinamige_MVC2/)



Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema
Red	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión
Green	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión
Pink	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección
Brown	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	8223	Concesión
Purple	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	10097	Concesión
Light Blue	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección
Grey	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión
Yellow	ANCAP	Durazno	12717	Concesión
Orange	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión
Light Green	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión
Dark Blue	ANCAP *	Lavalleja	10815	Prospección

* Tendiente a estudiar arcillas para la industria del cemento.

Fig. 3.1 Mapa de Uruguay con la ubicación de las canteras de arcilla (producción propia)

Para poder apreciar, en una primera instancia, las distancias entre canteras y fábricas de cemento, se procedió a ubicar toda la información dentro del mapa de la figura 3.2. Con la idea de sacar conclusiones, correspondientes a las distancias, se ejecutaron análisis donde se fueron estudiando las distancias de cada cantera a cada fábrica. A su vez, se tomaron datos sobre la fecha de presentación y estado de las mismas, entendiendo que cada cantera tiene una concesión a 30 años, en donde todos los años deben presentar una renovación para mantener la misma (entrevista, anexo II). Como dato relevante se examinó el tamaño de cada cantera como así también el tipo de mineral que se extrae de cada una.



Fig. 3.2 Mapa de Uruguay con la ubicación de las canteras de arcilla y las fábricas de cemento (producción propia)

En el mapa, a primera vista, se puede visualizar dónde se encuentra la mayor concentración de arcilla en el país. Todo pareciera indicar que los Departamentos de Durazno y Cerro Largo son los que tienen mayor concentración del mineral. Esto lleva a estudiar, en un análisis más profundo, las distancias de cada una de ellas a cada fábrica de cemento en particular, considerando específicamente las rutas disponibles para acceder a ellas. Para el siguiente estudio se ejecutaron tablas con los datos ordenando las canteras por distancia, de la más cercana a la más lejana, hacía cada empresa cementera. Las distancias consideradas no son en línea recta, sino por trayectos en ruta.

En la tabla 3.1 se ubicaron las canteras en relación a la distancia de Cementos Artigas Minas y ANCAP Minas, ordenadas de menor a mayor distancia. Ambas plantas se ubican una frente a la otra es por este motivo que se procedió a estudiarlas en una misma tabla, ya que se considera la misma distancia para ambas. En la tabla 3.2 se hace el mismo análisis, pero con la planta de ANCAP Paysandú. En la tabla 3.3 se estudia la planta de cemento Charrúa en el Departamento de Treinta y Tres y en la tabla 3.4 la planta de Cielo Azul también en Treinta y Tres; siempre estudiando la lejanía de las canteras, de menor a mayor distancia. En todas las tablas se marca en color amarillo la cantera de mayor tamaño y en color rojo se hace referencia a las concesiones caducadas.

TABLA SEGÚN LAS DISTANCIAS, DE MENOR A MAYOR, A LA ANCAP Minas y Cementos Artigas										
Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral	Minas
	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-	10 km
	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla	77 km
	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja	81 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria	211 km
	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo Metzen	216 km
	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da	216 km
	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da	221 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria	230 km
	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria	239 km
	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla	284 km
	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla	311 km

Notas:
 Cantera de mayor tamaño
 Estado CADUCADO

Tabla 3.1 según las distancias, de menor a mayor, a ANCAP Minas y Cementos Artigas (producción propia)

TABLA SEGÚN LAS DISTANCIAS, DE MENOR A MAYOR, A LA ANCAP Paysandú										
Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral	ANCAP Paysandú
	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo Metzen	317 km
	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da	317 km
	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da	340 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria	342 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria	346 km
	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla	371 km
	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria	375 km
	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja	381 km
	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla	419 km
	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-	426 km
	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla	454 km

Notas:
 Cantera de mayor tamaño
 Estado CADUCADO

Tabla 3.2 según las distancias, de menor a mayor, a ANCAP Paysandú (producción propia)

TABLA SEGÚN LAS DISTANCIAS, DE MENOR A MAYOR, A LA FÁBRICA DE CEMENTO CHARRÚA (Cimsa)										
Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral	CHARRÚA
	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla	89 km
	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla	111 km
	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria	140 km
	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da	145 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria	165 km
	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo Metzen	177 km
	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da	180 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria	184 km
	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-	193 km
	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla	268 km
	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja	275 km

Notas:
 Cantera de mayor tamaño
 Estado CADUCADO

Tabla 3.3 según las distancias, de menor a mayor, a la planta de Cemento Charrúa en Treinta y Tres (producción propia)

TABLA SEGÚN LAS DISTANCIAS, DE MENOR A MAYOR, A LA FÁBRICA DE CIELO AZUL										
Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral	CIELO AZUL
	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla	40 km
	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria	128 km
	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da	136 km
	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla	146 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria	168 km
	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo Metzen	168 km
	COMACO REFRACTARIOS S.R.L	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria	178 km
	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da	187 km
	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-	188 km
	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla	263 km
	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja	270 km

Notas:
 Cantera de mayor tamaño
 Estado CADUCADO

Tabla 3.4 según las distancias, de menor a mayor, a la planta de Cielo Azul en Treinta y Tres (producción propia)

De analizar cada cantera en la tabla resumen número 3.5 se puede apreciar que, en un número mayor, muchas de ellas se encuentran en cercanía a la zona de Minas o contienen rutas más directas para el traslado hacia las fábricas ubicadas en los Departamentos de la Lavalleja y Treinta y Tres. ANCAP de Minas y Cementos Artigas son las empresas que se ubican de manera más directa y cercana a la cantera de mayor tamaño, la cual es una prospección de ANCAP que actualmente se encuentra en trámite. La ANCAP de Paysandú se encuentra más alejada o es más difícil acceder a ella desde la gran mayoría de las canteras, lo cual la convierte en una fábrica poco rentable para el mercado de la arcilla en la producción de cementos. Se entiende que con las distancias se puede conseguir una reducción en tiempos de entrega y costos, haciendo eficiente la logística de cada empresa.

Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral	Distancia de la cantera a la fábrica			
										ANCAP Paysandú	ANCAP Minas y Cementos Artigas	Cielo Azul	CHARRÚA Cimsa
Red	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria	↓ 375 km	→ 239 km	→ 128 km	→ 140 km
Verde	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo	→ 317 km	→ 216 km	→ 168 km	→ 177 km
Magenta	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla	↓ 371 km	↑ 77 km	→ 263 km	→ 268 km
Oro	COMACO REFRACTARIOS	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria	↓ 346 km	→ 230 km	→ 178 km	→ 184 km
Púrpura	COMACO REFRACTARIOS	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria	→ 342 km	→ 211 km	→ 168 km	→ 165 km
Cyan	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla	↓ 454 km	→ 311 km	↑ 36 km	↑ 111 km
Azul	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-	↓ 426 km	↑ 10 km	→ 188 km	→ 193 km
Gris	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da	→ 340 km	→ 221 km	→ 187 km	→ 180 km
Amarillo	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da	→ 317 km	→ 216 km	→ 136 km	→ 145 km
Naranja	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla	↓ 419 km	→ 284 km	↑ 40 km	↑ 89 km
Verde claro	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja	↓ 381 km	↑ 81 km	→ 270 km	→ 275 km

Tabla 3.5 con los datos de las canteras y sus distancias a las fábricas de cemento (producción propia)

Entendiendo las distancias y conexiones entre las canteras y fábricas de cemento, para proyectar la factibilidad de la producción de cemento Pórtland utilizando arcilla calcinada, se pueden sacar varias conclusiones al respecto. Como se mencionó anteriormente la logística en la cercanía tiene costos de transporte más bajos, la cual podría generar una producción más rentable ofreciendo costos más competitivos en el mercado. Existe un acceso a los recursos de la materia prima más directos pudiendo así conseguir un suministro más seguro y constante que reduce riesgos en la producción. Una ventaja estratégica en la cercanía, en términos de expansión futura, es la posibilidad de crecimiento en las proximidades del terreno. Por último, reducir las distancias implica un menor consumo de combustible en el transporte, lo que conlleva a una disminución de las emisiones de gases nocivos.

3.1.1 ARCILLAS DISPONIBLES PARA LA ELABORACIÓN DE CEMENTO

Para poder evaluar la arcilla disponible es importante entender los tipos de arcillas existentes en el país. Otro punto a tener en cuenta son las canteras que explotan este mineral y conocer su estado y vencimiento. Actualmente son muy pocas las canteras de arcilla que están en uso y ellas no cuentan con la infraestructura o inversión necesaria para seguir estudiando el tipo de arcilla que tienen para dar a largo plazo. Para poder calcular la cantidad de arcilla se hacen prospecciones, perforaciones cada cierta cantidad de metros que se estudian con programas y ensayos para estimar el material existente.

Existen tres tipos de arcillas en Uruguay, registradas por Caorsi y Goñi (1958) bajo el nombre según la zona de donde se extraen: arcosas de Cerrezuelo, lulitas de Cordobés y areniscas de las Palmas. Con el paso del tiempo, el autor Bossi (1966) ajusta la nomenclatura de las mismas para llamarlas como se las conoce popularmente hoy bajo el nombre de: Formación Cerrezuelo, Formación Cordobés y Formación Paloma. A su vez, el mismo Ingeniero propone el nombre de grupo Durazno para el conjunto de las tres formaciones devonianas³ del Uruguay. El mismo autor comenta que los niveles de arcillitas caoliníticas se encuentran a varias alturas de la columna estratigráfica devónica. Esta columna es una manera de representar, en corte, los rasgos más importantes de la secuencia geológica de la tierra. Cada cantera tiene la arcilla dispuesta de distinta manera según la zona.

En la base de la Formación Cerrezuelo la arcilla se dispone en forma de lentes horizontales de poco espesor intercalados entre las rocas gruesas del miembro inferior de esta unidad (Preciozzi, 1985). En las de Formación Cordobés constituyen niveles de espesores variables donde predomina las rocas más finas. Los autores mencionan que los niveles de arcillitas de la Formación Cordobés poseen un origen sedimentario. Por otro lado, en las canteras de la zona de Blanquillo y San José de las Cañas, en el Departamento de Durazno, parecieran tener una superposición de varios procesos de alteración muy intensos.

En 1952, Goñi descubre que la caolinita es el mineral arcilloso que predomina en las sedimentitas devonianas en el Uruguay. Con el pasar del tiempo se reporta más información y se descubre, en las cercanías de Blanquillo, que existe una mayor composición de caolinítica con algunos niveles de illita, en un 80%-20% respectivamente, Ippoliti Ramilo, G y Ford, I. (1990). También se analizan muestras de la Formación Cerrezuelo encontrando composiciones a base de caolinita que llegan de 53% a 100% con presencia de esmectitas dentro de un 44% e illita en una menor proporción. Todas las arcillas son en su mayoría caoliníticas, agrupadas, en algunos casos, a esmectitas e illita y con poca presencia de impurezas como cuarzo y feldespatos (Zalba et al. 1988). Los tipos de esmectitas presentes se identificaron como montmorillonita y beidelita. Los mismos autores han hecho varios ensayos demostrando propiedades y calidades de la arcilla para ser utilizada en productos de alta refractariedad.

Según menciona Zubeldía, el ex director de la División de Ingeniería y Obras de COMACO Refractarios, en un llamado realizado el 01 de julio (entrevista, anexo II), los yacimientos interesantes para explorar son los que se extienden por el Departamento de Durazno: Blanquillo, Farruco y Cerrezuelo; en ellos no existe información confirmada de cateos hechos ahí en profundidad, pero si hay afloramientos en toda esa zona. Estos yacimientos son de formas lenticulares, poco profundos y extendidos en esa región. Él menciona el ejemplo de Farruco,

³ “El Paleozoico (vida antigua) transcurrió durante casi 300 millones de años (hace 542 a 251 millones de años), y se divide en seis períodos: Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico.” G. Veroslavsky, M. Ubilla y S. Martínez; *Cuencas Sedimentarias de Uruguay*; DIRAC Montevideo 2006; p.11.

donde las canteras tenían 4 metros de altura y entre 5 a 6 metros de profundidad. A la vista se puede observar arcilla en forma de lentes horizontales, en tres capas de arcilla, pero si se logrará contar con las herramientas para excavar seguramente se pueda seguir hallando material de estudio.

Lo que Zubeldía (anexo II) menciona es que hubo explotaciones importantes como las de la empresa Metzen y Sena y Comaco Refractarios SRL, donde el uso de la arcilla solo estaba destinado a cerámica sanitaria y azulejos. Él opina que la globalización con su conectividad, y la gran competencia con Brasil, hizo que estas como muchas otras empresas fundieran. Las producciones en Uruguay eran chicas, costosas y no pudieron competir contra la calidad y diseño de un país tan competitivo como lo es Brasil. Las canteras locales son chicas y no llegan a tener una calidad controlada. Hoy en día explotar una cantera en el país resultaría muy costoso y su uso no sería compatible con las ganancias que podría generar (Zubeldía, anexo II).

El delegado titular en representación de la Universidad de la República (UDELAR) en la Comisión Nacional de Evaluación Científica y Técnica Doc. Ing. Sánchez (entrevista, anexo I) llama la atención acerca de la composición de la arcilla. La arcilla caolinita, conocida como caolín, es un silicato de alúmina hidratado, compuesto por alúmina (óxido de alúmina), sílice (óxido de silicio) y agua mezclada con otros minerales. Dentro de las mismas canteras se obtienen arcillas de distintas calidades, ya que el desarrollo de la arcilla no es continuo y se observan diferencias por sectores. Hay una arcilla de primera calidad, de color más claro; una arcilla de segunda calidad y una de tercera calidad, que es la que contiene mayores impurezas con un aspecto más rojizo.

La empresa ANCAP cuenta con un prospecto en trámite desde el año 2008, en el Departamento de Lavalleya padrón 10815, teniendo de estudiar arcillas para la industria del cemento, tanto como adición fundente como adición inerte. Este tipo de arcilla contiene hierro (Fe) y aluminio (Al) que junto con la piedra caliza ayudan en el proceso de cocción del Clínker. Una vez que este autorizada la prospección ante la DINAMIGE, se podrán extraer muestras para su estudio. Información suministrada por el Ing. Químico Della Nave y el Ing. Gutiérrez, jefe de Minería y Geología de la firma ANCAP (2023).

En la tabla número 3.6, donde se visualiza el total de canteras que explotan el mineral de la arcilla en Uruguay, se puede observar las dimensiones de cada cantera estimando un posible número de la cantidad disponible. Después de todo lo expuesto está claro que para poder contar con un número acertado de la cantidad disponible de arcilla se requieren de varios cateos y estudios de las canteras. Más allá de esto, se estima que las dimensiones de cada cantera deberían ir en relación a la cantidad de arcilla que pueden explotar. Es decir, que a simple vista con la información suministrada por DINAMIGE se podría decir que la cantera de Gormalon S.A., en Canelones, debe contar con la mayor cantidad de arcilla en todo el sector, teniendo una superficie de 464,60 hectáreas. En oposición, la cantera de Bentacor Bellini José P. también ubicada en Canelones, cuenta con una superficie de 5,49 hectáreas convirtiéndose en la cantera de menor tamaño.

Color	Empresa	Departamento	Padrón	Tema	Fecha de presentado	Vencimiento	Estado	Área (has)	Mineral
	Silva Walter Gustavo	Cerro Largo	789	Concesión	9/8/2001	29/10/2033	Vigente	9,65 has	Arcilla refractaria
	Metzen y Sena	Durazno	3156	Concesión	9/1/1997	1/3/2012	Caducado	28,50 has	Arcilla Durazno, 1ra arcilla p/ consumo
	Gormalon SA	Canelones	6519	Prospección	20/3/2022	-	Trámite	464,60 has	Arcilla
	COMACO REFRACTARIOS	Durazno	8223	Concesión	28/5/1901	17/2/1989	Caducado	118,30 has	Arcilla refractaria
	COMACO REFRACTARIOS	Durazno	10097	Concesión	14/9/1982	6/2/2021	Caducado	30,20 has	Arcilla refractaria
	Albersis SA	Cerro Largo	10204	Prospección	3/2/2023	-	Trámite	124,90 has	Arcilla
	ANCAP	Lavalleja	10815	Prospección	31/5/2019	22/9/2027	Vigente	15,50 has	-
	Ferreira Cabrera Never	Durazno	12058	Concesión	17/8/1977	31/5/2025	Vigente	13,40 has	Arcilla Blanquillo 2da
	ANCAP	Durazno	12717	Concesión	12/2/2008	20/7/2039	Vigente	86,60 has	Arcilla Blanquillo 2da
	Nuevo Imperial	Cerro Largo	13201	Concesión	25/11/2008	26/10/2024	Vigente	42,60 has	Arcilla
	Bentacor Bellini José P.	Canelones	51185	Concesión	31/12/1997	29/10/2033	Vigente	5,49 has	Arcilla p/ cerámica roja

Tabla 3.6 con los datos de las canteras y sus superficies. En amarillo se evidencia la de mayor tamaño y en rojo la menor (producción propia).

3.1.2 ANÁLISIS Y VISITA A UNA CANTERA VIGENTE

Gracias a la información suministrada por todos los entrevistados se llegó a la conclusión que actualmente no se explotan la misma cantidad de canteras que se explotaban hace 15 o 20 años atrás. Hoy en día solamente queda una cantera pequeña en uso, en la zona de Durazno, que utiliza 39% de aluminio para arcilla refractaria (caolinita) para la construcción de estufas. Esta cantera pertenece al señor Silva Walter Gustavo, tiene 9,65 hectáreas, dentro del padrón 789 ubicada en el Departamento de Cerro Largo y dicha concesión se encuentra vigente. Este padrón cuenta con una concesión vigente hasta el año 2033.

La concesión de dicha cantera fue presentada el día 09 de agosto de 2011, por lo que menciona su dueño, la misma cuenta con varios años más de uso y según le han comentado expertos que han visitado la cantera, existe la posibilidad de que contenga arcilla de buena calidad varios metros hacia abajo. Para poder estimar el tiempo en años, Silva (entrevista, anexo III) comenta que con bancos de arcilla se va proyectando el tiempo que queda, es un cálculo estimado que se hace por la misma práctica y experiencia en tantos años de extracción. Lo ideal sería poder contar con cateos e inversores dispuestos a costear el estudio de la arcilla disponible ya que actualmente no se cuentan con los recursos para solventar dicho gasto. En la figura 3.3 se puede identificar el perfil de suelo de dicha cantera.

La arcilla que se visualiza en la cantera de Silva es arcilla refractaria, conocida popularmente como Formación Cerrezuelo; su nombre viene dado por la zona de donde se extrae. El nombre técnico del tipo de arcilla es la caolinita, la misma contiene poco óxido de hierro, por eso el tono de color claro (Figura 3.4). Hay sectores donde se ven zonas oscuras de tinte negro, resultado de la carbonilla que contiene carbón vegetal (Figura 3.5). La cantera a simple vista mantiene un orden y prolijidad en comparación a las canteras que han estado en uso (Figura 3.6 -9).

Actualmente esta arcilla se utiliza para la producción de ladrillos refractarios en estufas hogareñas. Con este tipo de arcillas se consigue un ladrillo de calidad superior al ladrillo de prensa que se comercializa hoy en día. La granulometría es muy fina al tacto, lo cual ayuda a la

reacción puzolánica y la misma es rica en sílice, que es lo que le da resistencia al material. En resumen, ante un examen visual y al tacto, este tipo de calidad de arcilla daría un buen resultado si se la quisiera utilizar para la fabricación de CPC.

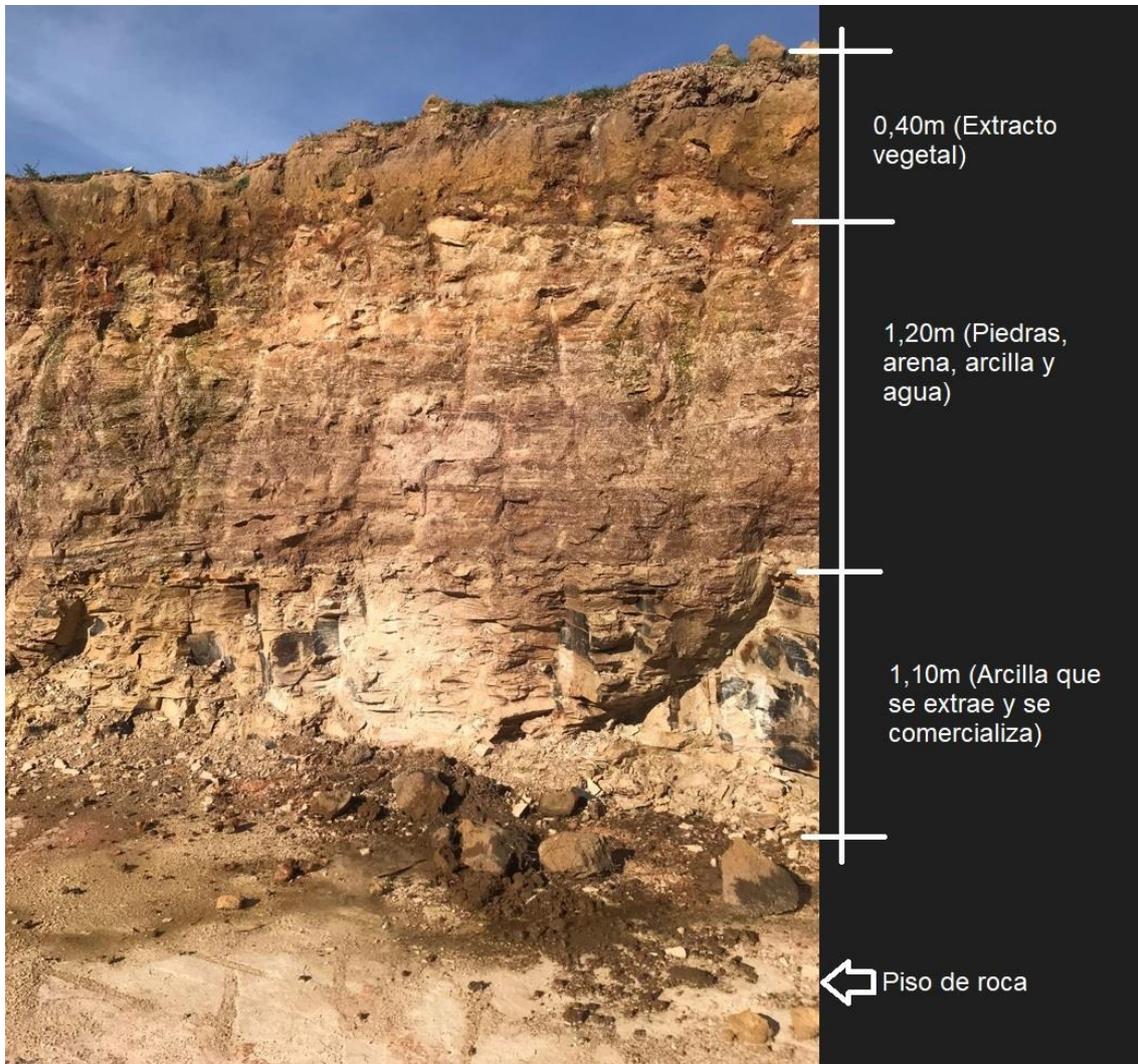


Figura 3.3: perfil de la columna del suelo de la cantera de Gustavo W. Silva (producción y fotografía propia).



Figura 3.4: arcilla de tonalidad clara con poco contenido de óxido de hierro (fotografía propia).



Figura 3.5: contenidos de carbonilla en el suelo vegetal (fotografía propia).



Figura 3.6: vista general de la cantera (fotografía propia).



Figura 3.7, 8 y 9: vistas generales de la cantera (fotografía propia).

Actualmente la arcilla que se extrae de esta cantera no se estudia ya que se vende para molienda tal cual como sale de la extracción. El responsable de la cantera compartió ensayos realizados el 13 de mayo de 2011 por El Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) junto con La División de Geología de DINAMIGE. Para dichos estudios se enviaron 2,12 kilos de arcilla en bolsas de plástico, una vez reciba la muestra se las secó en estufa a 45°C aproximadamente. Se tomó una porción de la muestra que se separó en tres partes para analizarla por el método analítico de fluorescencia de Rayos X dispersiva en Energía (EDXRF). De dichas muestras se obtuvieron elementos químicos presentes con distinto grado de precisión y exactitud (tabla 3.7 y 3.8). Con estos resultados, y según el tipo de cemento que se necesite fabricar se debería evaluar si dicha arcilla cumple con los requerimientos y elementos necesarios para tal fin.

Elemento	G0146 A	G0146 B	G0146 C	Unidades
Mg	0.027 ± 0.005	0.036 ± 0.005	0.025 ± 0.005	%
Al	9.2 ± 1.0	9.3 ± 1.0	9.2 ± 1.0	%
Si	35.3 ± 3.5	35.3 ± 3.5	35.3 ± 3.5	%
S	<LD	<LD	<LD	µg/g
K	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01	%
Ca	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.2	%
Ti	0.62 ± 0.05	0.63 ± 0.05	0.63 ± 0.05	%
Mn	135 ± 10	133 ± 10	136 ± 10	µg/g
Fe	0.39 ± 0.04	0.40 ± 0.04	0.39 ± 0.04	%
Cu	10.7 ± 1.0	15.5 ± 1.5	11.1 ± 1.0	µg/g
Zn	25.2 ± 2.5	26.3 ± 2.5	25.3 ± 2.5	µg/g
Ga	18.7 ± 1.5	20.3 ± 2.0	18.9 ± 2.0	µg/g
As	<LD	<LD	<LD	µg/g
Br	<LD	<LD	<LD	µg/g
Rb	6.2 ± 0.5	6.1 ± 0.5	6.0 ± 0.5	µg/g
Sr	86 ± 5	85 ± 5	86 ± 5	µg/g
Zr	609 ± 60	606 ± 60	583 ± 60	µg/g
Nb	14 ± 2	14 ± 2	14 ± 2	µg/g
Pb	18 ± 2	18 ± 2	18 ± 2	µg/g
Th	18 ± 2	19 ± 2	19 ± 2	µg/g

* LD – Límite de Detección

S	LD = 500 µg/g
Br	LD = 8 µg/g
As	LD = 5 µg/g

Tabla 3.7: Resultados obtenidos con las concentraciones de los elementos químicos presentes en las muestras (tabla proporcionada por Gustavo Silva, información del MIEM).

Especie	G0146 A	G0146 B	G0146 C	Unidades
Al ₂ O ₃	17.5 ± 2.0	17.5 ± 2.0	17.4 ± 2.0	%
SiO ₂	75.4 ± 10	75.5 ± 10	75.6 ± 10	%
K ₂ O	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.02	%
CaO	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2	%
TiO ₂	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	%
Fe ₂ O ₃	0.56 ± 0.05	0.57 ± 0.05	0.55 ± 0.05	%

Tabla 3.8: Resultados de las concentraciones de los elementos (tabla proporcionada por Gustavo Silva, información del MIEM).

A partir de la revisión bibliográfica, es evidente que las arcillas del grupo de la caolinita deben cumplir con ciertos requisitos cuando se utilizan como AMs. Según Díaz et al. (2022), para comprender las exigencias de las arcillas caolinitas en aplicaciones de AMs, es necesario satisfacer requisitos químicos y mineralógicos específicos. En la tabla 3.9 se puede observar la comparativa realizada entre los requisitos necesarios y la arcilla de la cantera visitada. Según los resultados del MIEM, varios de los componentes de la arcilla de la cantera no cumplen con las exigencias para ser utilizado como material de AMs. De todos modos, se observa una arcilla de buena calidad que deberá ser estudiada nuevamente ya que los resultados datan del año 2011.

	Requisito para la caolinita como Ams	Cantera W. Silva (promedio de las 3 muestras)
Al ₂ O ₃	> 18	17,5
SiO ₂	< 60	75,5
TiO ₂	< 1,5	1
Fe ₂ O ₃	< 1	0,56

Tabla 3.9: Comparativa de las concentraciones de los elementos para uso como AMs con la cantera visita (elaboración propia).

A su vez, para determinar el porcentaje aproximado de caolinita, se efectuaron dos tipos de ensayos a la cantera en cuestión, el primero consiste en un estudio microscópico de la muestra. El segundo ensayo es por calentamiento y pérdida de agua interna. Primero se calienta la muestra a 350°C y se deja hasta peso constante. Luego se procede a realizar el calentamiento entre 350°C a 600°C hasta peso constante. Se pesa la muestra para evaluar la pérdida de peso que se genera entre estas temperaturas como el porcentaje de agua interna perteneciente a la caolinita. El ensayo de este tipo de arcilla dio un porcentaje de 38%.

En cuanto al desperdicio que genera la extracción del mineral, en dicha cantera el sobrante residual es casi nulo ya que todo se recicla. Cerca del metro veinte (1,20m) de arcilla que se extrae de lo que está compactado, se va colocando en bancos, eso se carga entero como sale al camión. De un metro cúbico (1m³) compactado salen tres metros cúbicos (3m³) de arcilla, esto sucede por el esponjamiento del material. No es lo mismo un metro cúbico (1m³) de arcilla compactada natural que cuando la misma se saca y se desgrana y se desprende fácilmente. Luego lo que es suelo vegetal se utiliza para ir rellenando lo que se va excavando de las extracciones ya realizadas. En el movimiento de suelo hay rocas que el dueño de la cantera tiene acopiadas para utilizar como revestimiento de material de construcción.

3.2 CASOS EN OTROS PAÍSES

El cemento es un material noble para cubrir la demanda de construcción, pero hay que encontrar la manera de reducir la huella de carbono que genera su fabricación. Todo esto se puede lograr reemplazando el CPN con la nueva tecnología del LC³. Como se mencionó anteriormente dicho cemento se compone de arcilla calcinada, la arcilla se encuentra de manera abundante en el planeta sobre todo en África, América Latina y Asia. La amplia disponibilidad de arcilla en el mundo la convierte en una solución práctica y accesible.

Durante los años 2014 y 2017 el LC³ se estudió para poder demostrar su viabilidad técnica. Se realizaron proyectos y jornadas de investigación, que incluyeron conferencias, para dar a conocer los beneficios y poder facilitar su incorporación en el mercado. Por las investigaciones y estudios realizados se pudo comprobar que este cemento puede aplicarse de la misma manera que el CPN por el consumidor final. En otras palabras, se logra obtener un material diferente con un rendimiento idéntico, producido mediante procesos similares y utilizado para los mismos fines, pero con la distinción de que su producción genera una menor cantidad de CO₂.

La Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) trabaja en conjunto con Cuba, la India y Brasil en el desarrollo y la investigación del LC3 (Overney, 2014). Esta Agencia se encarga de transmitir esta tecnología a la industria. Este cemento, bajo en carbono, ha sido fabricado para satisfacer las necesidades de la industria y sus consumidores. En Cuba el centro de investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM) trabaja en lo que es la macroestructura mientras que en Suiza se dedican a la microestructura (Castillo Lara et al., 2010).

La necesidad de cementos con bajas emisiones de CO₂ es cada vez más apremiante, sobre todo en países donde la demanda para los próximos años irá en aumento (Fig. 3.10). Países como China, India, Cuba y Brasil se vieron en la obligación de innovar en nuevas tecnologías para la producción del cemento. Muchos de estos países han reconocido la urgencia de tomar medidas inmediatas, dado el pronóstico de una demanda importante en el mundo en desarrollo.

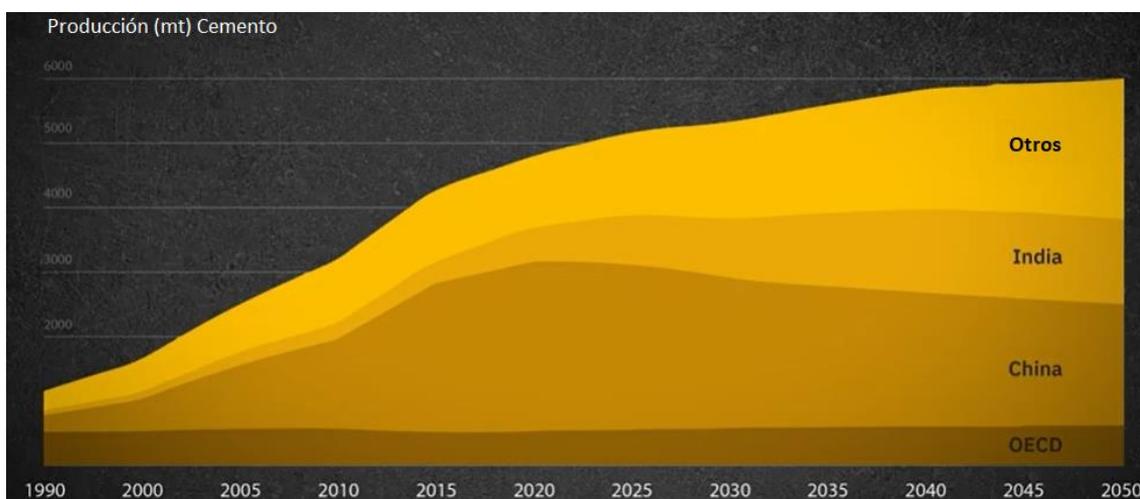


Figura 3.10 Proyección de la producción estimada del cemento en años (Scrivener, 2021)

3.2.1 INDIA

En el año 2018 India produjo cerca de 502 millones de toneladas de cemento (Verma et al., 2022) posicionándose como el segundo país con mayor consumo de cemento, después de China, pero se calcula que pronto será el país con el mayor consumo (Scrivener, 2023). Se estima que en la India el consumo de cemento anual por persona es igual al consumo de alimentos. Es por esta razón que en este país están comprometidos con el objetivo de reducir la huella de carbono y cumplir con el acuerdo de París (Swathi y Radhika, 2023).

Los autores Swathi y Radhika (2023) hacen mención al código exclusivo de Norma India que lanzó la Oficina de Estándares de la India (BIS) para el LC³ en este país (IS 18189:2023). Dentro de este código se pueden apreciar especificaciones técnicas y pautas para la producción y el uso de este cemento. El desarrollo de esta Norma intenta generar una oportunidad para poder producir cementos más sustentables con mejores propiedades.

En India hay una enorme necesidad de infraestructura y vivienda. Como menciona Scrivener (2021) para el año 2030 se estima que se necesitarán más de 25 millones de nuevas viviendas.

En este país el prototipo más destacado, donde se implementó el uso de LC³, data del año 2015 y fue la vivienda unifamiliar Jhansi (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación, 2023). Esta casa (Fig. 3.11) se construyó principalmente con LC³, en un 95%, y un porcentaje pequeño de

residuos industriales. Se estima que el ahorro en CO₂ fue de 15,5 ton que equivalen a 114 kg/m² (Scrivener, 2021). Este ahorro de CO₂ es comparable a las emisiones generadas por 10 pasajeros que realizan un viaje en avión desde Suiza hasta Sudáfrica. El segundo caso fueron las oficinas anexas a la Embajada de Suiza en Nueva Delhi proyectadas el mismo año (Fig. 3.12).



Figura 3.11 Casa Jhansi, prototipo construido con LC3, India (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación, 2023)



Figura 3.12 Oficinas de la embajada suiza en Delhi, India. (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación, 2023)

3.2.2 CUBA

Cuba, como muchos países, enfrenta desafíos en la sostenibilidad ambiental y la reducción de la huella de carbono. Al ser una isla con construcciones muy cercanas al mar se hace importante el estudio de los hormigones frente a los agentes externos (Castillo Lara et al., 2010). En este país se han estudiado numerosos casos de aplicación de los LC³ como también el impacto ambiental que el mismo tiene en comparación al CPN.

El Centro de Recursos Tecnológicos (TRC) de América Latina de los LC³ en Santa Clara se creó para tener un intercambio académico con la industria de la construcción. Los TRC interactúan con más de 25 industrias cementeras ubicadas en América Latina, África y Europa. El objetivo del TRC es brindar soluciones para abordar la creciente urgencia de contrarrestar el cambio climático, utilizando las tecnologías y el conocimiento sobre las mejoras propiedades de arcillas a utilizar, aspectos técnicos a tener en cuenta y aspectos ambientales a considerar entre otras cosas (<https://ecosolutions.gl/lc3-cement-implementation/>).

En la fábrica de Siguaney, de este país, se utilizó un software llamado SimaPro 8.1 para evaluar los indicadores de ecoeficiencia de los LC³ (Ruíz Rosa et al., 2017). En la figura 3.13 se puede apreciar la composición de los cementos estudiados, el P-35 representa un CPN en Cuba con 88% de clínker, el LC3-35 contiene un porcentaje menor de clínker de 65% y el LC3-50 tiene un porcentaje mucho menor del 50% de clínker.

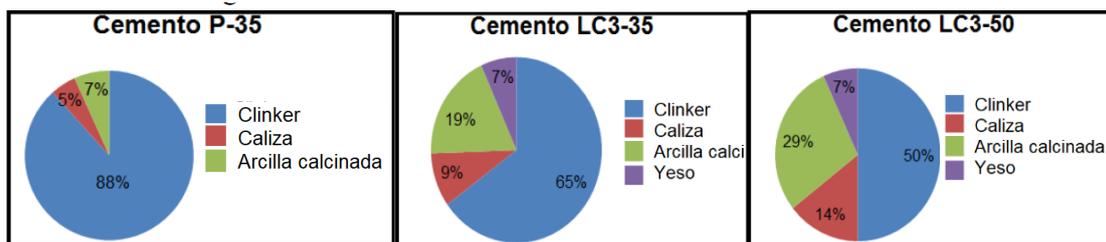


Figura 3.13 Composiciones de cemento P-35, LC3-35 y LC3-50 (Ruíz Rosa et al., 2017)

Mediante las investigaciones realizadas, Ruíz Rosa y su equipo (2017) han evidenciado que reemplazar el clínker conduce a una reducción de los impactos ambientales, destacando el cemento LC3-50 como la opción con el menor impacto en el medio ambiente.

Hace unos años atrás, en el año 2020, como se puede apreciar en la figura 3.14, se implementó un proyecto piloto de una casa modelo en Santa Clara (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación, 2023). En Cuba se han construido con LC³ para varias aplicaciones, sitios de prueba sobre el mar, esculturas artísticas, pavimentos y casas entre otros.



Figura 3.14 Casa modelo en Santa Clara, Cuba (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación, 2023)

3.2.3 BRASIL

En Brasil, el Profesor Silva Rego comenta en las charlas del Instituto Torroja (2023) que la industria del cemento es responsable de un gran porcentaje de las emisiones de carbono en el mundo. Un 50% es responsabilidad de la calcinación del clínker, un 40% de los combustibles, un 5% del transporte y un 5% del consumo energético.

De acuerdo con la norma brasilera: NBR16697/2018 existen dos tipos de cementos que pueden reemplazar el clínker del CPN con arcilla calcinada. Uno de ellos es el CPC con material puzolánico llamado: CPII-Z, con 6-14% de puzolanas y 15% de filler. El segundo es el cemento pórtland puzolánico (CP IV) con 15% a 50% de puzolana y hasta 10% de filler calcáreo (Silva Rego, 2023). Hace algunos años, en Brasil, que ya se comercializa el cemento LC³.

Entre 1965 y 1979 la fábrica Jupíá suministró arcilla calcinada para la construcción de grandes represas. En 1979 esta fábrica fue instalada para abastecer la Usina Hidroeléctrica de Itaipú (Fig.

3.15), situada entre las ciudades de Hernandarias, Paraguay y Foz do Iguaçu. Esta obra contaba con una superficie de 1.350 km² y para su construcción se utilizaron 12,7 millones de m³ de hormigón.



Figura 3.15 Presa de Jupiá en Brasil (Silva Rego, 2023)

En Brasil todas las obras que utilizan CPC con arcillas calcinadas utilizan más de un 25% de AC. Otro ejemplo es el caso del Templo Suelo Sagrado de La Iglesia Universal (Fig. 3.16 y 3.17) inaugurada en el año 2022, una obra de 54.000 m² que utilizó CPIV. La Iglesia Universal está ubicada en Taguatinga, Brasilia, Distrito Federal.



Figura 3.16 Etapa de construcción del Templo Suelo Sagrado en Brasil (Silva Rego,



Figura 3.17 Fotografía actual del Templo Suelo Sagrado en Brasil (Iglesia Universal, 2023)

3.2.4 OTROS PAÍSES

Existen otros países donde este innovador material ha demostrado notables ventajas en términos de rendimiento y sostenibilidad. A medida que la conciencia ambiental se consolida a nivel mundial, la adopción del cemento con arcillas calcinadas en proyectos de construcción se presenta como una oportunidad para mejorar la eficiencia y también para reducir el impacto ambiental asociado con la producción y el uso del cemento.

China es el principal consumidor de Hormigón en el mundo, seguido de la India (Scrivener, 2023). En los últimos 30 años en China el uso del hormigón aumentó de manera dramática (Scrivener, 2021). Es por esta razón que este país enfrenta desafíos relacionados con la huella de carbono y está en la búsqueda de soluciones sostenibles. China es uno de los países que está en la búsqueda de la implementación del LC³ en sus construcciones.

Por otro lado, en Colombia la empresa Argos está aplicando un cemento verde con AC (Cementos Argos, 2023). Este producto reduce un 38% del CO₂ en comparación a un cemento convencional.

Empresas africanas han contratado al TRC para indagar en la producción del LC³ y su potencial en la región (Ecosur, s.f.). Se llevan numerosos estudios y ensayos para lograr dar con el material correcto para lograr una menor huella de carbono.

En Francia, la empresa Holcim, introdujo el cemento con AC en su planta de Saint Pierre la Cour (Holcim, 2023) con una capacidad de producción de 500.000 toneladas por año. En esta fábrica están en la búsqueda constante de encontrar soluciones de construcción innovadoras y sostenibles.

3.3 ANÁLISIS Y SÍNTESIS FINALES DE LOS CASOS

El estudio de casos del uso de cementos con arcillas calcinadas en otros países revela patrones significativos que destacan la viabilidad y los beneficios de este cemento bajo en carbono en la industria de la construcción a nivel mundial. En todos los casos la sustitución del clínker ha demostrado una reducción sustancial de la huella de carbono, contribuyendo en la búsqueda global de la sostenibilidad.

En capítulos anteriores se ha mencionado como la resistencia temprana y la durabilidad, de este cemento, se destacan para lograr cumplir los estándares de calidad estructural. Los casos mencionados demuestran la versatilidad del LC³, utilizándose con éxito en diversas obras, desde infraestructuras de gran envergadura hasta proyectos residenciales.

Se ha demostrado que, gracias a la colaboración de diversos actores, las regulaciones gubernamentales, la investigación constante y el trabajo en conjunto entre países son factores imprescindibles para el éxito de este nuevo material a nivel internacional. La capacidad del LC³ de poder adaptarse a distintos contextos geográficos y estructurales sugiere su viabilidad como solución global para las futuras construcciones sostenibles.

A medida que más países se sumen en la implementación de cementos bajos en carbono, el LC³ aparece como una opción prometedora para impulsar la sostenibilidad y mitigar el impacto ambiental en las obras de construcción.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En el transcurso de investigación de la presente tesina se ha explorado el potencial de suplementar una parte significativa del clínker, en la composición del cemento, por arcilla calcinada abriendo un camino hacia la mejora de la ecoeficiencia en la industria de la construcción. La combinación de datos, análisis y entrevistas a profesionales y actores en el rubro proporcionan una perspectiva clara sobre los beneficios de este cemento Pórtland compuesto con arcilla calcinada.

El cemento ha sido utilizado en la historia de la construcción a nivel mundial, por su gran versatilidad, durabilidad y contribución al desarrollo de infraestructuras a lo largo del tiempo. Se estima que las urbanizaciones y la demanda de infraestructuras seguirán en aumento, por lo cual se espera que el uso del cemento continúe expandiéndose de manera significativa a través de los próximos años.

Es fundamental, por lo tanto, considerar el impacto ambiental y la ecoeficiencia en la producción y uso del cemento en las futuras construcciones, haciendo foco en la innovación, la investigación y el desarrollo de buenas prácticas que reduzcan la huella de carbono. Este enfoque será primordial para garantizar que el cemento, aunque continúe en aumento su demanda, evolucione hacia un material más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

El proceso de producción del cemento con arcilla calcinada ofrece mejoras significativas en comparación al CPN en varios aspectos. La cantidad de clínker, componente que consume grandes dosis de energía y gran emisor de CO₂, se disminuye en la mezcla lo que se traduce en una mejora medioambiental. También, la producción de CPC con AC conduce a una mejora en la eficiencia energética en los procesos de calcinación, ya que requiere de temperaturas de cocción más bajas en comparación con la producción del clínker, lo que lleva a un consumo energético menor. Por último, las propiedades de la AC pueden ofrecer un cemento con características mejoradas, como mayor durabilidad y resistencia.

La ventaja de estos cementos es que se pueden fabricar con las tecnologías disponibles en la industria del cemento, teniendo la particularidad que tanto la molienda como la calcinación de la arcilla se pueden llevar a cabo en la misma planta. Sharma et al. (2021) comentan un estudio que comprueba que instalar una planta desde cero de CPC con AC sería más económico que una planta para CPN de la misma capacidad de producción. No hay que pasar por alto el consumo de energía y la emisión de gases contaminantes, ya que la energía que se requiere para calcinar la arcilla es apenas un 60% de lo que se necesita para el clínker y las emisiones de CO₂ rondan en un 30% de las emitidas de la producción de clínker (Sharma et al., 2021).

Es importante tener en cuenta que para una correcta fabricación de un material amigable con el medio ambiente hay que considerar su ubicación y los medios de transporte que se necesitan. Si el país cuenta con materia prima para su realización, habrá que estudiar cuál es dicho mineral y qué recursos energéticos involucran al mismo para minimizar la huella de carbono, teniendo en cuenta todo su proceso. Las políticas sustentables están empezando a hacerse escuchar, pero se necesita profundizar en el análisis de los nuevos materiales para conseguir un gran desarrollo a nivel mundial.

En Uruguay se han evidenciado varios yacimientos de arcilla localizados en los Departamentos de Durazno, Cerro Largo y Canelones. Un aspecto clave a considerar para futuras investigaciones relacionadas con este tema, aprovechando la existencia de dos empresas en Uruguay que ya

están desarrollando este tipo de cemento, sería la fabricación de los CPC con AC a nivel local. Podría representar una oportunidad para la industria cementera uruguaya, mediante políticas gubernamentales que fomenten la inversión entre las empresas locales y las instituciones educativas para impulsar la producción de AC y animar su conocimiento e investigación. El costo en el procesamiento y el transporte son puntos importantes a considerar que se ven beneficiados por la disponibilidad y cercanía de la materia prima a nivel local. Pero sobre todo destacar los beneficios ambientales de la AC en comparación con el clínker utilizado en el CPN. Esto puede atraer a empresas y consumidores conscientes en el medio ambiente, promoviendo la adopción de métodos de producción más sostenibles.

Para avanzar en futuras investigaciones destinadas a estudiar y profundizar el potencial del cemento Pórtland con arcilla calcinada, es importante explorar diversas áreas estratégicas. Sería fundamental investigar y evaluar diferentes proporciones de arcilla calcinada en la mezcla del cemento para determinar el punto ideal para maximizar las propiedades del cemento y mejorar su impacto medioambiental. Además, realizar estudios del ciclo de vida permitirá evaluar el impacto ambiental global. Investigar y desarrollar técnicas avanzadas de calcinación que reduzcan aún más el consumo energético y las emisiones de CO₂. Paralelamente, se deberán generar análisis de viabilidad económica a largo plazo para poder proyectar la rentabilidad y sostenibilidad financiera de este material. Será de vital importancia estudiar los efectos regionales y locales de la implementación de estas innovaciones, así como analizar el marco regulatorio y las políticas gubernamentales que puedan influir en su adopción a gran escala. Por último, continuar investigando el mercado y la aceptación del consumidor final serán requisitos esenciales para poder entender las preferencias y demandas futuras. Todas estas áreas de investigación no solo fortalecerán el conocimiento actual, sino que también promoverán el desarrollo de prácticas más sostenibles y eficientes en la industria de la construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland. (07 de octubre de 2023).

Comercialización. <https://www.ancap.com.uy/1627/1/comercializacion.html>

Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland. (09 de septiembre 2023). *Reseña*

histórica. <https://www.ancap.com.uy/93/1/resenahistorica.html>

Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland. (18 de octubre 2023). *Ficha técnica*

Cemento Pórtland Filler CPF 40. <https://www.ancap.com.uy/innovaportal/file/1720/1/fds-cpf-40.pdf>

Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland. (18 de octubre 2023). *Ficha técnica*

Cemento Pórtland Normal CPN 40. <https://www.ancap.com.uy/innovaportal/file/9014/1/ficha-de-seguridad-cemento-portland-normal-cpn-40.pdf>

Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación (2023). *LC3 in use: Applications*. [https://lc3.ch/lc3-in-](https://lc3.ch/lc3-in-use-applications/)

[use-applications/](https://lc3.ch/lc3-in-use-applications/)

Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación. (2022). *LC3 Una alternativa sostenible para la industria*

del cemento <https://zoinet.org/product/sdc-lc3/>

Aitcin, P.C. (1998). *High Performance Concrete*. E & FN Spon.

Aleem, M. A., Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer concrete-a review. *International Journal of*

engineering sciences & emerging technologies, 1(2), 118-122.

https://doi.org/10.7323/IJESSET/V1_I2_14

Alujas Diaz, A., Almenares Reyes, R.S., Hanein, T., Irassar, E. F., Juenger, M., Kanavaris, F., Maier, M.,

Marsh, A.T., Sui, T., Thienel, K.C., Valentini, L., Wang, B., Zunino, F., Snellings, R. (2022).

Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials: a paper of RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*, 55 (5), 139.

<https://doi.org/10.1617/s11527-022-01972-2>

Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and concrete research*, 42(12), 1579-1589.

<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.09.006>.

Asociación de productores de cemento. (2018). *LC3 - Cemento de Arcilla Calcinada*.

<http://www.asocem.org.pe/noticias-internacionales/lc3-cemento-de-arcilla-calcinada>

Bonavetti, V.L., Donza, H., Pappalardi, M., Milanese, C., Violini, D., Irassar, E.F. (7-9 de noviembre de 2018). *Performance de un Nuevo Cemento Compuesto Elaborado con Puzolanas Obtenidas por Medio de Arcilla Calcinada y Filler*. Asociación Argentina de tecnología del Hormigón: VIII Congreso Internacional 22° reunión técnica de la AATH. Olavarría, Argentina.

https://cementosavellaneda.com.ar/file_publicaciones/CA_ca_publicacion_015pdf_18.pdf

Brochure coprocesa (2018). FICEM, Federación Interamericana del Cemento. E. F. Irassar, V. John, J. I.

Tobón, K. R. García Punhagui y J. L. Mack V. (2021). Rol del cemento en la construcción de ciudades sostenibles y resilientes. El desafío latinoamericano. Federación Internacional de Cemento y Medio Ambiente. <https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/Paper-ciudades-resilientes.pdf>

Castañón García, A., García Granda, S., Guerrero, A., Gómez Fernández, F. (2012). Estudio de las fases mineralógicas del clínker en una cementera española, utilizando el método de

Rietveld. *DYNA*. 79(173), 41-47. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49623206006>

Castillo Lara, R., Antoni, M., Alujas Díaz A., Scrivener, K., Martirena Hernández, J. F. (2011). Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. *Revista ingeniería de*

construcción, 26(1), 25-40. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732011000100002>

Castillo Lara, R., Fernández, R., Antoni, M., Scrivener, K., Alujas Díaz, A., Martirena Hernández, J. F. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista ingeniería de*

construcción, 25(3), 329-352. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300001>

Cemento Argos (2023) *¿Cómo se hace el cemento?* <https://argos.co/cemento/>

Cementos Artigas. (09 de septiembre de 2023). *Historia de la empresa*.

<https://www.cementosartigas.com.uy/empresa/historia>

Cementos Avellaneda (11 de octubre de 2023). CPC Olavarría granel 2023.

https://cementosavellaneda.com.ar/file_productos/cemento_compuesto_granel_olavarria.pdf

Cementos Avellaneda. (11 de octubre de 2023). *Productos: cementos*.

<https://www.cavellaneda.com.ar/productos/cementos>

Cielo Azul Cemento. (09 de septiembre de 2023). *Nuestra historia*.

https://www.cieloazul.com.uy/quienes_somos/

Cielo Azul Cemento. (09 de septiembre de 2023). *Ficha técnica Cemento Pórtland Filler Calcáreo CPF 40*

<https://www.cieloazul.com.uy/wp-content/uploads/2024/01/CEMENTO-EN-BOLSA-CPF-40.pdf>

Cimsa (23 de mayo de 2024). *Compromiso con el medio ambiente*. <https://cimsa.uy/>

da Silva Rego, J.H. (11 de abril de 2023). *Arcillas calcinadas como puzolana en la industria del cemento*

[seminario]. Seminarios Torroja, Universidad de Brasilia.

<https://www.youtube.com/watch?v=p7LOyBSuvGo>

CIU (2016). El interior industrial: Treinta y Tres. Recuperado de [https://www.ciu.com.uy/wp-](https://www.ciu.com.uy/wp-content/uploads/2022/09/el-interior-industrial-treintaytres-2016.pdf)

[content/uploads/2022/09/el-interior-industrial-treintaytres-2016.pdf](https://www.ciu.com.uy/wp-content/uploads/2022/09/el-interior-industrial-treintaytres-2016.pdf)

Davidovits J. (1994). Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. *World Resource Review*. 6(2). 263-278.

Davidovits, J. (2020). *Geopolymer, chemistry and applications*. Institut Géopolymere.

Duxson P., Fernandez Gimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., Van Deventer J.S. (2007).

Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*. 42,2917-

2933 <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Ecosolutions (2019). *LC3 Cement Implementation* (2019) <https://ecosolutions.gl/lc3-cement-implementation/>

Ecosur (s.f.). *Centro de recursos tecnológicos LC3 para América Latina en Cuba*

<https://www.ecosur.org/index.php/es/todos-los-articulos/17-ecosur-e-magazine/747-centro-de-recursos-tecnologicos-lc3-para-america-latina-en-cuba>

Federación Interamericana del Cemento (7 de octubre de 2023). *Informe estadístico 2021*.

<https://ficem.org/uso-estadisticas/>

Forero Romero, M. K. (2020). *Estudio de vigilancia tecnológica y estado del arte de los cementos*

LC3. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil]

<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5d98fb78-ce34-45b4-a136-fd763ab24f8a/content>

Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F., Marsh, A. T., Maier, M., Wang, B., Canut, M., Juenger, M. C. G., Ben Haha, M., Avet, F., Parashar, A., Al Jaber, L.A., Almenares, Reyes, R.S., Alujas Díaz, A., Scrivener, K.L., Bernal, S.A., Provis, J.L., Sui, T., Bishoi, S., Martinera Hernández, F. (2022). Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*. 55(1), 3.

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>

Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment - A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner Production*, 223 (2019) 704-728

Hidalgo Iglesias, P. (2015). *Evaluación de las emisiones de carbono del cemento portland compuesto con ceniza de cascara de arroz durante el proceso de fabricación*. [Tesis de maestría, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo] Colibrí.

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/8320/1/HID153.pdf>

HOLCIM (13 de febrero de 2023). *Holcim lanza la primera operación de cemento con bajas emisiones de carbono de arcilla calcinada en Europa*. [Comunicado de prensa].

<https://www.holcim.com/media/media-releases/first-calcined-clay-cement-operation>

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2022). *Cementos pórtland para uso general*. (Norma UNIT 20:2022).

International Renewable Energy Agency. (2018). Transformación energética mundial: hoja de ruta hasta 2050. Resumen ejecutivo. IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>

Ippoliti Ramilo, G., Ford, I. (1990). Arcilitas devonianas del Uruguay: un nuevo avance en su conocimiento. *Boletín de Investigación*, 1990 (24): 16 p.

Irassar, E., Tobón, J., John, V.M., Punhagui, K., Mack, Y. (2020). *Rol del cemento en la construcción de ciudades sostenibles y resilientes. El desafío latinoamericano*. FICEM. <https://ficem.org/ciudades-sostenible/>

Ito, A., Rota Wagai, R. (2017) Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies. *Scientific data*, 4(1),1-11 <https://www.nature.com/articles/sdata2017103#citeas>

Joshi, R. C. (16-18 de diciembre de 2010). *Fly ash—production, variability and possible complete utilization*. Indian Geotechnical Conference-2010. GEOTrendz, Mumbai, India <https://gndec.ac.in/~igs/ldh/conf/2010/articles/v012.pdf>

Mazloom, M., Ramezani pour, A. A., Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and concrete composites*, 26(4), 347-357 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946503000179>

Mehta, P. K., Monteiro, P. J.M. (2006). *Concrete: microstructure, properties and materials*. Mc Graw Hill.

Nasvi, M.C.M., Ranjith, P.G., Sanjayan, J. (2014). Effect of different mix compositions on apparent carbon dioxide (CO₂) permeability of geopolymer: Suitability as well cement for CO₂ sequestration

- wells. *Applied energy*, 114, 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.050>
- Norton, G.M., Provis, J. L. (2020). 1000 at 1000: Geopolymer technology - the current state of the art. *Journal of Materials Science*. 55, 13487-13489. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04990-z>
- Okoye, F.N. (2016). Geopolymer binder: A veritable alternative to Portland cement. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5599-5604. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.017>
- Overney, J. (2014). *A new, greener cement to meet future demand*. <https://actu.epfl.ch/news/a-new-greener-cement-to-meet-future-demand/>
- Perroud, S. (2023). *Retrouver un savoir oublié pour fabriquer un béton plus durable*. <https://actu.epfl.ch/news/retrouver-un-savoir-oublie-pour-fabriquer-un-beton/>
- Ruiz Rosa, Y., Rosa Domínguez, E. R., Sánchez Berriel, S., Castillo Hernández, L., Martirena Hernández, J. F., Suppen Reynaga, N. (2017). Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de Clinker. *Centro Azúcar*, 44(2), 77-88. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/103
- Scrivener, K.L. (2019). Eco-efficient cements: No magic bullet needed. *Global Cement Magazine* (septiembre) 10–14
- Share your green design (04 de septiembre de 2023). *Unleashing the Potential of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*. [Comunicado de prensa]. <https://www.shareyourgreendesign.com/unleashing-the-potential-of-limestone-calcined-clay-cement-lc3/>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Sirangi, B., y Prasad, M. (2023). A low carbon cement (LC3) as a sustainable material in high strength

concrete: green concrete. *Materiales de construcción*, 73(352)

<https://doi.org/10.3989/mc.2023.355123>

- Snellings, R., Almenares Reyes, R., Hanein, T., Irassar, E.F., Kanavaris, F., Maier, M., Marsh, A. T., Valentini, L., Zunino, F., Alujas Díaz, A. (2022). Paper of RILEM TC 282-CCL: mineralogical characterization methods for clay resources intended for use as supplementary cementitious material. *Materials and Structures* 55(149). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01973-1>
- Soliman, M. S., El-Sheshtawy, H. A., Shalabi, H. M. (2010). Granulated Blast Furnace Slag: Mineralogy, Microstructure, and Properties. *Advances in civil engineering*, ID 974638. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ground-granulated-blast-furnace-slag>
- TEDxGateway. Scrivener, K. (Octubre 2021). *Edificar en el mundo sin agravar el calentamiento global*. [archivo de video]. https://www.ted.com/talks/karen_scrivener_housing_the_world_without_exacerbating_global_warming/transcript?language=es
- Van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxson P. (2011). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*. 29, 89-104.
- Verma, M., Dev, N., Rahman, I., Nigam, M., Ahmed, M., Mallick, J. (2022). Geopolymer Concrete: A Material for Sustainable Development in Indian Construction Industries. *Crystals* 12(4), 514. <https://doi.org/10.3390/cryst12040514>
- Visedo, G. y Pecchio, M. (2019). *Roadmap tecnológico do cimento. Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. (pp. 43-48) https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf
- Zalba, P. E., Rodríguez, M., Iñiguez, A. M. (1988). Argilominerales de rocas pelíticas devónicas del departamento Durazno, República Oriental del Uruguay. *Revista del Museo de La Plata*, 10(86), 127-147.

Anexos

Anexo I. Doc. Ing. Gustavo Sánchez El delegado titular en representación de la Universidad de la República (UDELAR) en la Comisión Nacional de Evaluación Científica y Técnica. Jefe del Departamento Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de Facultad de Ingeniería (26 de julio, 2023). Comunicación personal.

Anexo II. Enrique Zubeldía, ex director de la División de Ingeniería y Obras de COMACO Refractarios (1 de julio, 2023). Comunicación telefónica.

Anexo III. Gustavo Walter Silva García – Dueño encargado de la cantera (29 de julio, 2023). Comunicación personal y visita a la cantera de arcilla.

Anexo IV. Ing. Luciano Gutiérrez, Jefe de Minería y Geología ANCAP (28 de agosto, 2023) Comunicación personal.

Anexo V. Ing. Matías Camou, Gerente General de CIMSA (23 de mayo, 2024). Comunicación personal y visita a la planta de Peñarol, Montevideo.

Anexo VI Ing. Virginia Hernández. Química de Cementos Artigas (27 de julio, 2023). Comunicación personal.

Anexo I

Ing. Doc. Ing. Gustavo Sánchez El delegado titular en representación de la Universidad de la República (UDELAR) en la Comisión Nacional de Evaluación Científica y Técnica. Jefe del Departamento Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de Facultad de Ingeniería. Miércoles 26 de julio, 2023 – 17hs. Comunicación personal.

Gustavo Sánchez es delegado titular en representación de la Universidad de la República (UDELAR) en la Comisión Nacional de Evaluación Científica y Técnica (CNECT). Además, coordina el trabajo encargado por convenio entre la Facultad de Ingeniería y el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) para recabar información sobre diferentes aspectos de la tecnología de fracturamiento hidráulico y la perforación horizontal. Es Ingeniero Químico, Doctor en Ingeniería Química de la UDELAR y en el área de Materiales de la Universidad de Limoges (Francia). Es también Profesor Agregado y jefe del Departamento Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de Facultad de Ingeniería. Trabajó por muchos años en la firma Metzen y Sena.

La arcilla que se extrae es arcilla clara y se extrae manualmente. Arcilla caolinita, conocidas como caolín. Para una mejor calidad de la extracción debe ser de manera manual, para no arrastrar otras impurezas, por eso es tan importante el aspecto y la clasificación visual.

Existen tres tipos de clasificaciones para las arcillas:

- Caolinita
- Illita
- Bentonita

Las dos primeras son más claras, color crema. Se usan mucho para sanitarios y azulejos por su color.

Durante el fraguado se genera hidróxido de calcio, la puzolana necesita ese hidróxido de calcio para que se genere la reacción puzolánica en la cual dicho hidróxido es absorbido por la puzolana y se genera silicato de calcio hidratado de menor densidad que el generado en la hidratación del cemento pero que al igual que éste influye aumentando la resistencia. La arcilla es un silicato de alúmina hidratado, compuesto por alúmina (óxido de aluminio), sílice (óxido de silicio) y agua mezclada con otros minerales. La sílice + alúmina + hidróxido de calcio (que lo da el Clinker) forman el silicato de calcio y aluminosilicato hidratado.

La arcilla de la familia de las bentonitas no aplica para el estudio de cementos con arcillas calcinadas. Las formaciones de caolinita-illita se las denomina coloquialmente, en Uruguay, como el nombre de arcillas de las formaciones Cordobés, por la zona de donde se extraen. En las canteras se observan segmentos colorados que es el óxido de hierro, que se utiliza para la cerámica roja. Por eso la importancia de la extracción manual.

Dentro de la misma cantera se obtienen arcillas de distintas calidades, el desarrollo de la arcilla no es continuo y se ven diferencias por sectores. La de primera calidad es la más clara, después viene la segunda calidad y la de tercera calidad ya es la arcilla con más impurezas que suele tener el aspecto más rojizo del óxido de hierro (óxido ferroso FeO).

En Uruguay se podría decir que, por año, entre todas las fábricas de cemento, se deben producir cerca de

un millón de toneladas (1.000.000 tn). Por lo que, para hacer un proyecto rentable en años, la materia prima tiene que rendir y saber que va a durar en el tiempo. Se estima que, en Uruguay por año, no deben sacar más de veinte mil toneladas (20.000 tn) de arcilla en total.

Otro factor importante es encontrar una fábrica o inversor que se interese por estudiar la arcilla del lugar. Las muestras de arcilla por debajo de la superficie visible, son costosas de extraer. También requiere de un insumo económico llevar a analizar esas muestras y se requiere de gente capacitada para seleccionarla. Uruguay no deja de ser un país muy conservador. Es importante saber cuánta arcilla hay en Uruguay y es un dato que creemos que no existe. Hay que saber si la arcilla que hay es suficiente para abastecer una fábrica de cemento y entender para qué se va a usar. Si el cemento va a hacer estructural, estamos hablando de un uso delicado, ya el cuidado de la elección del mineral tiene que ser más cuidadoso y minucioso por los riesgos que esto implica. Todo esto implica un costo y tiempos. La extracción tiene que ser homogénea, por ejemplo, dependiendo de la arcilla o cantera, a veces varía la dosis de yeso que contiene.

Para ajustar la producción del Clinker, que se forma de calcinar la piedra caliza con la arcilla, hay que ajustar las arcillas de interés. A veces se precisa solo alúmina, porque la caliza (materia prima del clinker) ya tiene sílice, entonces se precisa una arcilla rica en óxido de alúmina. El componente principal del Clinker es la caliza, que se extrae de la naturaleza, por lo tanto, hay que estudiar bien sus componentes. Por ejemplo, la caliza que se obtiene de la zona de treinta y tres suele tener déficit en alúmina, por lo cual hay que agregarle sílice, que suele ser arena.

Hoy en día hay cementeras locales que están utilizando el cemento Portland con escoria importada (CPE) que está tabulado y aprobado por las normas locales. El cemento con arcilla calcinada, que se podría conseguir en el país, aún creo que está en fase de experimentación.

Para la calcinación de la arcilla hay que llevarla a temperatura de manera rápida y enfriarla rápida. Se calcina a 600°-700°C aproximadamente y se hacen ensayos para estudiar la evolución del proceso de calcinación. Uno de estos ensayos es conocido como ensayo de frattini, “que mide el consumo de especies químicas correspondientes a las reacciones puzolánicas, y el índice de resistencia mecánica que determina el índice de actividad puzolánica por comparación de la resistencia a la compresión entre las condiciones con y sin incorporación del material considerado en una formulación de mortero normalizada” (extracto del trabajo de pasantía de grado en Ingeniería química de Silvia Gómez en el marco del programa de intercambio MARCA).

En cambio, el Clinker se hace a altas temperaturas 1.350-1.450°C esto genera gases contaminantes, y el consumo energético para llegar a esas temperaturas también es grande, todo esto repercute en un proceso costoso de fabricación (el Clinker es caro de fabricar). La arcilla calcinada se logra a temperaturas más bajas lo cual reduce en cierta medida ese consumo energético y no producen los gases contaminantes de la quema que genera la producción del Clinker.

Por último, hay que tener presente que el consumidor uruguayo no está acostumbrado a cosas nuevas, es difícil que se acostumbre a un nuevo material con otro color.

Anexo II

Enrique Zubeldía, ex director de la División de Ingeniería y Obras de COMACO Refractarios. Sábado 01 de julio, 2023 – 16hs. Comunicación telefónica.

Las zonas donde se explotaron yacimientos de arcillas en Uruguay fueron en Blanquillo, Cerrezuelo y Capilla de Farruco, que son una extensión importante del departamento de Durazno.

En este momento no se abastece de arcilla ninguna fábrica de cemento, nosotros en la época de Comaco, le suministramos arcilla durante años a una empresa (ANCAP), pero como portadores de aluminio.

Hoy en día ya no se explotan más canteras, solo queda una chica en la zona de Durazno, en Cerrezuelo que se utiliza 39% de aluminio para arcilla refractaria para la construcción de estufas. La persona con la que podrías hablar es Gustavo Silva.

Hubo explotaciones interesantes como la de Metzen & Sena, pero su uso solo estaba destinado a cerámica sanitaria y azulejos. Tenían un 22% de óxido de aluminio. La globalización con su conectividad, y la gran competencia con Brasil, hizo que esta como muchas otras empresas fundieran. Las producciones en Uruguay eran chicas, costosas y no pudieron competir contra la calidad y diseño de un país tan competitivo como lo es Brasil. Las canteras locales son chicas y no llegan a tener una calidad controlada. Hoy en día explotar una cantera en el país resultaría muy costoso y su uso no sería compatible con las ganancias que podría generar.

La empresa Comaco Refractarios SRL, en los años 70 era la única que se dedicaba a refractarios para horno en Uruguay. Durante más de 14 años le vendieron a la fábrica ANCAP. La arcilla era utilizada para agregarle el silicato de aluminio al Portland, la misma ayuda en el proceso de cocción del Clinker (5,5% hierro).

Las canteras cuentan con una concesión de 30 años, todos los años deben presentar una renovación para mantener la misma y pasado este período las concesiones se solicitan para extenderlas por 5 años más. El proceso de abrir y solicitar una concesión puede llegar a demorar entre 1 año o más.

Resulta interesante el trabajo de investigación, del estudio del cemento Portland compuesto utilizando arcilla calcinada como posible solución para reducir la huella de carbono, para esto ayudaría conseguir interesados que quieran involucrarse. Si existiera alguna empresa, que cuente con los fondos para dicho fin, se podría conseguir ahorrar mucho en combustible que no es un detalle menor. Los yacimientos interesantes para explorar son los que se extienden por el Departamento de Durazno: Blanquillo, Farruco y Cerrezuelo; en ellos no existe información confirmada de cateos hechos ahí, pero si hay afloramientos en toda esa zona. Estos yacimientos son de formas lenticulares, poco profundos y extendidos en esa región.

Tal vez resulte interesante contactarse con alguna fábrica de cemento nueva, como lo es Cielo Azul, que pueden interesarse en este proyecto y estudiar el tema de las arcillas o estar abiertos a modificar el ciclo de producción. Habría que evaluar la capacidad de los yacimientos e invertir en estos estudios, tal vez se podrían hacer cateos para ver que hay en la profundidad de dichas canteras. Por ejemplo, en Farruco las canteras tenían 4 metros de altura y entre 5 a 6 metros de profundidad. A la vista se ve la arcilla en forma de lentes horizontales, en tres capas de arcilla, pero si se excava se puede seguir hallando material.

Anexo III

Ing. Gustavo Walter Silva García – Dueño encargado de la cantera. Sábado 29 de julio, 2023 – 08hs.
Comunicación personal y visita a la cantera de arcilla.

Datos de la cantera:

Dueño encargado de la cantera: Silva Walter Gustavo

Padrón: 789

Departamento: Cerro Largo

Concesión presentada 9/8/2011 con vencimiento 29/10/2033

Estado: vigente

Tamaño: 9,65has

Mineral: Arcilla refractaria (caolinita)

1. ¿Qué tipo de arcilla se extrae de la cantera?

La arcilla es refractaria, la llaman Formación Cerrezuelo por la zona de donde se extrae. El nombre técnico de la arcilla sería caolinita. Después están las arcillas plásticas que se usan más comúnmente para cerámica, vajilla, pero esa no tengo en mi cantera.

La arcilla de mi cantera tiene poco óxido de hierro, por eso es tan clara. Hay sectores que se ve algo negro, eso es carbonilla que contiene carbón vegetal.

2. ¿Para qué se usa la arcilla de su cantera?

Hoy en día se usa para ladrillo refractario. El ladrillo es de color bastante claro, por eso cuesta que el consumidor lo tome como bueno. En realidad, la calidad de ladrillo que se logra con esta arcilla es superior a los que se comercializan hoy en día.

3. ¿Para qué se puede usar además de lo indicado en la respuesta anterior?

Se podría usar para el caso de estudio que tú estás estudiando. La calidad de la arcilla es muy buena. Tiene una granulometría muy fina lo cual ayuda a la mezcla de los agregados. El color es claro y es rica en sílice que es la que le da resistencia al material.

4. ¿Cómo se maneja el proceso de transporte y distribución de la misma?

Hoy en día trabajo con dos personas, en total conmigo somos tres. La arcilla se extrae con martillo neumático, cargo los camiones y los llevo a Sarandí del Yi donde después lo distribuyo. La cantera trabaja a pedido, la última extracción la tuve fue a finales de junio. En dos días de trabajo se pueden sacar varios camiones con martillo hidráulico.

Antes no tenía estas máquinas para extraer y se cargaba todo a mano con carretilla, eran horas y horas de trabajo.

5. ¿Conoce la calidad de la arcilla?

Sí, de hecho, tengo unos estudios que se han hecho que te voy a compartir. Pero la realidad es que la misma no se estudia, se vende para molienda como sale.

6. ¿Se hacen ensayos para caracterizar la arcilla?

La realidad es que no, la vendo como sale de la extracción. De hecho, la gente de Metzen y Sena me habían dicho que abajo había mucha más arcilla para seguir trabajando, pero la verdad es que muy costoso evaluar eso y no tengo los insumos para hacerlo.

7. ¿Para qué empresas explotan la cantera? ¿Quién consume la arcilla?

Antes le vendía a Metzen y Sena, llegamos a extraer 2.000 toneladas por año. Hoy estoy haciendo 8 viajes por mes como mucho. La empresa Comaco refractarios usa un porcentaje de mi arcilla para ladrillos de mejor calidad, pero necesitan más calor en la quema por la calidad de la arcilla. Cuanto mejor la calidad mayor es la temperatura que necesita para calcinarse.

8. ¿Hay alguna restricción legal o ambiental respecto a la cantidad de arcilla que se puede extraer?

No, el predio al ser mío yo puedo extraer lo que quiera. La gente de DINAMA ha venido solo dos veces en todos estos años a chequear el tema de los rellenos, pero no me pidieron nada en particular. Se quedaron tranquilos porque si ves, esta es una cantera que está muy prolija y limpia a comparación de otras canteras que estuvieron activas.

9. ¿Tienen alguna manera de cuantificar la vida útil de la cantera en años? ¿Hay algún plan medioambiental para garantizar la disponibilidad de arcilla a largo plazo?

Con los bancos de arcilla se va a estimando el tiempo que te queda, es un cálculo que hago yo por la práctica en todos estos años de extracción. Está cantera tiene para varios años más y si efectivamente hay más arcilla abajo calculo que podría seguir por muchísimo más.

10. ¿Han evaluado la posibilidad de la extracción de arcilla para la industria de cemento? ¿Por qué no se hizo antes?

Me encantaría, de hecho, me gustaría que se diera a conocer más. Por el momento no me han contactado para eso. Creo que mi arcilla sería muy buena para ese fin. El tema es que falta gente que invierta y lamentablemente mi cantera es chica.

11. ¿Hay desperdicio? ¿Qué hacen con el mismo?

La verdad es que no, porque la arcilla que se saca, que son cerca de 1,20m de lo que está compactado, se pone en los bancos, se desgrana fácilmente y eso se carga entero como está. De 1m³ compactado salen 3m³ de arcilla, eso por el esponjamiento. No es lo mismo la arcilla compactada natural que cuando la sacas y se desprende. Después lo que es suelo vegetal lo uso para ir rellenando las extracciones que fui haciendo y así voy moviendo. La roca que encontré en el terreno la tengo acopiada a un costado para usarla para la casa que me estoy construyendo.

12. ¿La cantidad de arcilla que se puede extraer de ella cree que podría abastecer a una fábrica de cemento o sólo serviría para fábricas de pequeña escala?

La verdad que mi cantera es pequeña, no creo a una fábrica como ANCAP le sea útil pero sí me gustaría que una fábrica pequeña pudiera consumirla.

Anexo IV

Ing. Luciano Gutiérrez, Jefe de Minería y Geología ANCAP. Lunes 28 de agosto, 2023 – 09hs. Comunicación personal.

Actualmente la firma ANCAP no cuenta con ninguna cantera en explotación. De hecho, tienen una solicitud presentada desde el año 2008 que aún no fue otorgada.

1. En 2019 ANCAP solicitó un prospecto en Minas cerca de la planta de ANCAP, el trámite quedó parado, ¿por qué?

No está parado, está en trámite. Pero la arcilla que utilizan ellos no es caolinita. La arcilla que utilizan es como fundente para el clínker, con aluminio (Al) y con hierro (Fe). Ver figura 1.

2. ¿Por qué ANCAP no produce cementos más sustentables con mayores sustituciones de Clinker que el CPF?

Se fabrica el CPF que lleva filler que no se calcina.

3. ¿Cómo son las políticas que utilizan para promover mejora y eficiencia energética en la producción? ¿Se puede asegurar la sustentabilidad a largo plazo? ¿Existe algún diseño planteado?

Para poder hacer viable un proyecto de estas características sería necesario contar con 3 factores fundamentales:

- Calidad de la materia prima.
- Disponibilidad.
- Cumplir con todos los requisitos funcionales como ambientales.

Ancap trabaja con CPF y CPN, la competencia ya trabaja con CPC y lo comercializa. Lo importante es mantener los procesos continuos para mantener un producto continuo. Si se va a utilizar arcilla calcinada, es importante que la materia prima esté disponible en la misma calidad por un tiempo prolongado. Otro factor muy importante es el transporte y las distancias, la gran mayoría de estas arcillas se encuentran en Durazno y son muchos kilómetros de distancia que lo hacen poco rentable.

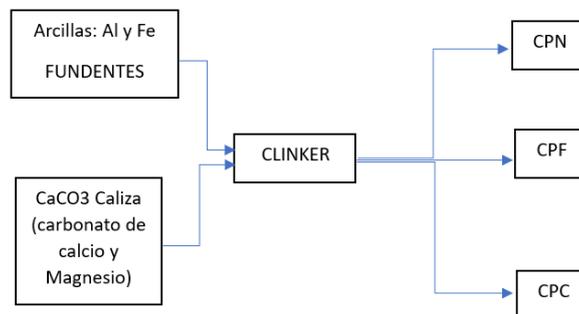


Figura II.1: Cuadro resumen dibujado por L. Gutiérrez

Anexo V

Ing. Matías Camou. Gerente general de la empresa CIMSA. Jueves 23 de mayo, 2024 – 13:30hs.
Comunicación personal y visita a la planta de Peñarol, Montevideo.

1. ¿Cómo fue el crecimiento de la empresa CIMSA en sus primeros años de operaciones?

La empresa comenzó comercializando con cemento que importaban de Turquía. A partir del año 2018 la planta de Montevideo empezó a expandirse y hoy es la sede de molienda y donde se paletiza el cemento. En los galpones se pueden depositar hasta 100.000 toneladas de clínker. De esta planta sale el cemento en bolsas de 25kg, en bolsones de 1.500kg o a granel en camiones.

2. ¿Dónde tiene la empresa su horno para la fabricación del clínker?

Contamos con un horno vertical en la planta de Treinta Tres, en ruta 8 kilómetro 306. En esta misma planta también tenemos nuestro laboratorio.

3. ¿Qué tipos de cementos fabrican?

Hoy en día fabricamos CPN 40 (de bolsa negra), el cemento de albañilería (bolsa roja), CPF 40 (bolsa azul) y hace 2 meses estamos comercializando el cemento CPC 40 (bolsa verde) en bolsas de 25kg ya que a granel lo veníamos vendiendo hace un tiempo. También estamos probando con arcillas calcinadas, pero aún no las hemos lanzado al mercado. Las puzolanas que trabajamos, para el CPC, son importadas desde Brasil.

4. ¿En la planta de Treinta y Tres, elaboran ustedes cemento o solo clínker en sus instalaciones?

El clínker que elaboramos es a través del proceso de fabricación semihúmeda. Los traslados son en camiones propios en su mayoría, al igual que la entrega del cemento, que es mayormente propia. El cemento también lo fabricamos nosotros.

5. ¿Cuáles son los valores característicos del CPC 40 que están fabricando?

Residuo sobre tamiz μm (g/100g): 6,0

Superficie específica (m^2/kg): 390

Tiempo de fraguado inicial (min): 240

Tiempo de fraguado final (min): 5

Resistencia a la compresión a los 2 días (MPa): 16

Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa): 42

6. ¿Qué adición emplean para el CPC 40?

Utilizamos puzolanas importadas de Brasil, caliza y escoria.

Anexo VI

Ing. Virginia Hernández. Química de Cementos Artigas. Jueves 27 de julio, 2023 – 10hs. Comunicación personal.

1. ¿Por qué hace un año se empezó a elaborar CPC con arcilla calcinada y no antes, pues lo elaboraban con escoria?

Migraron de la escoria a puzolana con arcilla calcinada. No fue hace un año que se empezó, ya que se venía estudiado y se sigue estudiando hace 25 años, es un tema que se venía manejando. Se paso en el año 2017 primero con escoria y 2da adición y a los 4 años cambiamos a puzolanas. En tema de sustentabilidad fuimos pioneros, aunque ANCAP había salido con CPF que ahora discontinuó, con filler hasta 20%, ahora se llega a 25%. Con esta experiencia que se conocía de ANCAP quisimos probar con un compuesto que llegara hasta 35% de adición, objetivo a largo plazo, porque aún no se llegó a 35% pero se va a llegar. La escoria que usábamos se importaba de Brasil, no había materia prima local y con el tiempo los precios empezaron a subir, se fue haciendo todo más complejo. Era mejor trabajar con material de cantera propia. Trabajamos corporativamente entre Cementos Artigas y Cementos Avellaneda de Argentina (Olavarría y San Luis). Una ventaja ecológica es que trabajamos con combustibles alternativos en el horno y trabajamos en sustituir el Clinker. Al sustituir el Clinker se logra bajar las emisiones CO₂. Yo trabajo desde hace 26 años en Cementos Artigas, en su momento teníamos un CPF con filler en un 5%. El contexto local no da para tener distintos tipos de cementos. El director de Cementos Artigas es de Uruguay. Lo que hacen ayuda a darle vida útil a la cantera. Hace 25 años, la proyección les daba para una cantera de 30 años de vida útil y hoy esa proyección sigue siendo de 30 años más, ganaron años por mejorar las adiciones. Hoy sustituyen carbón con combustibles alternativos. La idea es estirar la vida de la piedra.

2. ¿De qué cantera están extrayendo la arcilla que utilizan? ¿Se puede visitar la misma?

La nuestra está en Minas, en la base del Cerro Verdun, en el mismo predio que tenemos la planta. Si vas a la base del Cerro vas a ver desde arriba toda la extensión de la cantera. Antes, desde la planta de Clinker en Lavalleja, Minas, se trasladaba en ferrocarril a Montevideo y la fabricación de Clinker estaba en Sayago. A fines del año pasado montamos un nuevo molino en Minas dejando en desuso la de Sayago.

3. ¿Se están estudiando cateos de los yacimientos? ¿Qué tipos de ensayos se están haciendo actualmente?

Sí, hacemos los ensayos de la Norma UNIT 20, ellos tienen certificación de proceso por ISO 9.001 y la 50.000 de Eficiencia Energética y se sumó la gestión de seguridad y salud. Primero se estudió

con filler calcáreo.

4. ¿Cuáles son los principales desafíos que enfrentó la empresa al utilizar arcilla calcinada en la producción de CPC?

Muchos, y los desafíos siguen hoy en día. Desde el proceso de calcinación, tramitar la habilitación, todo se tiene que evaluar con DINAMA, pedir la habilitación, etc. Definir qué proceso de calcinación es un desafío todavía. El otro tema, es el color, cuando tienen hierro se ponen rojizas. En el caso del CPC el compuesto con filler va como mayoritario y la pulozona va con menor porcentaje. Si tiene mucha pulozona puede ser más rojizo. A veces a el cliente le causa rechazo el color, por eso es todo un desafío darse a conocer. La pulozona es excelente para el cemento, actúa bien ante los ataques al cloruro, a los sulfatos y tiene un montón de ventajas más. Lo que tienen es que bajan la resistencia a edades tempranas, es un punto que hay que tenerlo en cuenta, pero a los 7 días mejora.

5. ¿Tuvieron que cambiar el ciclo de producción de CPC que empleaban cuando lo elaboraban con escoria para implementar la producción de CPC con arcilla calcinada?

Sí, seguro que sí. La escoria se tenía estoqueada y no se fabricaba acá. La arcilla al tenerla acá mejora el sistema de producción notablemente.

¿Como se calcula la cantidad de la arcilla en la cantera? Se hacen prospecciones, perforaciones cada tanto metro, y ahí en un modelo de bloques con un programa que tenemos se estima que materiales tienen. Trabajamos con geólogos que estiman el volumen de arcilla para activar. Las conclusiones que sacamos es que hay un volumen interesante para seguir estudiando la viabilidad del CPC con arcilla calcinada.

6. ¿Cómo es el proceso de elaboración del CPC con arcilla calcinada?

Piedra cruda, illita y mica, con alto contenido de sílice y aluminio. Primero se tritura la materia, luego se la activa con temperatura. La temperatura dependerá de la composición de la arcilla, las bibliografías hablan de temperaturas que van de los 500° a 900°C. Luego se acopia el material, se puede guardar a cielo abierto o bajo techo. Con las básculas se cargan al molino del cemento junto con el resto de las adiciones, yeso y filler calcáreo.

7. ¿Los porcentajes de arcilla calcinada y filler calcáreo empleados para elaborar el CPC que están comercializando tienen alguna relación con los que se emplean para elaborar en otros países los cementos de bajo carbono, LC3?

De eso estamos lejos, no está permitido en Uruguay hacer este tipo de cementos, en Europa lo están trabajando. Nosotros estamos más próximos a la norma IRAM de Argentina que a la de Europa, que tiene más tipos de cementos. En Argentina se permite hasta 25% de filler y en Europa hasta 20%, eso por lo menos hasta donde sabía, por ahí ahora cambió.

8. ¿Cuáles son las propiedades y características específicas del CPC con arcilla calcinada en comparación con otros cementos? ¿Qué ventajas ofrece el CPC con arcilla calcinada en relación a los otros?

Excelente resistencia a los ataques químicos, se logra un hormigón más compacto lo que lo hace menos poroso. Con determinados contenidos de puzolonas con un mínimo para arriba mejora, todavía acá son bajos por lo cual no es tan buena, pero mejora los poros. Se consigue una buena resistencia los ataques por sulfatos y por cloruros. Se verifica con pruebas y distintas adiciones, a medida que se aumenta la puzolana todas sus propiedades mejoran. Reacciona mejor cuanto más fina es. Tamiz 3,25 se logra mejor índice de actividad puzolánica.

9. ¿Cuáles son los factores claves que influyen en la producción del CPC durante su fabricación?

Comparado con el CPN, hubo que hacer una gran inversión, incorporar una báscula más. El control requirió de un equipo más, otra calificadoradora, se tuvieron que agregar suplementos que antes no se tenían. Hay que pensarlo como otro proceso más que incorporar. La escoria se compraba afuera, en cambio ahora la arcilla calcinada se produce acá, es otra cosa.

10. ¿Cómo se manejan los aspectos ambientales y de sostenibilidad en la producción CPC?

Tenemos un monitoreo continuo de DINAMA, ellos tienen acceso permanente a toda la información. Contamos con un jefe de medio ambiente fijo en la planta. Se hicieron varias pruebas previas a las salidas de chimenea, no fue algo rápido de lograr. Hubo que mejorar el tema de emisiones, siempre avalados y monitoreados por DINAMA.

11. ¿Se están llevando a cabo investigaciones adicionales para mejorar las propiedades del CPC con arcilla calcinada, además de lo indicado en la norma UNIT 20?

Sí, con Argentina se mandan muestras todo el tiempo. Al INTI y a la Universidad de Olavarría. Allá hay equipamiento que acá no tenemos, se hacen estudios de difractómetros de rayos X, hay que trabajar en paralelo en la búsqueda de poder fabricar más cantidad.

12. ¿Cómo cree que la utilización del CPC con arcilla calcinada puede influir en la industria cementera uruguaya?

Pienso que puede influir positivamente, la idea es bajar el valor de Clinker con el nivel que sea. Cada cementero tiene que usar lo que tiene a su alcance, tener en cuenta las emisiones de CO₂ y el tema del traslado. Hay que pensar en las distancias y cercanías para mejorar el traslado. En una conferencia que presencié en Praga me dijeron: “trabajamos en menos clinker en el cemento, menos cemento en el hormigón, y hormigón a medida de la aplicación.” Hay que trabajar en eso, sería inviable pensar en otra cosa.

Antes, la escoria había que traerla de afuera y la pandemia fue el empujón para vernos obligados a usar lo que teníamos a nuestro alcance. El balance da como resultado la sustentabilidad. Hay que cuidar el medio ambiente, es el futuro.

Hace unos años éramos solo dos empresas: ANCAP y Cemento Artigas, hoy la cantidad se duplicó

(Cemento Charrúa y Cielo Azul). Nuestra cantera es muy similar a la de ANCAP en Minas, de hecho, compartimos espacio en el comité de cemento para las normas técnicas, donde se habla mucho de las normas.

El camino sigue siendo para adelante, no tiene retroceso, seguir con las arcillas calcinadas y trabajar para seguir aumentando la adición en producto de sostenibilidad. El filler calcáreo está topeado en un 25% y llegó a su límite, se podría decir que entre 18 a 25% es el máximo, por eso hay que ir previendo la otra adición y vamos a ir aumentando la otra adición. Pero como todo, esto hay que ir haciéndolo paso a paso. Con los otros que hemos trabajado codo a codo, son con los proveedores del aditivo químico, que es otra industria que con los cementos compuestos se está trabajando mucho porque mejoran la calidad y trabajabilidad que ayudan a compensar esto.

Hay que aprovechar más los recursos y esto es una forma de hacerlo, es un ganar ganar, por donde se lo vea.

Ahora nuestra fábrica también fabrica pegamentos y morteros. La planta la están montando en este momento, es una planta más chica pero también se hacen ensayos. En septiembre se va a estar instalando.

Para plantear esto hay que visualizar las inversiones, estudiarlas con tiempo. Todo se tiene que hacer con tiempo, nosotros fabricamos 1.500 ton de Clinker por día, son grandes volúmenes y eso implica grandes números a nivel económico. Nos mantenemos en la vanguardia gracias a los inversores en España y los contactos de Brasil y Argentina. Esto enriquece, ver otras realidades, nosotros tenemos un contexto limitado por el volumen de país, y ver otra realidad te da información que uno como colega sino no la puede tener. Creo que es algo que no vuelve atrás. Ahora hay que contagiar y darse a conocer.

Anexo VII

Fichas técnicas de los cementos

Ficha técnica CPC 40 de Cementos Artigas:



DEFINICIÓN

El cemento Pórtland Compuesto CPC40 Artigas es obtenido por la molienda conjunta de Clinker Pórtland y pequeñas cantidades de yeso, filler calcáreo, escoria granulada de alto horno y aditivos mejoradores de molienda y calidad. Se halla destinado a aquellas aplicaciones en las que no es necesario un requisito especial.

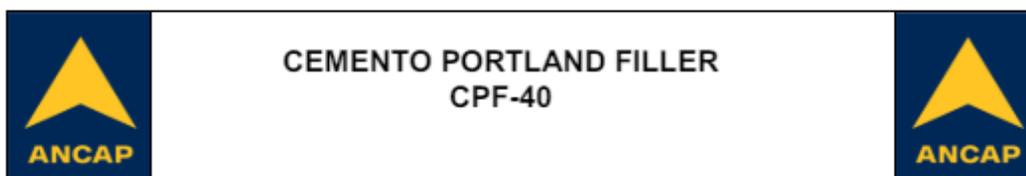
PROPIEDADES

En el cuadro adjunto se indican las propiedades del **Cemento Pórtland Compuesto Artigas Granel**:

Requisitos físicos		Unidad	Requisito UNIT		Artigas CPC 40 G
			Mínimo	Máximo	
Finura	Retenido sobre tamiz 75 μm	%	-	15	-
	Retenido sobre tamiz 45 μm	%			8,4
	Superficie específica Blaine	m ² /kg	250	-	346
Tiempo de fraguado	Inicial	Minutos	60	-	196
Resistencia a compresión	1 día	MPa	-	-	14
	2 días	MPa	10	-	27
	7 días	MPa	-	-	42
	28 días	MPa	40	60	52
Expansión en autoclave		%	-	0,8	0,06
Agua de pasta Normal		%	-	-	30
Requisitos químicos					
Residuo insoluble		%	-	-	1,5
Óxido de magnesio		%	-	-	3,0
Pérdida por calcinación		%	-	-	6,0
Anhídrido sulfúrico		%	-	3,5	2,9
Sulfuros		%		0,5	< 0,01
Cloruros		%		0,1	0,007
<i>Valor medio segundo semestre de 2021.</i>					

Según se observa en el cuadro adjunto, las propiedades del cemento Pórtland Compuesto Artigas a granel cumplen ampliamente los requisitos de la norma UNIT 20. Se destaca, por su importancia, la resistencia a compresión (figura 1), cuyos valores medios superan las exigencias normativas correspondientes.

Cementos Artigas S.A. ha desarrollado un cemento Pórtland Compuesto, que posee a edad temprana, resistencias que corresponden a las exigidas a un cemento de alta resistencia inicial (tipo III), según la norma americana ASTM C 150. Esta norma requiere resistencias superiores a 12 y 24 MPa, a 1 y 3 días respectivamente, que son superadas por el cemento compuesto Artigas.



DEFINICIÓN

Cemento Pórtland Filler 40 ANCAP es el producto que se obtiene por la molienda conjunta de clinker Pórtland y pequeñas cantidades de sulfato de calcio, entre un 6% y 25% de filler calcáreo (caliza) y hasta 5 % de minoritarios.

El producto permite obtener hormigones y morteros de muy buena trabajabilidad, así como buen desarrollo de resistencia mecánica.

CALIDAD

Cementos del Plata, fiel a la política de constante renovación, actualiza permanentemente sus controles asegurando el cumplimiento de las más estrictas normas de calidad internacionales. De este modo, el Cemento Pórtland Filler 40 ANCAP se ajusta a las normas UNIT 20 de Uruguay e IRAM 50.000 de la Argentina.

A su vez, el nuevo producto CPF 40 ANCAP contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo un cemento más amigable con el medio ambiente en comparación con el CPN 40.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CEMENTO PORTLAND FILLER

Requisitos físicos		Unidad	Requisito Norma UNIT 20:2022	
			Mínimo	Máximo
Finura	Retenido sobre Tamiz 75 µm	%	--	15
	Superficie específica de Blaine	m ² /Kg	250	--
Expansión en autoclave		%	--	0,8
Tiempo de fraguado	Inicial	Minutos	60	--
Resistencia a compresión	2 días	MPa	10	--
	28 días	MPa	40	60
Requisitos químicos				
Pérdida por calcinación		%	--	13,5
Residuo insoluble		%	--	10,0
Anhídrido sulfúrico		%	--	3,5
Óxido de magnesio		%	--	7,0
Sulfuros		%	--	0,10
Cloruros		%	--	0,10

USOS

El Cemento Pórtland Filler 40 ANCAP es de uso general en la construcción siempre que no existan condiciones especiales de exposición que justifiquen el uso de cemento Portland con propiedades



Cemento Charrúa CPF 40

El cemento **Charrúa CPF 40** es un producto de gran versatilidad diseñado para cubrir todas las aplicaciones convencionales en cualquier tipo de obra.

Es un material conglomerante hidráulico producido en Uruguay, a partir de una cuidadosa y controlada molienda de **Clínker** (componente principal) junto con **Piedra Caliza** de alta pureza (Carbonato de Calcio) más un pequeño porcentaje de **Yeso** (Sulfato de Calcio).

Como resultado de este proceso, se obtiene un producto que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua.

Presentación al cliente: sacos de 25 kg, big-bags de 1500 kg o a granel en tolvas.

Requisitos		Unidad	Requisito UNIT 20:2003		● CPF 40
			Mínimo	Máximo	
Finura	Residuo sobre tamiz 75 µm	g/100 g	□	15	1.4
	Superficie específica	m ² /kg	250	□	350
Tiempo de fraguado	Inicial	mín	45	□	162
	Final	h	□	10	3.67
Resistencia a la compresión	2 días	MPa	10	□	22
	28 días	MPa	40	60	46

Ficha técnica CPF 40 de Cielo Azul:

<p>FÁBRICA: TREINTA Y TRES MARCA: CIELO AZUL CEMENTO CIELO AZUL CEMENTOS Y CALIZAS SA INFORME TÉCNICO DEL CEMENTO</p>		<p>CPF-40 CEMENTO PÓRTLAND CON FILLER CALCÁREO (Norma UNIT 20) GRANEL 13/02/2023 - 30/03/2023</p>			
CARACTERIZACION QUIMICA					
ENSAYOS	UNIT N°	UNIDAD	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES UNIT 20/2022	
Pérdida por calcinacion	UNIT NM 18/12	%	8,89	≤ 13,5	
Trióxido de Azufre - SO ₃	UNIT NM 16/12	%	2,99	≤ 3,5	
Óxido de Magnesio - MgO	UNIT NM 14/12	%	5,02	≤ 7,0	
Residuo Insoluble - RI	UNIT NM 15/12	%	2,15	≤ 10,0	
Cloruros - Cl ⁻	UNIT 1013/15	%	0,00	≤ 0,10	
Sulfuros S ⁻²	UNIT NM 201/12	%	0,00	≤ 0,10	
Óxido de Sodio - Na ₂ O	XRF	%	0,11	No aplicable	
Óxido de Potasio - K ₂ O	XRF	%	0,84	No aplicable	
Sodio equivalente - Na ₂ O equivalente (Na ₂ O + 0,658K ₂ O)	CALC	%	0,66	No aplicable	
Aluminato tricálcico - C ₃ A en Cemento (2.65 Al ₂ O ₃ - 1.69 Fe ₂ O ₃)	CALC	%	6,25	No aplicable	
CARACTERIZACIONES FISICAS Y MECANICAS					
ENSAYOS	UNIT N°	UNIDAD	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES UNIT 20/2022	
Superficie específica (Blaine)	UNIT NM 76/98	cm ² /g	4450	≥ 2500	
Densidad absoluta	UNIT NM 23/04	g/cm ³	3,08	no aplicable	
Retenido tamiz 75µm (#200)	UNIT 1064/00	%	0,02	≤ 15,0	
Retenido tamiz 45µm (#325)	UNIT 327/11	%	4,75	no aplicable	
Tiempo de fraguado inicial	UNIT NM 65/04	MIN	205	≥ 60	
Tiempo de fraguado final	UNIT NM 65/04	MIN	240	no aplicable	
Constancia de volumen - Expansión en autoclave	UNIT 514/09	%	0,18	≤ 0,80	
RESISTENCIA A LA COMPRESION (MPa) - UNIT ISO 679					
Edad (días)	PROMÉDIO	D.ESTÁNDAR	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS UNIT 20 / 2022		
1	15,0	1,2	no aplicable		
2	25,0	1,6	≥ 10,0 Mpa		
7	38,4	1,4	no aplicable		
28	47,7	1,0	≥ 40 y ≤ 60 Mpa		
Observación:					