

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El uso del yeso en la construcción data desde la antigüedad en las regiones de Mesopotamia, Egipto y Oriente Medio se encontraron piezas de yeso en ruinas de 7000 a.C. después. A principios del siglo XX en Estados Unidos el yeso forma parte de una serie de prefabricados conjuntamente con otros materiales para generar paneles divisorios debido a su propiedad térmica y al poder aglomerante que tiene.

En Bolivia no existen datos del uso del yeso en la construcción, pero si de un artículo del año 1997 que trata de realizar el trabajo de modernización del proceso de calcinación y molienda para mejorar la producción del yeso; este trabajo plantea mejorar la producción de yeso para poder fabricar tizas, yesos médicos y yesos especiales.

En el mercado regional, el yeso proviene de las comunidades de El Huayco y Zapallar entre otras comunidades que están ubicadas en el municipio de Entre Ríos; la producción está en la etapa artesanal sin muchos cambios, desde la antigüedad. Debido a la importancia que tienen estas comunidades al ser los principales proveedores de yeso de la región es que se tomó la decisión que los estudios se realicen de estas vetas. La importancia de un estudio de las características de un material radica en conocer las propiedades del yeso teniendo mejores posibilidades de realizar prefabricados y optimizar el uso del yeso en obra.

1.2. Planteamiento del problema

El yeso de construcción es uno de los materiales de construcción con una menor uniformidad en su producción y no existen estudios de sus características físico químico y mecánicas, el trabajo tiene como finalidad la optimización en el uso del yeso en la obra y el empleo en la elaboración de elementos derivados del yeso, por lo cual es importante el conocer las características del material y las deficiencias en su proceso de fabricación y comercialización, así trabajar con los productores para mejorar estos aspectos.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar las características físicas, químico y mecánicas del yeso que se producen en las comunidades de El Huayco y Zapallar de la Prov. O'Connor del departamento de Tarija, para realizar ensayos de laboratorio así definir la calidad del yeso y clasificar según la normativa: NCh 141(Chile), UNE-EN 13279-1(España) y NB 122004 (Bolivia).

1.3.2. Específicos

- Comparación de normativas de ensayo: NCh 144(Chile), UNE-EN 13279-2 (España) y NB 122008 (Bolivia).
- Determinar características físico: finura del yeso, tiempo de fraguado, relación agua/yeso, peso específico, peso volumétrico; químico: composición química, porcentaje de humedad y mecánicos: flexión, compresión y dureza del yeso.
- Comparar los las características del yeso de El Huayco y Zapallar.
- Clasificar en función a las características del yeso de acuerdo a las normativas.
- Redactar una ficha técnica resumiendo todo el trabajo realizado con valores de las propiedades físico, químico y mecánicas, rendimiento, lugar y descripción del yeso, entre otros aspectos.

1.4. Alcance del estudio

1.4.1. Espacial

La roca de aljez es una roca sedimentaria, que se debe a la existencia de cuencas de la antigüedad en el departamento de Tarija en la Provincia O'Connor municipio de Entre Ríos donde existen dos vetas de roca de aljez formada por dos cuencas una en la zona de los cerros Villanueva, San Diego en donde se encuentra las comunidades de San Diego, Narváez, El Huayco. La segunda veta es la serranía de Suaruro y San Simón en donde existen hornos de calcinación en la zona de San Simón y Zapallar. Se escogió las comunidades de El Huayco a 82.1 km y Zapallar a 101.0 km de la ciudad de Tarija debido a la posibilidad de ingreso y la representatividad de la veta de roca de aljez, mostrada la ubicación en la Ilustración 1.1 El muestreo se realiza en el mercado de la construcción en la ciudad de Tarija que abastecen los hornos de producción del yeso de las zonas ya indicadas, las vetas existentes muestran una variación mínima debido

a que el yeso en su estado natural es de origen sedimentario por precipitación química de la solución en un medio acuoso.

Ilustración 1.1 Ubicación de los hornos de calcinación.



Fuente: Imagen satelital extraída Google Earth

1.4.2. Conceptual

1.4.2.1. Caracterización del yeso

Los parámetros que se aplican en este trabajo dan como resultado las características físicas, químico y mecánicas del yeso de construcción sin el uso de ningún aditivo para poder clasificar su calidad en base a normativa. También la redacción de la ficha técnica de los yesos con valores de sus propiedades, composición química y recomendaciones del uso, dando al usuario un mayor conocimiento del producto para realizar un correcto uso del yeso en obra y realizar aplicaciones con otros materiales como prefabricados.

1.4.2.2. Comparación de las propiedades del yeso, manipulación y el impacto ambiental

Partiendo de la caracterización del yeso en los lugares de estudio se procede a una comparación y una clasificación del yeso según normativa, así también se investiga los ambientes de producción, envasado y la manipulación en obra, así mismo el impacto ambiental que genera en su proceso de producción. Realizando un análisis de la realidad de la producción del yeso y proponiendo mejoras para optimizar los niveles de calidad en la producción y el producto.

1.5. El estudio

1.5.1. Tipo de estudio

Esta investigación de tipo exploratorio y descriptivo ya que los estudios a estos materiales en el país son escasos y en la región es más acentuada esta deficiencia, es un estudio exploratorio ya que no se conocen los valores de las propiedades del material explorando estas propiedades en los lugares de extracción y producción del yeso para determinar una determinada área de estudio. Se procede a describir las propiedades físico, químico y mecánicas del yeso para así tener una ficha técnica que describa las características del material y la compatibilidad con otros materiales para analizar en la aplicación en elementos prefabricados.

1.5.2. Método de estudio

En este trabajo se realiza un análisis de metodología cuantitativa para la cual se procede a aplicar estudios físicos, químico y mecánicos; la metodología cualitativa se usa para clasificar el yeso de acuerdo a sus características y formar una ficha técnica que describa al material.

1.5.3. Tratamiento de la información

1.5.3.1. Fuentes y recolección

En base a la identificación de los lugares de explotación más representativos se obtiene el yeso y se realizan los ensayos y la recolección de la información es de forma cuantitativa midiendo los valores que reflejen estos estudios tanto químicos, físicos y mecánicos.

1.5.3.2. Análisis

En la etapa de análisis de los resultados reflejados en el laboratorio se realiza una comparación entre las características de cada banco de material para determinar cuál es el de mejor desempeño y cuál cumple con la normativa tanto nacional como la de los países vecinos, obteniendo otros indicadores para trabajar en futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL: EL YESO DE CONSTRUCCIÓN, SU FABRICACIÓN, USO Y ENSAYOS

2. MARCO CONCEPTUAL: EL YESO DE CONSTRUCCIÓN, SU FABRICACIÓN, USO Y ENSAYOS.

2.1. El yeso en la construcción

El yeso se ha empleado desde la antigüedad en distintos usos en una edificación: como mortero de junta o revestimiento de pared, piso y techo; también se resalta el uso en ornamentos: esculturas, yeserías, estucos. Este uso del material proviene de orígenes proteolíticos en las zonas de Mesopotamia, Egipto y Oriente, se logra encontrar rastros de yeso como el primer material conglomerante fabricado por el hombre este hallazgo en el lugar de Catal Hüyük en el 7000 a.C. (actualmente Anatolia-Turquía) se encontró rastros de yeso en paredes, techos y suelos de las viviendas en ruina (Gárate,1999). Según el tipo de aplicación en los restos arqueológicos se habla de yesos de colocación a base de anhídrita insoluble, como lubricante entre sillares; de yesos de acabado, fundamentalmente de semi-hidrato, usados en tabiques y juntas; y yesos de decoración, en forma de morteros con arena caliza muy seleccionada.

Según (Villanueva,2004) el yeso ha pasado por tres etapas históricas, que se corresponden con revoluciones tecnológicas en la sociedad: la etapa artesanal, la etapa industrial y la etapa postindustrial. Los yesos artesanales son los que se fabrican en los hornos a partir de rocas de aljez de mayor diámetro y su proceso de cocción para obtener yeso es mediante leña; son yesos no homogéneos, que se emplean en las cercanías de los lugares de producción y en muchas ocasiones son fabricados por los usuarios para consumo propio. Los yesos industriales son yesos más controlados, sujetos a protocolos de fabricación y que se comercializan en grandes cantidades en las ciudades. Finalmente, los yesos postindustriales son los yesos con aditivos de tipo sintético que modifican y corrigen sus propiedades y características, adaptándolos al proceso de fabricación y a una puesta en obra rápida y eficaz.

En el siglo XVIII se inician los primeros estudios de la producción del yeso de forma industrial y de los primeros estudios que se realizaron en 1768 por Lavoisier con la presentación de su trabajo de los fenómenos en los que se basa la preparación de yeso a la Academia de Ciencias. Posteriormente en el siglo XIX Van t'Hoff y Le Chatelier dan una explicación científica del proceso de deshidratación de la piedra de aljez

iniciando con una serie de investigación sobre el tema para mejorar los tiempos y la homogeneidad del proceso.

En Bolivia no existe una data del año en cuando se comenzó a utilizar el yeso en las edificaciones, los primeros estudios que se realizaron son del año 1997 en el cual se plantea mejorar la producción del yeso para la fabricación de tizas y para la construcción el trabajo fue presentado en un Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, por la Universidad Mayor de San Simón con el título de: Aplicaciones del yeso: plantas piloto en Bolivia.

Las mejoras a los procesos de fabricación del siglo XVIII y XIX que generó tipos de calcinación en los cuales optimiza el consumo energético, tiempos de cocción de la roca del aljez, estas mejoras llevan a los procesos actuales de calcinación realizando la posibilidad de aplicar el yeso en elementos pre fabricados.

En el siglo XX en Estados Unidos se inicia la patente de yeso laminado es un tablero de dos cartones con alma de yeso la misma nace como una propuesta más resistente al fuego que los paneles de madera, éste fue el inicio del uso del yeso para prefabricados como elementos no decorativos.

2.2. Geología de las vetas de yeso

La materia prima para la obtención del yeso, es una roca sedimentaria química llamada aljez o piedra de yeso, procedente de fenómenos de evaporación de cuencas salinas evaporitas. Esta roca está compuesta por el mineral yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), acompañado frecuentemente con impurezas de arcilla, arena, otras sales como carbonatos y cloruros, y otros sulfatos.

Este mineral es encontrado en masas compactas, masas terrosas o rocas blandas, asociadas con sales, calizas, areniscas, arcillas, pizarras, y otras formas de depósito salino. Por lo general la roca de aljez tiene un 71% de sulfato de calcio y un 20% agua. En la naturaleza existen tres fases cuya composición se basa en el sulfato de calcio, dos fases minerales hidratadas: yeso y basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$) y una anhidra la anhidrita (CaSO_4). Estos minerales en muchas ocasiones están relacionados entre sí por fenómenos geológicos:

Hipergénesis son las transformaciones y alteraciones tras la exhumación de las rocas mediante procesos físicos o químicos en el cual rocas ígneas se descomponen y forman sedimentos en un esquema de diferenciación geoquímica sedimentaria, según (Goldschmidt,1954): De una roca madre se descompone en: minerales resistentes (cuarzo); minerales hidrolizados (arcillas); minerales oxidados (hematíes, pirolusita); materiales reducidos (carbón, petróleo, sulfuros); minerales precipitados (calcita, dolomita, magnesita) y minerales evaporados (halita, carnalita, epsomita, atacamita, dolomita, calcita)

Diagénesis es las transformaciones durante la compactación de los sedimentos los mismos se producen en temperaturas menores de 150 a 200 °C y a una profundidad máxima de 5 a 6 km del suelo, este proceso se debe a la compactación causadas por la infiltración en donde se decantan sustancias disueltas. Esta transformación se debe a un proceso en el cual una cuenca infiltra y al sepultarse se produce aumentos de presión y temperatura, en el cual se produce un proceso de deshidratación y formación de la roca de aljez. Estas transformaciones en las rocas, en lo que se conoce como ciclo geológico del yeso.

En la naturaleza la roca de aljez se encuentra en 5 variedades: Roca Natural; gipsita, que es una estructura térrea e impura; alabastro, una variedad translúcida de granos finos; espato satinado, de aspecto sedoso y fibroso; y selenita, de apariencia cristalina. En la región de la provincia O'Connor se encuentra en su abundancia la roca aljez natural y la gipsita teniendo una variación de coloración de la roca de acuerdo a la pureza de sulfato de calcio (coloración blanco-amarillo), contenido de: Aluminio (rojo-café), Silicio (Rojo), Hierro (Café), Magnesio (Blanco) y los tal como se muestra en las ilustraciones 2.1. y 2.2.

Para la comprensión completa del comportamiento de los productos industriales derivados del yeso, es necesario conocer los aspectos mineralógicos de los componentes de este sistema de fases minerales, así como las características petrológicas de los sistemas evaporativos que dan lugar a la génesis del aljez.

Ilustración 2.1 Vetas de extracción de la piedra de aljez



Fuente: Periódico El País del 30 de Junio del 2018

Ilustración 2.2 Extracción y transporte de la piedra de Aljez



Fuente: Imagen Propia. Zapallar Prov. O'Connor

2.3. Fabricación del yeso

El yeso se utilizó en la construcción desde la antigüedad se encuentran datos de construcciones de yeso desde los años 7000 a.C en la región de Mesopotamia, Egipto y Oriente Medio, las primeras investigaciones se realizaron en los años 1768 por Lavoisier y en el siglo XIX por Van t'Hoff y Le Chatelier, y en esa época se realizaba la cocción de la roca de aljez con los hornos árabes o morunos.

Al mismo tiempo que se realizaron las investigaciones del material también hubo innovaciones y descubrimientos de nuevos mecanismos de cocción de la roca de aljez, el horno culée del año 1751 es un horno de forma de un paralelogramo, el horno tiene varios ingresos y una cubierta de similar forma a los hornos tipo volcán con los que actualmente se realiza cocción del ladrillo artesanal (gambote). En el año 1845 Minich fabricó un horno en base a un cilindro el cual era pre calentado y donde contenía la roca de aljez y mediante un espiral procedía generaba un movimiento para su uniformidad en base a esta idea se realiza el horno de cilindro rotatorio el cual es utilizado de forma industrial en la actualidad. El horno de Friquet y Guyant de 1850 es un sistema de cilindros en los cuales la roca de aljez ingresaba triturada, en donde se realizaba una cocción uniforme y conservando su coloración blanca. M. Dumesnil presenta en el año 1855 su horno para la cocción de la roca de aljez este constaba de dos partes, una de ellas era el hogar en forma de cono invertido y la otra el horno en forma de cono truncado. Su principal meta era poder cocer 35 metros cúbicos por día de yeso. Paralelamente, Violette diseña un horno a vapor mediante una serie de calderos en donde se hierve agua para que el vapor pase por un serpentín en donde está la roca de aljez molida, produciendo su calcinación. En base a este diseño actualmente existen las marmitas de fuego indirecto.

El proceso industrial del yeso inicia en la extracción de la roca de aljez el cual se realiza mediante perforación y voladura de uno o más niveles de la roca de aljez para después llevar a la trituradora mediante trituradoras de rodillo o machacadoras de impacto o mandíbula se obtiene los tamaños de grano deseados de la roca de aljez para después ser calcinada mediante un horno de cilindro rotatorio o una marmita de fuego indirecto,

el proceso de tamizado y homogenizado de las partículas para realizar el envasado del producto.

La fabricación del yeso en la región de la provincia O'Connor comunidades del El Huayco, Zapallar, San Diego, San Simón, Chimeo y Lagunitas se tiene registrado con 193 productores de yeso afiliados y 265 hornos , tiene una producción año de 156,500 Ton de yeso ocupando el tercer lugar después de los departamentos de Cochabamba y La Paz, debido al proceso de calcinación de la roca de aljez en el departamento, éste ocupa el primer lugar de producción de gases de efecto invernadero con 72,100 ton de CO₂ por año datos extraídos de la revista El hornero tecnológico. Programa EELA Eficiencia energética en ladrilleras y yeserías artesanales. Swisscontact.

Los lugares de estudio a los que se pudieron acceder para la toma de muestras son las de El Huayco y Zapallar en donde se visitaron y se observó el proceso de calcinación del yeso son de forma muy artesanal, sin tener ningún control de los aspectos de contenidos de humedad, finura del material, grado de cocción del yeso y otros aspectos que definen la calidad del producto.

Ilustración 2.3 Calcinación del yeso de construcción



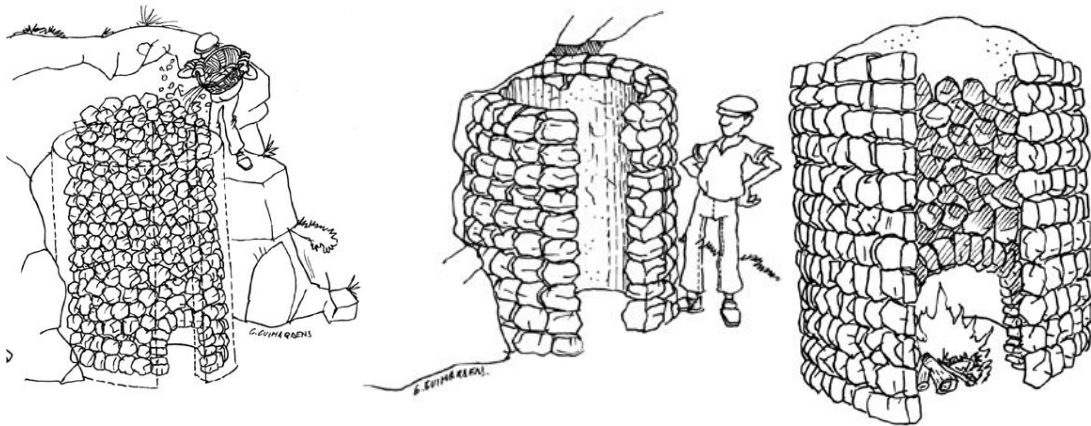
Fuente: Imagen Propia. Zapallar Prov. O'Connor

Ilustración 2.4 Horno de calcinación de yeso



Fuente: Imagen Propia. Zapallar Prov. O'Connor

Ilustración 2.5 Proceso de calcinación del yeso en un horno tradicional



Fuente: Guimaraens G., Maestros del yeso.

Para la extracción del aljez se escoge mediante la coloración de la roca de aljez (gris claro – rosado claro) y la experiencia de las personas del lugar la misma extracción se realiza mediante maquinaria pesada.

El proceso de calcinación del yeso es de manera artesanal y con procesos antiguos tal como se muestra en la ilustración 2.3 y 2.4, este proceso tiene muchas deficiencias en

la forma de cocción de la roca de aljez no es uniforme, tiene mucha contaminación del yeso con la materia orgánica que se utiliza para la cocción y el daño ambiental que genera en la deforestación.

El proceso de producción comienza en unos hornos cilíndricos “morunos o hornos árabes” de unos 3 a 4 m. de alto y 2 a 1.5 m. de diámetro tal como se muestra en la gráfica 1 y 2. La distribución del horno se divide en tres partes, en la base se colocan las troncas más grandes y el yeso en roca con diámetro mayores a 50 cm, en la parte del medio se coloca troncos medianos y rocas de yeso de un diámetro entre 50cm a 20cm, y en la parte superior del horno se colocan ramas y hojas con rocas pequeñas de un diámetro menor con 20cm y tapando con ramas y hojas para conservar la temperatura, el tiempo de cocción puede llegar a durar más de 20 hrs, todo esto depende de las características del clima y del tipo de madera que se emplea para generar la alimentación continua del fuego.

Este proceso artesanal como se muestra las ilustraciones 2.3, 2.4 y 2.5 en los tiene distintos problemas al no ser un método controlado la deshidratación del yeso no es uniforme, la zona inferior del cilindro sufre una calcinación excesiva del yeso y la zona superior una incompleta deshidratación del yeso. En el contexto mundial este tipo de producción de yeso queda obsoleta desde el siglo XVII existiendo mejoras significativas en el proceso. El molido de la roca de yeso deshidratado es mediante un molino de martillo accionado por un motor eléctrico, para después ser envasado.

2.4. Datos técnicos del proceso de fabricación de yeso

En los hornos de deshidratación en la provincia O'Connor son cilíndricos y como combustible usado para la deshidratación de la roca de yeso es la leña la misma que tiene un Poder Calorífico Superior de 14.630 kJ/kg el cual durante 15 a 18 hrs se realiza la combustión con temperaturas que oscilan entre los 100 °C a 130°C tal como se demuestra en la Tabla 2.1

En la presente Tabla 2.1, indica que la temperatura máxima a la que llega el horno artesanal es a 130°C, la que es necesaria para deshidratar la roca de yeso. Gracias a las orientaciones de los trabajadores en los hornos de producción de yeso se logró realizar

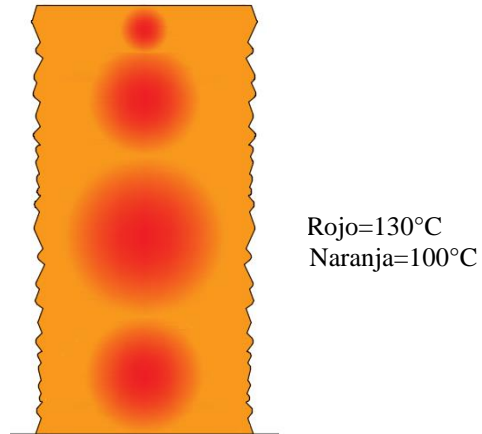
la ilustración 2.6 referente a la distribución de las temperaturas en el horno y también se tomó como referencia la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Uso del ventilador durante el proceso de cocido de yeso

Etapa	Rango de Temperatura	Uso de Ventilador	Efecto sobre el yeso
Pre-Calentamiento	Temperatura ambiente hasta 100°C	Se requiere poco aire y combustible	Se produce el secado y eliminación de agua unida físicamente a la materia prima
Calentamiento	110°C–130°C	Aumentar el caudal de aire y cantidad de combustible administrado para alcanzar la temperatura alta indicada	Se elimina media molécula de agua ligada químicamente a la materia prima
Enfriamiento	De 130°C a temperatura ambiente	Una vez terminada la cocción, se suspende la administración de aire y combustible	

Tabla extraída: Revista “El Hornero Tecnológico” como parte del proyecto EELA Eficiencia Energética en Ladrilleras y Yeseras Artesanales, proyecto de Swisscontact

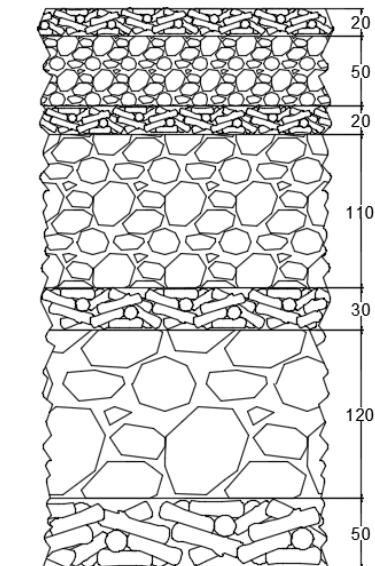
Ilustración 2.6 Distribución de temperatura en el horno.



Fuente: Elaboración Propia, Ilustración referencial.

Partiendo de una medición aproximada (por su irregularidad) de los hornos de deshidratación de yeso se tiene un volumen aproximado de 12.56 m³ el cual mediante indicaciones de las personas encargadas de los hornos se ven reflejadas en la ilustración 2.7:

Ilustración 2.7 Horno de calcinación del yeso.



Fuente: Elaboración Propia, Ilustración referencial.

Partiendo de la ilustración 2.7 y tomando en cuenta la cantidad de vacíos que tiene la colocación de la leña ($F_w=0,47$) y del coeficiente de esponjamiento de la roca de yeso ($F_w=0,57$). Teniendo la siguiente Tabla 2.2 en donde resumimos: el espacio que ocupa en el horno, volumen de material en el horno, peso del material.

Tabla 2.2 Cantidades de material que ingresa al horno.

Material	Volumen en el horno (m³)	Volumen de material (m³)	Peso del material (kg)
Yeso	8.80	5.01	15,894.00
Leña	3.77	1.77	1,594.71

Tabla referencial: Compuesta a partir de mediciones en el lugar y consultas con los trabajadores. **Fuente:** Elaboración: propia.

En la actualidad el proceso de cocción de la roca de aljez genera daños ambientales de consideración según los datos que recabamos de la revista “El hornero tecnológico” se tiene que al año se emiten 72,100 Ton de CO₂. Según la tabla 2.2 el uso de 17,215 m³ de leña que equivale a 860.75 ha de monte deforestado al año con una producción de 156,500 Tn de yeso.

2.5. Composición química del yeso

El yeso es sulfato cálcico hidratado, del cual tiene la siguiente composición: CaO 32.6%, SO₃ 46.5% y agua 20.9%, es incoloro o blanco en estado puro, sin embargo, generalmente presenta impurezas que le confieren variadas coloraciones, entre las que encontramos la arcilla, óxido de hierro, sílice y caliza, entre otras. Presenta lustre de vítreo a aperlado, especialmente en superficies de clivaje, sus cristales van de transparentes a translúcidos, cristaliza en el sistema monoclinico (Regueiro, 1997, p.563). Sus cristales delgados son flexibles, pero no elásticos, tiene muy baja conductividad térmica, por lo que se usa en paneles de yeso como un relleno aislante. La estructura del yeso ha sido definida por varios autores, la misma que nos es más útil para nuestro estudio son los datos de (Chang,1996) en su “Tratado sobre minerales”.

Tabla 2.3 Composición química en óxidos de los sulfatos de cálcicos naturales.

Fase mineral	CaO (%)	SO₃ (%)	H₂O (%)
Yeso (Aljez)	32.60	46.50	20.90
Anhidrita	41.20	58.80	0
Basanita	38.70	49.70	9.30

Tabla compuesta: a partir de datos de Chang, Howie y Zussman (1996) y de SNIP (1982). **Fuente:** David Sanz Arauz (2009). Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas (Tesis doctoral). Recuperado de http://oa.upm.es/1711/1/DAVID_SANZ_ARAUZ.pdf

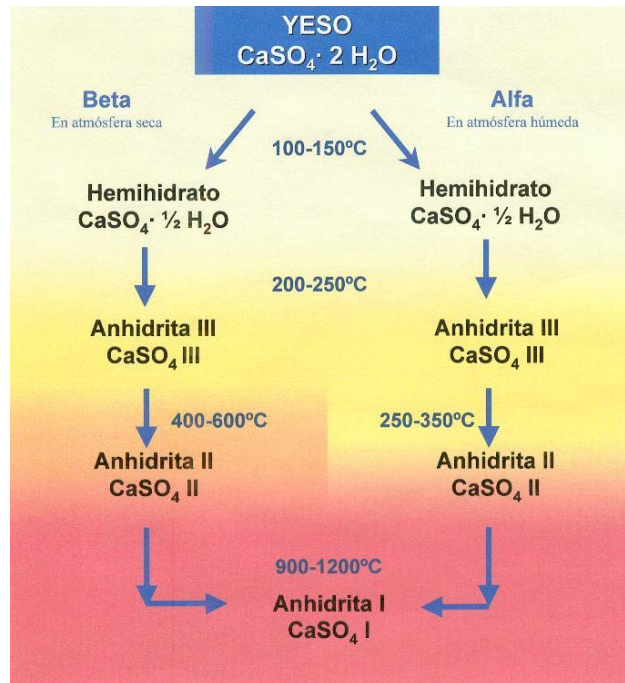
Esta tabla 2.3 tiene valores de óxidos que están presentes en el sulfato de calcio Ca(SO₄) en sus fases mineral de forma natural, anhidrita cuando esta calcinada debido a ello perdió todo el agua que está ligado químicamente y basanita es el yeso cuando ya tuvo humedad de equilibrio el mismo es el más común y es el que se comercializa como yeso.

2.6. Efecto del calor sobre el sulfato de calcio di-hidratado.

El yeso di-hidratado de forma natural (roca de aljez) o de forma artificial solo se tiene unas modificaciones en la humedad de la roca por lo cual se realiza un proceso de cocción.

Cuando el sulfato de calcio natural di-hidratado (roca de aljez) es calentado pierde parte del agua de constitución. A temperaturas superiores a 110°C se elimina una molécula y media de agua, dando lugar al sulfato de calcio hemi-hidratado de estructura cristalina monoclinica, cuya fórmula química es CaSO₄ + ½H₂O. Este compuesto químico es el constituyente fundamental del yeso aglomerante.

Ilustración 2.8 Calcinación de la roca de aljez



Fuente: Propiedades del yeso sito web del departamento de ingeniería química de la Universidad de Alicante. Recuperado: <https://diq.ua.es/yeso/propiedades.htm>

Como se puede ver en la ilustración 2.8 y los datos obtenidos de la Tabla 2.1 podemos notar que la temperatura de calcinación de la roca de aljez no pasa de los 130°C el mismo sólo forma yeso en estado hemi-hidrato que si es posible su rehidratación posteriormente para formar yeso di hidrato ya aplicado con las molduras y formas que se necesite. Las fases del yeso anhídrita no es posible su rehidratación debido a que el proceso de deshidratación modifica su estructura cristalina hexagonal las cuales no reaccionan o es muy difícil su reacción con el agua, estos tipos de CaSO_4 son utilizados como complementos para el cemento Portland

El proceso químico que ocurre en la calcinación de la roca de aljez es la pérdida de la molécula y media de agua, los compuestos químicos que acompaña al sulfato de calcio no tienen ninguna pérdida ni modificación manteniendo los porcentajes de impurezas en una muestra de yeso y de la roca de aljez.

2.7. Ensayos químicos

2.7.1. Análisis espectrómetros de fluorescencia de rayos X en el yeso

Este ensayo se realizó en los laboratorios de la empresa de Cemento El Puente debido a que es uno de los pocos laboratorios que cuenta con el equipo para poder realizar el ensayo.

Como referencia se buscó un procedimiento de laboratorio que se realiza para poder hacer estos análisis ya que en las normativas se determinaba análisis químico mediante el uso de reactivos y teniendo la posibilidad de realizarlo mediante la metodología XRF era lo más recomendable, El procedimiento tiene como fuente el artículo de: TRIVIÑO, SAGRERA, "La preparación de muestras para análisis por rayos X". 1 fluorescencia. Últimos avances en materiales de construcción, Núm. 113, enero-febrero-marzo 1964. El mismo indica lo siguiente:

“Procedimiento:

Las muestras recibidas en el laboratorio son trituradas y molidas, hasta pasar toda la cantidad de muestra por el tamiz de 1.900 mallas, con el fin de eliminar el posible contenido de hierro metálico procedente de la molienda, a cada una de las muestras se le pasa un imán, quedando adherido al mismo las pequeñas partículas de aquel metal que se encuentre mezclado con la muestra.

Las muestras así obtenidas se desecan a 105° C, hasta peso constante.

La pérdida al fuego de cada una de las muestras se determina por el procedimiento normal.

Con los datos de las pérdidas al fuego se forman grupos o familias, con pérdidas al fuego similares. Esta similitud se entiende para valores extremos que difieran en una unidad.

De cada familia se toma una muestra, cuya pérdida al fuego sea la media de los valores extremos que determina la familia, a esta muestra se le llama "patrón", analizándose sus componentes por la técnica química habitual y por duplicado.

Como es sabido, todo procedimiento de análisis por técnica fisicoquímica necesita un patrón, cuyo contenido haya sido determinado por vía química normal; dicho patrón se

analizará también por la técnica fisicoquímica que se emplee. Esta determinación será el elemento comparativo de las muestras-problema de su misma familia.

Todas las muestras, tanto los patrones como los problemas, son analizadas por fluorescencia de rayos X; para ello deben someterse a una preparación standard (1), que consiste esencialmente en tomar una cantidad aproximada de 10 g, llevarlos a un porta-muestras, y mediante un pistón cilíndrico se comprimen con una presión de 260 kg/cm² durante un tiempo fijo de medio minuto.

Una vez preparada la muestra, estará lista para ser introducida en el aparato de rayos X para su análisis.”

2.7.2. Determinación de humedad o agua libre

El ensayo para la determinación de humedad en el yeso se basa en la Normativa Chilena NCh 145 que en su capítulo 5.1., especifica lo siguiente:

“Pesar, como mínimo una muestra de 50 g del material preparado según 4.1.1 y colocarla en un recipiente adecuado formando una capa delgada. Secar en horno a temperatura de 45°C durante 2 hrs., enfriar enseguida en atmósfera seca y pesar nuevamente.

La pérdida en peso corresponde a la humedad. Se calcula su porcentaje en relación con la muestra original.

Esta muestra seca se debe conservar en un recipiente hermético para las determinaciones posteriores.”

2.7.2.1. Determinación del tiempo de actividad del yeso comercial

El tiempo de actividad química de un yeso inicia cuando el producto se hidrata con el agua de amasado para su cristalización. En este proceso el sulfato de calcio pasa de tener media molécula de agua que en algunos casos logra obtener a través del contenido de humedad de equilibrio en el proceso de enfriado y molido del yeso, y la total cristalización y pérdida de actividad del yeso cuando se logra hidratar y se compone de dos moléculas de agua.

En este trabajo el análisis que se quiere realizar es la variación de la pérdida de actividad del yeso en un estado de almacenamiento de condiciones ideales y el momento en el cual el producto ya no es óptimo para la obra.

En el análisis se obtienen los peso moleculares de los siguientes compuestos: sulfato de calcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) y agua (H_2O) los mismos se desarrolla en las Tablas 2.4 y 2.5:

Tabla 2.4 Peso Molecular Ca (SO_4)

Elemento	Numero de moles de átomos (mol)	Peso atómico (gr/mol)	Peso sub total (gr/mol)
Ca	1.00	40.08	40.08
S	1.00	32.07	32.07
O	4.00	15.99	63.99
Peso molecular Ca (SO_4):			136.14

Tabla: compuesta a partir de datos de la tabla periódica de elementos. **Fuente:**

Elaboración Propia.

Tabla 2.5 Peso Molecular H_2O

Elemento	Numero de moles de átomos (mol)	Peso atómico (gr/mol)	Peso sub total (gr/mol)
H	2 mol	1.01	2.02
O	1 mol	15.99	15.99
Peso molecular H_2O			18.01

Tabla: compuesta a partir de datos de la tabla periódica de elementos. **Fuente:**

Elaboración Propia.

Partiendo de los datos de las Tablas 2.4 y 2.5 se tiene el porcentaje de humedad en la molécula de sulfato de calcio cuando inicia el proceso de pérdida de actividad producido por la humedad del ambiente la misma ocurre cuando se añade media molécula de agua al sulfato de calcio ($\text{Ca}(\text{SO}_4) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$):

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso molecular } \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}}{\text{Peso molecular } \text{Ca}(\text{SO}_4) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

$$\% \text{Humedad} = 6.20557\%$$

La pérdida total de la actividad concluye cuando el yeso por su periodo estacionario en el tiempo adquirió dos moléculas de agua mediante procesos de humedad ($\text{Ca}(\text{SO}_4)+2\text{H}_2\text{O}$):

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso molecular } 2\text{H}_2\text{O}}{\text{Peso molecular } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

$$\% \text{Humedad} = 20.9270\%$$

Los valores de la Tabla 2.4 y 2.5 son valores de sulfato de calcio di-hidratado ($\text{Ca}(\text{SO}_4)+2\text{H}_2\text{O}$) para efectos de cálculo se trabaja con porcentajes de pureza de sulfato de calcio anhidro ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$) realizando la siguiente relación para la muestra de El Huayco:

$$100\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 79.073\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)$$

$$88.96\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow x$$

$$x = \frac{88.96\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \cdot 79.073\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)}{100\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O}}$$

$$x = 70.3433408\% \text{ Ca}(\text{SO}_4)$$

Realizando el mismo procedimiento de cálculo se obtuvieron los siguientes valores con los datos de la muestra del Zapallar:

$$100\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 79.073\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)$$

$$95.90\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow x$$

$$x = \frac{95.90\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O} \cdot 79.073\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)}{100\% \text{ de } \text{Ca}(\text{SO}_4)+2 \text{H}_2\text{O}}$$

$$x = 75.831007\% \text{ Ca}(\text{SO}_4)$$

2.8. Ensayos físicos

2.8.1. Finura del yeso

En los ensayos de finura del yeso se toma como guía a la Normativa Española UNE-EN 13279-2 que indica lo siguiente en su capítulo 4.1.:

“Aparatos

- Serie de tamices según la Norma Internacional ISO 565 de:
 - 5 000 μm solo para los yesos para mortero de agarre (C2)
 - 200 μm y 100 μm para elementos de yeso fibroso (C1)

- 1500 μm para los trabajos con yeso fibroso y yesos en capa fina (C1. C6)
- Espátula de madera o de plástico.
- Balanza de precisión de ± 0.1 g
- Desecador

Determinación de las partículas retenidas en el tamiz de 5000 μm

Procedimiento: Se pesa $500\text{g} \pm 5\%$ de la muestra de ensayo guardada en un recipiente estanco y se tamiza a través del tamiz de 5000 μm ., aplastando los granos con la espátula, se pesa el residuo y se analizan de forma visual las partículas retenidas en el tamiz.

Expresión de los resultados: Se expresa la masa retenida en el tamiz, como el tanto % referido a la muestra total, se hace la media de los dos resultados obtenidos y se anota en el informe del ensayo.

Determinación de las partículas retenidas en los tamices de 200 μm y 100 μm

Procedimiento: Se toma unos 200 g aproximadamente de la muestra de ensayo guardada en un recipiente estanco y se desecan hasta una masa constante a (40 ± 2) °C., se enfría en un desecador hasta la temperatura ambiente.

Se toma el tamiz con una mano de manera que su posición será algo inclinada y se le imprime un movimiento de vaivén, permitido en cada movimiento golpear la otra mano, con una cadencia de aproximadamente 125 veces por minuto, de modo que el yeso se extienda en todo momento de manera uniforme, cada 25 movimientos se gira el tamiz unos 90 grados, tras un minuto se pesa el residuo y se continúa tamizando. Se sigue tamizando hasta que durante un minuto no pasen más de 0.4 g de yeso.

Al cabo de tres minutos de tamizado se restituye el polvo adherido al marco del tamiz, al fondo del tamiz mediante una brocha, se sigue tamizando hasta que el yeso pase a través del tamiz en un minuto sea inferior a 0.2 g. Se cepilla la parte inferior del tamiz, rechazando este residuo antes de pesar el retenido del tamiz. El ensayo en el tamiz de 100 μm se realiza de forma análoga y con las mismas limitaciones que las del tamiz de 200 μm .

Se repite el procedimiento con una segunda muestra.

Expresión de los resultados: Se expresa la masa retenida en el tamiz, como porcentaje de la masa total ensayada. Se hace la media de las dos determinaciones para cada uno de los tamices y se compara con el valor indicado en las especificaciones.”

2.8.2. Tiempo de Fraguado

Para este ensayo se considera guía a la Normativa Boliviana NB 122008 debido a que el tipo de ensayo que se realizó la normativa española solicitaba el uso de aditivos y/o retardadores, no respetando los objetivos de la investigación, la misma estudia al yeso y no así la influencia de los aditivos. En la normativa su capítulo 3.5 indica:

“Tiempo de fraguado

Aparatos

Aparato de Vicat (Ilustración 2.9) consistente en un armazón de soporte (A), provisto de una varilla reversible (B) de $300\text{g} \pm 0.5\text{ g}$. cuyo extremo o barra de penetración (C) tiene $10\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ de diámetro en una longitud mínima de 50mm; el otro extremo lleva una aguja intercambiable (D) de $1\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ de diámetro y de 50mm de longitud. La barra reversible puede fijarse en cualquier posición por medio de un tornillo de sujeción (E); asimismo, va provista de un índice (F) ajustable y deslizante sobre una escala (G) graduada al milímetro, fija sobre el soporte (A).

Molde constituido de un material no corrosivo ni absorbente en forma de anillo tronco-cónico de $60\text{mm} \pm 3\text{mm}$ de diámetro interno del círculo mayor y de base, $70\text{mm} \pm 3\text{mm}$ de diámetro interno del círculo menor y una altura de $40\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

Placa de asiento constituida por una placa de vidrio de aproximadamente 100 mm x 100 mm de lado.

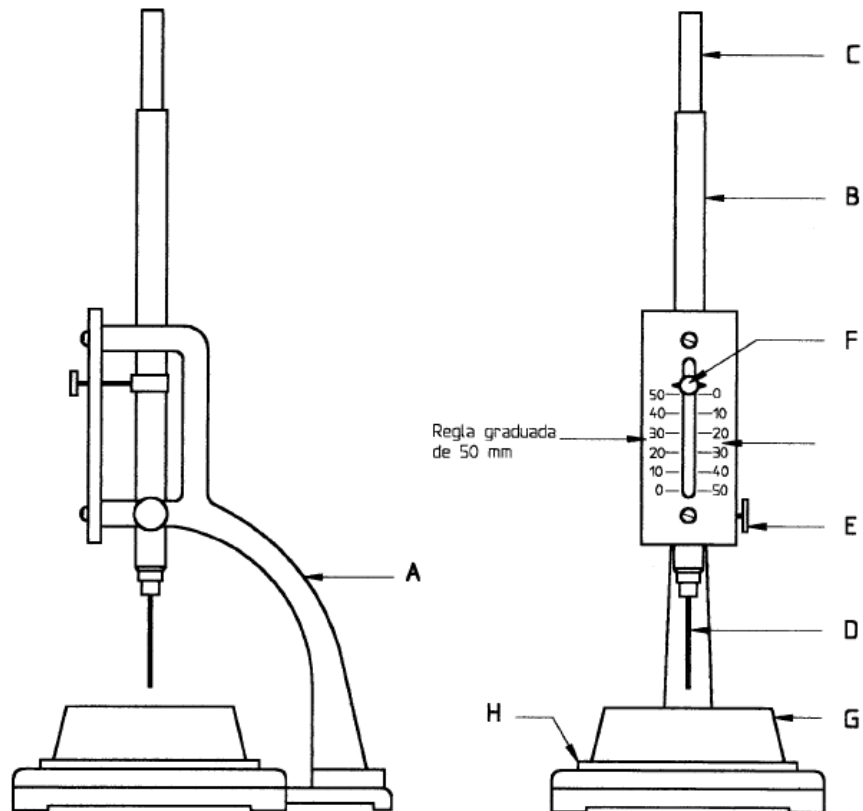
Balanza con una división de escala de 0.1 g.

Se pesan, al 0.1 g, aproximadamente 200 g de muestra, se registra la hora y se mezcla con la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal, teniendo en cuenta todas las condiciones especificadas, pero omitiendo el agregado del retardador.

Se hace descender la aguja y se deja penetrar suavemente en la pasta, evitando que se acelere su movimiento.

Se repite la operación cada 30 s, hasta obtener el tiempo de fraguado inicial y luego cada 2 min, hasta obtener el tiempo de fraguado final, realizando esta operación en partes distintas sobre la superficie de la probeta, limpiando perfectamente la aguja después de cada penetración.

Ilustración 2.9 Ilustración del Aparato de Vicat



- | | |
|---|--|
| A: Soporte | E: Tornillo fijador de la posición de B |
| B: Varilla removible | F: Indicador ajustable |
| C: Extremo superior de B, 10 mm de diámetro y al menos 50 mm de largo | G: Anillo cónico rígido, que contiene la pasta |
| D: Aguja removible. De 1 mm de diámetro y 50 mm de largo | H: Plato de vidrio cuadrado de 100 mm de lado |

Fuente: Instituto Nacional de Normalización, Normativa NCh 144.

Se considera iniciado el fraguado, cuando la aguja, penetrando en la pasta, queda retenida a 1 mm aproximadamente, del fondo del molde; se registra entonces el periodo

transcurrido desde que se comenzó el agregado de yeso al agua y se expresa como el tiempo de fraguado inicial, en minutos.

Se considera que ha finalizado el fraguado, cuando la aguja, apoyada sobre la cara de la probeta no penetre más de 0.5 mm. Se registra entonces, el periodo transcurrido desde que se agregó el yeso al agua y se expresa como tiempo de fraguado final, en minutos.”

2.8.3. Relación agua/yeso

En este ensayo tenemos como guía a la normativa española UNE-EN 13279-2 que indica tres métodos para la obtención de la relación agua/yeso debido a las posibilidades de obtención de materiales de laboratorio se procedió a realizar el método del amasado a saturación:

“Método de amasado a saturación. - Este método se usa para los conglomerantes a base de yeso.

Principio. - Determinación de la masa de conglomerante de yeso en gramos que se puede saturar cuando se amasa a saturación en 100 g de agua

Aparatos:

- Recipiente cilíndrico de vidrio de unos 66 mm de diámetro interior y 66 mm de altura. con marcas a los 16 mm y a los 32 mm de altura sobre la superficie interior de la base.
- Cronómetro.
- Balanza con precisión de ± 0.1 g.

Procedimiento. - Se vierten en el recipiente de vidrio 100 g de agua teniendo cuidado de no mojar la parte superior de las paredes del recipiente cilíndrico, se determina la masa m_0 con una precisión de ± 0.5 g., el tiempo total para realizar el ensayo debe ser de (120 ± 5) s. Primero se espolvorea el yeso uniformemente sobre la superficie del agua. de forma que al cabo de 30 s la pasta de yeso haya alcanzado la primera marca y la segunda al cabo de 60 s. se continúa espolvoreando el yeso hasta que al cabo de (90 ± 10) s la pasta de yeso haya alcanzado unos 2 mm por debajo de la superficie del agua. Durante los 20 a 40 s posteriores, la cantidad de yeso espolvoreado en la superficie del agua y por los bordes del recipiente debe ser la suficiente para que la capa de agua

desaparezca. Si aparecieran pequeños grumos de yeso durante la operación, éstos deberían haberse humectado al cabo de 3 a 5 s.

En el caso de yesos de fraguado lento, puede ser que no se alcancen las marcas de nivel en el tiempo señalado. En este caso debe espolvorearse el yeso de forma que caiga sobre la parte del agua en la que no haya yeso y no sobre las zonas en las que ya se haya espolvoreado el yeso. Debe anotarse el tiempo de espolvoreado.

Antes de pesar, se elimina el exceso de yeso de los bordes del recipiente de vidrio. Se determina la masa m_1 con una precisión de ± 0.5 g., este ensayo se repite como mínimo dos veces. Se calcula el valor medio de la cantidad espolvoreada.

Expresión de resultados. - la relación agua/yeso. R. viene dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{100}{m_1 - m_0} (3)$$

Donde:

m_0 : es la masa del vaso + la masa del agua, en g.

m_1 : es la masa del vaso + la masa del agua + la masa del yeso, en g.”

2.8.4. Determinación del peso específico

Al no existir un ensayo para la obtención del peso específico del yeso se tomó una relación con la densidad del cemento hidráulico haciendo referencia que ambos son conglomerantes utilizando así la normativa ASTM C 188-95 “Density of hydraulic Cement” (Densidad del Cemento Hidráulico) y AASTHO T-133 (El ensayo fue extraído de una guía de laboratorio de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” San Salvador - El Salvador) Basándose en las normativas mencionadas:

“Material Y Equipo.

Cemento Portland tipo I (64 g aproximadamente).

Kerosene libre de agua o Nafta con gravedad no menor de 62 API.

Hielo.

Matraz Le Chatelier.

Balanza de 0.01 g de precisión.

Aparato Baño María a temperatura constante.

Termómetro de 0.2 C de precisión.

Espátula.

Embudo.

Procedimiento.

1) Lavar el matraz Le Chatelier y secar su interior (asegurarse que se encuentre libre de residuos y de humedad).

2) Llenar el matraz Le Chatelier entre las marcas de 0 y 1 ml (se recomienda llenar el matraz hasta la marca de 0 ml), con cualquiera de los dos líquidos especificados en la parte correspondiente a material y equipo, secar el cuello del matraz si es necesario.

La determinación del peso específico relativo de los cementos consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (g) y el volumen (cm³) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier.

3) Sumergir el matraz en Baño María a temperatura ambiente hasta que no existan diferencias mayores de 0.2 °C entre la temperatura del líquido dentro del matraz y la temperatura del líquido exterior a éste, debido a que cuando se desprendan las burbujas de aire el líquido dentro del matraz disminuirá, llenar éste con una pipeta entre las marcas de 0 y 1 ml (se recomienda mantener la medida en cero). Anotar en la hoja de reporte el volumen de líquido dentro del matraz y la temperatura de ensayo (temperatura ambiente).

4) Pesar una cantidad de cemento de 64 ± 0.05 g y depositarla en el matraz, debe tener cuidado al depositar el cemento de evitar salpicaduras y observar que el cemento no se adhiera al interior del matraz por encima del líquido, se puede utilizar un aparato vibratorio o un embudo para acelerar la colocación del cemento y para prevenir que éste se adhiera al cuello del matraz.

5) Colocar el tapón en el matraz y hacer girar éste en una posición inclinada o girarlo horizontalmente y suavemente en círculo, de tal manera de liberar de aire el cemento hasta que ya no exista escape de burbujas hacia la superficie.

6) Sumergir el matraz en el Baño María y controlar la temperatura de éste tal como se hizo en el numeral 3) de este apartado. Medir el volumen y anotarlo.

7) Para desalojar el cemento del matraz que contiene kerosene, colocar éste boca abajo, sin destaparlo. Mover el matraz y el cemento se ubicará en las cercanías de la boca de éste. Si quedan residuos de cemento adheridos al matraz, utilice ácido clorhídrico para enjuagarlo.

Cálculos.

Para determinar la densidad del cemento se hace uso de la siguiente ecuación:

$$c = \frac{M}{(V_f - V_i)} \quad (4)$$

Donde:

M: Masa de la muestra de cemento.

V_i: Volumen inicial del líquido introducido al matraz Le Chatelier, en cm³.

V_f: Volumen final del líquido (después de introducir los 64 g de cemento), en cm³.

c : Densidad del cemento, en g/cm³.

El peso específico relativo del cemento se calcula de la siguiente forma:

$$PER_c = \frac{c}{H_2O} \quad (5)$$

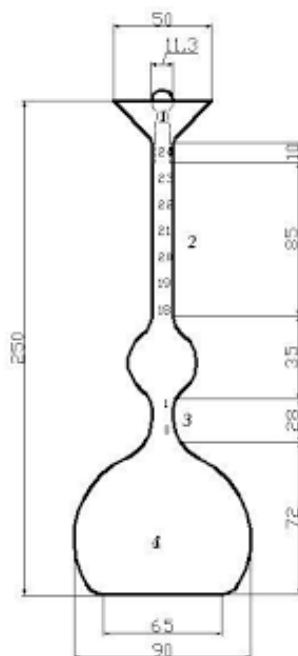
Donde:

c: Densidad del cemento en g/cm³.

H₂O: Densidad del agua a 4 C = 1 g/cm³.

PER_c: Peso específico relativo del cemento (adimensional).”

Ilustración 2.10 Matraz de Le Chatelier



Fuente: Asociación Brasileña de Fundición ABIFA.

2.8.5. Preparación de probetas de ensayo y determinación del peso volumétrico del yeso fraguado.

La preparación de los ensayos es una parte fundamental para obtener los mejores resultados; tenemos como guía a la Normativa Española UNE-EN 13279-2 el mismo en su inciso 4.5. 2.. Cumple con los mismos requerimientos que la Normativa Boliviana NB 122008, especificando mejor su procedimiento.

“Preparación de la Probeta de ensayo. El yeso que se va a ensayar, se debe amasar según el procedimiento indicado en el apartado 4.33, con la relación agua/yeso determinada según los procedimientos descritos en los apartados 4.3.1. 4.3.2. o 4.3.3., dependiendo del tipo de yeso.

Inmediatamente después de la preparación, con ayuda de una espátula para rellenar los huecos y las esquinas, se debe pasar la pasta de yeso a los moldes previamente engrasados. Para eliminar la aparición de burbujas de aire, se debe elevar el molde 10 mm desde su extremo superior y dejarlo caer.

Esta operación debe repetirse 5 veces, todo el proceso de relleno de los moldes no debe superar los 10 min desde el comienzo del amasado y su superficie no debe ser alisada. Cuando la pasta haya fraguado debe eliminarse el material sobrante con una regla metálica o un cuchillo, mediante un movimiento de sierra. Se deben preparar de esta manera tres probetas como mínimo.

Cuando la pasta haya adquirido el grado adecuado de resistencia, se deben desmoldar las probetas identificándolas. Las probetas deben mantenerse durante siete días en la atmósfera de laboratorio descrita en el apartado 3.1 después, deben desecarse hasta masa constante a una temperatura de (40 ± 2) °C. Tras su secado, las probetas deben enfriarse en desecador hasta la temperatura del laboratorio de ensayo.”

2.9. Ensayos mecánicos

2.9.1. Resistencia a flexión

Para el ensayo de la resistencia a la flexión se toma como guía a la Normativa Española UNE-EN 13279-2 la misma en su inciso 4.5.4 indica:

“Determinación de la resistencia a flexión

Principio. Se determina la carga necesaria para romper una probeta prismática de 160mm x 40 mm x 40 mm apoyada sobre los rodillos cuyos centros estén separados 100 mm

Procedimiento. La probeta debe colocarse sobre los rodillos del dispositivo de flexión y, mediante un rodillo central, debe aplicarse una carga hasta que se rompa la probeta. Se anota la carga máxima, en Newton, que soporta la probeta.

Expresión de los resultados. La resistencia a flexión P_F viene dada por la formula (9):

$$P_F = 0.00234.P \quad (9)$$

Donde:

P_F : es la resistencia a flexión en N/mm²;

P: es la carga media de rotura en N de, al menos, tres valores obtenidos.”

2.9.2. Resistencia a compresión

En el ensayo de resistencia a la compresión se tuvo como guía a la Normativa Española UNE-EN 13279-2 la misma que indica lo siguiente en su capítulo 4.5.5:

“Determinación de la resistencia a compresión

Principio. La probeta se comprime hasta su rotura.

Procedimiento. La resistencia a compresión se debe determinarse aplicando una carga a los trozos rotos de las probetas procedentes del ensayo de resistencia a flexión.

Pueden fabricarse nuevas probetas siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 4.5.2. Si el ensayo de compresión no se realiza inmediatamente a continuación del ensayo de flexión, los trozos de las probetas a ensayar se deberán guardar en un desecador, los trozos de las probetas se colocan con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40 mm x 40 mm.

Se permite inclinar el plato superior para establecer un contacto perfecto entre las dos caras de las probetas y los platos de la prensa, el eje de rotación del plato superior debe estar centrado sobre la superficie de la probeta sometida a compresión.

La carga debe aplicarse sobre la probeta hasta su rotura.

Expresión de los resultados. Debe calcularse el valor medio de los 6 valores obtenidos y expresarse en N/mm². La carga de resistencia a compresión R_c viene dada por la fórmula (10):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (10)$$

Donde

R_c : es la resistencia a la compresión en N/mm²;

F_c : es la máxima carga en la rotura en N;

1600 40 mm x 40 mm es el área de la probeta en mm².”

2.9.3. Determinación de la dureza

Para realizar el ensayo de la determinación de la dureza se tuvo como guía a la Normativa Española UNE-EN 13279-2 que en su capítulo 4.5.3., indica:

“Determinación de la dureza

Principio. Se determina la huella dejada por una fuerza determinada sobre la probeta de ensayo.

Aparatos. Dispositivo que permita aplicar una bola de acero de 10mm de diámetro en un punto fijo de la superficie de una probeta y que se pueda ejercer una carga fija sobre

dicha bola de forma perpendicular a la superficie de la probeta. Comparador, que forme parte del conjunto de la bola y que permita determinar la profundidad de la huella.

Procedimiento. El ensayo se realiza sobre dos de las caras longitudinales de la probeta (por ejemplo, sobre las caras laterales que están en contacto con el molde).

Se aplica la carga en tres puntos situados a una distancia de $\frac{1}{4}$ de la longitud de la probeta aplicando la fuerza perpendicularmente a la cara ensayada, en el plano que pasa por el eje lateral. Los puntos extremos deben estar situados a una distancia de 20 mm de cada uno de los extremos de la probeta.

Se aplica una carga de 10 N y en 2 s se incrementa hasta $200 \text{ N} \pm 10\text{N}$. Se mantiene la carga durante 15s; a continuación, se mide la profundidad de la huella.

Expresión de los resultados. La dureza H, en N/mm^2 viene dada por la formula (8):

$$H = \frac{F}{\pi \times D \times t} = \frac{20 \times 1000}{\pi \times 1 \times t} = \frac{6366}{t} \quad (8)$$

Donde

F: es la carga en N

D: es el diámetro de la bola en mm

t: es la profundidad media de la huella en μm

Se anota en el informe de ensayo, en grupos de tres correspondientes a cada una de las caras ensayadas, la profundidad de las 18 huellas. Se calcula la media aritmética “t” y se indica el número de resultados comprendidos entre $0.9t$ y $1.1t$. Se excluyen los valores de las huellas que hayan marcado sobre poros.”

CAPÍTULO 3
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Análisis del espacio de estudio

El análisis del espacio de la investigación es cualitativo se analizó en base a las vetas de origen de la roca de aljez y su representatividad para la producción del yeso; también se consideró como zonas de estudio la accesibilidad a las zonas de calcinación del material para elegir los bancos de muestra y la procedencia del yeso para realizar el análisis físicos, químicos y mecánicos.

3.2. Ensayos químicos

3.2.1. Análisis espectrómetros de fluorescencia de rayos X en el yeso

El ensayo del análisis químico del yeso se realizó en la Fábrica de Cemento “El Puente” dando los siguientes datos en la Tabla 3.1 que se encuentran respaldados en el anexo 1:

Tabla 3.1 Análisis químico de yeso

Muestra	1	2
Lugar de Procedencia	El Huayco	Zapallar
Componente	%	%
LOI o PPF ¹	7,13	6,79
SiO ₂	4,71	5,08
Al ₂ O ₃	0,90	0,97
Fe ₂ O ₃	0,21	0,19
CaO	35,26	36,03
MgO	0,39	0,57
SO ₃	44,23	44,61
Ca(SO ₄) + 2 H ₂ O	88,96	95,90

Fuente: Laboratorio de Cemento El Puente.

Como un análisis visual se tiene que es una roca sedimentaria y se cristaliza en un sistema monoclinico de hábito prismático de forma rómbica con aristas biseladas en las caras, en forma de punta de lanza al quebrarse de las canteras.

La referencia de la Tabla 2.3 comprueba que los valores obtenidos en laboratorio son de una muestra de yeso con alto contenido de pureza. Asimismo el contenido, de Silicio

¹ LOI= Perdidas por fuego

(SiO₂) con el que cuenta mejorando la dureza del yeso y el contenido de Hierro (Fe₂O₃) aporta en las propiedades de resistencia al reaccionar en la solución pueden formar un anión [FeCl₆] que puede estar complejos en coordinación química con el Calcio (Ca). Sodio (Na). Magnesio (Mg); como también puede formar un catión-ion hexaminhierro III [Fe(NH₃)₆]³⁺ que pueden estar complejos en coordinación con tetroxido de azufre (SO₄) formando estructuras de mayor desempeño en su resistencia.

3.2.2. Determinación de humedad o agua libre

Ambos ensayos se realizaron mediante la normativa NCh 145., siguiendo el procedimiento de laboratorio. El material que se utilizó en los ensayos fue conservado en óptimas condiciones las mismas son en bolsas plásticas y se mantuvieron a una altura de 20 cm a 30cm del suelo.

En el ensayo de la determinación de humedad del yeso, en los lugares de El Huayco, Zapallar se realizaron 3 muestras en diferentes periodos de tiempo los mismos datos recabados en laboratorio se pueden ver en el anexo 2 y 3. Mostrando a continuación los cálculos realizados en donde terminamos el porcentaje de humedad de una muestra de yeso y partiendo de la explicación en el título 2.7.2.1. Determinamos el contenido de humedad en sulfato de calcio resumiendo los valores de este cálculo en las siguientes tablas 3.2 y 3.3:

Tabla 3.2 Contenido de humedad²

Procedencia	Fecha del Ensayo	Numero de muestras	Valor medio (%)	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)	Desviación estándar máxima de las muestras (%)
El Huayco	12/09/2019	5	5.03	4.54	5.42	0.72
	17/09/2019	5	5.53	5.40	5.64	0.28
	27/11/2019	5	6.29	6.07	6.54	0.46
Zapallar	17/06/2019	5	4.82	4.09	5.13	0.72
	10/09/2019	5	5.08	4.89	5.18	0.51
	15/10/2019	5	5.34	5.10	5.53	0.68
	26/11/2019	5	5.72	4.95	6.21	0.57

² Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 3

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.3 Contenido de humedad en sulfato de calcio³

Procedencia	Fecha del Ensayo	Numero de muestras	Valor medio (%)	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)	Desviación estándar máxima de las muestras (%)
El Huayco	12/09/2019	5	6.24	5.66	6.69	0.89
	17/09/2019	5	6.82	6.66	6.94	0.32
	27/11/2019	5	7.68	7.44	7.98	0.52
Zapallar	17/06/2019	5	5.98	5.13	6.34	0.83
	10/09/2019	5	6.29	6.07	6.41	0.60
	15/10/2019	5	6.60	6.32	6.81	0.79
	26/11/2019	5	7.03	6.14	7.59	0.67

Fuente: Elaboración Propia.

Estas Tablas 3.2 y 3.3 resumen son: los datos tabulados del contenido de humedad de las muestras del yeso y del sulfato de calcio, las últimas usaremos para determinar la pérdida de actividad del yeso de la muestra de El huayco.

Estos datos de resumen son de los datos tabulados del contenido de humedad de las muestras del yeso y del sulfato de calcio, las últimas usaremos para determinar la pérdida de actividad del yeso de la muestra del Zapallar.

Debido a las condiciones ideales con la que se mantuvieron las muestras tanto de El Huayco como la del Zapallar la variación de la absorción de la humedad es mínima menor a un 6% (yeso hemi-hidratado) por las condiciones en las cuales están expuestas. Teniendo un comportamiento totalmente distinto el yeso en condiciones en las cuales se almacenan y venden en el mercado, las mismas son en bolsas de cemento las cuales son recicladas algunas veces engrampadas y otras veces solo dobladas para evitar que el contenido salga.

La importancia de analizar una muestra que esté en condiciones de almacenamiento y venta al mercado es muy importante para determinar el lapso de tiempo en el cual el yeso tiene una total pérdida de actividad.

³ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 2

La muestra es de una obra la misma fue adquirida en fecha 6/10/2019 y consultando al proveedor del yeso da como referencia que cada 15 días recibe nuevo lote de El Huayco el laboratorio se realizó en fecha 5/12/2019 teniendo los datos de laboratorio en el anexo 2 y 3, las tablas 3.4 y 3.5 resumen de resultados a continuación:

Tabla 3.4 Contenido de humedad⁴

Procedencia	Fecha del Ensayo	Número de muestras	Valor medio (%)	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)	Desviación estándar máxima de las muestras (%)
El Huayco (Extraída de Obra)	06/10/2019	5	4.41	4.18	4.61	0.12
	05/12/2019	5	6.48	6.30	6.60	0.14

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.5 Contenido de humedad en sulfato de calcio⁵

Procedencia	Fecha del Ensayo	Número de muestras	Valor medio (%)	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)	Desviación estándar máxima de las muestras (%)
El Huayco (Extraída de Obra)	06/10/2019	5	5.51	5.23	5.74	0.14
	05/12/2019	5	7.90	7.70	8.04	0.15

Fuente: Elaboración Propia.

Mediante los las anteriores tablas 3.4 y 3.5 se lograron graficar el comportamiento estadístico de la humedad del yeso en el tiempo con la finalidad de observar la pérdida de actividad. Determinando un periodo de duración expuesto a las condiciones de almacenamiento y envasado ideal y como referencia también se realizó otra curva en la cual se ve el comportamiento del yeso en las condiciones con las que se comercializa

⁴ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 2

⁵ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 2

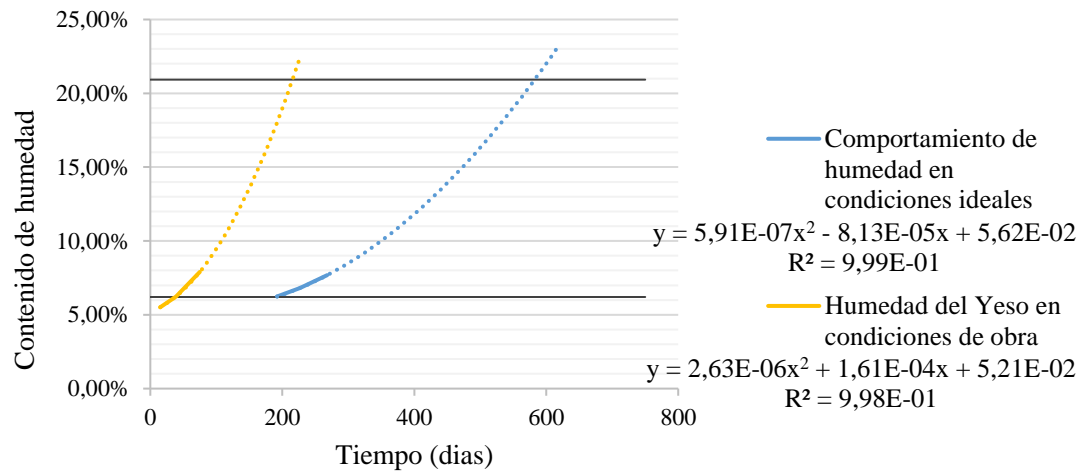
y almacena en obra. Así mismo se determina el periodo en cual el yeso se hidrató totalmente, ya no reacciona con el agua comparando ambas condiciones descritas.

Tabla 3.6 Contenido de humedad en muestras de sulfato de calcio en el tiempo⁶

Procedencia	Fecha de ensayo	Días ⁷	Humedad en Ca (SO4) (%)
El Huayco	12/09/2019	192	6.24
	17/10/2019	227	6.82
	27/11/2019	268	7.68
El Huayco (Extraída de Obra)	06/10/2019	15	5.51
	05/12/2019	75	7.90

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 3.1 Comportamiento de la pérdida de actividad en el tiempo



Fuente: Elaboración Propia, Basado en la Tabla 3.6.

⁶ Tabla elaborada con valores de las Tablas 3.3 y 3.5

⁷ Periodo de tiempo desde su fabricación al día de ejecución del ensayo (variación ± 3 días)

Tabla 3.7 Proceso de pérdida de actividad del yeso en el tiempo⁸

Evento		Tiempo (días) ⁹	Tiempo (días) ¹⁰
El yeso comienza a fraguar por humedad del ambiente	Ca(SO ₄)+1/2 H ₂ O	191	39
El yeso contiene una molécula de agua	Ca(SO ₄)+1 H ₂ O	382	123
El yeso termina de fraguar por humedad del ambiente	Ca(SO ₄)+2 H ₂ O	583	216

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.8 Contenido de humedad en muestras de sulfato de calcio en el tiempo¹¹

Procedencia	Fecha de ensayo	Días ¹²	Humedad en Ca (SO ₄) (%)
Zapallar	17/06/2019	14	5.98
	10/09/2019	99	6.29
	15/10/2019	134	6.60
	26/11/2019	176	7.03
El Huayco (Extraída de Obra)	06/10/2019	15	5.51
	05/12/2019	75	7.90

Fuente: Elaboración Propia.

⁸ Tabla elaborada con valores de la ilustración 3.1.

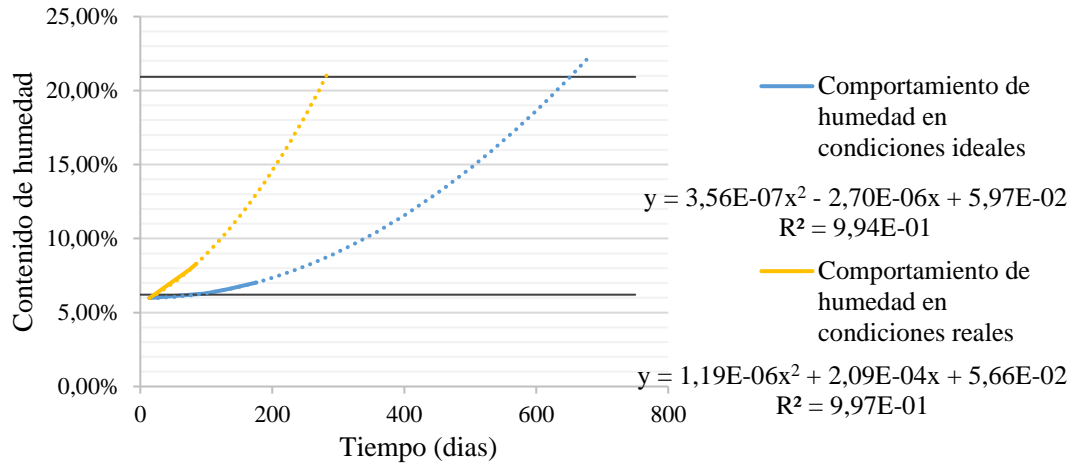
⁹ Valores de la localidad El Huayco almacenado en condiciones ideales.

¹⁰ Valores de la localidad El Huayco almacenado en obra.

¹¹ Tabla elaborada con valores de las Tablas 3.3 y 3.5

¹² Periodo de tiempo desde su fabricación al día de ejecución del ensayo (variación ± 3 días)

Ilustración 3.2 Comportamiento de la pérdida de actividad en el tiempo



Fuente: Elaboración Propia, Basado en las Tablas 3.8.

Tabla 3.9 Proceso de pérdida de actividad del yeso en el tiempo¹³

Evento		Tiempo (días) ¹⁴	Tiempo (días) ¹⁵
El yeso comienza a fraguar por humedad del ambiente	Ca(SO ₄)+1/2 H ₂ O	88	23
El yeso contiene una molécula de agua	Ca(SO ₄)+1 H ₂ O	384	145
El yeso termina de fraguar por humedad del ambiente	Ca(SO ₄)+2 H ₂ O	652	282

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Ensayos físicos

3.3.1. Finura del yeso

Para el ensayo del yeso en el laboratorio no se contaba con los tamices que requiere la Normativa UNE-EN 13279-2 debido que la Normativa Boliviana NB-122008 requería una estufa para mantener la temperatura y un procedimiento que no se contaba en el laboratorio, por lo que se decidió realizar los ensayos con la Normativa Española y los

¹³ Tabla elaborada con valores de la ilustración 3.2.

¹⁴ Valores de la localidad Zapallar almacenado en condiciones ideales.

¹⁵ Valores de la localidad El Huayco almacenado en obra.

tamices de menor diámetro teniendo la certeza que el porcentaje que pasa y es requerido es mayor al de la normativa, el mismo cambio se ve resumido en la Tabla 3.11

Tabla 3.10 Tamices que exige la norma y disponibles en laboratorio

Espaciamiento que pide la norma (mm)	Tamiz más cercano	Espaciamiento del tamiz (mm)	Tamiz usado	Espaciamiento del tamiz (mm)
5.000	N° 4	4.760	N° 4	4.760
1.500	N° 14	1.410	N° 16	1.190
0.800	N° 25	0.841	N° 30	0.595
0.200	N°80	0.177	N° 100	0.149
0.100	N° 200	0.074	N° 200	0.074

Fuente: Elaboración Propia.

El laboratorio se realizó con los tamices indicados en la Tabla 3.10, como indica la normativa realizamos 5 muestras de ensayos por cada banco de muestra, utilizando 5 tipos de tamices de los cuales cuenta el laboratorio, los datos que se recolectaron están en el Anexo 4 y 5.

Una vez obtenidos los resultados se procede a realizar los cálculos, obteniendo una gráfica de distribución granulométrica en donde refleja los datos máximos y mínimos de cada muestra tal como se refleja en la Tabla 3.12 para realizar las gráficas de las envolventes, las cuales indican que las gráficas de la distribución granulométrica de las demás muestras se encuentran dentro de estas dos curvas de distribución de envolventes.

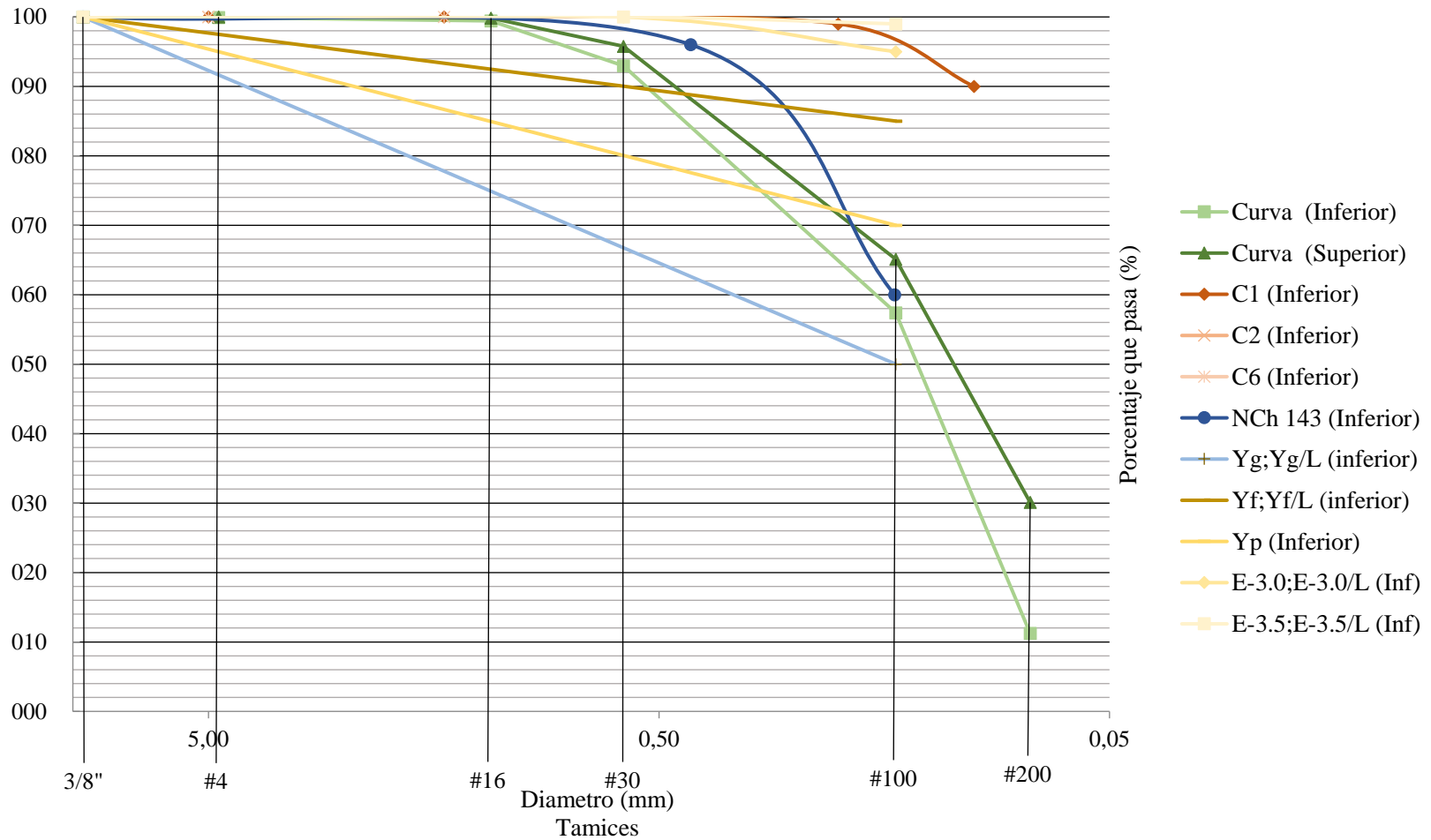
Tabla 3.11 Porcentaje de yeso que pasa¹⁶

Procedencia	Número de Muestra	Porcentaje que pasa (%)				
		# 4	# 16	# 30	# 100	# 200
		4,750 mm	1,180 mm	0,600 mm	0,150 mm	0,075 mm
El Huayco	1	99.98	99.72	95.43	61.31	20.85
	2	100.00	99.80	95.10	64.43	19.00
	3	99.96	99.78	95.74	62.16	26.29
	4	100.00	99.52	93.05	61.97	26.96
	5	99.90	99.72	93.89	58.38	12.25
	Valor máximo	100.00	99.80	95.74	64.43	26.96
	Valor mínimo	99.90	99.52	93.05	58.38	12.25
Zapallar	1	100.00	99.60	91.69	61.12	43.90
	2	100.00	99.54	91.93	60.17	42.16
	3	100.00	99.60	94.52	62.30	43.87
	4	100.00	99.58	93.91	61.66	42.20
	5	100.00	99.60	93.33	59.86	40.79
	Valor máximo	100.00	99.60	94.52	62.30	43.90
	Valor mínimo	100.00	99.54	91.69	59.86	40.79

Fuente: Elaboración Propia.

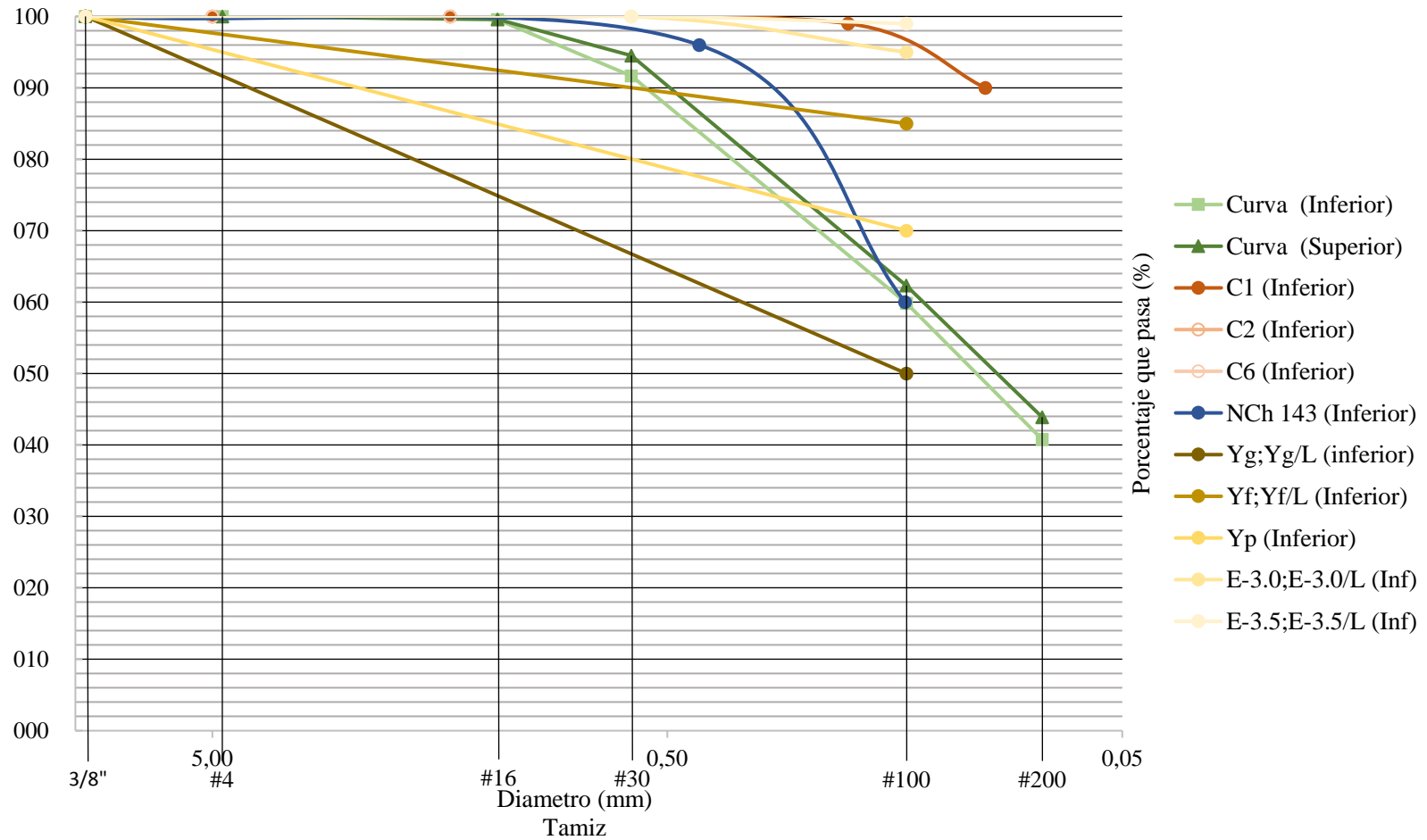
¹⁶ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 5

Ilustración 3.3 Curva de distribución granulométrica



Fuente: Elaboración Propia. Basado en las tablas 3.12. Banco de material: El Huayco

Ilustración 3.4 Curva de distribución granulométrica



Fuente: Elaboración Propia. Basado en las tablas 3.12. Banco de material: Zapallar

En las anteriores ilustraciones las referencias a curva son las granulometrías de las muestras que se realizaron anexo 4 y 5 las definiciones de C1, C2, C6 representa a los requerimientos de la Normativa Española UNE-EN 13279-1 anexo 15; NCh 143 representa a los requerimientos de la Normativa Chilena NCh 143 anexo 15; Yg;Yg/L, Yf;Yf/L, Yp, E-3.0;E-3.0/L, E-3.5;E-3.5/L representa a los requerimientos de la Normativa Boliviana NB 122004 anexo 15.

3.3.2. Tiempo de Fraguado

En el ensayo de tiempo de fraguado se consideró todo lo que indica en la Normativa NB 122008 sólo que los tiempos en los primeros 11 min se tomaron cada 30 segundos y después el lapso de tiempo se modificó cada 1 min tal con la finalidad de tener un resultado más preciso.

Teniendo en cuenta que en el título 3.3.3 el ensayo de la relación agua/yeso se realizó por la metodología de saturación, se revisó en la bibliografía para tener un parámetro de los tiempos de fraguado en distintos tipos de relación agua/yeso con los tiempos de fraguado Tabla 3.12. Tomando la decisión de corregir la relación de agua/yeso para: El Huayco 0.55 y Zapallar 0.50 respaldado en el anexo 6.

Tabla 3.12 Relación agua/yeso vs tiempo de fraguado

Relación agua/yeso (cm³/gr)	Duración del amasado (min)	Tiempo de Fraguado (min) Aguja de Vicat
80/100	1	10 - 30
80/100	2	7 - 45
80/100	3	5 - 45
60/100	1	7 - 15
45/100	1	3 - 15

Fuente: “Aplicaciones de la cerámica en la construcción”; Rojas R John.

Después de obtener una relación agua/yeso se realizaron los ensayos de tiempo de fraguado en el aparato de Vicat obteniendo los siguientes datos que están desarrollados en el Anexo 6 se ven descritos en las tablas 3.13 y 3.14, mostradas a continuación:

Tabla 3.13 Datos del ensayo de Vicat¹⁷

Procedencia	Número de Muestra	Tiempos de Fraguado		
		Inicio	Final	Duración
El Huayco	1	0:08:30	0:14:00	0:05:30
	2	0:08:30	0:16:00	0:07:30
	3	0:09:00	0:12:00	0:03:00
	4	0:08:00	0:13:00	0:05:00
	5	0:09:00	0:16:00	0:07:00
Zapallar	1	0:08:30	0:15:00	0:06:30
	2	0:08:30	0:15:00	0:06:30
	3	0:08:00	0:15:00	0:07:00
	4	0:08:30	0:14:00	0:05:30
	5	0:07:00	0:11:00	0:04:00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.14 Resumen del ensayo de Vicat¹⁸

Procedencia	Mínimo	Máximo	Medio
El Huayco	0:08:00	0:16:00	0:05:36
Zapallar	0:07:00	0:15:00	0:05:54

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 3.15 mostraremos los requerimientos de las distintas normativas, los datos son extraídos de las normas: española UNE-EN 13279-1, chilena NCh 143, boliviana NB 122004. La información fue extraída de las normativas mencionadas y se encuentran en el Anexo 15.

¹⁷ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 6

¹⁸ Tabla elaborada con valores de las tablas 3.13

Tabla 3.15 Requisito de las normativas

Normativa	Tipo de yeso	Tiempo de fraguado (min)	
		Inicial	Final
UNE-EN 13279-1	C2	> 30	-
	C3	> 20	-
	C4	> 20	-
	C5	> 20	-
	C6	> 20	-
NCh 143		> 7	< 35
NB122004	Yg; Yf; Yp	≥ 3	≤ 10
	Yg/L; Yf/L	≤ 20	≥ 50
	E-3.0; E-3.5	≥ 3	≤ 10
	E-3.0/L; E-3.5/L	≤ 20	≥ 50

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3. Relación agua/yeso

Para el ensayo de la relación del agua/yeso existen varios métodos en ambas normativas, el que se escogió es el método del amasado a saturación de la Normativa Española UNE-EN 13279-2 debido a la disponibilidad de materiales en el laboratorio este procedimiento lleva a un fraguado más lento de lo normal el mismo se aplica para un fraguado lento de la mezcla para alargar el tiempo de trabajo.

Cabe aclarar que la Normativa Boliviana NB 122008 no cuenta con este ensayo, las tablas de toma de muestra se encuentran en el Anexo 7 y en la Tabla 3.16 se muestra un resumen de los cálculos y el valor medio de cada una de las muestras:

Tabla 3.16 Resumen del ensayo de relación agua/yeso¹⁹

Procedencia	Número de Muestra	Peso del agua (gr)	Peso del yeso (gr)	Relación agua/yeso	Promedio
El Huayco	1	100.00	99.30	1.01	0.89
	2	100.00	113.00	0.89	
	3	100.00	122.20	0.82	
	4	100.00	107.40	0.93	
	5	100.00	116.90	0.85	
Zapallar	1	100.00	125.90	0.79	0.71
	2	100.10	133.00	0.75	
	3	100.10	151.70	0.66	
	4	100.10	151.90	0.66	
	5	100.10	149.60	0.67	

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de la relación agua/yeso no clasifican por este parámetro por lo que no existen restricciones para este parámetro, lo único que la relación agua/yeso se ve ligada al tiempo de fraguado tal como se muestra en la tabla 3.12.

3.3.4. Determinación del peso específico

El ensayo de la determinación de peso específico no existe en la normativa, debido a la similitud que existe entre el yeso y el cemento hidráulico, se decidió por realizar el ensayo de la determinación del peso específico en base a la normativa del cemento hidráulico ASTM C 188-95 AASTHO T-133 con el yeso el mismo se redacta en el título 2.8.4.

En el ensayo que se describe era necesario el matraz de “Le Chatelier” el mismo no está disponible en el laboratorio; en su remplazo, el laboratorio cuenta con un matraz de 500 ml. Debido a que la escala mínima de medida es de 50ml una de las soluciones para tener una mejor aproximación del volumen que ocupa el yeso en el matraz se tomó una fotografía y mediante una regresión estadística se calibró la altura del matraz con el volumen que tiene y mediante la ecuación de calibración y la altura de la imagen se obtuvo el valor del volumen que ocupa el yeso. Los cálculos que están a continuación

¹⁹ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 7

en la Tabla 3.17 de ambas muestras son a base de los datos y las planillas de laboratorio, en donde se calibró cada una de las fotografías tal como se muestra en el anexo 13:

Tabla 3.17 Resumen del ensayo de determinación de peso específico²⁰

Procedencia	Número de Muestra	Peso del yeso (gr)	Volumen que ocupa el yeso (cm ³)	Densidad del yeso (gr/cm ³)		Peso Específico Relativo	
				Muestra	Promedio	Muestra	Promedio
El Huayco	1	64,00	30,00	2,13	2,60	2,13	2,60
	2	64,00	29,80	2,15		2,15	
	3	64,00	22,90	2,80		2,80	
	4	64,00	17,80	3,59		3,59	
	5	64,00	27,70	2,31		2,31	
Zapallar	1	64,00	24,10	2,65	2,37	2,65	2,37
	2	64,00	24,30	2,64		2,64	
	3	64,00	26,70	2,40		2,40	
	4	64,00	30,30	2,11		2,11	
	5	64,00	31,50	2,03		2,03	

Fuente: Elaboración Propia.

La normativa no cuenta entre los parámetros de clasificación o de aprobación el peso específico, incluso en la normativa española y chilena no existe el procedimiento para poder determinar el peso específico.

3.3.5. Preparación de probetas de ensayo y determinación del peso volumétrico del yeso fraguado.

En la parte de la preparación de probetas de ensayo se realizaron en total 30 probetas por cada banco de muestra, las mismas se escogieron aleatoriamente 3 probetas por cada muestra o bolsa de material con la finalidad de realizar un ensayo en cada probeta de las dimensiones que se indican en la Normativa Española UNE-EN 13279-2, en el presente ensayo se realizó la obtención del peso volumétrico del yeso ya fraguado con la ecuación 9, como el rendimiento por kg de yeso en obra. Las tablas de toma de datos

²⁰ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 8

se encuentran en el Anexo 14 y en las tablas 3.18 y 3.19 está el resumen del peso volumétrico del yeso fraguado y el rendimiento.

Tabla 3.18 Peso volumétrico del yeso fraguado²¹

Procedencia	Número de Muestra	Tiempo secado inicial ²² (días)	Tiempo secado final ²³ (días)	Densidad del yeso endurecido (gr/cm ³)				
				Número de probeta			Promedio de muestra	Promedio
				1	2	3		
El Huayco	1	13	2	1.33	1.32	1.32	1.32	1.28
	2	13	2	1.29	1.28	1.29	1.29	
	3	12	2	1.27	1.27	1.27	1.27	
	4	7	2	1.19	1.19	1.18	1.19	
	5	7	2	1.33	1.34	1.34	1.34	
	6	8	2	1.31	1.31	1.32	1.31	
	7	8	2	1.30	1.30	1.29	1.30	
	8	7	2	1.30	1.30	1.30	1.30	
	9	8	2	1.25	1.25	1.25	1.25	
	10	7	2	1.25	1.26	1.25	1.26	
Zapallar	1	9	2	1.42	1.42	1.43	1.42	1.43
	2	7	2	1.41	1.42	1.43	1.42	
	3	12	2	1.49	1.44	1.47	1.47	
	4	11	2	1.41	1.42	1.42	1.42	
	5	10	2	1.42	1.43	1.42	1.42	
	6	7	2	1.42	1.41	1.40	1.41	
	7	7	2	1.48	1.48	1.51	1.49	
	8	7	2	1.44	1.41	1.43	1.43	
	9	7	2	1.39	1.39	1.39	1.39	
	10	12	2	1.42	1.42	1.43	1.42	

Fuente: Elaboración Propia.

$$P_v = \frac{M}{V} \quad (9)$$

Donde:

M: Masa de la muestra de la probeta de yeso.

²¹ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 9

²² Secado a la atmosfera periodo mínimo son 7 días

²³ Secado en horno a una temperatura de 40±1°C por un periodo de 2 días

V: Volumen de la probeta de yeso. 256 cm³.

P_v: Peso volumétrico del yeso, en g/cm³.

Tabla 3.19 Rendimiento del yeso de construcción²⁴

Procedencia	Número de Muestra	Rendimiento ²⁵ en kg de yeso para revoque (1 m ²) espesor de:		
		0,50 cm	1,00 cm	1,50 cm
El Huayco	10	7.29	14.58	21.88
Zapallar	10	7.42	14.84	22.27

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Ensayos mecánicos

3.4.1. Resistencia a flexión

En el ensayo de resistencia a flexión se realizó en una prensa confinada cumpliendo el procedimiento indicado en la Normativa Española UNE-EN 13279-2 en el título 2.9.1 utilizando un anillo de compresión. En la Tabla 3.20 se muestran los datos de la prensa confinada y del anillo dinamométrico datos que están respaldados por el proceso de calibración que está en el Anexo 10:

Tabla 3.20 Características del anillo y del comparador²⁶

Tipo de Anillo de Compresión:	Anillo de color amarillo de 2000 lb
Ecuación de Anillo de Compresión:	$P = 335,59 D + 44,513 P(\text{kgf}) D(\text{mm})$
Características del Comparador	0,01 mm = 1 Unidad del comparador

Fuente: Elaboración Propia.

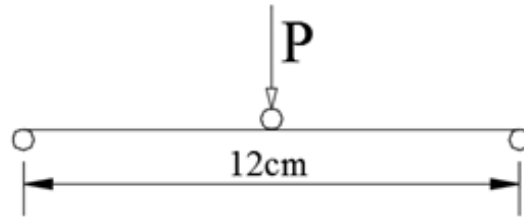
En el ensayo de flexión se realizó con un accesorio distinto al que indica en la normativa. La razón por la que no se utilizó el elemento que recomienda la normativa no se contaba en el laboratorio y el que se tenía en el laboratorio tiene una longitud de apoyos de 12 cm tal como se describe en la siguiente ilustración:

²⁴ Datos recolectados de planilla 3.17

²⁵ Tomando en cuenta un 5% de desperdicios

²⁶ Datos recolectados de planilla de Anexo 10

Ilustración 3.5 Diagrama de fuerzas en el ensayo de flexión.



Fuente: Elaboración Propia.

Partiendo de este diagrama de fuerzas mostrado en la anterior, y de las propiedades geométricas de la sección de la probeta se logra generar las siguientes ecuaciones. Momento máximo en una viga simplemente apoyada con una carga puntual en centro luz:

$$M = \frac{P \cdot l}{4} \Rightarrow M = \frac{P \cdot 120\text{mm}}{4} \Rightarrow M = 30\text{mm} \cdot P \quad (10)$$

En donde:

M: Momento flector en centro luz.

P: Carga en centro luz.

l: Longitud de la viga.

Para una sección cuadrada en el caso de las probetas de yeso el momento de Inercia es:

$$I = \frac{h^3 \cdot b}{12} \Rightarrow I = \frac{40^3 \cdot 40}{12} \Rightarrow I = 213333.33 \text{ mm}^4 \quad (11)$$

En donde:

h: altura de la sección en mm.

b: base de la sección en mm.

Partiendo de las ecuaciones 10 y 11 se reemplaza en la siguiente ecuación del esfuerzo a flexión:

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \Rightarrow \sigma_f = \frac{30\text{mm} \cdot P \cdot 20\text{mm}}{213333.33 \text{ mm}^4} \Rightarrow \sigma_f = 0.0028125 \cdot P \quad (12)$$

En donde:

σ_f : resistencia a flexión en N/mm²

P: carga media de rotura en N.

Usando estas ecuaciones se realizó la tabulación de los resultados demostrándose el resumen en la Tabla 3.21 partiendo de los datos que están en el Anexo 11:

Tabla 3.21 Resumen del ensayo de resistencia a flexión²⁷

Procedencia	Promedio (MPa)	Resistencia a un percentil del 90% (MPa)
El Huayco	6.12	5.79
Zapallar	7.13	6.36

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.2. Resistencia a compresión

En el ensayo de resistencia a compresión se realizó en una prensa confinada cumpliendo la Normativa Española UNE 13279-2 descrita en el título 2.9.2., utilizando un anillo confinado el cual a continuación se describe en la Tabla 3.22 su ecuación de calibración y las características del comparador, estos datos están respaldados en el anexo 12:

Tabla 3.22 Características del anillo y del comparador²⁸

Tipo de Anillo de Compresión:	Anillo de color dorado de 5000 kg
Ecuación de Anillo de Compresión:	$P = 13,569 D + 0,9293 P(\text{kgf}) D(\text{Unidades del Comparador})$
Características del Comparador	0,01 mm = 1 Unidad del comparador

Fuente: Elaboración Propia.

Los cálculos realizados para la obtención del esfuerzo están basados en la ecuación 7 que esta descrita en el título 2.9.2 los resultados están resumidos en la Tabla 3.23 que están respaldadas en el anexo 13:

²⁷ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 11

²⁸ Datos recolectados de planilla de Anexo 12

Tabla 3.23 Resumen del ensayo de resistencia a compresión²⁹

Procedencia	Promedio (MPa)	Resistencia a un percentil del 90% (MPa)
El Huayco	8.68	9.06
Zapallar	8.31	8.53

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3. Determinación de la dureza

En el ensayo de la determinación de dureza se realizó por el método Janka debido a la disponibilidad del equipo en laboratorio de maderas el mismo tiene el siguiente procedimiento de laboratorio:

Se aplica una carga gradualmente creciente por medio de una esfera de acero de 11.284 mm de diámetro, al que corresponde una sección de 1cm². La prueba consiste en determinar la carga necesaria para que la bola penetre hasta su círculo máximo.

En este caso solo una probeta llegó a una penetración del círculo máximo, las demás sufrieron fracturas antes de llegar a este estado debido que la práctica que se realiza en probetas de madera se realizó con probetas de yeso. La metodología de laboratorio tiene las siguientes ecuaciones para obtener la dureza del material:

$$H_B = \frac{F}{A} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (13)$$

Donde:

HB = Dureza en N/mm².

F = Fuerza en N.

A = Área en mm². del círculo de penetración.

$$A = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad (14)$$

Donde:

D = Diámetro de la esfera en mm

d = Diámetro de penetración en mm

Reemplazando las ecuaciones 13 y 14 formando la siguiente ecuación:

²⁹ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 13

$$H_B = \frac{2.F}{\pi.D.(D-\sqrt{D^2-d^2})} \quad (15)$$

La Tabla 3.24 de la escala de Mohs y la relación con la dureza de Vickers en Kp/mm² se realizó de forma referencial en base a un documento presentado en el XXXV Congreso Brasileiro de Cerámica y III Congreso Iberoamericano de Cerámica y Vidrios Refractarios. De título “Dureza de minerales cerámicos” de M. J. Liso. C. Albarrán y V. Higes

Tabla 3.24 Comparación de escalas de dureza

Dureza Mohs	Mineral de Referencia	Dureza Vickers (MPa)
1	Talco	0.20
2	Yeso	3.60
3	Calcita	11.00
4	Fluorita	19.00
5	Apatito	54.00
6	Ortosa	79.00
7	Cuarzo	112.00
8	Topacio	143.00
9	Corindón	200.00
10	Diamante	

Fuente: M. J. Liso. C. Albarrán y V. Higes. (1990). Dureza de minerales cerámicos.

En base a los datos obtenidos en el laboratorio y los cálculos que se realizaron se encuentran en el Anexo 14 mediante la Tabla 3.24 se toma como referencia para poder caracterizar al material y poder plasmar en la Tabla 3.25 como resumen.

Tabla 3.25 Resumen del ensayo de dureza³⁰

Procedencia	Promedio (MPa)	Numero de resultados ³¹	Resistencia a un percentil del 90% (MPa)	Dureza escala (Mohs)
El Huayco	4.92	5	4.11	2.19
Zapallar	7.56	8	6.88	2.55

Fuente: Elaboración Propia.

³⁰ Datos recolectados de planillas de cálculo en Anexo 14

³¹ Número de resultados comprendidos entre 0.9 y 1.1 de la media.

CAPÍTULO 4
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Cumplimiento de los resultados respecto a normativas estudiadas

El yeso que se produce en la zona del El Huayco y Zapallar de la provincia O'Connor del departamento de Tarija tiene unas propiedades mecánicas muy buenas según los valores obtenidos y las normativas en las cuales se basaron este estudio.

En la Normativa Española UNE 13279-1 “Yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción” el cual indica en su tabla de “Especificaciones para los yesos de construcción” que se encuentra en el Anexo 15. Esta tabla clasifica al yeso en 7 tipos de yeso, para distintos usos clasificando al yeso estudiado en: El Huayco como un yeso tipo B7 yeso de construcción de alta dureza, y el del Zapallar también como un yeso tipo B7 yeso de construcción de alta dureza.

En la otra tabla “Especificaciones para los yesos especiales para la construcción” que se encuentra en el Anexo 15 de la misma normativa el yeso estudiado no es posible clasificarlo debido a que el ensayo de tiempo de fraguado no se realizó debido a que la normativa establece que debe utilizarse aditivos o retardadores, que en el presente trabajo no se utilizó debido a que no era el objetivo del presente trabajo.

En la normativa chilena NCh 143 “Yeso calcinado requisitos” indica en la tabla “Requisitos generales para el yeso calcinado” que se encuentra en el anexo 15. Según la tabla se puede comprobar el cumplimiento de la normativa la muestra de El Huayco cumplió 3 de los 5 requerimientos, de igual forma la muestra del Zapallar cumplió 3 de los 5 requerimientos. Los mismos requerimientos se ven resumidos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de cumplimiento a la normativa NCh 143³²

Procedencia	El Huayco	Zapallar
Contenido de Ca SO₄ + 1/2 H₂O	Si	Si
Finura de molido	No	No
Tiempo de colocación o fraguado	Si	Si
Resistencia a la flexión	Si	Si
Resistencia a la compresión	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

³² Datos recolectados de planillas de Anexo 15

En la Normativa Boliviana NB 122004 clasifica al yeso de construcción en 9 tipos de yeso: Yg (yeso grueso de construcción), Yg/L (yeso grueso de construcción, lento), Yf (yeso fino de construcción), Yf/L (yeso fino de construcción, lento), Yp (yeso de prefabricación), E-3.0 (escayola), E-3.0/L (escayola lenta), E-3.5 (escayola especial), E-3.5/L (escayola especial lenta). En la siguiente Tabla 4.2 podemos ver que ambas muestras cumplen en la mayoría de los requisitos de la normativa como un yeso grueso de construcción, en el caso de la muestra de El Huayco el índice de pureza no cumple, pero su valor es muy cercano al requerimiento en la normativa. El tiempo final de fraguado no cumple, pero este valor está influenciado por la relación agua/yeso.

Tabla 4.2 Resumen de cumplimiento a la normativa NB 122004³³

Procedencia	El Huayco	Zapallar
Índice de pureza Ca (SO₄)	No cumple	Yg, Yg/L
Contenido de sulfato de calcio semi-hidratado Ca (SO₄) + ½ H₂O	Yg, Yg/L, Yf, Yf/L, Yp	Yg, Yg/L, Yf, Yf/L, Yp
Finura del Molido	Yg	Yg
Tiempo de fraguado: inicio de fraguado	Yg, Yf, Yp	Yg, Yf, Yp
Tiempo de fraguado: final de fraguado	No cumple	No cumple
Resistencia mecánica a la compresión	Yg, Yg/L	Yg, Yg/L
Resistencia mecánica a la flexo-tracción	Yg, Yg/L, Yf, Yf/L, Yp, E-3.0, E-3.0/L, E-3.5, E-3.5/L	Yg, Yg/L, Yf, Yf/L, Yp, E-3.0, E-3.0/L, E-3.5, E-3.5/L

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Comparación de propiedades

En el presente trabajo se realizaron 9 ensayos, uno de ellos en el laboratorio de la Fábrica de Cemento “El Puente” (SOBOCE) y los demás se realizaron en los Laboratorios de Hormigón, Suelos y Maderas de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho UAJMS.

Los bancos de muestra son los más representativos de la región a los cuales se pudieron acceder, en el mercado local se comercializan. Los mismos se encuentran en el

³³ Datos recolectados de planillas de Anexo 15

departamento de Tarija, la Provincia O'Connor, las comunidades del Zapallar y del El Huayco. En ambas muestras se realizaron los ensayos químicos, físicos y mecánicos. Obteniendo los siguientes resultados reflejados en la siguiente Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Comparación de resultados obtenidos en los laboratorios

Aspecto	Procedencia		UNE 13279-1	NCH 143	NB 122004
	El Huayco	Zapallar	B-7		Yg
Ensayos Químicos					
Análisis químico	%	%	%	%	%
SiO ₂	4.71	5.08			
Al ₂ O ₃	0.9	0.97			
Fe ₂ O ₃	0.21	0.19			
CaO	35.26	36.03			
MgO	0.39	0.57			
SO ₃	44.23	44.61			
Ca (SO ₄) + 2 H ₂ O	88.96	95.90			
Índice de pureza	70.34	75.83	> 50.00		> 75.00
Contenido de sulfato de calcio hemi hidratado	74.99	80.84		≥ 73.00	> 66.00
Determinación de humedad	5.03	4.82			
Ensayos Físicos					
Finura del yeso	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa
# 4	100.00	100.00			
# 16	99.80	99.60			
# 30	95.74	94.52		≥ 96.00 ³⁴	
# 100	64.43	62.30		≥ 60.00 ³⁵	> 50.00
# 200	26.96	43.90			
Tiempo de fraguado					
Inicial	0:08:00	0:07:00		≥ 7:00	≥ 3:00
Final	0:16:00	0:15:00		≤ 35:00	≤ 10:00

³⁴ Bajo tamiz 0.425 mm

³⁵ Bajo tamiz 0.150 mm

Aspecto	Procedencia		UNE 13279-1	NCH 143	NB 122004
	El Huayco	Zapallar	B-7		Yg
Ensayos Físicos					
Relación agua/yeso	0.89	0.71			
Peso específico relativo	2.60	2.37			
Ensayos Mecánicos					
Resistencia a flexión (MPa)	5.79	6.36	≥ 2.00	≥ 3.43	≥ 2.00
Resistencia a compresión (MPa)	8.31	8,53	≥ 6.00	≥ 12.74	≥ 7.50
Dureza (Mohs) (MPa)	2.19	2.56			
	4.92	7.56	≥ 2.00		

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. Ficha técnica

Uno de los documentos más importantes para un material de construcción es su ficha técnica, el cual contiene información de su forma de uso y las propiedades físicas, químico y mecánicas. Como uno de los objetivos de este trabajo es realizar una ficha técnica de dos muestras de yeso que se comercializa en la ciudad de Tarija, presentándolas a continuación:

Tabla 4.4 Ficha Técnica Muestra: El Huayco

Ubicación	Propiedades físicas																	
Comunidad El Huayco, Prov. O'Connor ubicado a 82.10 Km de la ciudad de Tarija																		
Lugares de uso	Finura del Yeso (% que pasa)	Tiempo de Fraguado (R a/y =0.55) (min)																
<ul style="list-style-type: none"> • Ejecución manual de revoques y enlucidos interiores de muros y losas de hormigón • Aplicación en decoraciones: esculturas, canteras rehundidas y cornisas. • Reparación y acabados en placas cartón – yeso sujeción de cajas y materiales eléctricos. 	<table border="1"> <tr><td># 4</td><td>100.00</td></tr> <tr><td># 16</td><td>99.80</td></tr> <tr><td># 30</td><td>95.74</td></tr> <tr><td># 100</td><td>64.43</td></tr> <tr><td># 200</td><td>26.96</td></tr> </table>	# 4	100.00	# 16	99.80	# 30	95.74	# 100	64.43	# 200	26.96	<table border="1"> <tr><td>Inicio</td><td>08:00</td></tr> <tr><td>Fin</td><td>16:00</td></tr> <tr><td>Tiempo de trabajo</td><td>08:00</td></tr> </table>	Inicio	08:00	Fin	16:00	Tiempo de trabajo	08:00
# 4	100.00																	
# 16	99.80																	
# 30	95.74																	
# 100	64.43																	
# 200	26.96																	
Inicio	08:00																	
Fin	16:00																	
Tiempo de trabajo	08:00																	
Uso en Obra	Relación agua/yeso																	
Añadir las porciones de agua y yeso según la relación agua yeso y el tipo de fraguado que se requiera encontrar y mezclar hasta conseguir una pasta consistente. No volver a amasar una vez iniciado el fraguado y proceder a aplicar.	<table border="1"> <tr><th>Fraguado</th><th>Agua (ml)</th><th>yeso(kg)</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>554.00</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>Lento</td><td>899.00</td><td>1.00</td></tr> </table>		Fraguado	Agua (ml)	yeso(kg)	Normal	554.00	1.00	Lento	899.00	1.00							
Fraguado	Agua (ml)	yeso(kg)																
Normal	554.00	1.00																
Lento	899.00	1.00																
Precauciones para su uso en obra	Peso específico relativo	Peso volumétrico (gr/cm³)																
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar sobre superficies completamente libres de impurezas • No mezclar con Cemento • Evite la aplicación en superficies que todavía no estén totalmente secas 	2.60	1.28																
	Rendimiento																	
	Rendimiento en 1 m ² de superficie de enlucido:																	
	Espesor de enlucido (cm)	Rendimiento (kg)																
	0.50	7.29																
	1.00	14.58																
	1.50	21.88																



Propiedades químicas

Componente	%
LOI o PFF	7.13
Ca(SO ₄)	70.34
Ca(SO ₄)+2 H ₂ O	88.96
SiO ₂	4.71
Al ₂ O ₃	0,90
Fe ₂ O ₃	0,21
CaO	35,26
MgO	0,39
SO ₃	44,23
Contenido de humedad	5.03


Propiedades mecánicas

Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)
5.79	8.31

Dureza	
Escala de Mohs	2.19
Método Janka (MPa)	4.92

Fuente: **Elaboración Propia.**

Tabla 4.5 Ficha Técnica Muestra: Zapallar

<p>Ubicación Comunidad Zapallar, Prov. O'Connor ubicado a 101,0 Km de la ciudad de Tarija</p>	<p>Propiedades físicas</p>																	
<p>Lugares de aplicación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ejecución manual en revoques y enlucidos interiores de muros y losas de hormigón • Aplicación en decoraciones: esculturas, canteras rehundidas y cornisas. • Reparación y acabados en placas cartón – yeso sujeción de cajas y materiales eléctricos. 	<p>Finura del Yeso (% que pasa)</p> <table border="1"> <tr><td># 4</td><td>100.00</td></tr> <tr><td># 16</td><td>99.60</td></tr> <tr><td># 30</td><td>94.52</td></tr> <tr><td># 100</td><td>62.30</td></tr> <tr><td># 200</td><td>43.90</td></tr> </table>	# 4	100.00	# 16	99.60	# 30	94.52	# 100	62.30	# 200	43.90	<p>Tiempo de Fraguado (R a/y =0.50) (min)</p> <table border="1"> <tr><td>Inicio</td><td>07:00</td></tr> <tr><td>Fin</td><td>15:00</td></tr> <tr><td>Tiempo de trabajo</td><td>08:00</td></tr> </table>	Inicio	07:00	Fin	15:00	Tiempo de trabajo	08:00
# 4	100.00																	
# 16	99.60																	
# 30	94.52																	
# 100	62.30																	
# 200	43.90																	
Inicio	07:00																	
Fin	15:00																	
Tiempo de trabajo	08:00																	
<p>Uso en Obra Añadir las porciones de agua y yeso según la relación agua yeso y el tipo de fraguado que se requiera encontrar y mezclar hasta conseguir una pasta consistente. No volver a amasar una vez iniciado el fraguado y proceder a aplicar.</p>	<p>Relación agua/yeso</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Fraguado</th> <th>Agua (ml)</th> <th>yeso(kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>normal</td> <td>499.00</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Lento</td> <td>707.00</td> <td>1.00</td> </tr> </tbody> </table>		Fraguado	Agua (ml)	yeso(kg)	normal	499.00	1.00	Lento	707.00	1.00							
Fraguado	Agua (ml)	yeso(kg)																
normal	499.00	1.00																
Lento	707.00	1.00																
<p>Precauciones para su uso en obra</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar sobre superficies completamente libres de impurezas • No mezclar con Cemento • Evite la aplicación en superficies que todavía no estén totalmente secas 	<p>Peso específico relativo</p> <table border="1"> <tr><td>2.37</td></tr> </table>	2.37	<p>Peso volumétrico (gr/cm³)</p> <table border="1"> <tr><td>1.43</td></tr> </table>	1.43														
2.37																		
1.43																		
	<p>Rendimiento Rendimiento en 1 m² de superficie de enlucido:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Espesor de enlucido (cm)</th> <th>Rendimiento (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.50</td> <td>7.42</td> </tr> <tr> <td>1.00</td> <td>14.84</td> </tr> <tr> <td>1.50</td> <td>22.27</td> </tr> </tbody> </table>		Espesor de enlucido (cm)	Rendimiento (kg)	0.50	7.42	1.00	14.84	1.50	22.27								
Espesor de enlucido (cm)	Rendimiento (kg)																	
0.50	7.42																	
1.00	14.84																	
1.50	22.27																	

Propiedades químicas

Componente	%
LOI o PFF	6.79
Ca(SO ₄)	75.83
Ca(SO ₄)+2 H ₂ O	95.90
SiO ₂	5.08
Al ₂ O ₃	0.97
Fe ₂ O ₃	0.19
CaO	36.03
MgO	0,57
SO ₃	44,61
Contenido de humedad	4.82

Propiedades mecánicas

Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)
6.36	8.53

Dureza	
Escala de Mohs	2.55
Método Janka (MPa)	7.56

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El yeso en la ciudad de Tarija proviene de las regiones del El Huayco a 82.1 Km y del Zapallar a 101.0 Km de la ciudad de Tarija, estos dos lugares se analizaron debido al acceso y a la cantidad de producción, también existen otras comunidades de la provincia O'Connor que envían su producto a la ciudad de Santa Cruz y ciudades intermedias como: Yacuiba. Bermejo. Entre Ríos. Villa Montes.

- En las normativas revisadas para su cumplimiento se clasifican de la siguiente manera: Normativa Española UNE 13279-1 clasifica a la muestra de El Huayco y Zapallar como un yeso B7 yeso de construcción de alta dureza. el cual indica que es utilizado en revestimiento y enlucidos donde se requiera una mayor dureza superficial. Normativa Chilena NCh 143 ambas muestras no cumplen en dos parámetros la finura del yeso y la resistencia a compresión. Normativa Boliviana NB 122004 la muestra de El Huayco no cumple en la pureza de la muestra y el tiempo final de fraguado, la muestra de El Zapallar no cumple en el tiempo final del fraguado.
- La composición química del yeso en ambas muestras analizadas cumple con los requerimientos de las Normativas Española UNE-EN 13279-1 y Chilena NCh 143. En cambio, en la Normativa Boliviana NB 122004 el yeso de El Huayco no cumple con la pureza requerida esto se debe al proceso de selección de la roca de aljez que se realiza de forma visual buscando una coloración blanca. La muestra de El Zapallar cuenta con mejores propiedades en la pureza de la muestra y en el contenido de silicio. y la muestra de El Huayco tiene un mayor contenido de hierro. Estos compuestos ayudan de forma considerable en la dureza del material y los porcentajes que se tienen son muy favorables para el yeso en el uso de la construcción.
- Los valores obtenidos de los ensayos de ambas muestras son muy similares entre las ventajas de la muestra del Zapallar tiene un mejor comportamiento a los ensayos mecánicos de compresión, flexión y dureza, ésto se debe al mayor

contenido de pureza que tiene la muestra, cumpliendo con lo requerido de la normativa NB 122004.

- El contenido de humedad en el momento de recibir el material es un valor aceptable para que se realice un uso óptimo del yeso; también cabe recalcar que el almacenamiento del producto y el envase generan una diferencia considerable en el tiempo que sigue el producto apto para el uso en la obra. Las gráficas 3.1 y 3.2 demuestra que el cuidado del almacenamiento y forma de empaque del yeso es muy importante; estos cuidados interfieren a la pérdida de actividad del yeso, en el primer caso de muestreo las condiciones para la manipulación en la obra fueron las ideales: uso de bolsa plástica sellada y cuando queda material cerrar con ganchos metálicos, se ubicó a unos 20 a 30cm del suelo mantener en un lugar cerrado y protegido de la intemperie; y las condiciones de muestreo del segundo caso, en las que se encontraron el yeso en la obra son las siguientes: después de la compra en una bolsa de papel que es reutilizada, ya que su primer uso fue para contener cemento, se abrió y en la obra se mantuvo el yeso sobre una superficie de tierra, protegida con una calamina como cubierta durante aproximadamente dos meses. Los datos son comportamientos distintos en las muestras, la pérdida de actividad en las condiciones de obra que se encontraron es un periodo más corto, de 30% a 40% del tiempo que en las condiciones ideales con las que se plantearon retardando la pérdida de actividad. El término de caducidad indica: “Pérdida de la utilidad para el consumo” esto indica que cuando la muestra tenga un contenido de humedad que endurezca a la muestra en condiciones que ya no sea útil. El porcentaje de pérdida de actividad pasó el 50% se puede ver que el yeso ya no es útil, debido a que ocurrió un alto porcentaje de cristalización en el yeso, modificado a las características de un yeso fresco. Las condiciones en las cuales se debería envasar el yeso son en bolsas de plástico sellado por calor con la finalidad de tener un mayor tiempo de vida útil. El manejo recomendado es almacenar en lugares secos, preferentemente y al ser abierto volver a cerrar para no permitir el ingreso de humedad.

- Una de las grandes deficiencias del yeso estudiado es la finura, en ambas muestras de yeso. Esta deficiencia se debe a distintos factores los cuales en algunos casos pueden ser subsanados. La forma de molido de las rocas de yeso calcinado es artesanal mediante un molino eléctrico al aire libre, generando dos problemas: la absorción de humedad inicial en el yeso debido al lugar y un molido deficiente debido a la máquina que se utiliza. La composición química del yeso hace que adquiera cargas eléctricas y generando la unión de moléculas y formando partículas de un diámetro más grande, la última condicionante no afectaría en el desempeño del yeso, que al incluir agua estas moléculas se disolverían.
- Al realizar un análisis del tiempo de fraguado del yeso se debe considerar que los valores que obtenemos están en función a distintos factores que se los menciona a continuación:
 - ✓ La relación agua/yeso con la que se realiza la mezcla.
 - ✓ La finura del molido que tiene el yeso.

En el presente ensayo se realizó bajo las condiciones de la finura de molido que cuenta de fábrica, cada una de las muestras, y antes se realizó el ensayo de la relación agua/yeso para trabajar con los valores recabados; cabe resaltar que la metodología que se siguió es la del amasado a saturación. que consultando con la bibliografía los valores son de una relación de fraguado lento que al realizar en ensayo con la aguja de Vicat daba resultados de un fraguado inicial de 10 a 11 min y alrededor de los 40 min existía una capa de yeso sin fraguar y una película de agua excedente que no reacciona con el yeso. Después se realizó ajustes para lograr encontrar la relación agua/yeso para obtener un tiempo de fraguado normal esto se obtuvo orientado bajo la Tabla 3.13 y los valores confrontados con las fichas técnicas de los yesos existentes en la región:

- Para determinar la densidad del yeso la única normativa es la boliviana 122008 en la cual tenía como requerimiento el uso de un picnómetro, después de haber realizado un análisis y encontrar una similitud con el cemento portland debido que ambos reaccionan con el agua y se produce su endurecimiento. Se procedió a realizar el ensayo de determinación de la densidad del cemento hidráulico con el

yeso. En el laboratorio de hormigón el procedimiento es realizado con un matraz volumétrico y no con el matraz de Le Chatelier, debido a la graduación del frasco y los resultados que se encontraban al medio de la graduación es que se procedió a realizar la toma de fotografías y mediante un programa gráfico se realizó la lectura más aproximada, y la comparación con una ecuación formada de las alturas de cada marca de volumen y el volumen que contenían. Teniendo así un menor error en la obtención de valores. Los valores que se obtuvieron son bastante cercanos con los que se tienen en las fichas técnicas de los yesos de otras regiones, este parámetro no es posible comparar mediante la normativa ya que no es un ensayo que lo requiera ambas normativas.

- Las probetas para los ensayos de flexión, compresión y dureza se vaciaron en grupos de 3 con la finalidad de tener una probeta para cada ensayo la relación agua/yeso en las 10 probetas para cada ensayo con la finalidad de tener un resultado consistente. Ambos ensayos se realizaron con una prensa confinada y calibrada con un anillo de deformación:
- El ensayo de resistencia a flexión se realizó con una variación en la dimensión del material de laboratorio. En el título 3.4.1., se describe el procedimiento que se siguió, los valores que se obtuvieron están entre los valores de fichas técnicas de otros yesos de la región y en el cumplimiento con ambas normativas para ser un yeso apto para la construcción.
- En el ensayo de resistencia a compresión se obtuvieron resultados inferiores a algunos requerimientos de la normativa, pero muy cercanos a los datos obtenidos de otras fichas técnicas de los yesos de la región.
- En el ensayo de dureza se realizó mediante la metodología Janka y los resultados que se obtuvieron en base a la tabla 3.25 de referencia se convirtieron en la escala de Mohs estando en los valores que la bibliografía lo indica y logrando superar a los valores requeridos por la normativa.
- El proceso de calcinado de la roca de aljez en la zona del Zapallar y El Huayco es un proceso bastante deficiente y el mismo genera un daño ambiental considerable debido a que la leña es el combustible que se utiliza en los hornos de calcinación

de la piedra aljez, según la Tabla 2.2 que son datos recabados de las medidas de los hornos y con la ayuda de los trabajadores del lugar se determinó los volúmenes referenciales que ocupa la leña y de la roca de aljez, y consultando al libro “Métodos simples para fabricar carbón vegetal” FAO da como referencia que en bosques medianos el rendimiento de leña es de 20 a 25 m³ por hectárea deforestada, de acuerdo al trabajo realizado en campo se utiliza 0.11 m³ de leña deforestando 55 m² de bosque alto, por 1 Tn de yeso. Tomando en cuenta que la producción anual en el departamento es de 156,500 Tn de yeso, implica el uso de 17,215 m³ de leña deforestando 860.75 Ha de bosque y produciendo 72,100 Tn de CO₂ al año, aparte de ser un proceso que genera mucha contaminación la actual forma de calcinación del yeso de construcción produce un pequeño contenido de yeso de baja calidad, yeso negro. El mismo, se debe a la mezcla del yeso con impurezas de material orgánico calcinado, en su mayoría su uso se realiza en el lugar de producción, el estudio de este tipo de yeso es muy escaso ya que los procesos de cocción de la roca de aljez cambiaron, desapareciendo este tipo de pérdidas.

- Los valores obtenidos en el título 4.3 están cercanos y en algunos aspectos con mejores características a las fichas técnicas de los yesos que se encontraron: Yeso Maestro (Colombia). Beissier (España). Yeso Supremo USG (México). Yeso Volcán (Chile). Yeso Espuma Romeral (Chile).

5.2. Recomendaciones

En todo el proceso en el cual se realizó el presente trabajo de investigación se lograron encontrar varias observaciones al proceso de fabricado, así también se consultaron otras investigaciones que se realizaron con yeso, que dejaron varias inquietudes a ser investigadas en un futuro, las mismas son temas que escapan del alcance del proyecto.

- El proceso de fabricación del yeso en las regiones de El Huayco y el Zapallar se inicia con la extracción del yeso este proceso se basa en la experiencia de las personas, por ser una veta de roca sedimentaria su identificación no es muy difícil y la roca tiene una homogeneidad en su estructura. El siguiente paso en el proceso es la calcinación de las rocas aljez es un proceso bastante artesanal en donde existe un gran uso de la leña que desde el punto de vista ambiental es un problema muy

grande, debido al área de deforestación que cada año aumenta en la zona. Es muy preocupante este aspecto, pero existen muchas alternativas para mejorar la producción de yeso: como solución a corto plazo es el uso de túneles de viento, los cuales mejoran las temperaturas con una menor cantidad de uso de combustible (leña); a mediano plazo es la modificación de hornos con un proceso de recuperación de calor para optimizar y reducir el uso de combustibles en la fabricación; a largo plazo se tendría que llegar a trabajar con quemadores de gas los mismos aportarían en una homogeneidad en la deshidratación del yeso aumentando en la calidad, existen trabajos en donde se reemplaza el combustible tradicional (leña) por biomasa estos procesos son algo complicados de realizarlos por los requerimientos de biomasa y el transporte al lugar, imposibilitando estas opciones. Después del proceso de quemado del yeso se procede al molido del mismo se realiza en un molino de martillo accionado por un motor eléctrico, en este paso del proceso, lo más recomendado es que se realice un proceso de tamizado mecánico y un proceso de doble molido al volumen retenido de yeso. Mediante este proceso garantizamos que todas las partículas cuenten con una hidratación homogénea. La última fase del proceso es el envasado en bolsas recicladas de cemento que son de papel, para el envasado en la presentación que se maneja es de 20 Kg aproximadamente es lo más recomendable el uso de bolsas plásticas selladas, en la investigación se cambiaron las bolsas de cemento por bolsas plásticas; teniendo resultados muy positivos en el tiempo que el yeso se mantenía al mismo contenido de humedad a comparación con el manejo tradicional del yeso, al tener un producto sellado da seguridad en el manejo y tiempos de conservación del producto.

- En el proceso de investigación también se encontraron inquietudes, las que se recomienda estudiarlas en un futuro, para realizar la industrialización del yeso en distintos prefabricados y materiales para procesos de construcción en seco los cuales son: transmisión térmica del yeso, aislamiento eléctrico del yeso, resistencia al fuego. Además de otras inquietudes que surgieron en base a la consulta de otros trabajos y fichas técnicas que se realizaron en la región: reciclaje del yeso, rango

de temperatura de uso del yeso, fenómeno de no fraguado del yeso en temperaturas altas.

- Teniendo el tiempo suficiente para su aplicación en obra en condiciones de clima templado según bibliografía y fichas técnicas entre 5°C y 35°C ya que a una temperatura mayor a 42°C de la mezcla el di-hidrato es inestable manteniendo una masa fluida por varias horas, este trabajo debe ser verificado en laboratorio para tener el conocimiento y poder aprovecharlo en usos para prefabricados y obra.
- En el trabajo de investigación se realizaron usos de normativas: españolas UNE-EN 13279-1, chilena NCh 143 y boliviana NB 122004, uso de ensayos para materiales como el cemento, se fabricaron moldes para tener las probetas; esto indica que en un trabajo de investigación a veces hay que realizar uso de distintos medios para llegar a los resultados, lo más importante es no perder los principios teóricos de cada ensayo.