

AFECTACIÓN DE LOS CHOQUES TÉRMICOS EN LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO

AFFECTION OF THERMAL SHOCK IN THE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

SAAVEDRA ARCE V. M. A., QUISBERT RIVERO W. E

RESUMEN

Las estructuras son sometidas a diversas condiciones ambientales, como la salinidad del ambiente, la radiación de escenarios de incendios, de temperaturas bajas llegando hasta el nivel de congelamiento y exposición a grandes gradientes térmicos producidos por el derrame de material criogénico en un ambiente de temperaturas elevadas. La necesidad de determinar el impacto que los elementos de hormigón sufran en caso de que sean sometidos a altos gradientes térmicos producidos por el ambiente geográfico donde se encuentre, la función a la que se somete y el efecto de un evento extraordinario como ser el derrame de material a temperaturas criogénicas. Utilizando estándares de comprobación estadística de resistencia de probetas de hormigón, según la normativa aplicable para el hormigón estructural, instalaciones con equipos cuyos resultados fueron tabulados y posteriormente comparados de manera tal que pueda identificarse la variación de la resistencia de las probetas que hayan seguido una misma dosificación. Para realizar la rotura de probetas, se idealizaron los siguientes escenarios de rotura: primero incrementar de calor, enfriamiento natural y enfriamiento con nitrógeno líquido. Segundo: sin incremento de calor sometidas a enfriamiento con nitrógeno líquido. Tercero: probetas paramétricas (patrón) sin ser sometidas a condiciones de calentamiento o enfriamiento de las mismas. Se evidenció disminuciones en las resistencias características del hormigón, las probetas sometidas al primer escenario presentaron una disminución del 24 %. Mientras, las probetas del segundo escenario, tuvieron un 12.31 % de disminución. Las probetas sometidas a las gradientes térmicas sufrieron la rotura de las mismas que en la pasta del testigo, sin embargo, para las probetas patrón, el mecanismo de falla fue el agregado de la mezcla, de ello se deduce que la gradiente térmica afecta especialmente a la pasta de cemento-agua-arena y no tanto al agregado grueso de la mezcla realizada. La resistencia característica del hormigón fue afectada por las grandes variaciones de temperatura en su etapa de servicio, por lo tanto, es necesario tomar medidas que mitiguen los efectos de una gradiente térmica muy alta.

ABSTRACT

Different structures are subjected to different environmental conditions, such as the salinity of the environment, the radiation from fire scenarios, low temperature scenarios reaching the freezing level and exposure to large thermal gradients produced by the spillage of cryogenic material in an environment of high temperatures. The need to determine the impact that the concrete elements suffer in the event that they are subjected to high thermal gradients produced by the geographical environment where they are located, the function to which they are subjected and the effect of an extraordinary event such as the spill of material at cryogenic temperatures. Using statistical verification standards for the resistance of concrete specimens according to the applicable regulations for structural concrete, installations with equipment whose results were tabulated and subsequently compared so that the variation in the resistance of the specimens that have followed the same dosage can be identified. To perform the rupture of specimens, the following first rupture scenarios were idealized: Increased heat, natural cooling and cooling with liquid nitrogen. Second: Test tubes without heat increase subjected to cooling with liquid nitrogen. Third: Standard: Parametric specimens without being subjected to their heating or cooling conditions. Decreases in the characteristic strengths of concrete were evidenced. The specimens submitted to the first scenario showed a decrease of 24%. While the test tubes of the second scenario, had a 12.31% decrease. The specimens subjected to the thermal gradients suffered the breakage of the same as in the control paste, however, for the standard specimens, the failure mechanism was the addition of the mixture, it follows that the thermal gradient affects especially the cement-water-sand paste and not so much the coarse aggregate of the mixture made. The characteristic resistance of concrete was affected by large temperature variations in its service stage, therefore it is necessary to take measures to mitigate the effects of a very high thermal gradient

PALABRAS CLAVE

Gradientes Térmicos, Hormigón Estructural, Ruptura de Probetas

KEYWORDS

Thermal Gradients, Structural Concrete, Specimen Rupture

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, Bolivia en el crecimiento de su matriz energética y expansión de sus distintas ramas y sectores.

Una de estas expansiones del Sector hidrocarburífero-energético, es la implementación de sistemas criogénicos con Nitrógeno para la obtención de productos tales como el Gas Natural Licuado, GNL.

La estatal petrolera y los diferentes organismos gubernamentales de los sectores hidrocarburífero y energético, han realizado inversiones e implementación en los sistemas criogénicos para la obtención del mencionado GNL; en este contexto, el año 2014 fue construida la primera Planta de GNL, en el departamento de Santa Cruz; además de que fueron construidas 27 estaciones de regasificación del producto y su posterior distribución en distintas poblaciones del Estado.

Dicha planta y estaciones, cuentan con sus diversos sistemas dentro del proceso y del almacenaje del producto, para lo cual, como se había indicado anteriormente, intervienen métodos de criogenización en base la utilización de Nitrógeno (Generado en una microplanta de Nitrógeno, que forma parte de los sistemas auxiliares de la planta); y por ello, fue necesaria la construcción de recipientes de almacenaje especiales, toda vez que las temperaturas que se manejan en estos fluidos, oscilan entre -160 a -190° Centígrados.

Una de estas obras de almacenaje, es el tanque del almacenamiento de GNL de la planta, para el cual se tomaron métodos preventivos durante los periodos de diseño, ingeniería y ejecución de la misma; siendo uno de ellos, la proyección y construcción de una cimentación especial de hormigón reforzado, compuesta por una losa octagonal con un diámetro concéntrico de 25 metros y un espesor de 1 metro, la cual se encuentra soportada por 40 pilotes de 1 m de espesor y 20 m de profundidad.

El aspecto llamativo de esta cimentación fue la elección del sistema de protección con las que cuenta, toda vez que al soportar a un tanque de amplias dimensiones (25 m de diámetro y aproximadamente 20 m de altura), lo usual o incluso hasta práctico, sería que estuviese apoyada en el terreno. Sin embargo, se tomó como medida preventiva realizar una cimentación elevada, a fin que exista un flujo de aire y eliminar las transferencias de calor del suelo a la cimentación para que esta última no funcione como un puente térmico, ocasionando un salto abrupto en la gradiente térmica interna.

Dicha cimentación, también cuenta con un sistema de contención en caso de derrame del producto y la cual se encuentra revestida de 2 materiales aislantes: poliuretano aislante y poliurea proyectada. Sin embargo, estos métodos y sistemas de protección preventivos a la cimentación y al tanque, generan altos costos en el presupuesto del almacenamiento de productos o cualquier fluido a temperatura criogénica; en comparación a cimentaciones de tanques de dimensiones similares que están apoyados en el terreno.

Por tanto, surgió la interrogante respecto a que pudiese pasar con una cimentación que soporte un recipiente de almacenamiento de fluidos criogénicos (GNL, Nitrógeno u otros), que este apoyada

en el terreno; ¿existiría transferencia de calor del suelo que ha sufrido absorción de radiación solar?, ¿puede generarse un salto abrupto en la gradiente térmica de la cimentación, toda vez que el suelo transfiere calor la cimentación y encima soporta fluidos a temperaturas muy bajas?, ¿qué sucede en el hormigón en casos de contingencias o derrames repentinos de fluidos criogénicos que han absorbido calor del suelo por transferencia de superficies en contacto?, ¿cuál es el comportamiento del hormigón ante un salto repentino en su gradiente térmica interna?, ¿existe pérdida en la resistencia característica del Hormigón ante tal situación?

Dentro de la documentación de referencia, se tomaron las guías y normativas presentadas por el Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute – ACI), para Concreto sometido a clima frío (ACI 306R “Cold weather concreting”), en la cual se hace una descripción de los efectos del clima frío en el hormigón y las protecciones a aplicar en los periodos de elaboración de dichos hormigones, Anticongelantes o revestimientos de protección a hormigones endurecidos (Poliuretano Aislante, Poliurea Proyectada o similares); sin embargo, no se cuenta con una experiencia de hormigón sometido a temperatura criogénica.

Para la elaboración de probetas de hormigón y determinación de la resistencia característica del concreto, se tomó como base el Manual de inspección del Hormigón del ACI. Para la realización del modelo escalar, se tomó como base el diseño de ingeniería de la cimentación del tanque de almacenamiento de la Planta de GNL de Bolivia; específicamente de los planos de la cimentación, memoria de cálculo de la misma y los métodos preventivos de protección a los saltos térmicos que se utilizaron en esta, incluyendo el plano y memoria del cubeto de contención para derrames del producto y los materiales de revestimiento de este.

El cálculo del calor del suelo por absorción de radiación solar, fue realizado sobre la base de los resultados presentados por un estudio técnico, económico, social y ambiental (TESA), efectuado en Bolivia en el año 2016 y preparado por un equipo multidisciplinario de cooperación alemán, para el aprovechamiento de la energía solar con plantas solares fotovoltaicas en Bolivia y el cual analiza la radiación local en las regiones disponibles de Bolivia y en conjunto a los modelos realizados por GeoModel Solar, los cuales cuentan con licencias y patentes reconocidas internacionalmente; presentan mapas de radiación solar y el efecto calorífero causado en el suelo en el territorio del Estado Boliviano, y a través de los cuales se determina la temperatura base que debía alcanzar el suelo para la experimentación.

MÉTODOS Y MATERIALES

Para realizar el cálculo de temperatura del suelo ambiente, se tomó como base los modelos presentados por el Estudio Técnico, Económico, Social y Ambiental (TESA) realizado por el equipo de Cooperación Alemana en el año 2016, para la construcción de Plantas Solares Fotovoltaicas en Bolivia.

Dichos modelos generaron mapas de radiación solar donde se identifica a Bolivia como uno de los países de mayor irradiación solar; y luego distribuye en los distintos departamentos que conforman a este Estado, la potencia de irradiación causada por la exposición del terreno al Sol, y mediante la formulación presentada del mencionado estudio, se puede determinar a partir de esta potencia, el poder calorífero y la temperatura de absorción del suelo a la radiación solar.

Para realizar el cálculo y el dimensionado del modelo semiescalado, se tomó como base la cimentación existente en la Planta de GNL de Bolivia, en el departamento de Santa Cruz; y se buscó una relación escalar que simule el diseño y permita realizar el manipuleo del mismo durante la experimentación.

En paralelo a la determinación de la temperatura a la que fueron sometidas las probetas, se definió la dosificación de la mezcla a ser utilizada de manera tal que se obtenga un hormigón de calidad H-30 tomando en consideración los agregados de un banco de préstamo de la localidad de El Torno.

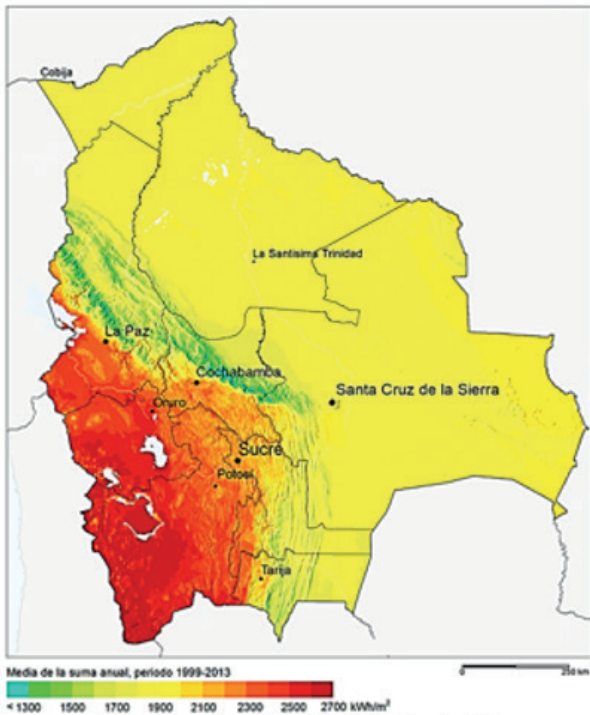


Fig. 1 Irradiación Global Horizontal de Estado Plurinacional de Bolivia (Solargis,2017)

Una vez determinada la dosificación se procedió a la fabricación de 17 probetas las cuales fueron fabricadas en las instalaciones del laboratorio de hormigones de la Unidad Académica Santa Cruz de la Escuela Militar de Ingeniería. Al terminar la elaboración de las probetas se procedió a introducir las dentro de una piscina de curado de manera tal que se evite cualquier falla de las mismas.

Pasados 28 días de la fabricación de las probetas de hormigón, se procedió a la rotura de las probetas patrón. Mientras, se procedía a la rotura de probetas patrón, se realizó el calentamiento de las seleccionadas para ser calentadas a temperatura controlada de 120 °C. Una vez las probetas patrón fueron sometidas a la prueba de compresión simple, se realizó la rotura de las probetas que tuvieron un tratamiento térmico simple, es decir, las que no sufrieron un incremento de temperatura antes de someterlos a contacto criogénico. Para someter a las probetas a temperaturas criogénicas se utilizó un recipiente de poliuretano expandido que contenía el nitrógeno líquido.

Se introducían las probetas en ese ambiente y finalmente se procedió a la rotura de las mismas. Este último procedimiento se realizó tanto para las sometidas a temperaturas elevadas,

como para las sometidas a temperaturas normales antes de su inmersión en nitrógeno líquido.

Se tomaron, tabularon y analizaron estadísticamente los datos para determinar la variación de resistencias en todas las probetas considerando si las mismas corresponden a las sometidas a calor o correspondían a las simplemente sumergidas en nitrógeno. La evaluación de los efectos ocurridos en el modelo después de la experiencia se basa en la observación de patologías del hormigón, normalizados en ACI 224 “Control of Cracking in Concrete Structures” para medición de fisuras en el Hormigón.

RESULTADOS

Se consideraron como datos de partida de la investigación a las siguientes variables:

Temperatura máxima media a la que podría estar sometida la estructura de hormigón en contacto con el terreno que sufrió radiación solar: 100°C.

Resistencia característica del hormigón: 300Kg/cm².
Temperatura de material criogénico: -145°C.

Tabla 1. Incremento de temperatura en suelo

Potencia Adoptada (ver Fig.1.), KWh/m ²	2000
Tiempo de Exposición, Solar Horas	12
Área de Estudio (Cimentación Diam: 25 m) m ² :	490,875
Potencia de Estudio KW	48,892
Energía KWh	586,707
Capacidad calorífica del suelo	7,5
Incremento de Temperatura, °C	78,227
Temperatura natural, °C	30
Temperatura de Estudio, °C	108,227
Temperatura adoptada, °C	100

Una vez determinados los parámetros de la investigación se procedió a la dosificación de una mezcla de hormigón que garantice la resistencia mínima requerida para la presente investigación. Los resultados de la dosificación se resumen en la tabla 1.

Tabla 2. Resumen de dosificación para mezcla de hormigón H-30.

Material	Agua	Cemento	Grava	Arena
peso kg/m ³ [H°] Seco	200.00	433.44	1050.90	366.62
peso kg/m ³ [H°] Húmedo	115.23	433.44	1120.05	390.75
Relación	0.27	1	2.58	0.90
volumen/m ³ [H°]	0.115	0.149	0.482	0.168
Para 50.0 lt	5.8	21.7	56.0	19.5
Para una bolsa de cemento	13.3	50.0	129.2	45.1

Con la dosificación determinada, se procedió a realizar la fabricación de 17 probetas de hormigón para su posterior curado durante 28 días dentro de una piscina de inmersión de manera que no se alteren los resultados de resistencia por factores correspondientes a la fabricación o curado de las mismas.

Una vez concluido el período de curado de las muestras de hormigón, se procedió a la rotura de las probetas patrón. Los resultados de la rotura de las mismas se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Resistencia a compresión probetas Patrón de diámetro 15 cm, altura 30 cm patrón, volumen 0.0024m³ y área 176.71 cm².

PROBETA	Peso kg	Densidad kg/m ³	Carga	Capacidad, Kg/cm ²
1	12.678	2391.43	60980	345.08
2	12.459	2350.12	59850	338.68
3	12.502	2358.23	60980	345.08
4	12.454	2349.17	62820	355.4

Posteriormente a la rotura de las probetas patrón, se procedió a la rotura de las probetas que no sufrieron incrementos de temperatura, pero si fueron sometidas a una inmersión en nitrógeno líquido de -140 °C durante un período de tiempo de alrededor de 2 minutos.

Los resultados de la segunda tanda de rotura de probetas de hormigón se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Resistencia a compresión de probetas, con inmersión en nitrógeno líquido, de diámetro 15 cm, altura 30 cm patrón, volumen 0.0024m³ y área 176.71 cm².

PROBETA	Peso kg	Densidad kg/m ³	Carga	Capacidad, Kg/cm ²
11	12.544	2366.15	58540	331.27
12	12.613	2379.17	51010	288.66
13	12.414	2341.63	56970	322.38
14	12.384	2335.97	48560	274.79
15	12.640	2384.26	53040	300.15
16	12.496	2357.10	57530	325.55
17	12.514	2360.49	49750	281.50

Finalmente se procedió a la medición de las temperaturas de las probetas que estaban siendo sometidas a calor determinándose que las mismas se encontraban con temperaturas de alrededor de los 100 °C, una vez alcanzadas las temperaturas requeridas, se procedió al enfriamiento por inmersión en nitrógeno líquido de 140 °C durante un tiempo de alrededor de 2 minutos.

Los resultados de la tercera tanda de rotura de probetas de hormigón se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Resistencia a compresión de probetas, con calentamiento e inmersión en nitrógeno líquido, de diámetro 15 cm, altura 30 cm patrón, volumen 0.0024m³ y área 176.71 cm².

PROBETA	Peso kg	Densidad kg/m ³	Carga	Capacidad, Kg/cm ²
5	12.454	2349.17	42440	240.16
6	12.348	2329.18	44940	254.31
7	12.334	2326.54	43560	246.50
8	12.483	2354.64	45810	259.23
9	12.446	2347.66	53630	303.48
10	12.375	2334.27	48500	274.45

Además de la rotura de las probetas para cuantificar la disminución de resistencias se realizó la fabricación de un modelo semiescalado para verificar la acción de temperaturas criogénicas en su superficie.

Para la elaboración del mismo se consideró una placa de hormigón de 4 cm de espesor y 15 cm de diámetro sometida a calor a través de terreno calentado hasta los 120 °C y posteriormente sometida a inmersión en nitrógeno líquido a una temperatura de -140 °C.

Posterior a la inmersión del modelo se permitió al mismo estabilizar su temperatura con la temperatura ambiente de manera tal que se pueda identificar cualquier patología que aparezca en el período de prueba.

DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos de la rotura de las probetas se puede determinar que la dosificación corresponde a un hormigón de una resistencia característica de 330 Kg/cm², donde el mecanismo de falla de las probetas corresponde a una falla del agregado grueso de la mezcla como se puede observar en la Figura 2.



Fig. 2. Mecanismo de falla de probetas patrón.

Con los resultados obtenidos de la rotura de las probetas se puede determinar que para la misma dosificación que resulta en un hormigón de 330 Kg/cm², se tiene una disminución promedio del 12 % de la resistencia media de las probetas patrón, en este caso el mecanismo de falla seguía siendo a través del agregado grueso de la mezcla como se puede observar en la Figura 3.



Fig. 3. Mecanismo de falla de probetas de temperatura ambiente + criogénicas.

Con los resultados obtenidos de la rotura de las probetas sometidas al cambio de temperatura desde los 100 °C a los -140 °C para una dosificación que resulta en un hormigón de 330 Kg/cm², se tiene una disminución promedio del 24 %

respecto la resistencia media de las probetas patrón, en este caso el mecanismo de falla cambió y fue la pasta de hormigón y desprendimiento del agregado las causales visibles de la falla de las probetas como se puede observar en la figura 4.



Fig. 4. Mecanismo de falla de probetas de temperatura incrementada + criogénicas.

Del modelo semiescalado se pueden observar fisuras que atraviesan diametralmente el elemento y microfisuración alrededor de las fisuras principales, además de un cambio en la coloración del elemento que pasa a ser de un gris oscuro típico de hormigón a un gris claro, coloración que puede deberse al congelamiento del agua contenida en el testigo.



Fig. 5. Patología del modelo semiescalado.

De las probetas de hormigón se obtuvieron los resultados que permiten identificar claramente una disminución de las resistencias obtenidas en el laboratorio según la Figura 6, característica a la compresión a nivel superficial en las estructuras de hormigón.

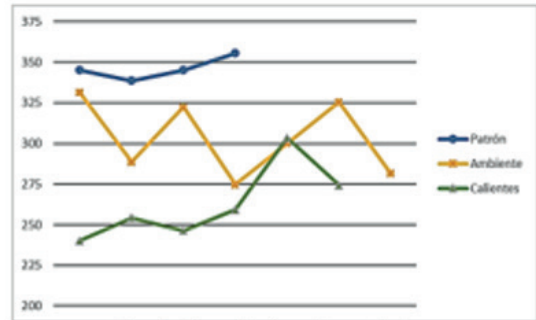


Fig. 6. Resultados de probetas

En los proyectos y/o diseños de elementos de Hormigón el salto brusco en la gradiente térmica en el Hormigón genera patologías de resquebrajamiento, fisuración, microfisuración y pérdida de la resistencia. Se ha comprobado que los saltos bruscos en la gradiente térmica en el hormigón generan una disminución de la resistencia característica del hormigón que llega hasta el 24 % de pérdida de resistencia característica del hormigón a la compresión. Que, ante una mayor gradiente térmica, la pérdida de resistencia se incrementa de manera similar que servirán de cimiento, soporte o elemento de contención para fluidos sometidos a temperatura criogénica, realizar en estas, protecciones y/o aislamientos térmicos que protejan o mitiguen el efecto de un salto térmico que pueda producirse en el hormigón.

REFERENCIAS

ACI Norma ACI 306R "Cold weather concreting"; American Concrete Institute
 ACI Manual de inspección del Hormigón del American Concrete Institute.
 Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos Diseños de Ingeniería, memorias de cálculo y planos "P227538-USICA-PLA04-CC-0001", "P227538USICAPLA04-DR-0500" y "P227538-USICA-PLA04-DR-0520" de la Planta GNL, Bolivia.
 Empresa Nacional De Electricidad, Bolivia. Estudio Técnico, Económico, Social y Ambiental (TESA), Deea Solutions -, 2016.
 Boletines técnicos de la Asociación de productores de cemento de Perú (ASOCEM), 1996
 Collepardi Mario y Coppola Luigi Diseño de concreto "Mix - Design Calcestruzzo", Italia, 1990.
 Dreux George Guía práctica del Ho

CITA

