

# 1. CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

## 1.1. Introducción

El hormigón es uno de los componentes más esenciales de una obra civil, por lo cual es importante tomar en cuenta las virtudes y defectos que tiene, de esta manera sacar el máximo rendimiento del mismo. La inversión que se realiza para cada proyecto debe ser correlativa a la duración y calidad que se requieren, es por eso que cuando la estructura sufre daños se debe realizar cuidadosamente una evaluación para la rehabilitación de la estructura y de esta manera no perder la inversión realizada.

Debido a los problemas que causa un incendio, teniendo en cuenta que son accidentes que aumentan mientras más crece la población de una ciudad, es de vital importancia tomar medidas para prevenir tales acontecimientos, siguiendo las normativas vigentes en nuestro medio. Pero si se llega a presentar es necesario pensar en un método para la rehabilitación de las edificaciones que sufren con estos accidentes y determinar cuándo se pueden rehabilitar, en vez de optar por su demolición directa.

Una solución que se puede presentar en los elementos estructurales lineales que son sometidos principalmente a compresión, puede ser la construcción de encamisados en el contorno de los elementos, permitiendo de esta manera reforzar la pieza y que no colapse por los diferentes tipos de cargas existentes sobre la misma. El método de encamisados no requiere de mucha inversión y es muy utilizado en cualquier situación en la que una columna necesite refuerzo, por este motivo es necesario conocer el punto en el que su uso deja de ser eficiente, como en el caso de una columna que ha sido expuesta al fuego directo.

## 1.2. Problemática

La mayor parte de los edificios construidos actualmente no cuentan con un sistema contra incendios óptimo, apoyados solamente en lo básico como extinguidores, algunas salidas de emergencia entre otras cosas. El mayor riesgo se presenta en edificaciones que tienen instaladas conexiones de gas, alta cantidad de materiales que sean inflamables, como en mercados, edificios con oficinas y pudiendo también presentarse en hoteles, residenciales y demás por algún descuido de los hospedados.

*Figura 1: Edificio quemado en la ciudad de Yacuiba (vista frontal)*



*Figura 2: Edificio quemado en la ciudad de Yacuiba (vista de losa)*

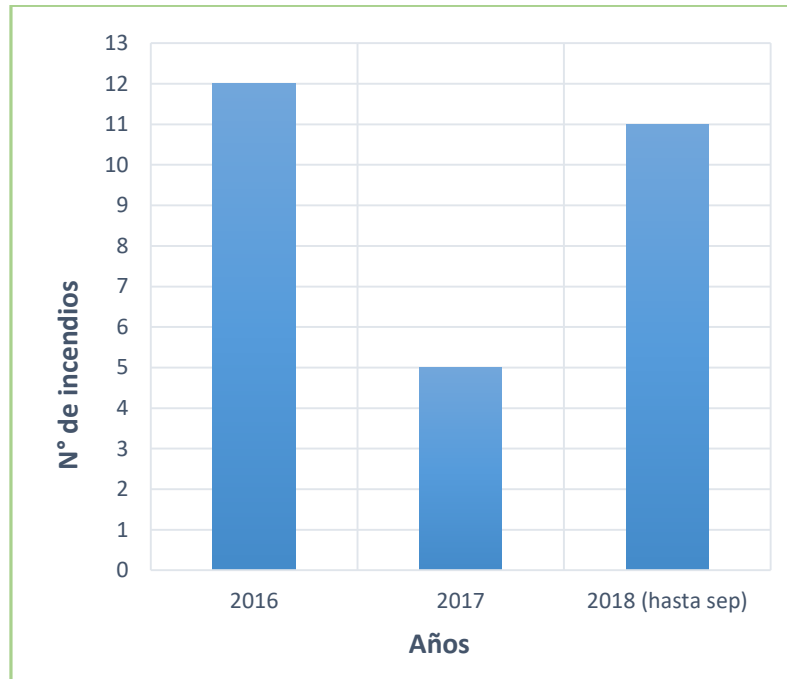


*(Fuente: Elaboración propia)*

Las estructuras en las ocurren estas catástrofes quedan en su mayoría en desuso (figura 1), sea por la falta de recursos al momento de realizar de un estudio para su rehabilitación o demolición. Un incendio que ocurre en cualquier edificación, si se prolonga por mucho tiempo genera grandes daños, y una vez apagado el fuego, la estructura ya no genera seguridad al estar en su interior (figura 2), por lo que es imperativo desalojar temporalmente hasta su rehabilitación.

Realizada una entrevista al Departamento de Bomberos de la Ciudad de Tarija (Anexo A.1), se registran los siguientes datos como se muestran en la gráfica N° 1, respecto a incendios en edificaciones:

*Gráfica N° 1: Registro de incendios en edificaciones.*



*Fuente: Depto. De Bomberos Tarija*

Con esta información se puede asumir, que la necesidad de conocer el grado de deterioro de la resistencia del hormigón conforme se incrementa la temperatura del incendio, como así también metodologías de rehabilitación.

## 1.3. Justificación

### 1.3.1. Académica

El concreto es un material compuesto, por lo cual sus componentes no reaccionan de la misma forma frente a las altas temperaturas, de forma que el conocer las condiciones físicas y mecánicas en las que se va deteriorando, puede ofrecer información para establecer parámetros de rehabilitación. Estos datos dan la posibilidad de considerar si es viable o no el método de encamisados, y saber el punto en el que la metodología pierde su eficiencia.

### 1.3.2. *Técnica*

Realizada una evaluación sobre la gravedad del incendio ocasionado en la estructura, puesto a que los incendios en edificaciones varían en gran manera uno de otro por factores como la cantidad de material inflamable y la capacidad de aporte de oxígeno disponible para la combustión, se podrá adoptar como método de refuerzo constructivo los encamisados, para su correcta rehabilitación.

### 1.3.3. *Social*

Las edificaciones que han sufrido el deterioro a causa de un incendio, tuvieron un costo previamente invertido, por lo cual, tomar alguna medida constructiva de refuerzo es más factible que en comparación a realizar una demolición completa de la estructura, permitiendo de esta forma que la edificación retome la función que sostenía.

## 1.4. Alcance de la investigación

El principal elemento lineal estructural en el que se enfoca éste estudio, será el que trabaje principalmente a esfuerzo axial o compresión. Puesto a que no tiene el mismo funcionamiento que otros elementos de la estructura, los métodos de rehabilitación también serían diferentes. Entonces el método de rehabilitación por encamisados idealmente funciona en columnas por los que este será el principal punto de investigación, usándolo frente a las patologías que genera el fuego a diferentes temperaturas.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. *Objetivo general*

Estimar el valor de temperatura máxima de exposición al fuego en el hormigón, en el que el método de rehabilitación por encamisados es efectivo proporcionando una magnitud de carga igual o superior a la inicial. Y de esta manera aplicarlo para la efectiva rehabilitación de columnas.

### 1.5.2. *Objetivos específicos*

- Determinar la resistencia característica a compresión de un tipo de hormigón con componentes uniformes, obteniendo así una probeta tipo o patrón.

- Consolidar un modelo de exposición al fuego o simulacro de incendio, considerando ciertos factores o variables como el tiempo de exposición y la cantidad de calor o el grado de temperatura.
- Exponer las probetas a estos simulacros y medir resistencias características, comparando así la variación de las mismas con datos universales.
- Obtener características básicas como color y degradación que se manifiestan en las muestras de hormigón a diferentes temperaturas de exposición.
- Determinar la viabilidad del método estructural de encamisados, considerando hasta qué punto de temperatura alcanzado es conveniente dicha rehabilitación.

## 1.6. Hipótesis

Considerando que la sección inicial de mi columna coincide con la de una probeta, se estima que a una temperatura de exposición de 400° C por un tiempo de 30 minutos y posteriormente reforzada con un encamisado de 2,5cm de espesor; obtendrá la misma magnitud de carga que resistiría una probeta que no ha sido expuesta al fuego.

## 1.7. Metodología de la investigación

Para la consolidación de conocimientos, en este caso es esencial recurrir a la metodología práctica o experimental, puesto a que los componentes del concreto son diferentes en cada lugar. De esta manera utilizar datos recolectados experimentalmente y aplicarlos de manera teórica en las diferentes situaciones que se presenten en la vida diaria.

Para la realización de este experimento se realizará la dosificación del hormigón mediante la Metodología ACI, tomando en cuenta todas las características físico – mecánicas que tengan los materiales componentes del hormigón, como ser: agregado fino, agregado grueso y cemento.

Las condiciones de resistencia que se obtengan del hormigón deberán cumplir las características que indique la Normativa Boliviana CBH – 87, tanto como resistencia mínima y calidad de los materiales.

2. CAPÍTULO II  
MARCO REFERENCIAL

## 2.1. Marco teórico

Debido a que la resistencia característica inicial del concreto es una variable importante, se utilizará el Código boliviano de hormigón (CBH – 87), como también normativas del Instituto boliviano de normalización y calidad (IBNORCA), de esta forma establecer una calidad de hormigón que cumpla con los reglamentos antes mencionados, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Nuestro medio no cuenta con una normativa que especifique o señale la metodología para determinar o estimar la pérdida de resistencia a compresión de un elemento de hormigón simple y mucho menos para la rehabilitación de estructuras en las cuales se haya ocasionado un incendio.

En cuanto a prevención y protección está el Decreto Supremo N° 2995 del 23 de noviembre de 2016 en su capítulo sexto a delante, establece el Sistema de Prevención y Protección Contra Incendios (SIPPCI) el cual indica parámetros, procedimientos, disposición y actividades a realizarse en distintas edificaciones para disminuir la mayor cantidad de víctimas en caso de suceder un incendio.

También se cuenta con un conjunto de normativas del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) en el Comité 5.8 – Prevención y Protección contra incendios.

## 2.2. Marco conceptual

*Resistencia característica del hormigón.* - Valor estadístico que garantiza que el 95% del hormigón colocado en obra, posee una resistencia mayor o igual a dicho valor. Este dato se utiliza para definir el hormigón utilizado; debe ser comprobado en obra mediante el control de calidad.



*Combustible.* - Es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor. Supone la liberación de una energía de su forma potencial (energía de enlace) a una forma utilizable sea directamente (energía térmica) o energía mecánica (motores térmicos) dejando como residuo calor (energía térmica), dióxido de carbono y algún otro compuesto químico.

*Incendio.* - Se entiende como incendio al fuego de grandes proporciones que arde de forma fortuita o provocada y destruye cosas que no están destinadas a quemarse, puede afectar considerablemente a las estructuras y mucho más a los seres vivos.

*Carga de fuego.* -Es la cantidad de calorías por kilogramo de combustible. Se toma como referencia a la masa de madera por unidad de superficie, expresada en kg/m<sup>2</sup>, capaz de desarrollar una cantidad de calor equivalente a la de los materiales contenidos en el sector de incendio. Como patrón de referencia se considera la madera con poder calorífico interior de 18,4 MJ/kg (aproximadamente 4400 cal/kg).

Indirectamente, la carga de fuego es un indicador de la magnitud del riesgo de incendio que presenta un edificio o instalación industrial. Este valor es de gran importancia tanto para determinar las protecciones en materia de detección y control de incendios, como también para determinar las características constructivas de la edificación.

*Spalling.* - El efecto Spalling es el fenómeno de desprendimiento que puede ocurrir a las superficies de las capas de los miembros de concreto cuando son expuestas al fuego. En la mayoría de los casos este fenómeno es el resultado de una combinación de la presión de poros generada por la ebullición de un volumen de agua libre o intersticial.

*Coefficiente de dilatación térmica.* - Es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura provocando una dilatación térmica. De forma general, durante una transferencia de calor, la energía que está almacenada en los enlaces intermoleculares entre dos átomos cambia. Cuando la energía almacenada

aumenta, también lo hace la longitud de estos enlaces. Así, los sólidos normalmente se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse.

*Conductividad térmica.* - Es una propiedad física que describe la capacidad de un material de transferir calor por conducción, esto es, por contacto directo y sin intercambio de materia. Es una magnitud intensiva que no depende de la cantidad de materia. La propiedad inversa es la resistividad térmica.

La energía térmica siempre fluye de forma espontánea de mayor a menor concentración, esto es, de caliente a frío. Esto implica que la transmisión de calor por conducción se da de un cuerpo a otro que está a menor temperatura o entre zonas de un mismo material, pero con temperatura diferente.

*Estado límite.* - Es una situación caracterizada por el valor de una magnitud física tal que, de ser rebasada, haría que la estructura dejara de ser apta para su uso, ya sea por ruina estructural total o parcial o por una pérdida significativa de funcionalidad. Es decir, si una magnitud  $M$  caracteriza un Estado Límite concreto, existirá un valor límite o valor último  $M_u$  tal que la condición  $M > M_u$  implica que la estructura sufrirá algún tipo de fallo estructural o de deterioro, que hará que en general deje de ser apta para su uso normal.

*Flashover.* - También conocido como combustión súbita generalizada, es un fenómeno que se observa en incendios confinados en los cuales de forma repentina todas las superficies combustibles, que hasta ese momento no estaban implicadas en el incendio, comienzan a arder a consecuencia de la radiación proveniente de las llamas que recorren el techo (rollover) provocando que todo el volumen del recinto sea ocupado por las llamas.

### *Transmisiones de calor:*

*Convección.* – La transmisión del calor se produce a través del movimiento del humo, gases, aire y partículas calientes. El humo y los gases calientes tienden a subir. El aire cercano al fuego se calienta y también sube, al ascender transporta ascuas y partículas calientes lejos del incendio. A medida que estos gases y sólidos calientes se alejan, el

aire más frío se vuelve hacia el fuego. Esto genera corrientes que aceleran el proceso de convección, que, a su vez, se va acelerando al aumentar la velocidad de combustión.

*Conducción.* – Es la transmisión del calor a través de un sólido. Los objetos metálicos, tales como vigas, columnas, tuberías, clavos y cables son excelentes conductores del calor.

*Radiación.* – El calor transmitido por radiación no precisa de un medio material como vehículo. Todos los materiales radian energía calorífica en forma de ondas electromagnéticas. Cuando esta energía incide sobre otro cuerpo, puede ser parcialmente reflejada, transmitida o absorbida. La energía absorbida es la que se manifiesta en forma de calor en el cuerpo.

*Encamisado.* - El encamisado de hormigón no es nada más que el vaciado de hormigón nuevo por alrededor de un elemento de hormigón viejo, incrementado así la sección transversal del elemento y de esta forma proporcionando el aumento en la resistencia característica del mismo.

### 2.3. Marco normativo

Para la realización de un estudio es necesario conocer las normativas vigentes que están relacionadas directamente con la temática de incendios en edificaciones, el deterioro en los materiales afectados estructuralmente y aquellos materiales que contribuyen al crecimiento del fuego, también aquellas normativas dirigidas a prevenir los mismos.

Un incendio constituye una amenaza para la vida por la asfixia, el envenenamiento y las temperaturas elevadas, pero de producirse en un edificio el peligro aumenta por la propia estructura del edificio. En un recinto exterior, con aire fresco, es casi imposible superar los 700° C. En un recinto cerrado la temperatura sube fácilmente un 30% más debido a la reflexión y radiación de las paredes.

El punto crítico de ignición (flashover) se sitúa en los 273°C, hasta este momento sólo la estructura de aluminio se vería afectada. A partir de aquí se desarrolla el llamado fuego equivalente o normalizado que es al que se refieren todas las reglamentaciones y las resistencias al fuego de materiales, medido en minutos.<sup>1</sup>

### 2.3.1. *Marco normativo en Bolivia*

En nuestro medio no se cuenta con normativas para la rehabilitación de estructuras que hayan sido afectadas específicamente por un incendio, ya que al tratarse de una patología de origen fortuito (en la mayoría de los casos) solamente se puede estudiar cada caso de manera individual y encontrar una solución viable. Se cuenta con información sobre efectos causados después del fuego sobre los materiales, de esta manera prevenir y proteger de manera estratégica los elementos de mayor importancia.

Con respecto a las medidas a tomar después del incendio solamente queda en manos del especialista encargado de la estructura después del incidente, con conocimientos sobre la dinámica de incendios.

### 2.3.2. *Leyes y normativas sobre la prevención de incendios en Bolivia*

Las medidas de protección contra incendios deben responder a estos objetivos:

- ✓ Protección de las personas para conservar la vida y la salud.
  
- ✓ Protección de la propiedad para conservar las mercancías y otras pertenencias, tanto en viviendas como en comercios en las que se haya iniciado un incendio, así como en las propiedades próximas. A ello debe añadirse que las estructuras de edificación sufran el menor daño posible.

---

<sup>1</sup> ASEFA Seguros. (2011). Efectos de incendios en estructuras de hormigón armado. Recuperado de <https://www.asefa.es/comunicacion/patologias/efectos-de-incendios-en-estructuras-de-hormigon-armado>

- ✓ Defensa del medio ambiente para reducir al mínimo los efectos adversos sobre el mismo provocados por el humo y los gases tóxicos, así como por el agua contaminada empleada para apagar los incendios.
- ✓ Protección de la propiedad para conservar las mercancías y otras pertenencias, tanto en viviendas como en comercios en las que se haya iniciado un incendio, así como en las propiedades próximas. A ello debe añadirse que las estructuras de edificación sufran el menor daño posible.<sup>2</sup>

El Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) dispone de un conjunto de normativas que permiten tener seguridad en las estructuras, si se aplican de manera adecuada dependiendo de las condiciones de la estructura.

Las normativas vigentes que encuentran relacionadas con el presente tema, se disponen en el Comité 5.8 y 5.9, las cuales son:

#### COMITÉ 5.8 PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

- NB 58001:2007 Detectores de incendio - Guía para la detección de incendios en centros de trabajo.
- NB 58002:2010 Extintores portátiles contra incendios - Requisitos de selección, instalación, aprobación y mantenimiento - Disposiciones generales (Primera revisión).
- NB 58003:2007 Iluminación alterna – Requisitos.
- NB 58004:2007 Extinción de incendios de edificaciones - Sistemas fijos de extinción con mangueras con agua para incendio.
- NB 58005:2007 Criterios para determinar la resistencia al fuego de materiales constitutivos de los edificios y de la carga ponderada de fuego (Qp) en entresijos.

---

<sup>2</sup> Plataforma Europea del Hormigón, (2008). Seguridad y protección completa frente al fuego con hormigón. (página 3)

- ETD 58006:2008 Extintores (matafuegos) manuales y sobre ruedas - Dotación, control, mantenimiento y recarga.
- NB/ISO 13943:2009 Seguridad contra incendios - Vocabulario (Correspondiente a la norma ISO 13943:2008).

#### COMITÉ 5.9 SEGURIDAD EN INSTALACIONES

- NB 59001:2005 Instalaciones - Batería de garrafas de GLP.

La norma de mayor relevancia en el presente estudio es:

*NB 58005:2007 Criterios para determinar la resistencia al fuego de materiales constitutivos de los edificios y de la carga ponderada de fuego en entre pisos*

Tal normativa ofrece información con la cual se puede construir elementos estructurales más resistentes al incendio, dependiendo del tipo de edificio y de los materiales componentes del mismo.

Cada material tiene aptitudes diferentes y propias frente al fuego por lo cual, en el punto 4 se indican a detalle en diferentes tablas, los espesores requeridos para que el material no sufra grandes daños, como así mismo sus respectivos grados de resistencia al fuego (RF).

Y en el punto 5 hacia delante establece la metodología a seguir para determinar la carga de fuego de un espacio, conociendo la magnitud de la carga se puede determinar los mecanismos de prevención, como extinguidores, sistemas de extinción con mangueras de agua, etc.

En la determinación de dicha carga se deben considerar todos y cada uno de los elementos combustibles que se encuentren o se vayan a instalar en el ambiente, los materiales líquidos o gaseosos en tuberías, barriles y depósitos, se consideran como uniformemente repartidos sobre toda la superficie del sector de incendio.

No obstante, más allá de las normativas de prevención y protección vigentes, se tiene establecido en el marco legal el Decreto Supremo N° 2995, que en sus capítulos 6 y 7 se establecen las siguientes medidas relacionadas directamente al tema:

### *Capítulo VI*

#### *Sistema de Prevención y Protección Contra Incendios - SIPPCI*

Artículo 18°. - (Finalidad del Sistema de Prevención y Protección Contra Incendios)

- I. El Sistema de Prevención y Protección Contra Incendios - SIPPCI tiene por finalidad:
  - a. Establecer los criterios técnicos para generar las condiciones de prevención y protección contra incendios de infraestructuras, y de los lugares en el que se desarrollan actividades, con el fin de evitar y reducir el riesgo de su iniciación y dar una respuesta adecuada, evitando pérdidas de vidas humanas, bienes y la protección del medio ambiente;
  - b. Establecer la coordinación entre las distintas entidades e instituciones públicas y privadas competentes para el cumplimiento del SIPPCI.
- II. El SIPPCI se aplica en las infraestructuras que existan remodelación, ampliación y otras, así como en actividades permanentes o eventuales, cambios de uso de inmuebles y otras similares de personas naturales y jurídicas, públicas y privadas propietarias y/o responsables, que representen por su naturaleza riesgo de incendio.
- III. Las Direcciones Departamentales de Bomberos dependientes de la Dirección Nacional de Bomberos de la Policía Boliviana, son las instancias competentes de realizar las acciones de fiscalización, control, certificación e inspección de cumplimiento del SIPPCI.

Artículo 19°. - (Niveles de riesgo de incendio)

Artículo 20°. - (Certificado de prevención y protección contra incendios)

Artículo 21°. - (Inspecciones técnicas)

Artículo 22°. - (Instalación de hidrantes públicos)

Artículo 23°. - (Instalación de hidrantes en edificios, industrias, centros comerciales, hospitalarios, educativos y de eventos públicos)

### *Capítulo VII*

#### *Medidas generales del sistema de prevención y protección contra incendios-SIPPCI*

Artículo 24°. - (Accesibilidad)

Artículo 25°. - (Detección y alarmas)

Artículo 26°. - (Medidas de extinción)

Artículo 27°. - (Abastecimiento de agua para bocas de fuego y rociadores) <sup>3</sup>

#### *1.3.3. Normativas de protección contra incendios internacionales*

Entre las normativas sobresalientes en el tema se tiene:

- ACI 216.1 – 97 Método Normalizado para determinar la resistencia al fuego de las construcciones de hormigón y mampostería.

Esta normativa norteamericana describe métodos aceptables para determinar la resistencia al fuego de las construcciones y elementos estructurales de hormigón y mampostería, incluyendo tabiques, losas de entepiso, losas de cubierta, vigas, columnas, dinteles y la mampostería utilizada para proteger contra el fuego las columnas de acero estructural.

En los elementos de hormigón toma en cuenta el tipo de agregado con el que se está realizando la mezcla, ya sean carbonatos, silíceos o semilivianos. También cuenta con ensayos de variación de tiempos al cual se exponen los hormigones y asimismo variando secciones transversales.

Cabe destacar que el modelo de incendio con los que se llevaron a cabo los ensayos que se presentan en la normativa, se detalla en la:

ASTM e119 – 00a Prueba de fuego a materiales de construcción de edificios

---

<sup>3</sup> Decreto Supremo N° 2995. Reglamentación de la ley de bomberos y de los sistemas de prevención contra incendios, La Paz, Bolivia, 23 de noviembre de 2016.



- CPI – 96 Condiciones de protección contra incendios en los edificios.  
Normativa española que establece condiciones que los edificios deben cumplir para proteger a sus habitantes frente a los riesgos originados por un incendio, para prevenir daños en los edificios o establecimientos próximos a aquel que se declare un incendio y facilitar la intervención de los bomberos y de los equipos de rescate, teniendo en cuenta su seguridad.  
Tales condiciones las especifica dependiendo del uso de la estructura, ya sea comercial, hospitalario, administrativo, zonas de baja densidad, etc.

## 2.4. Análisis de la información global disponible

La información con la que se cuenta al momento de definir el modo con el que se va a reforzar un elemento estructural que trabaja principalmente a esfuerzo axial, que ha sufrido daños por causa de un incendio, es muy limitada en cada situación. Solamente se cuenta con la experiencia del profesional que va a encarar la reparación de la estructura, considerando toda la información posible tanto del incendio como de la estructura en sí.

De tal manera tomar la decisión de destruir las zonas en las que el fuego haya ocasionado más daño, en cuanto a resistir cargas se refiere, o la de realizar algún trabajo de rehabilitación, estableciendo el tipo y forma de realizarlo, de forma que se pueda garantizar la efectividad del mismo.

Un factor determinante es conocer la magnitud en la que desciende el esfuerzo a compresión del hormigón, la cual se puede obtener de diferentes fuentes:

- Según Jimenez Montoya, Meseguer y Morán en su libro de Hormigón Armado<sup>4</sup>:

*Tabla N° 1: Acción de las altas temperaturas sobre el hormigón*

<b>TEMPERATURA</b>	<b>EFEECTO SOBRE EL HORMIGÓN</b>
<i>&lt; 100° C</i>	Ninguna influencia.
<i>100° C a 150° C</i>	El hormigón cede su agua capilar y de absorción.
<i>150° C durante un tiempo bastante largo</i>	Ligera disminución de la resistencia a compresión y fuerte caída de la resistencia a tracción.
<i>Hasta 250° C en periodos cortos</i>	Disminución de la resistencia a tracción sin afectar a la compresión.
<i>300° C a 500° C</i>	Pérdida de un 20% de la resistencia a compresión; la de tracción puede haber desaparecido.
<i>A 500° C y más</i>	La cal hidratada se destruye por pérdida del agua de cristalización (agua combinada químicamente).
<i>Hacia 900° C – 1000° C</i>	La deshidratación es total y provoca la destrucción completa del hormigón.

*Fuente: Jimenez Montoya et al. Hormigón Armado*

- Según la Plataforma Europea del Hormigón (2008) en el estudio de Seguridad frente al Fuego<sup>5</sup>:

<sup>4</sup> Jimenez Montoya et al. Hormigón Armado. Acción de las altas temperaturas sobre el hormigón (tabla). (página 98)

<sup>5</sup> Plataforma Europea del Hormigón, (2008). Hormigón sometido al fuego: Procesos físicos (Khoury, 2000), (tabla). (página 33)

Tabla N° 2: Hormigón sometido al fuego: Procesos físicos (Khoury, 2000)

Temperatura	Que sucede
1000	
900	Las temperaturas del aire en incendios rara vez exceden este nivel pero las de la llama pueden alcanzar los 1.200°C y más aún.
800	
700	
600	Con esta temperatura el hormigón no mantiene su capacidad estructural total.
550-600	Los materiales con base de cemento experimentan un descenso de su capacidad de apoyo.
400	
300	Comienza una pérdida de firmeza pero en realidad sólo los primeros centímetros de hormigón expuestos al fuego soportarán más calor que éste e internamente la temperatura estará por debajo de ésta.
250-420	Se produce una pérdida de recubrimiento con partes del hormigón separándose de la superficie.

Fuente: Plataforma Europea del Hormigón, (2008). Seguridad frente al fuego

- Según ASEFA Seguros (2011) en un estudio sobre patologías en Efectos de Incendios en Estructuras de Hormigón Armado<sup>6</sup>:

Tabla N° 3: Efectos sobre el hormigón

TEMPERATURA	DETERIORO
A 380° C en periodos prolongados	El hormigón comienza a deteriorarse significativamente.
A 400° C	Pérdida de resistencia entre 15% - 20%.
Por encima de 800° C	El hormigón deja de poseer resistencia a compresión viable.

Fuente: ASEFA seguros, (2011). Efectos de incendios en Estructuras de hormigón armado.

<sup>6</sup> ASEFA seguros, (2011). Efectos sobre el hormigón, (tabla). Recuperado de <https://www.asefa.es/comunicacion/patologias/efectos-de-incendios-en-estructuras-de-hormigon-armado>.

Información que debe ser comparada con la obtenida de los diferentes ensayos realizados, para observar y analizar las distintas variaciones que se presenten.

## 2.5. Análisis de tipos de hormigones

Como material de gran importancia en la mayoría de las edificaciones que se realizan en nuestro medio, es necesario indicar los tipos de hormigón que más se utilizan:

- Hormigón en Masa. Este se vierte directamente en moldes previamente preparados y dan macizos sometidos a esfuerzos de compresión.
- Hormigón Ciclópeo. Es un tipo de material de construcción usado en cimentaciones, en lechos marinos o de río. Este sistema ha quedado prácticamente en desuso.
- Hormigón Ligero. Material de poca densidad, formado por áridos de pequeña densidad. Se utiliza principalmente para la obtención de elementos que no precisen grandes resistencias, como tabiques, forjados de pisos, fachadas de revestimiento, y, sobre todo, como aislante del calor y del sonido.
- Hormigón Armado. Contiene en su interior una armadura metálica y trabaja también a la flexión. Las barras de Acero se introducen en la pieza de Hormigón, en el borde que resiste las tracciones, y debido a la adherencia entre ambos materiales, las primeras resisten las tracciones y el segundo las compresiones.
- Hormigón Pretensado. Contiene acero sometido a fuerte tracción previa y permanente. La idea básica del pretensado es someter a compresión al Hormigón antes de cargarlo, en todas aquellas áreas en que las cargas produzcan tracciones.

En éste caso se estudiarán los elementos sometidos a compresión pura, como ser en columnas de hormigón armado.

Se sabe que a los 400° C el acero se vuelve dúctil y a los 600° C se produce una bajada brusca de su resistencia. Como en la hipótesis se establece no se estudiarán efectos mayores a los 400° C, se ve conveniente trabajar sin acero incluido en las muestras de hormigón.

A diferencia del acero, el hormigón está expuesto al fuego, por lo tanto, las evaluaciones son más complejas. Además de las variables propias de cada incendio (carga de combustible, aireación, etc), la variación en los resultados del hormigón puede deberse a una serie de factores intrínsecos como la densidad, la porosidad, el tipo de árido y el método de vibración durante la ejecución.

Se podrá contar con datos específicos solamente del hormigón simple y de acuerdo a las resistencias que las muestras presenten mediante la variación del modelo de incendio, se podrán aplicar a elementos compuestos.

De acuerdo a la clasificación de resistencias, la normativa boliviana indica lo mostrado en la Tabla N° 4, se opta por escoger un valor para la realización de la dosificación y tipificación de los hormigones a realizar.<sup>7</sup>

*Tabla N° 4 Clasificación de hormigones*

<b>Tipo de hormigón</b>	<b>Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>H – 12,5</b>	125
<b>H – 15</b>	150
<b>H – 17,5</b>	175
<b>H – 20</b>	200
<b>H – 25</b>	250
<b>H – 30</b>	300
<b>H – 35</b>	350
<b>H – 40</b>	400
<b>H – 45</b>	450
<b>H – 50</b>	500
<b>H – 55</b>	550

*Fuente: Normativa CBH – 87*

<sup>7</sup> Código boliviano del hormigón, (1987). Clasificación de hormigones, (tabla). (página 21)

Tabla N° 5: Resistencia del hormigón en función del tipo de acero

Tipo de Acero	Solicitación	Valor mínimo de la resistencia de proyecto del hormigón a los 28 días, fck, en MPa.	Tipo de hormigón
AH 215 L	Estática	12,5	H - 12,5
AH 400	Estática	15	H - 15
	Dinámica	20	H - 20
AH 500	Estática	17,5	H - 17,5
	Dinámica	20	H - 20
AH 600	Estática	20	H - 20
	Dinámica	20	H - 20

Fuente: Normativa CBH – 87.

La normativa de forma específica determina que el valor mínimo de resistencia que debe tener el hormigón de cualquier estructura, que trabaje en conjunto con el acero sea del tipo que sea, debe ser del tipo H – 20, como se observa en la Tabla N° 5. De esta manera se infiere que se debe trabajar con un hormigón de una resistencia característica de 200 Kg/cm<sup>2</sup>.<sup>8</sup>

## 2.6. Modelo tipo de incendio

Cuando se produce un incendio, existe una serie de condicionantes que pueden afectar a la propagación. El calor generado en un incendio puede transmitirse de 3 formas: por convección, por conducción y por radiación.

<sup>8</sup> Código boliviano del hormigón, (1987). Resistencia del hormigón en función del tipo de acero, (tabla). (página 30)

En la primera fase de un incendio, el calor se transmite por radiación y sólo una pequeña parte del calor es transmitida por convección. Esta fase afecta principalmente al contenido del recinto. A medida que el incendio se desarrolla, el calor transmitido por radiación va disminuyendo y aumenta el calor por convección. Sólo una pequeña parte del calor se transmite por conducción entre los elementos metálicos presentes en el escenario del incendio.

Una vez alcanzada la fase de total desarrollo del incendio, se inicia el proceso de propagación del fuego al resto de la edificación. Normalmente el fuego se propaga por acción de los mecanismos de convección y radiación térmica originados por las llamas, también por contacto o radiación directa a otros productos o elementos constructivos.

El movimiento del fuego y los humos durante un incendio depende en gran medida de la geometría del edificio y de las potenciales rutas que constituyen elementos como: puertas y ventanas, conductos de ventilación, cavidades entre los elementos constructivos, cajas de escaleras, espacios ocultos sobre los falsos techos, etc.

Por otro lado, para que el incendio se propague y evolucione se debe disponer de calor, combustible, comburente y producirse la reacción en cadena, es decir, el tetraedro del fuego. Ante la ausencia de cualquiera de estos elementos el fuego se extingue.

Por tanto, los factores que pueden afectar a la propagación serán los siguientes:

- ❖ Concentración de comburente/combustible.
- ❖ Superficie específica expuesta al ataque del fuego.
- ❖ Condiciones de entorno y geometría del escenario.
- ❖ Condiciones climatológicas.
- ❖ Tamaño, número y distribución de los huecos (aberturas) de ventilación.
- ❖ Propiedades térmicas de los cerramientos del recinto.
- ❖ Tamaño, composición y localización de las fuentes de combustible que se incendian en primer lugar.
- ❖ Disponibilidad y ubicación de fuentes de combustible adicionales.

- ❖ Correcto funcionamiento de las medidas de protección activa y pasiva del recinto.

Un incendio es un fenómeno muy complejo y que se ve afectado por un gran número de factores. De hecho, los incendios desarrollados nunca pueden ser simulados perfectamente, debido a la gran cantidad de parámetros que influye en un incendio. Por ello, todavía no se ha encontrado un programa de simulación exacto.<sup>9</sup>

### 2.6.1. Características del ensayo

Al conocer la gran cantidad de factores que están involucrados en un incendio, se considerarán en el ensayo los más relevantes, como ser la temperatura, el tiempo de exposición y resistencia del hormigón. De esta manera establecer las que serán variables y las que serán constantes.

Se establece lo siguiente:

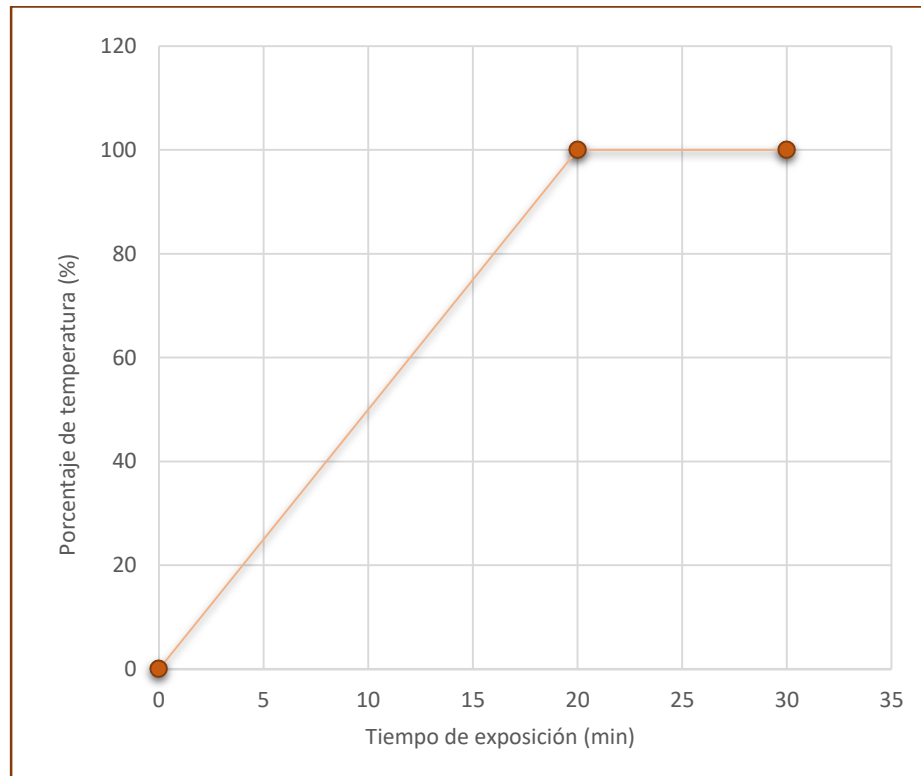
- Se considera el tiempo de exposición como factor constante en cada ensayo, con un valor de 30 minutos. Aproximado al tiempo máximo de respuesta del Cuerpo de Bomberos en llegar al incendio. (Anexo A.1)
- La temperatura de exposición será el factor variable, y las temperaturas de estudio serán de 100° C, 200° C, 300° C y de 400° C.
- El incremento de la temperatura se realiza como se indica en el gráfico N° 2, estableciendo que el incremento de temperatura se da en los primeros 20 minutos y los últimos 10 minutos con la máxima temperatura establecida.

---

<sup>9</sup> Galán, A. (2016). Factores que afectan a la propagación de un incendio. El blog de la seguridad contra incendios. Recuperado de <http://elblogdelaseguridadcontraincendios.es/factores-que-afectan-a-la-propagacion-de-un-incendio/>



*Gráfica N° 2: Incremento de la temperatura del ensayo*



*Fuente: (Elaboración propia)*

- El horno debe contar con un lector de temperatura, con el cual se pueda realizar la lectura y control de la misma. Las características del horno de ensayo se indican en el Anexo A.2
- Para simular la situación de un incendio, se procede a enfriar las probetas utilizando el sistema de choque térmico, que consiste en sumergir a las probetas en un tanque de agua a temperatura ambiente.

## 2.7. Modelos de análisis estadísticos

Para realizar un análisis estadístico de la resistencia característica del hormigón, se decidió trabajar con 5 probetas por cada punto de temperatura especificado.

En primer lugar, se trabajarán con probetas que solamente hayan sido expuestas al fuego y en segundo con probetas que han sido quemadas y posteriormente reforzadas con el encamisado. La agrupación de probetas que se realizará, se indican en la Tabla N° 6.

*Tabla N° 6: Agrupación de probetas.*

<b>Tipo de Hormigón</b>	<b>Temperatura de exposición (°C)</b>	<b>Cantidad de probetas</b>
<i>Patrón Normal (7 días)</i>	-	3
<i>Patrón Normal (28 días)</i>	-	5
<i>Patrón Refuerzo</i>	-	3
<i>Solamente quemadas</i>	100	5
	200	5
	300	5
	400	5
<i>Quemadas con refuerzo</i>	100	5
	200	5
	300	5
	400	5

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se indica en la tabla, en principio realizada la dosificación y rompiendo a los 7 días se verificarán las resistencias registradas y posteriormente a corregir o ajustar las cantidades de material.

Para determinar la resistencia característica del hormigón, de acuerdo a la hipótesis de distribución estadística normal, se utilizará la siguiente expresión:

$$f_{ck} = f_{cm} (1 - 1,64 * \delta)$$

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2} \geq 0,10$$

Donde:

$f_{cm}$  : Resistencia a compresión promedio del conjunto de datos.

$\delta$  : Coeficiente de variación de la población. El cual no será menor a 0,10.

$n$  : Número de datos

$f_{ci}$  : Resistencia a compresión de cada ensayo.

Las distintas ecuaciones se indican tanto en el Hormigón Armado del Jimenez Montoya como en la CBH – 87, y el valor mínimo del coeficiente de variación que debe ser mayor a 0,10; en la normativa solamente indica que no deberá sobrepasar dicho valor, en cambio en el Jimenez Montoya se establecen los valores de la Tabla N° 7.<sup>10</sup>

*Tabla N° 7: Condiciones de ejecución del Hormigón.*

Condiciones previas para la ejecución	Coeficiente de variación $\delta$	Resistencia media en el laboratorio, $f_{cm}$ , en kg/cm <sup>2</sup> .
Medias	0,20 a 0,25	$f_{cm} = 1,50 f_{ck} + 20 \text{ kg/cm}^2$
Buenas	0,15 a 0,20	$f_{cm} = 1,35 f_{ck} + 15 \text{ kg/cm}^2$
Muy buenas	0,10 a 0,15	$f_{cm} = 1,20 f_{ck} + 10 \text{ kg/cm}^2$

*Fuente: Jimenez Montoya et al. Hormigón Armado.*

<sup>10</sup> Jimenez Montoya et al. Hormigón Armado. Condiciones de ejecución del hormigón, (tabla). (página 201)

## 2.8. Metodología de encamisados

### 2.8.1. *Sistemas de refuerzo*

Presentándose la necesidad de incrementar la capacidad portante de un elemento, bien porque sus características mecánicas son inadecuadas, en relación con las contempladas en el proyecto original (incendio), o bien porque un cambio de uso condiciona unas cargas superiores con la consiguiente demanda de un incremento de la capacidad portante. En estos casos, es necesario proceder al refuerzo del elemento estructural y para ello pueden plantearse diferentes alternativas:

- ✚ Sustitución de un hormigón de mala calidad por uno de mejores características resistentes, manteniendo las secciones existentes.
- ✚ Recrecido de secciones o encamisados para mejorar la capacidad portante del elemento con hormigón.
- ✚ Aporte de nuevas armaduras embebidas dentro de la sección existente de hormigón que permita soportar los esfuerzos durante la vida de servicio.
- ✚ Encamisados metálicos sobre la superficie de la sección de hormigón existente.
- ✚ Otras técnicas (pretensados exteriores, cosidos locales, etc.).

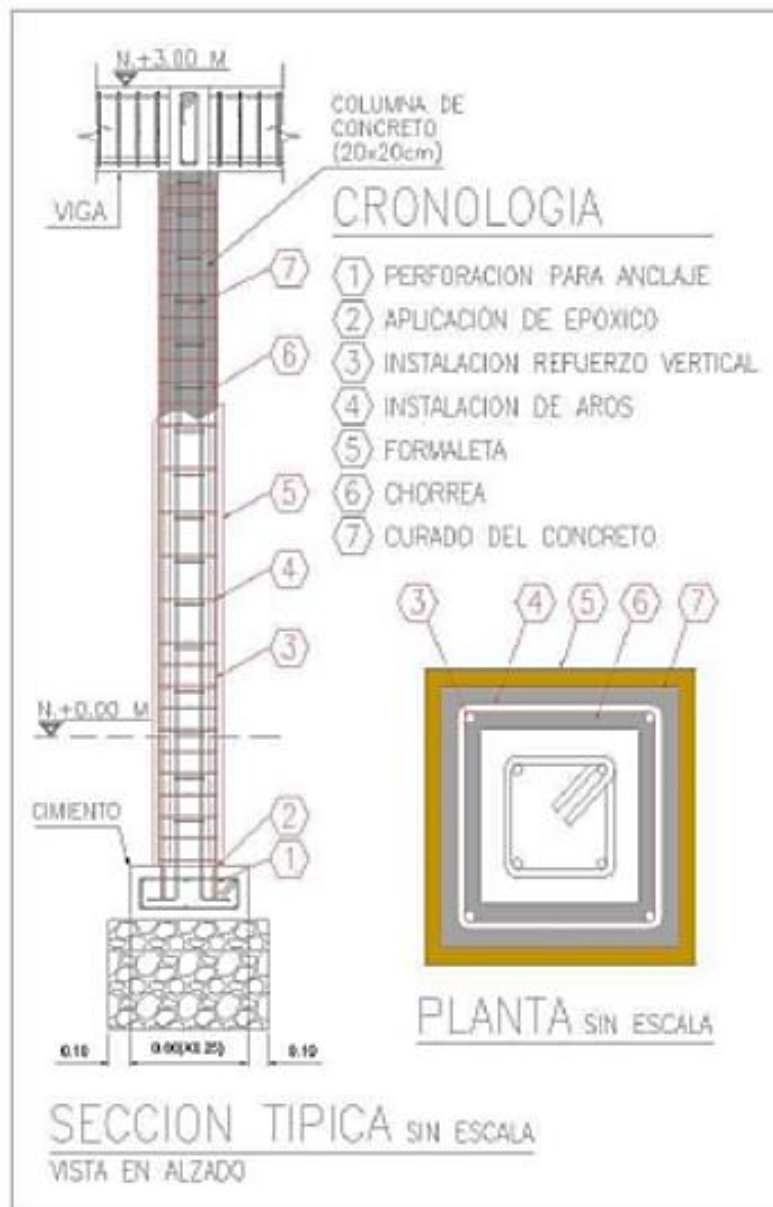
En todos los casos, es fundamental la realización de un estudio adecuado para el apeo de las cargas que transmite el elemento previamente a la realización del refuerzo. Ello condicionará de forma determinante el futuro comportamiento tensional en servicio del refuerzo realizado.

### 2.8.2. *Características del encamisado de hormigón*

El encamisado perimetral de hormigón con acero adicional es una de las técnicas más compleja de realizar, pero como producto final da un acabado arquitectónico favorable, ya que el trabajo de refuerzo no es visible, simplemente es un aumento de la sección de la columna. Es una técnica que es complementaria a la columna existente y ayuda al núcleo de concreto existente a absorber y distribuir las cargas hacia el cimiento.

Como pasos para realizar esta técnica es necesario nuevamente analizar la columna según su estado de resistencia de concreto, para así determinar el sobre ancho de la sección y que el acero a instalar sea el requerido para la nueva área. De tal manera que esta nueva sección sea la que trabaje y resista las cargas de la columna.<sup>11</sup>

Figura N° 3: Vista en alzado de la columna con encamisado perimetral.



Fuente: ICO TEC. Técnicas de reforzamiento de estructuras de hormigón.

<sup>11</sup> ICO TEC, (2010). Técnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales. (página 12)

### 2.8.3. Encamisado de hormigón en el ensayo

Las condiciones que se imponen sobre el refuerzo son las siguientes:

- El espesor del encamisado en las probetas de refuerzo es de 2,5 cm. Inicialmente el diámetro de las probetas es de 15 cm sin refuerzo, pero con refuerzo adquieren un diámetro de 20 cm.
- Para garantizar la adherencia entre el hormigón nuevo y el viejo, se utiliza una pintura epóxica, Sikadur 32 Gel con características indicadas en el Anexo A.3.
- La resistencia de cálculo utilizada para la dosificación del refuerzo, es para un hormigón de 200 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor fue adoptado debido a que es la resistencia mínima que debe de tener un hormigón para trabajar eficazmente con el acero.  
Esto solamente será aplicado académicamente para obtener información básica, ya que un refuerzo siempre debe tener una resistencia superior a la que se tiene en obra inicialmente.
- Para obtener valores de resistencia mayores en un periodo corto de tiempo, se añade un acelerante de fraguado en el hormigón de refuerzo. Esto con el fin de simular una situación real, en la que se debe reforzar la columna en el menor tiempo posible.
- El acelerante que se utiliza en este caso es el Sika 3, con una proporción de 1:12, tales características del acelerante se indican en el Anexo A.4.

*Figura N° 4: Aditivos utilizados en el encamisado*



*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura N° 5: Preparación de los aditivos para el hormigonado*

*Fuente: Elaboración propia.*

3. CAPÍTULO III  
APLICACIÓN PRÁCTICA



### 3.1. Agregados pétreos

#### 3.1.1. Localización del lugar de procedencia de agregados

Los agregados pétreos utilizados para realizar el hormigonado se adquieren del Comercial San Martín, ubicado a media cuadra del puente San Martín, dicho comercial recibe los materiales de la Seleccionadora Fernández.

La seleccionadora extrae agregados de San Jacinto Norte, los que se entregan al comercial son de canto rodado.

#### 3.1.2. Ensayos y análisis de agregados

Para realizar la dosificación se deben conocer las características físicas de los agregados, por lo que se tiene:

- ✓ Peso unitario agregado grueso

$$PU_{AG} = 1,69 \text{ gr/cm}^3$$

- ✓ Peso unitario agregado fino

$$PU_{AF} = 1,58 \text{ gr/cm}^3$$

- ✓ Peso específico agregado grueso

$$PE_{granel} = 2,60 \text{ gr/cm}^3$$

$$PE_{SSS} = 2,64 \text{ gr/cm}^3$$

$$PE_{aparente} = 2,67 \text{ gr/cm}^3$$

$$\%Absorción = 1,24 \%$$

- ✓ Peso específico agregado fino

$$PE_{granel} = 2,81 \text{ gr/cm}^3$$

$$PE_{SSS} = 2,86 \text{ gr/cm}^3$$

$$PE_{aparente} = 2,96 \text{ gr/cm}^3$$

$$\%Absorción = 1,79 \%$$

- ✓ Módulo de finura del agregado fino

$$MF = 2,62$$

- ✓ Peso específico del cemento

$$PE_{cemento} = 3,01 \text{ gr/cm}^3$$

El detalle de la realización y cálculo de todos los ensayos se indica en el Anexo A.5

### 3.1.3. *Dosificación de hormigones*

Se determinan las cantidades de material, tanto del hormigón normal como el de recubrimiento, mediante el método ACI.

Debido al ajuste de cantidades, se muestran los resultados de las dos dosificaciones del hormigón normal y la del hormigón de refuerzo.

Se tienen:

- ✓ Hormigón normal inicial

Cemento = 382,98 kg/m<sup>3</sup>

Arena = 716,32 kg/m<sup>3</sup>

Grava = 1162,72 kg/m<sup>3</sup>

Agua = 180,00 lts/m<sup>3</sup>

- ✓ Hormigón normal ajustado

Cemento = 435,84 kg/m<sup>3</sup>

Arena = 666,00 kg/m<sup>3</sup>

Grava = 1162,72 kg/m<sup>3</sup>

Agua = 180,00 lts/m<sup>3</sup>

- ✓ Hormigón de refuerzo (proporción de acelerante 1:12)

Cemento = 484,26 kg/m<sup>3</sup>

Arena = 754,80 kg/m<sup>3</sup>

Grava = 959,92 kg/m<sup>3</sup>

Agua = 200,00 lts/m<sup>3</sup>

Acelerante = 16,67 lts/m<sup>3</sup>

El detalle del cálculo y tablas utilizadas se indican en el Anexo A.6.

## 3.2. Ensayos en el hormigón

### 3.2.1. Resistencia patrón del hormigón normal

Realizada la primera dosificación, se procede a romper a los 7 días y realizar una proyección de los esfuerzos, según la norma CBH – 87, y así verificar que las cantidades sean las convenientes.<sup>12</sup>

Tabla N° 8: Coeficiente de conversión de la resistencia a compresión

Clase de hormigón	Edad, en días				
	3	7	28	90	360
<i>Hormigones de endurecimiento normal</i>	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
<i>Hormigones de endurecimiento rápido</i>	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

Fuente: Normativa CBH – 87.

Puesto a que el tipo de hormigón es normal y se realiza el ensayo a los 7 días, el coeficiente de conversión es de 0,65. Determinando la proyección de la siguiente forma:

$$f_{c \text{ (proyectado)}} = \frac{f_{ci \text{ (lecturado)}}}{0,65}$$

El área de la sección transversal, para un diámetro de 15 cm, es:

$$A_T = \frac{\pi * 15^2}{4}$$

$$A_T = 176,63 \text{ cm}^2$$

Debido a que la Prensa Hidráulica realiza la lectura de la fuerza aplicada en kilonewtons (KN), el factor conversor a kilogramos (kg) es:

$$1 \text{ KN} = 101,94 \text{ kg}$$

---

<sup>12</sup> Código boliviano del hormigón, (1987). Coeficiente de conversión de la resistencia a compresión, (tabla). (página 21).

Si la lectura de carga es:

$$1P = 176,5 \text{ KN}$$

Conversión de la fuerza:

$$\text{Carga} = 176,5 \text{ KN} * \frac{101,94 \text{ kg}}{1 \text{ KN}}$$

$$\text{Carga} = 18003,0 \text{ kg}$$

La resistencia del hormigón será:

$$f_{ci} = \frac{\text{Carga}}{\text{Área}}$$

$$f_{ci} = \frac{18003,0}{176,63}$$

$$f_{ci} = 101,93 \text{ kg/cm}^2$$

De esta forma se indican los resultados de las demás probetas en la tabla N° 9.

Tabla N° 9: Resistencias del hormigón normal (A)

Probeta N°	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura de carga (KN)	Carga (kg)	Peso (kg)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1P	176,63	176,5	18003,0	13,050	101,93	156,81
2P	176,63	180,3	18390,6	13,040	104,12	160,19
3P	176,63	163,8	16707,6	13,120	94,59	145,53
Promedio				13,070	100,20	154,20

Fuente: Elaboración propia.

Con las siguientes características adicionales:

- Día del vaciado 15/05/2018
- Día del ensayo a rotura 22/05/2018
- El asentamiento en el cono de Abrams fue de 6,5 cm.

Ya que el promedio de la resistencia proyectada es de 154,2 kg/cm<sup>2</sup>, se realiza el ajuste a las proporciones de la dosificación.

Con la dosificación final se realiza el hormigonado de todas las probetas, y hecho en ensayo a rotura a los 28 días se obtienen los resultados mostrados en la tabla N° 10.

*Tabla N° 10: Resistencias del hormigón normal (B)*

<i>Probeta N°</i>	<i>Sección</i>	<i>Lectura de carga</i>	<i>Carga</i>	<i>Peso</i>	<i>Resistencia a 28 días</i>
	<i>(cm<sup>2</sup>)</i>	<i>(KN)</i>	<i>(kg)</i>	<i>(kg)</i>	<i>(kg/cm<sup>2</sup>)</i>
1P	176,63	340,2	34700,4	12,970	196,46
2P	176,63	376,3	38382,6	12,965	217,31
3P	176,63	367,8	37413,6	12,935	211,83
4P	176,63	216,2	22052,4	13,035	124,85
5P	176,63	370,8	37821,6	13,020	214,14
Promedio				12,990	209,93

*Fuente: Elaboración propia.*

Características adicionales:

- Día del vaciado 29/05/2018
- Día del ensayo a rotura 26/06/2018
- El asentamiento en el cono de Abrams fue de 3,0 cm.

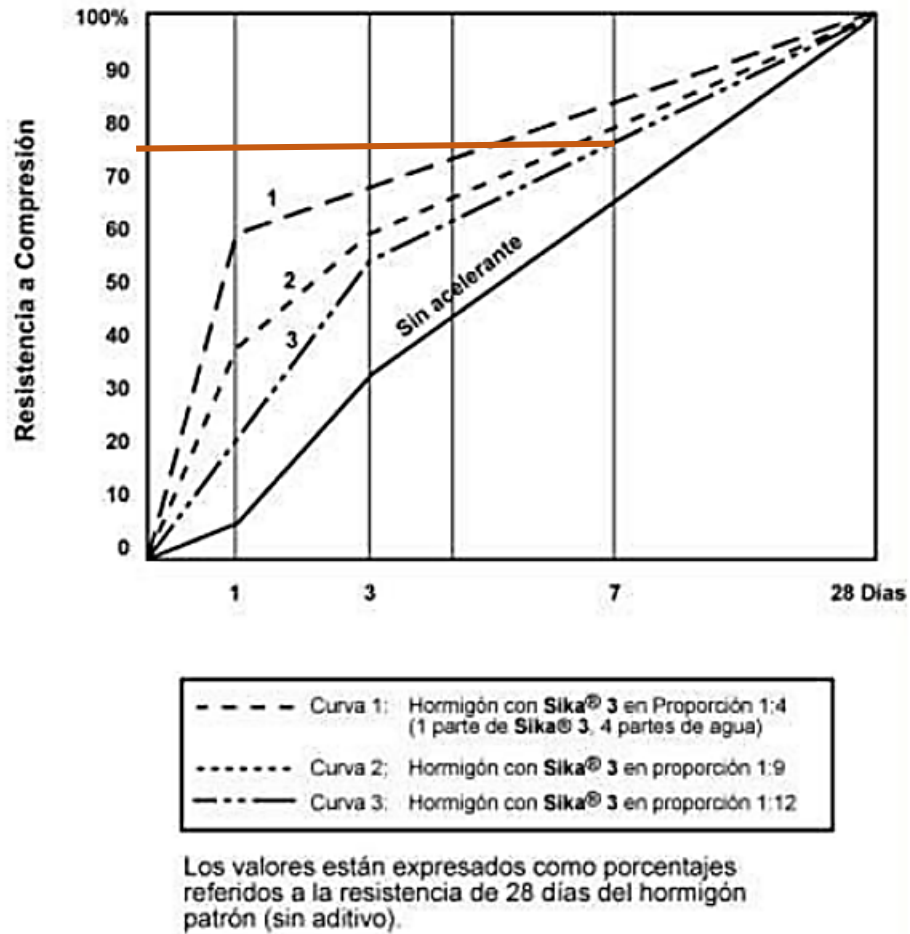
La lectura de la probeta 4P no fue tomada en cuenta para el promedio ya que en el ensayo solamente se rompió en una esquina, como se muestra las imágenes del Anexo A.7.

### 3.2.2. Resistencia patrón del hormigón de recubrimiento

El hormigón de refuerzo debe alcanzar resistencias superiores en el menor tiempo posible, para poder recibir las cargas que recibía la sección original, de ahí la necesidad de utilizar un acelerante de fraguado.

De acuerdo a las características del acelerante Sika 3 (anexo A.4), se obtiene la siguiente información:

**Cuadro 3**  
Evolución de resistencia en hormigones con Sika® 3



*Fuente: Ficha técnica, Sika 3.*

Se utiliza la proporción 1:12, la cual indica que el hormigón alcanza un 75% de su resistencia máxima a los 7 días.

Entonces la proyección a los 28 días se determina:

$$f_{c(\text{proyectado})} = \frac{f_{ci(\text{lecturado})}}{0,75}$$

Los resultados del ensayo a rotura del hormigón de recubrimiento, se indican en la tabla N° 11.

*Tabla N° 11: Resistencia del hormigón de recubrimiento.*

Probeta N°	Sección	Lectura de carga	Carga	Peso	Resistencia 7 días	Proyección 28 días
	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
1R	176,63	287,8	29355,6	12,835	166,20	221,60
2R	176,63	298,4	30436,8	12,790	172,32	229,77
3R	176,63	313,9	32017,8	12,805	181,28	241,70
Promedio				12,810	173,27	231,02

*Fuente: Elaboración propia.*

Características adicionales:

- Día del vaciado 19/09/2018
- Día del ensayo a rotura 26/09/2018
- El asentamiento en el cono de Abrams fue de 6,5 cm.

Las imágenes del ensayo de dichas probetas se encuentran en el Anexo A.8.

### 3.2.3. Ensayo de quemado de probetas

El hormigonado se realiza en grupos de 10 probetas, en la tabla N° 12 se muestra información de los asentamientos registrados y grupo al cual se ocuparán las mismas.

*Tabla N° 12: Información sobre el vaciado de probetas*

Día de vaciado	Asentamiento en el cono de Abrams (cm)	Grupo de probetas
23/05/2018	6,0	Solo Quemadas (Q)
04/06/2018	3,5	Quemadas y Reforzadas (QR)
07/06/2018 (mañana)	5,0	Solo Quemadas (Q)
07/06/2018 (tarde)	5,5	Quemadas y Reforzadas (QR)

*Fuente: Elaboración propia.*

A medida que se realizaban las probetas se vio la necesidad de identificar a cada una, por lo que se enumeraron del 1 al 20 con respecto al grupo al cual pertenezca. De esta manera, la distribución de las probetas a cada temperatura de exposición se indica en la tabla N° 13.

*Tabla N° 13: Distribución de probetas con respecto a la temperatura de exposición.*

Enumeración de las probetas					Temperatura (°C)
1	5	9	13	17	100
2	6	10	14	18	200
3	7	11	15	19	300
4	8	12	16	20	400

*Fuente: Elaboración propia.*

El quemado de todas las probetas fue realizado en los días que se muestran en la tabla N° 14, la cual también indica las temperaturas de exposición de cada grupo referenciado en las tablas N° 12 y N° 13.

*Tabla N° 14: Información sobre el quemado de las probetas.*

N° de Probeta	Día de vaciado	Día de quemado	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
1Q	23/05/2018	16/08/2018	30	100
5Q	23/05/2018	16/08/2018		
9Q	23/05/2018	16/08/2018		
13Q	07/06/2018	16/08/2018		
17Q	07/06/2018	16/08/2018		
1QR	04/06/2018	16/08/2018	30	100
5QR	04/06/2018	16/08/2018		
9QR	04/06/2018	16/08/2018		
13QR	07/06/2018	17/08/2018		
17QR	07/06/2018	17/08/2018		



2Q	23/05/2018	17/08/2018		
6Q	23/05/2018	17/08/2018		
10Q	23/05/2018	17/08/2018	30	200
14Q	07/06/2018	17/08/2018		
18Q	07/06/2018	17/08/2018		
2QR	04/06/2018	17/08/2018		
6QR	04/06/2018	17/08/2018		
10QR	04/06/2018	17/08/2018	30	200
14QR	07/06/2018	17/08/2018		
18QR	07/06/2018	17/08/2018		
4Q	23/05/2018	04/09/2018		
7Q	23/05/2018	04/09/2018		
8Q	23/05/2018	04/09/2018	30	300
15Q	07/06/2018	04/09/2018		
19Q	07/06/2018	05/09/2018		
3QR	04/06/2018	05/09/2018		
7QR	04/06/2018	05/09/2018		
11QR	07/06/2018	05/09/2018	30	300
15QR	07/06/2018	05/09/2018		
19QR	07/06/2018	05/09/2018		
3Q	23/05/2018	05/09/2018		
11Q	07/06/2018	05/09/2018		
12Q	07/06/2018	06/09/2018	30	400
16Q	07/06/2018	06/09/2018		
20Q	07/06/2018	10/09/2018		
4QR	04/06/2018	10/09/2018		
8QR	04/06/2018	10/09/2018		
12QR	07/06/2018	10/09/2018	30	400
16QR	07/06/2018	10/09/2018		
20QR	07/06/2018	10/09/2018		

*Fuente: Elaboración propia.*

El detalle fotográfico de la realización del ensayo se encuentra en el Anexo A.9, junto con el detalle de las probetas antes y después del quemado a diferentes temperaturas.

Así de esta manera poder observar los cambios físicos como de color y degradación superficial que se generen en las muestras de hormigón.

#### 3.2.4. Resistencias del hormigón expuesto al fuego

Una vez realizado los ensayos de quemado, se determina la resistencia a compresión de todas las probetas. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Día de rotura de todas las probetas 11/09/2018

*Tabla N° 15: Resistencia del hormigón a 100° C.*

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia
	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
1Q	176,63	345,2	35210,4	12,820	199,35
5Q	176,63	380,5	38811,0	12,805	219,74
9Q	176,63	346,9	35383,8	12,690	200,33
13Q	176,63	338,8	34557,6	12,745	195,66
17Q	176,63	364,5	37179,0	12,800	210,50
Promedio				12,772	205,11

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla N° 16: Resistencia del hormigón a 200° C.*

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia
	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
2Q	176,63	298,1	30406,2	12,705	172,15
6Q	176,63	299,4	30538,8	12,560	172,90
10Q	176,63	303,7	30977,4	12,675	175,39
14Q	176,63	326,0	33252,0	12,665	188,26
18Q	176,63	360,6	36781,2	12,770	208,24
Promedio				12,675	183,39

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla N° 17: Resistencia del hormigón a 300° C.*

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia
	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
4Q	176,63	340,3	34710,6	12,340	196,52
7Q	176,63	266,3	27162,6	12,480	153,79
8Q	176,63	303,1	30916,2	12,705	175,04
15Q	176,63	347,1	35404,2	12,635	200,45
19Q	176,63	317,8	32415,6	12,601	183,53
Promedio				12,552	181,86

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla N° 18: Resistencia del hormigón a 400° C.*

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia
	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
3Q	176,63	300,2	30620,4	12,740	173,36
11Q	176,63	320,7	32711,4	12,800	185,20
12Q	176,63	298,4	30436,8	12,725	172,32
16Q	176,63	263,7	26897,4	12,800	152,29
20Q	176,63	332,9	33955,8	12,510	192,25
Promedio				12,715	175,08

*Fuente: Elaboración propia.*

El detalle fotográfico del conjunto de probetas quemadas y posteriormente fracturadas por el ensayo a compresión, se muestran en el Anexo A.10.

### 3.2.5. *Hormigonado del encamisado*

Para la realización del ensayo se realizaron moldes con las dimensiones requeridas de 20cm de diámetro y 30cm de alto. Solamente se pudo contar con 3 moldes por el elevado costo de los mismos, de esta manera fue realizado el hormigonado en 7 días para tener a las 20 probetas encamisadas.

Los datos que se registraron en cada día de vaciado se indican en la tabla N° 19.

*Tabla N° 19: Información sobre el vaciado del encamisado.*

<b>N° de Probetas</b>	<b>Día del vaciado del recubrimiento</b>	<b>Asentamiento en el cono de Abrams (cm)</b>	<b>Día de la rotura de probetas</b>
1QR 5QR 9QR	12/09/2018	4,5	19/09/2018
13QR 17QR 2QR	13/09/2018	7,5	20/09/2018
6QR 10QR 14QR	14/09/2018	10,0	21/09/2018
18QR 3QR 7QR	17/09/2018	6,5	24/09/2018
11QR 15QR 19QR	18/09/2018	4,5	25/09/2018
4QR 8QR 12QR	19/09/2018	6,5	26/09/2018
16QR 20QR	26/09/2018	8,5	03/10/2018

*Fuente: Elaboración propia.*

La realización del encamisado se puede observar en el Anexo A.11.

### 3.2.6. Resistencias del hormigón con encamisado

Antes de poder determinar las resistencias, se deben tomar en cuenta el factor de esbeltez.

Debido a que el diámetro de la sección transversal de las probetas se incrementa, es necesario realizar una corrección por esbeltez a la lectura de los esfuerzos. La resistencia a compresión obtenida del ensayo de una probeta es inversamente proporcional al valor de su esbeltez. Probetas con menores esbelteces fallan a mayores cargas por varias razones. Una es el llamado efecto zunchado, que toma en cuenta el confinamiento que las platinas metálicas de la prensa de ensayos confieren a los extremos de la probeta, fenómeno que es más notable a menores esbelteces.<sup>13</sup>

En la tabla N° 20 se indican los valores de corrección que establecen la NB 639:1994 “Rotura por Compresión” y la ASTM C42 “Método de prueba estándar para Obtención y ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de Hormigón”.

*Tabla N° 20: Coeficientes de corrección por esbeltez.*

<b>h/D</b>	<b>NB 639</b>	<b>ASTM C42</b>
<b>2,00</b>	1,00	1,00
<b>1,75</b>	0,98	0,98
<b>1,50</b>	0,96	0,96
<b>1,25</b>	0,94	0,93
<b>1,10</b>	0,90	-
<b>1,00</b>	-	0,87

*Fuente: NB 639, ASTM C42.*

Dadas las dimensiones de 20cm de diámetro por 30 cm de alto, se determina:

$$h/D = \frac{30}{20}$$

---

<sup>13</sup>A. Fernández, J. Howland, (2016). Relación entre la resistencia a compresión de testigos y probetas de hormigón, (página 3)

$$h/D = 1,50$$

Convenientemente en ambas normativas el coeficiente de corrección se mantiene con 0,96; por lo que la corrección se presenta de la siguiente manera:

$$f'_{ci} = \frac{f_{ci}}{0,96}$$

El área de la sección transversal, para un diámetro de 20 cm, es:

$$A_T = \frac{\pi * 20^2}{4}$$

$$A_T = 314 \text{ cm}^2$$

*Tabla N° 21: Resistencia del hormigón con encamisado a 100° C.*

Probeta N°	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Pesos (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia Corregida (kg/cm <sup>2</sup> )	Fecha de rotura
1QR	314	389,2	39698,4	21,755	126,43	131,70	19/09
5QR	314	448,6	45757,2	21,965	145,72	151,80	19/09
9QR	314	353,5	36057,0	21,830	114,83	119,62	19/09
13QR	314	431,3	43992,6	21,790	140,10	145,94	20/09
17QR	314	479,9	48949,8	21,680	155,89	162,39	20/09
Promedio				21,804	147,24	153,37	

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla N° 22: Resistencia del hormigón con encamisado a 200° C.*

Probeta N°	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Pesos (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia Corregida (Kg/cm <sup>2</sup> )	Fecha de rotura
2QR	314	423,9	43237,8	21,870	137,70	143,44	20/09
6QR	314	438,6	44737,2	21,625	142,48	148,41	21/09
10QR	314	289,6	29539,2	21,635	94,07	97,99	21/09
14QR	314	345,7	35261,4	21,755	112,30	116,98	21/09
18QR	314	413,8	42207,6	21,645	134,42	140,02	24/09
Promedio				21,706	138,20	143,96	

*Fuente: Elaboración propia.*

Tabla N° 23: Resistencia del hormigón con encamisado a 300° C.

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia	Resistencia Corregida	Fecha de rotura
	(cm2)	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm2)	(Kg/cm2)	
3QR	314	421,2	42962,4	21,520	136,82	142,52	24/09
7QR	314	376,6	38413,2	21,590	122,34	127,43	24/09
11QR	314	393,0	40086,0	21,880	127,66	132,98	25/09
15QR	314	446,0	45492,0	21,815	144,88	150,92	25/09
19QR	314	299,8	30579,6	21,700	97,39	101,45	25/09
Promedio				21,701	132,92	138,46	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 24: Resistencia del hormigón con encamisado a 400° C.

Probeta N°	Sección	Lectura	Carga	Pesos	Resistencia	Resistencia Corregida	Fecha de rotura
	(cm2)	(KN)	(kg)	(kg)	(Kg/cm2)	(Kg/cm2)	
4QR	314	442,5	45135,0	21,650	143,74	149,73	26/09
8QR	314	395,1	40300,2	21,785	128,34	133,69	26/09
12QR	314	374,3	38178,6	21,890	121,59	126,65	26/09
16QR	314	226,3	23082,6	21,760	73,51	76,57	03/10
20QR	314	324,5	33099,0	21,965	105,41	109,80	03/10
Promedio				21,810	124,77	129,97	

Fuente: Elaboración propia.

Los datos que están de color amarillo, fueron excluidos por ser valores muy alejados del conjunto.

El detalle de la rotura de todas las probetas con encamisado, se indican en el Anexo A.12.

### 3.3. Análisis estadísticos

Una vez obtenido el conjunto de datos de cada ensayo, se determinan las resistencias características de cada tipo de hormigón. Utilizando las ecuaciones de la distribución Gaussiana:

- Hormigón patrón normal

Esfuerzo promedio:

$$f_{cm} = 209,94 \text{ kg/cm}^2$$

Determinación del desvío:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2}$$

$f_{ci}$	$f_{ci} - f_{cm}$	$\left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)$	$\left( \frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2$
196,46	-13,475	-0,0642	0,00412
217,31	7,375	0,0351	0,00123
211,83	1,895	0,0090	0,00008
214,14	4,205	0,0200	0,00040
Suma			0,005837

*Fuente: Elaboración propia.*

$$\delta = \sqrt{\frac{0,005837}{4}}$$

$$\delta = 0,03820 \geq 0,10$$

Entonces el Esfuerzo Característico es:

$$f_{ck} = f_{cm} (1 - 1,64 * \delta)$$

$$f_{ck} = 209,94 * (1 - 1,64 * 0,10)$$

$$f_{ck} = 175,51 \text{ kg/cm}^2$$



En la tabla N° 25 se encuentran los resultados y resúmenes de los diferentes ensayos realizados en las probetas de hormigón.

*Tabla N° 25: Resultados de las resistencias obtenidas.*

<b>Tipo de Hormigón</b>	<b>Temperatura (° C)</b>	<b>Resistencia promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia Característica (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<i>Patrón normal</i>	-	209,94	175,51
<i>Patrón de recubrimiento (a 7 días)</i>	-	173,27	144,85
<i>Quemado solamente</i>	100	205,11	171,47
	200	183,39	153,31
	300	181,86	152,03
	400	175,08	146,37
<i>Quemado y con recubrimiento</i>	100	153,37	128,22
	200	143,96	120,35
	300	138,46	115,75
	400	129,97	106,46

*Fuente: Elaboración propia.*

El cálculo detallado de los demás valores se encuentra en el anexo A.13.

### 3.4. Calibración de la ecuación de Resistencia vs Temperatura de exposición

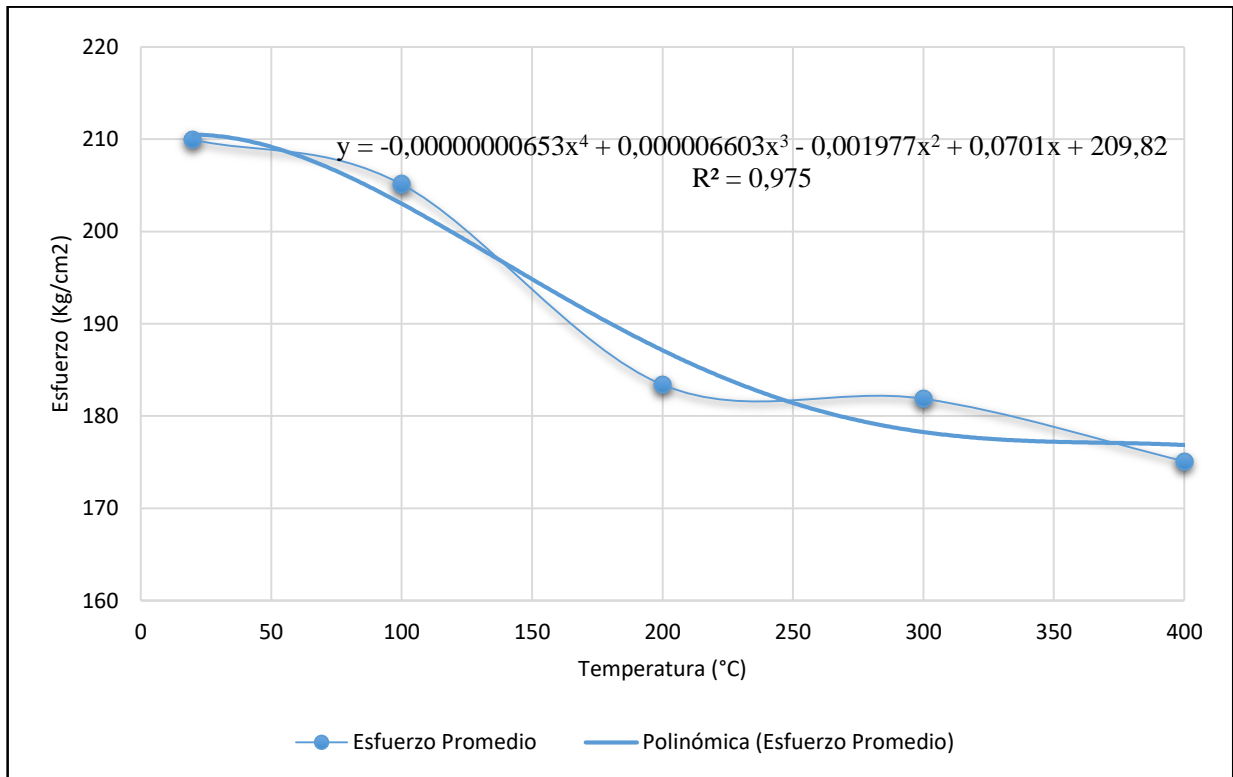
Determinados los esfuerzos resultantes de los ensayos a compresión, se establece una gráfica con una línea de tendencia y de este modo realizar un análisis del comportamiento del hormigón frente a diferentes temperaturas.

Entonces se puede definir con los datos:

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Esfuerzo Promedio (kg/cm2)</i>
20	209,94
100	205,11
200	183,39
300	181,86
400	175,08

*Fuente: Elaboración propia.*

*Gráfica N° 3: Curva de Esfuerzos vs Temperatura.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La ecuación que más se ajusta es una polinómica de 4° grado, con una regresión de:

$$R^2 = 0,975$$

$$R = 0,9874$$

La ecuación es:

$$f_{cm} = -6,53 * 10^{-9}T^4 + 6,603 * 10^{-6}T^3 - 1,977 * 10^{-3} T^2 + 0,0701 T + 209,82$$

Los valores con los que se establece esta ecuación son con los esfuerzos promedios de cada punto de temperatura.

### 3.5. Punto de eficiencia del encamisado

Para determinar en qué punto el encamisado consigue mantener la misma carga, que la sección original resistía desde un comienzo, se deben comparar los porcentajes de carga que se incrementan antes del momento en que se produzca el fallo.

La determinación de los porcentajes de carga, se obtienen en este caso, a partir de los esfuerzos promedios en cada punto.

Se considera como el 100% máximo el esfuerzo promedio inicial del hormigón normal.

Se tiene en términos de carga:

<b><i>Temperatura (°C)</i></b>	<b><i>Carga sin refuerzo promedio (KN)</i></b>	<b><i>Carga con refuerzo promedio (KN)</i></b>
20	363,53	-
100	355,18	472,15
200	317,56	422,40
300	314,92	426,25
400	303,18	400,10

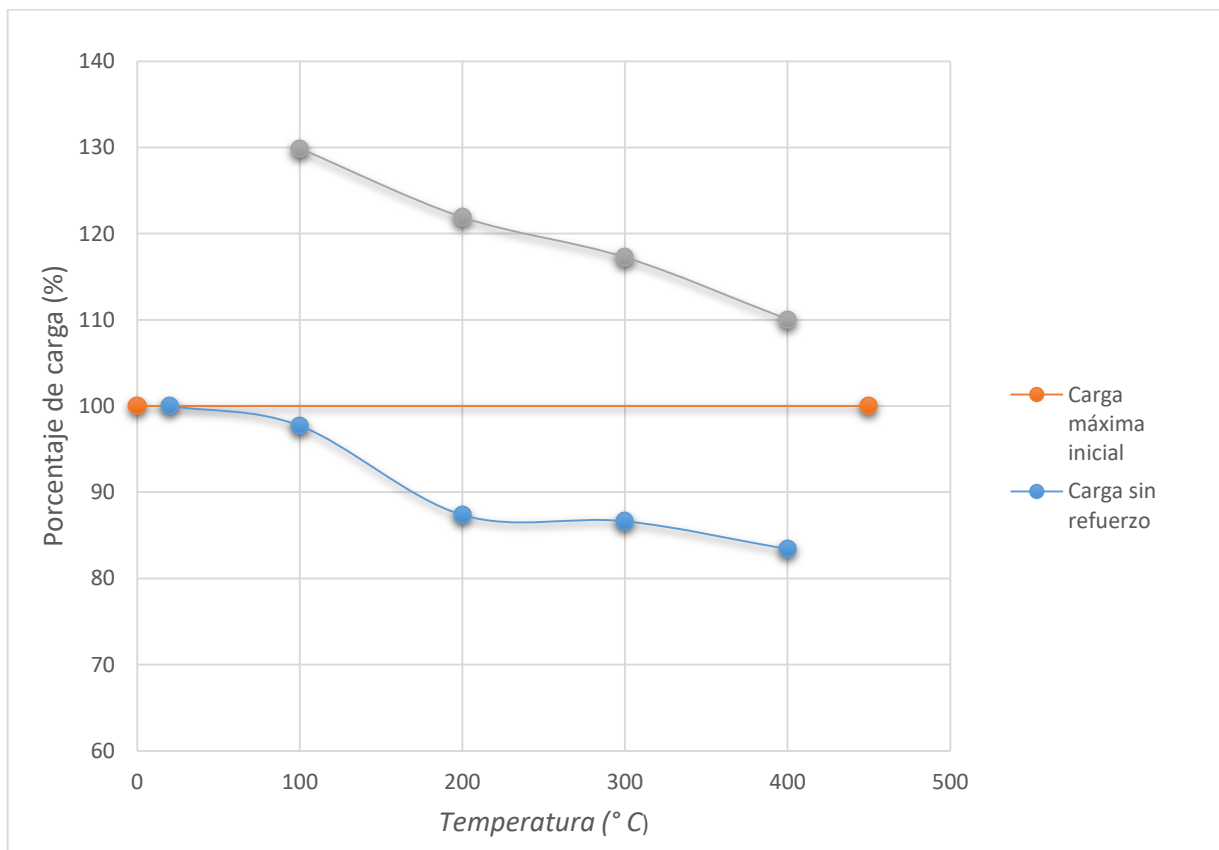
*Fuente: Elaboración propia.*

En términos de porcentaje:

Temperatura (°C)	Carga sin refuerzo (%)	Carga con refuerzo (%)	Incremento de carga al hormigón dañado (%)
20	100	-	-
100	97,70	129,88	32,2
200	87,35	121,90	34,6
300	86,63	117,25	30,6
400	83,40	110,06	26,7

*Fuente: Elaboración propia.*

*Gráfica N° 4: Eficiencia del encamisado.*



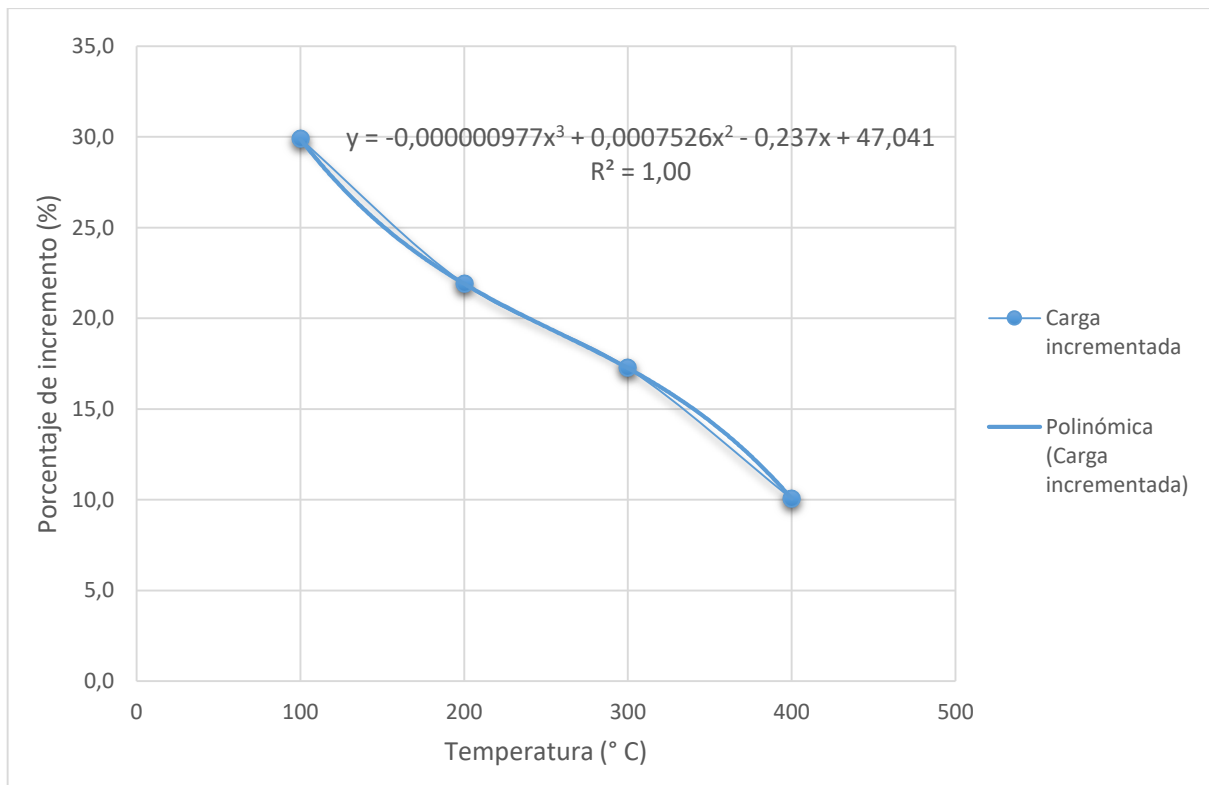
*Fuente: Elaboración propia.*

Estableciendo una línea de tendencia para determinar en el punto en el que el hormigón reforzado con el encamisado ya no resiste la carga inicial del hormigón sano, se tiene:

Temperatura (°C)	Carga sin refuerzo (%)	Carga con refuerzo (%)	Incremento de carga al hormigón no expuesto al fuego (%)
20	100	-	-
100	97,70	129,88	29,88
200	87,35	121,90	21,90
300	86,63	117,25	17,25
400	83,40	110,06	10,06

*Fuente: Elaboración propia.*

*Gráfica N° 5: Carga incrementada a la carga máxima inicial.*



*Fuente: Elaboración propia.*

La ecuación que más se ajusta es una polinómica de 3° grado, con una regresión de:

$$R^2 = 1,00$$

$$R = 1$$

La ecuación es:

$$\%_{incremento} = -9,77 * 10^{-7}T^3 + 7,526 * 10^{-4} T^2 - 0,237 T + 47,041$$

Si el incremento de carga es nulo, entonces despejando de la ecuación se tiene:

$$0 = -9,77 * 10^{-7}T^3 + 7,526 * 10^{-4} T^2 - 0,237 T + 47,041$$

$$\mathbf{T = 472,34^{\circ} C}$$

El hormigón que es expuesto a una temperatura de 472,34° C aproximadamente y se le realiza el encamisado, la carga que debe resistir sería la misma que la que tendría la sección inicial antes de la exposición al fuego.

### 3.6. Análisis y validación de resultados

Realizando una comparación de los resultados obtenidos, de la resistencia del hormigón expuesto al fuego a diferentes temperaturas, con la información que se tiene al respecto de distintas bibliografías, se compara mediante un gráfico.

➤ Información propia de ensayos

<i>Temperatura (° C)</i>	<i>Resistencia media (kg/cm2)</i>	<i>Resistencia media (%)</i>
20	209,94	100,00
100	205,11	97,70
200	183,39	87,35
300	181,86	86,62
400	175,08	83,40

*Fuente: Elaboración propia.*

- Según Jimenez Montoya (Tabla N°1)

<i>Temperatura</i> (° C)	<i>Resistencia</i> <i>media</i> (%)
20	100
400	80
950	0

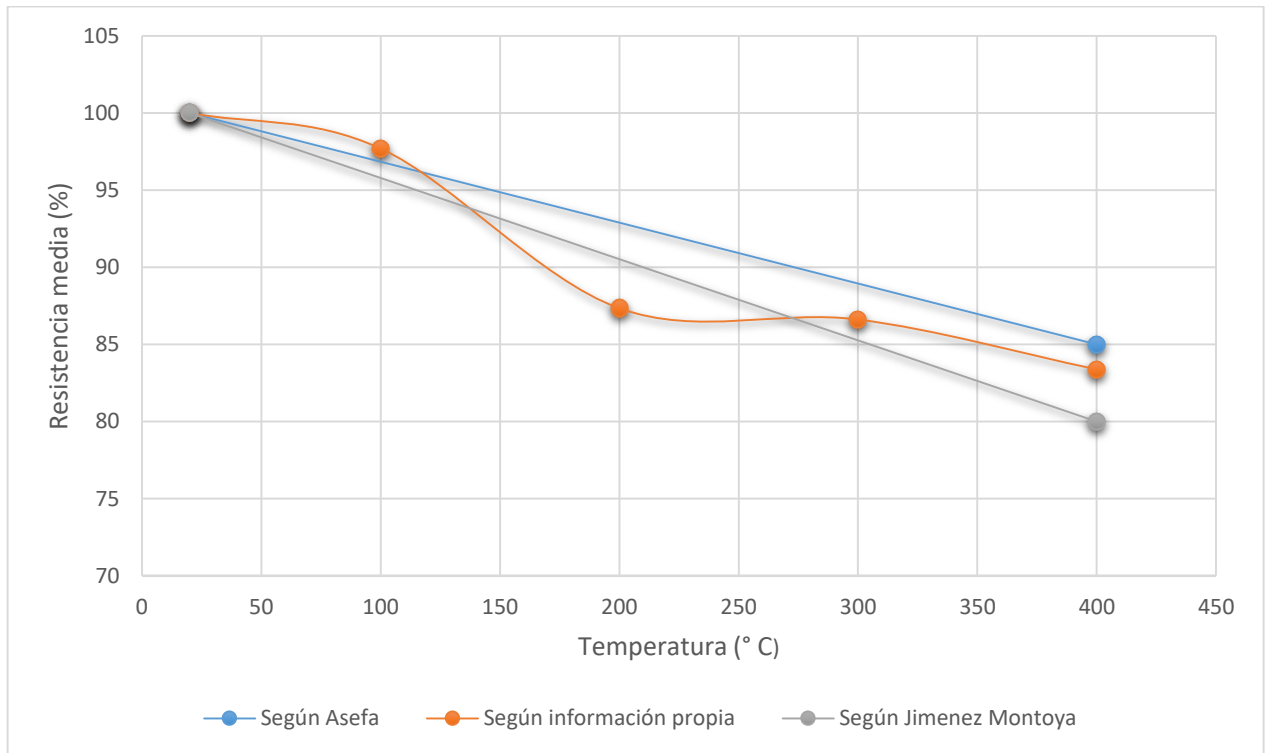
*Fuente: Jimenez Montoya et al. Hormigón Armado.*

- Según ASEFA Seguros (Tabla N° 3)

<i>Temperatura</i> (° C)	<i>Resistencia</i> <i>media</i> (%)
20	100
400	85
800	0

*Fuente: ASEFA seguros, (2011). Efectos de incendios en Estructuras de hormigón armado.*

Gráfica N° 6: Comparación de Pérdida de Esfuerzo.



*Fuente: Elaboración propia.*

Se puede observar que la información obtenida por los ensayos no tiene mucha diferencia con la de las demás bibliografías.

*Con respecto al refuerzo por encamisados:*

Partiendo de la información inicial, con respecto al incremento de área de la sección transversal, se tiene:

✚ Probeta normal (D = 15cm)

$$A = 176,71 \text{ cm}^2$$

✚ Probeta con encamisado (D = 20cm)

$$A = 314,16 \text{ cm}^2$$



✚ Área del anillo de recubrimiento ( $e = 2,5\text{cm}$ )

$$A = 137,45 \text{ cm}^2$$

✚ En porcentajes se determina:

Del 100% del área de la probeta normal; 77,78% de área se incrementa con el encamisado.

Del 100% del área de la probeta encamisada, 43,75% del área es de refuerzo y 56,25% es de la probeta original.

Con respecto a la resistencia media del hormigón de encamisado a los 7 días, se conoce que es:

$$f_{cm} = 173,27 \text{ kg/cm}^2$$

Dada una determinada área, se conoce la magnitud de la carga que debe sostener antes del fallo, por el área de encamisado se tiene una carga de incremento teórica:

$$Carga_{incremento} = 173,27 * 137,45$$

$$Carga_{incremento} = 23815,96 \text{ kg}$$

$$Carga_{incremento} = 233,49 \text{ KN}$$

La carga máxima del hormigón de una probeta normal, sin exposición al fuego es:

$$Carga_{inicial} = 363,53 \text{ KN}$$

Entonces el porcentaje de incremento de carga TEORICO al hormigón dañado es:

$$\% \text{ incremento} = \frac{233,49}{363,53} * 100$$

$$\% \text{ incremento} = 64,2 \%$$

Esto nos indica que teóricamente el encamisado de 2,5cm de espesor incrementa en un 64,2 % de la carga inicial, a la sección existente; se encuentre dañada o no.

Comparando con los valores reales de los ensayos realizados a las probetas dañadas con encamisado, tenemos que:

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Incremento de carga al hormigón dañado (%)</b>
100	32,2
200	34,6
300	30,6
400	26,7
<i>Promedio</i>	31 %

*Fuente: Elaboración propia.*

El incremento promedio REAL de carga es del 31% al hormigón dañado.

#### DETERMINACIÓN DE UN FACTOR DE SEGURIDAD

Para la aplicación de un sistema de refuerzo por encamisado en obra, más allá de todo el análisis de cargas que se debe realizar, se deberá ajustar la carga teórica que se pretende incrementar a un valor de carga real que ofrece el encamisado, tal factor de seguridad se obtiene:

$$FS = \frac{\% \text{ incremento teórico}}{\% \text{ incremento real}}$$

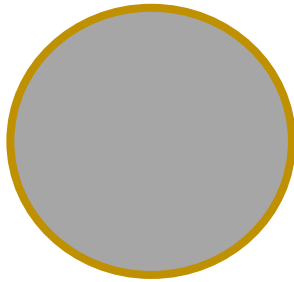
$$FS = \frac{64,2}{31}$$

$$FS = 2,07$$

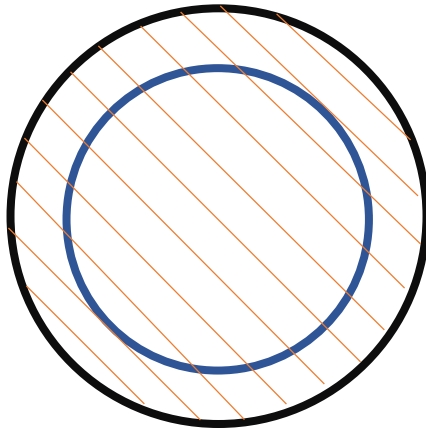
### *Comparación de resistencias reales y teóricas*

Para poder comparar estos valores, se determinarán secciones homogéneas de cada uno de los hormigones reforzados, ya que los hormigones tienen diferentes resistencias. Como se observa en las siguientes imágenes:

- En el caso de los 100° C

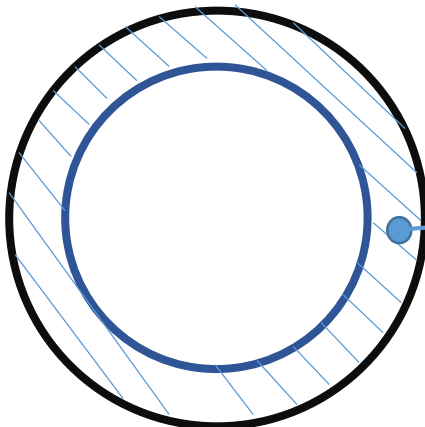


*La resistencia de 205,11 kg/cm<sup>2</sup> se determinó con la sección inicial.*



*La resistencia de 153,37 kg/cm<sup>2</sup> se determinó con la sección reforzada.*

El hormigón de recubrimiento posee otra resistencia:



*La resistencia de 173,27 kg/cm<sup>2</sup> se determinó de la dosificación de recubrimiento.*

Para homogeneizar la sección se debe determinar el factor de conversión “n” que depende de los módulos de elasticidad de los hormigones. Dichos módulos se determinan de acuerdo a normativa boliviana CBH – 87 con la siguiente expresión:

$$E = 21000 * \sqrt{f_c} \quad (\text{en } kg/cm^2)$$

Una vez determinados los módulos de elasticidad, se determina el factor de homogenización:

$$n = \frac{E_{\text{Hormigón Dañado}}}{E_{\text{Hormigón de refuerzo}}}$$

Para el hormigón de 100° C tenemos:

$$n = \frac{21000 * \sqrt{205,11}}{21000 * \sqrt{173,27}}$$

$$\mathbf{n = 1,0880}$$

Con este factor se pasa a transformar el área del anillo real al anillo teórico:

Área del anillo real = 137,45 cm<sup>2</sup>.

$$A_{at} = \frac{A_{ar}}{n}$$

$$A_{at} = \frac{137,45}{1,0880}$$

$$\mathbf{A_{at} = 136,33 \text{ cm}^2}$$

El valor del área del anillo se le añade al de la probeta inicial y así obtener un área total:

Área de la probeta inicial = 176,71 cm<sup>2</sup>.

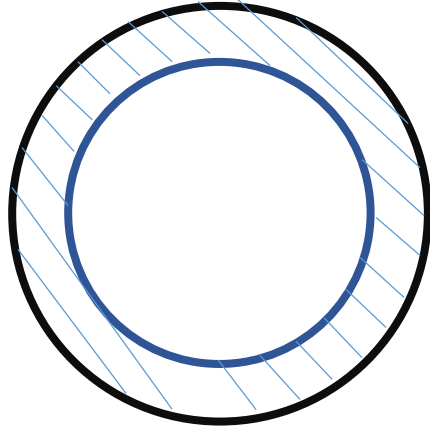
$$A_T = 176,71 + 136,33$$

$$\mathbf{A_T = 303,04 \text{ cm}^2}$$

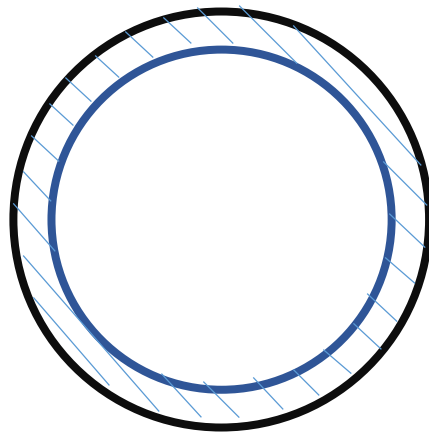
De esta manera determinar el diámetro de la sección transformada:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A_T}{\pi}}$$

$$D = 19,64 \text{ cm}$$



*El diámetro de la sección inicial es de 20 cm.*



*El diámetro de la sección transformada es de 19,64 cm.*

En la siguiente tabla se presentan los resultados:

Temperatura	Resistencia media	Módulo de elasticidad	Factor de trans.	Área trans.	Área total	Diámetro
	(kg/cm <sup>2</sup> )	E	n	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm)
<b>100</b>	205,11	300754,90	1,0880	126,33	303,04	19,64
<b>200</b>	183,39	284385,28	1,0288	133,60	310,31	19,88
<b>300</b>	181,86	283196,50	1,0245	134,16	310,87	19,90
<b>400</b>	175,08	277867,37	1,0052	136,74	313,45	19,98
<b>Refuerzo</b>	173,27	276427,33				

*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez determinado el diámetro de la sección, se debe realizar la corrección a la resistencia por esbeltez, de acuerdo a la tabla N° 20.

Entonces el valor de esbeltez para la sección de 100° C, será:

$$h/D = \frac{30}{19,64}$$

$$h/D = 1,5273$$

El valor de corrección se determina por interpolación de los valores de la tabla:

$$\text{Corrección por esbeltez} = 0,962184$$

Realizando la corrección se tiene:

$$f_c = \frac{205,11}{0,962184}$$

$$f_c = 213,17 \text{ kg/cm}^2$$

En resumen, de todas las secciones:

Temperatura (° C)	Resistencia media (kg/cm <sup>2</sup> )	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Esbeltez	Coefficiente de corrección	Resistencia Corregida Teórica (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>100</b>	205,11	30	19,64	1,5273	0,962184	213,17
<b>200</b>	183,39	30	19,88	1,5093	0,960744	190,88
<b>300</b>	181,86	30	19,90	1,5079	0,960632	189,31
<b>400</b>	175,08	30	19,98	1,5017	0,960136	182,35

*Fuente: Elaboración propia.*

Comparando con los valores de los ensayos realizado en laboratorio se tiene:

Temperatura (° C)	Resistencia real ensayo (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia Real Teórica (kg/cm <sup>2</sup> )	Incremento en resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>100</b>	153,37	213,17	59,80
<b>200</b>	143,96	190,88	46,92
<b>300</b>	138,46	189,31	50,85
<b>400</b>	129,97	182,35	52,38
<b>Promedio</b>			<b>52,49</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

La resistencia del hormigón con el encamisado se tuvo que alcanzar un 52,49 kg/cm<sup>2</sup> más de lo que se registró en laboratorio.

4. CAPÍTULO IV  
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



## 4.1. Conclusiones

- ✚ La dosificación inicial y la ajustada tienen un valor bajo de resistencia media debido al contenido elevado de material limoso-arcilloso en el agregado grueso. Ya que una vez revisado el hormigón en el lugar del fallo, se observó que el agregado grueso no sufrió fallas, sino que las mismas se originaron por los extremos, afectando al mortero de arena – cemento (Anexo A.12).
- ✚ El efecto spalling no se ve presente en las muestras de hormigón, se intuye que se deba a que en una estructura el hormigón tiene las cargas aplicadas en el momento, y al estar en contacto con el incendio, este provoca el debilitamiento y por ende el spalling en la superficie del hormigón.  
Se puede asumir también que la temperatura de exposición fue relativamente más baja en comparación a la de un incendio real.  
Lo que sí se originó en la superficie de las muestras de hormigón, al momento de enfriar mediante el choque térmico de sumergido en el agua, fue el efecto piel de cocodrilo, como se observa en el reporte fotográfico (Anexo A.9).
- ✚ Los resultados de las resistencias del hormigón expuesto a diferentes temperaturas, se obtuvieron muy similares a los datos de otras bibliografías, de esta manera sustentando de mejor forma tanto la teoría como la práctica.
- ✚ Cuando se requiera llevar a cabo la rehabilitación de una columna dañada por el fuego de un incendio, se tiene que ajustar los valores que se pretenden incrementar a un valor real que ofrece la metodología, siendo este factor de seguridad de 2,07 en caso de presentarse las mismas condiciones que se describieron en los ensayos.
- ✚ La magnitud del tiempo es muy considerada, ya que se deben presentar las condiciones ideales para que el cuerpo de bomberos llegue y se instale a realizar el apagado. Por lo que generalmente se presentan situaciones en la que este valor es sobrepasado, alcanzándose tiempos muy elevados y generando que los daños en la estructura sean mayores.

- ✚ La hipótesis, propuesta en un principio, se establece como verificada ya que el punto de eficiencia mínima no se encuentra a los 400° C, sino a los 472,34° C aproximadamente, para un encamisado de 2,5cm de espesor, de esta manera sobrepasando el límite que se tenía previsto.
- ✚ Si bien el valor de resistencia de cálculo para la dosificación del hormigón de recubrimiento, es de 200 kg/cm<sup>2</sup>, el valor de resistencia real que se obtendría a los 28 días es de 231,02 kg/cm<sup>2</sup>; superando la resistencia inicial de 209,93 kg/cm<sup>2</sup> que tiene el hormigón sin tener ningún daño ocasionado por el fuego.  
De esta manera se cumple la condición de que el hormigón de refuerzo debe tener una resistencia superior a la que se tiene en obra.
- ✚ El encamisado de 2,5cm de espesor, incrementa en un 31% de carga en promedio de forma real, de los 64% de incremento que teóricamente debería ofrecer, es decir la mitad aproximadamente, esto se le puede atribuir a que la unión del hormigón viejo con el hormigón nuevo no se llevó a cabo de la mejor manera, ya sea por el delgado espesor del aplicado de la pintura epóxica, o por realizar el hormigonado sobre una superficie lisa en vez de una superficie picada, y así obtener mayor adherencia (Anexo A.3).
- ✚ Se debe destacar que las resistencias obtenidas después del refuerzo fueron muy bajas con 52,49 kg/cm<sup>2</sup> en promedio por debajo de lo registrado, por lo que se pudo observar solamente el anillo de refuerzo fue la principal zona en la que se produjo el fallo al momento de realizar el ensayo a rotura, por lo que las resistencias obtenidas fueron principalmente adquiridas por el anillo mismo.
- ✚ El aumentar en un 77,78% de área con respecto al área de hormigón de 209,94 kg/cm<sup>2</sup> existente, con un hormigón de 173,27 kg/cm<sup>2</sup>, incrementa en un 31% de carga al elemento en estudio.

- ✚ Sin importar la cantidad de carga de materiales combustibles que posea un ambiente, siempre las mayores temperaturas se alcanzaran en el día, con la máxima temperatura en los horarios pico del día.

## 4.2. Recomendaciones

- ❖ La información debe ser organizada recolectada debe ser organizada y separada por la relevancia que tenga en el tema de estudio, de esta manera obtener referencias de la misma al momento utilizar.
- ❖ Para garantizar que los cálculos sean sostenibles, se deben realizar los ensayos de la mejor manera posible, utilizando correctamente las guías y normativas en las que se indican a detalle.
- ❖ Cuando se realice el hormigonado de recubrimiento debe existir una superficie rugosa en el hormigón viejo, para que la adherencia que ofrece la pintura epóxica sea mucho mayor. Garantizando así que ambos hormigones trabajen en conjunto y por consecuente obtener mayores resistencias de la pieza.
- ❖ El ensayo a compresión es uno de los más delicado, puesto a que la prensa hidráulica aplica la carga de manera constante hasta que se produzca la más mínima falla y en este punto genera la lectura, por esta razón es necesario tener las superficies de contacto lo más uniformes posibles, para que la presa aplique la carga sobre toda la sección y no a un borde que pueda generar mala lectura.

La sección transversal de la probeta tiene que ser lo más uniforme posible, por lo que se utilizó una amoladora para uniformizar zonas con relieve, sobre todo en la unión del hormigón viejo con el nuevo, pero no en todas las muestras se consiguió un resultado satisfactorio.

- ❖ Al llevar a cabo la rehabilitación de una columna vieja de cualquier estructura, al determinar la temperatura del incendio que se originó en el mismo, más allá del análisis patológico y las características encontradas en el hormigón y comparadas

con las probetas del presente estudio realizadas en laboratorio, se puede concluir a que temperatura ha sido sometida.

Con este valor se estima un valor de resistencia de acuerdo a las gráficas obtenidas y mediante la medición de resistencias con instrumentos, como el esclerómetro, se puede confirmar el valor de resistencia real para el cálculo.

- ❖ Al momento de realizar el refuerzo con un hormigonado adicional nuevo sobre el hormigón viejo, se debe verificar que la superficie en contacto sea firme y no exista desprendimientos en la misma, ya que la principal patología que se presenta después de un incendio es el efecto spalling. Y para que exista un correcto uso de la pintura epóxica se debe cumplir con este requisito, tal como lo indica las recomendaciones del Sika.
- ❖ Debido a que el tiempo de quemado fue considerablemente bajo, y comparado a los tiempos en los que el cuerpo de bomberos trabaja realmente, se debe realizar un estudio que observe los daños que genera un determinado incendio con temperaturas elevadas a diferentes tiempos de exposición.
- ❖ El objeto de una rehabilitación es siempre reforzar una pieza dañada, pero si se reforzara o protegiera antes de que exista el daño, sobre todo a las armaduras estructurales que sufren daños mucho más severos y es necesario protegerlas, se obtendrían resultados diferentes y por consiguiente mucho mejores. Tales valores podrían determinarse en otros estudios comparando resistencias obtenidas antes y después del refuerzo, expuestas a un tipo de incendio.  
Esto se aplica cuando la estructura corre un alto riesgo a ser expuesta a un incendio.