UCC UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA JESUITAS | Sistema de Bibliotecas

PRODUCCIÓN ACADÉMICA

Venencia, Santiago Rodolfo

Temperatura del hormigón fresco: colocación y compactación con temperaturas mayores a 30°

Tesis para la obtención del título de grado de Ingeniero Civil

Director: Campos, Darío G.

Documento disponible para su consulta y descarga en Biblioteca Digital - Producción Académica, repositorio institucional de la Universidad Católica de Córdoba, gestionado por el Sistema de Bibliotecas de la UCC.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento- No Comercial 4.0 Internacional.

TEMPERATURA DEL HORMIGÓN FRESCO: COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN CON TEMPERATURAS MAYORES A 30°C

Fresh concrete temperature: placement and compaction with temperatures greater than 30°C

Autor: Santiago R. Venencia

Trabajo de Investigación.

UNIVERSIDAD CATÓLICA CÓRDOBA

Junio 2022

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA

Facultad de Ingeniería

DOCUMENTO DE TRABAJO FINAL

TEMPERATURA DEL HORMIGÓN FRESCO:

COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN CON TEMPERATURAS MAYORES A 30°C

FRESH CONCRETE TEMPERATURE: PLACEMENT AND COMPACTION WITH TEMPERATURES GREATER THAN 30°C

Autor: Santiago R. Venencia

Director: Esp. Ing. Darío G. Campos

Junio 2022

“El ambiente que nos rodea supone constantes retos para ser humano, adaptarse para superarlos consiste en una de las misiones fundamentales para la evolución del hombre”

AGRADECIMIENTO

"Este trabajo es la culminación de muchos años de estudio, experiencias, oportunidades y personas que dejaron su huella en mi vida. Muchos de los cuales hoy están conmigo para verme dejar la mía, y muchos otros que, por cuestiones de la vida, no están aquí para verlo.

Mientras avanzo hacia una nueva etapa, no puedo evitar pensar que no estaría aquí si no fuese por todos y cada uno de ellos.

Muchas gracias."

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio experimental desarrollado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Católica de Córdoba y una planta industrializada de hormigón prefabricado, con el objetivo de establecer una relación entre la temperatura de las mezclas de hormigón en su estado fresco, medidos al momento de su colocación y sus propiedades mecánicas en estado endurecido. Atendiendo a los efetos de las temperaturas mayores a 30 °C (límite del reglamento actual en la Argentina).

En Argentina la normativa actual que regula la tecnología y las propiedades del hormigón fue redactada por el INTI- CIRSOC en el año 2005 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles), estableciendo los límites y las condiciones de aceptabilidad del hormigón en Argentina. Dicha normativa está registrada como el reglamento CIRSOC 201-2005 [1].

El reglamento nombrado limita la aplicación y moldeo de hormigones con temperatura mayores a 30°C, indicando en su punto 5.12.2.1 [2]: **"la temperatura del hormigón fresco inmediatamente después de su colocación y compactación, debe ser menor o igual a 30°C […]"** medidas en su masa en estado fresco.

Otros organismos nacionales como Vialidad Nacional [3] y el Instituto Racionalización Argentino de Materiales (IRAM) [4], establecen condiciones diferentes a las del CIRSOC 201-2005 para la colocación del hormigón. Así mismo otras iinvestigaciones internacionales realizadas por entidades como la American Society for Testing and Materials (ASTM) [7], el American Concrete Institute (ACI) [8], y la Portland Cement Association (PCA) [9], definen temperaturas máximas de hormigonado en estado fresco de 32 °C, 35 °C y 38 °C respectivamente.

Los resultados de este proyecto de investigación pretendieron conocer más profundamente los fenómenos en estudio, evaluando el estado fresco del hormigón (determinación de asentamientos/extendidos, toma de temperatura, densidad y aire incorporado) y sus propiedades en estado endurecido (Resistencia a 3, 7 y 28 días) para entornos de temperatura entre 20 y 39 grados centígrados, propios de periodo estival de los años 2021-2022.

Estudios de los cuales, los resultados consideran valores de resistencias aceptables hasta temperaturas de 36 °C, luego del cual se observa una caída en la resistencia, indicando un posible nuevo límite de aplicación.

Palabras claves: Temperatura, Hormigón, Fragüe, Estado fresco, Estado endurecido, Resistencia.

ABSTRACT

This paper presents the results of the experimental study developed in the Materials Laboratory of the Catholic University of Córdoba and an industrialized prefabricated concrete plant, with the aim of establishing a relationship between the temperature of concrete mixtures in their fresh state, measured at the time of their placement and their mechanical properties in a hardened state. Taking into account the effects of temperatures greater than 30 ° C (limit of the current regulation in Argentina).

In Argentina, the current regulations governing the technology and properties of concrete were drafted by INTI-CIRSOC in 2005 (National Institute of Industrial Technology- Research Center of National Safety Regulations for Civil Works), establishing the limits and conditions of acceptability of concrete in Argentina. This regulation is registered as the CIRSOC regulation 201-2005.

This regulation limits the application and molding of concrete with temperatures greater than 30°C, stating in point 5.12.2.1: "the temperature of fresh concrete immediately after its placement and compaction must be less than or equal to 30°C [...]" measured in its mass in a fresh state.

Other national bodies such as “Vialidad Nacional” and the Materials Rationalization Institute of Argentina (IRAM), establish conditions different from those of CIRSOC 201-2005 for the placement for concrete. Others, international researches conducted by entities such as the American Society for Testing and Materials (ASTM), the American Concrete Institute (ACI), and the Portland Cement Association (PCA), define maximum concreting temperatures of 32 °C, 35 °C and 38 °C respectively.

The results of this research project sought to know more deeply the phenomena under study, evaluating the fresh state of concrete (Determination of settlements / extended, temperature intake, density and incorporated air) and its properties in hardened state (Resistance to 3, 7 and 28 days) for temperature environments between 20 and 39 degrees Celsius, typical of the summer period of the years 2021-2022.

Likewise, the results consider acceptable resistance values up to temperatures of 36 °C, after which a drop in resistance is observed, indicating a possible new application limit.

Key words: Temperature, Concrete, Setting, Fresh concrete, Hardened concrete, Resistance.

INDICE

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1
1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 4
1.2.1. Hipótesis de trabajo 4
1.2.2. Objetivo general 5
1.2.3. Objetivos específicos. 5
1.2.4. Enfoque científico. 6
2. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE 7
2.1. INTRODUCCIÓN 7
2.2. ESTADO DEL ARTE 9
2.2.1. Manejo de la temperatura 13
2.2.2. Situación ambiental 16
2.2.2.1. Gasto energético – económico por uso de escamas de hielo para la reducción de temperatura de la mezcla de hormigón 19
2.2.3. Situación industrial 22
2.3. EXPECTATIVAS A FUTURO: 25
2.3.1. AATHH 26
3. CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO 26
3.1. HIDRATACIÓN DEL HORMIGÓN 26
3.2. EFECTOS EN CLIMAS CALUROSOS 30
3.2.1. Evaporación 30
3.2.1.1. Estimación de la tasa de evaporación 32
3.2.2. Exudación 34
3.3. FISURACIÓN PLÁSTICA 35
3.4. EFECTO SOBRE REVENIDO: 39
3.5. EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA: 40
3.6. EFECTOS DE UN CURADO APROPIADO 42

4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y MATERIALES DE TRABAJO 43

4.1. INTRODUCCIÓN 43

4.2. MATERIALES 44

1) Cemento Portland del CPN50 44

2) Áridos naturales 45

A. Agregado fino - arena parana. 45

B. Agregado fino - arena gruesa 46

C. Agregado grueso 48

D. Ensayos sobre agregados – R.A.S. 49

3) Agua 51

4) Aditivos 51

4.3. METODOS 51

4.3.1. Contexto teórico 51

4.3.1.1. Distribución probabilística de los materiales estructurales 53

4.3.1.2. Control de calidad del hormigón 55

4.3.2. Resistencia característica 56

4.3.3. Dosificación de mezcla 58

4.3.3.1. Método de dosificación racional 58

4.3.4. Preparación de los materiales 61

4.3.5. Paston de prueba 62

4.3.6. Muestreo de hormigon 63

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS 66

5.1. INTRODUCCIÓN 66

5.2. RESULTADOS 66

5.2.1. Temperatura 66

5.2.2. Resistencia a compresión 68

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN 71

7. CAPÍTULO VII: REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA 73

ANEXO I 78

ANEXO II **80**

ANEXO III **82**

ANEXO IV **102**

ANEXO V **104**

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

En el siglo XX con los primeros investigadores Louis Vicat, Joseph Aspdin, Isaac Johnson, Francois Coinet, entre otros, se produjeron las primeras innovaciones en la materia: se creó el cemento, se desarrolló el hormigón y se inscribió la patente del hormigón armado. Sin embargo, fue recién a mediados del siglo XX donde las aplicaciones de estos materiales se tornaron paisaje habitual para la sociedad.

En la actualidad el hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, y tras el agua, es el producto más consumido del planeta. Cada año, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena, y un billón de toneladas de agua. En nuestro país, la industria de la construcción tiene un gran impacto a nivel social y económico, presentando un crecimiento sostenido en la última década.

Los avances en las propiedades del hormigón se han alcanzado, en gran medida, gracias al estudio y conocimiento de la estructura interna de los materiales que generaron notables ventajas técnicas y económicas propiciando mejoras en el servicio de las construcciones y nuevas alternativas de aplicación. (Giovambattista, A et al. 2020) [10].

El diseño de hormigones comprende básicamente realizar una mezcla de dos componentes esenciales: agregados y pasta (Kosmatka, 2002) [11]. La pasta está compuesta por cemento portland, agua y ocasionalmente aditivos; mientras que los agregados están unidos por esta pasta, normalmente se denominan arenas y agregados gruesos.

Ambos componentes mezclados recrean una masa que en su estado fresco puede ser moldeada a fin de que, en un determinado tiempo de secado, fragüe, se pueda contar con un nuevo material sólido de características propias ya consolidadas.

El principal objetivo de realizar dosificaciones de mezclas de hormigón es determinar la más económica y práctica, con materiales fácilmente disponibles en el lugar para producir el hormigón cumpliendo con las propiedades especificadas para su uso. (Maldonado y Carrasco, 2012) [12].

Del hormigón se esperan diversas cualidades. Por ejemplo, en estado fresco, recién preparado, el hormigón debe permitir ser transportado y colocado con facilidad sin que los componentes se separen o disgreguen. En estado endurecido, situación en la que va a permanecer durante su vida útil, debe poseer la suficiente resistencia mecánica y resistencia a la agresión de los agentes externos, propiedad ésta que se conoce como durabilidad.

Entre los principales parámetros que inciden en las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido se pueden destacar cuatro:

a) La clase y cantidad de aglomerante, es decir el cemento Portland.
b) El tipo y composición granulométrica de los áridos.
c) La relación entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento Portland.
d) La condición climática.

En Argentina la normativa actual que regula la tecnología y propiedades del hormigón fue redactada por el INTI- CIRSOC en el año 2005 (Instituto Nacional de Tecnología Industrial- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles) estableciendo los límites y las condiciones de aceptabilidad. Dicha normativa recibe el nombre del reglamento: CIRSOC 201-2005.

El reglamento anteriormente mencionado define al tiempo caluroso como: "*cualquier combinación de factores climáticos que, asociados a alta temperatura ambiente, tienda a perjudicar la calidad del hormigón fresco o endurecido, o que contribuya al desarrollo de propiedades anormales del mismo*." Lo que a su vez se soluciona limitando la aplicación y moldeo de hormigones con temperatura mayores a 30°C, indicando en su punto 5.12.2.1 "*la temperatura del hormigón fresco inmediatamente después de su colocación y compactación, debe ser menor o igual a 30°C* […]" medidas en su masa en estado fresco.

Según el capítulo 5.12, de este manual, esto se establece con el objetivo de evitar dificultades tales como:

- Aumento de la demanda de agua (evaporación).
- Rápida pérdida de la trabajabilidad (asentamiento).
- Tendencia a fisuras, por retracción térmica y contracción plástica.
- Necesidad de un curado temprano.
- Dificultad para controlar el porcentaje de aire incorporado.

A su vez se explica, que en muchos casos estos factores traen consigo problemas secundarios. Los cuales, en muchos casos, suelen ser tan importantes como los primeros y que se generan como producto de la adición de agua en obra, para realizar correcciones de las primeras. Acciones que generalmente se realizan sin un control previo y de forma improvisada, afectando negativamente las propiedades y las condiciones de servicio del hormigón endurecido. Entre estos problemas se pueden nombrar:

- Disminución de resistencia, por el aumento de agua-cemento de la mezcla

- Aumento de la permeabilidad.
- Fisuración.
- Mayor contracción post fragüe.
- Malas terminaciones, lo que resulta en una menor resistencia a abrasión.

Otros factores a considerar son:

- Hormigón de alta resistencia temprana a la compresión, que requiere mayor contenido de cemento.
- Cementos con diferente y mayor tasa de hidratación.
- Mayor porcentaje de armadura.
- Etc.

Por estas razones y debido a la incertidumbre que genera la manipulación de hormigón en obra, el reglamento argentino, CIRSOC 201-2005, acota los límites máximos de la mezcla de hormigón en su estado fresco, a esta temperatura.

El mismo límite máximo se establece para el hormigón fresco en tiempo caluroso basado según las *"Bases de un Código Modelo para la Tecnología de las obras de Hormigón*" (Giovambattista et al. 2020).

Sin embargo, en el mismo documento aclara que el American Concrete Institute (ACI) no especifica una temperatura máxima, porque dependerá de las demás condiciones climáticas, y en cambio da un rango de temperaturas máximas a considerar, entre 24 y 38 º C. Este último además establece una serie de medidas preventivas con énfasis en la evaluación de materiales, la planificación y la coordinación de todas las fases del trabajo, para evitar las posibles consecuencias. Dentro de los cuales el reglamento argentino, elige seguir simplemente los límites en la temperatura del hormigón, que no son tan prácticos en muchas zonas geográficas o para los factores climáticos anuales del país. Ignorando, quizás, en muchos casos la posibilidad de optar por diferentes métodos para resolver dichas problemáticas.

En el punto 5.12.3 [13] del reglamento CIRSOC 201-2005, se especifican los distintos métodos propuestos para reducir la temperatura del hormigón, estos son:

a) Usar cemento con la menor temperatura posible. (Baja incidencia en la temperatura de la mezcla final, de 10 a 1).
b) Mantener los acopios de agregados a la sombra, y refrigerarlos por humedecimiento con agua en forma de niebla para reducir su temperatura.

c) Refrigerar el agua del mezclado.
d) Emplear hielo en reemplazo total o parcial del agua de mezclado.
e) Mantener a la sombra o aislados térmicamente o pintados de color blanco o de color claro a los silos, tolvas, depósitos y cañerías que conducen el agua de mezclado, y al tambor de la hormigonera.

Por otro lado, existen otras indicaciones y estudios de otros métodos de que cumplen el mismo propósito, tales como:

- Programación de colocación de hormigón para limitar la exposición a las condiciones atmosféricas
- Métodos para limitar la pérdida de humedad durante el colado y acabado, tales como sombrillas, parabrisas, niebla y rociada.
- Vertido de nitrógeno líquido, adicionado directamente en el camión mezclador.
- Circular aire frío en los cubos de almacenamiento de áridos.

Esta práctica si bien es eficiente en muchos casos, en otros, resulta innecesaria, de simple reemplazo, o bien complementada por otras medidas de prevención, control y curado, ya implementadas por muchas empresas a nivel internacional y que muchas veces resultan más simples, efectivas y económicas que las primeras opciones.

Aun así, en Argentina la falta de estudios respecto al tema, demora la concientización y discusión de este tema en particular (al igual que muchos otros). Resultando, si es que se respeta el reglamento, en un sobre gasto energético y económico en muchas de las obras del país. Por otro lado, la falta de información o/y el incumplimiento de las normativas vigentes lleva a improvisaciones en obra, en estado de infracción, que son realizadas sin tomar los correctos procedimientos para una construcción segura.

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.2.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

"Técnicamente es posible trabajar, mezclar y moldear hormigones que tengan temperaturas entre 30 y 35°C (medidas en su masa luego de ser mezclado) sin perder sus propiedades ni su performance de diseño, teniendo en cuenta sus condiciones de elaboración".

1.2.2. OBJETIVO GENERAL

- *"Poner en debate la hipótesis planteada, dentro de un ámbito profesional y educativo, que tendrá lugar a fines del mes de octubre de este mismo año (2022), con el décimo congreso internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH). En expectativa a modificar la norma que la misma desafía".*

- *"Posicionar a la Universidad Católica de Córdoba como referente en los temas de investigación y desarrollo en hormigones".*

- *Poner en ejercicio los conocimientos adquiridos durante el cursado de diversas materias de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Católica de Córdoba.*

Los objetivos generales del trabajo giran alrededor de conocer más profundamente los fenómenos en estudio sobre el hormigón, para formular teorías específicas que permitan comprender mejor su funcionamiento. Poniendo en debate los límites de temperaturas impuestos por las normas actuales para hormigón elaborado.

Por lo cual el proyecto propone:

- Fortalecer un Centro de Investigación en la temática de Materiales.
- Sistematizar acciones y políticas organizadas en el Laboratorio de Materiales UCC.
- Investigar y generar un estudio detallado de los antecedentes en la temática desarrollada.

1.2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

El equipo de trabajo y los procesos que se orientarán en la búsqueda del saber tendrán como objetivos específicos:

- Recopilar información sobre la temática de hormigones en temperaturas extremas.
- Verificar, estudiar y caracterizar las mezclas de hormigón con los requisitos establecidos en el Reglamento Argentino CIRSOC 201-2005.
- Diseñar y dosificar hormigones.
- Completar los requisitos necesarios para finalizar con la carrera de Ingeniería Civil.

A partir de esta información:

- Preparar mezclas de hormigones.
- Caracterizar el Hormigón en estado fresco y en estado endurecido.
- Sintetizar los principales aspectos metodológicos utilizados en los diferentes ensayos.
- Mantener la Formación de Recursos Humanos, mediante:
  - La inclusión de alumnos de Ingeniería Civil a través de temas de tesis de grado.
  - Generar Seminarios específicos para los alumnos de la Facultad de Ingeniería que permitan divulgar los desarrollos alcanzados.
  - Generar Seminarios de especialización para profesionales del área, con miembros del centro o especialistas invitados. (siempre y cuando exista el apoyo institucional).

1.2.4. ENFOQUE CIENTÍFICO.

Este estudio comenzó con una revisión intensiva de la literatura sobre temas relacionados con el comportamiento del hormigón en edades tempranas. Esta amplia colección de referencias incluía artículos desde 1941 en adelante, a partir de los cuales se identificaron planteos similares a esta problemática climatológica en las mezclas de hormigón. Dentro de ellos se encontraron distintas entidades, organizaciones y autores con enfoques en diferentes aspectos sobre el tema, ya sea, evaporación, agregado de agua, enfriamiento de mezclas de hormigón fresco, curados especiales, contracción plástica del hormigón, etc.

En consecuencia, esta investigación se centró en los efectos de las temperaturas máximas en la mezcla de hormigón fresco, previo a la colocación y compactado, y su relación directa con sus propiedades en estado fresco y endurecido. Principalmente porque los resultados relatados en las literaturas estudiadas se consideraron demostrables, representativos y conservadores, según la opinión del autor.

2. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

La Argentina se extiende, en su parte continental, aproximadamente desde los 22 hasta los 55 grados de latitud sur, mientras que su extensión en el sentido de los meridianos es de aproximadamente 3.700 km. Condiciones territoriales que resultan en una gran diversidad de climas, clasificados más recientemente por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), o bien, la agencia cartográfica nacional de Argentina que actualiza una larga tradición de clasificaciones nacionales que, a su vez, se basan en la clasificación internacional de Köppen y Geiger (ver Imagen 2.1.).

Imagen 2.1. Mapa geográfico de la diversidad climática Argentina (Fuente, Wikipedia, IGN)

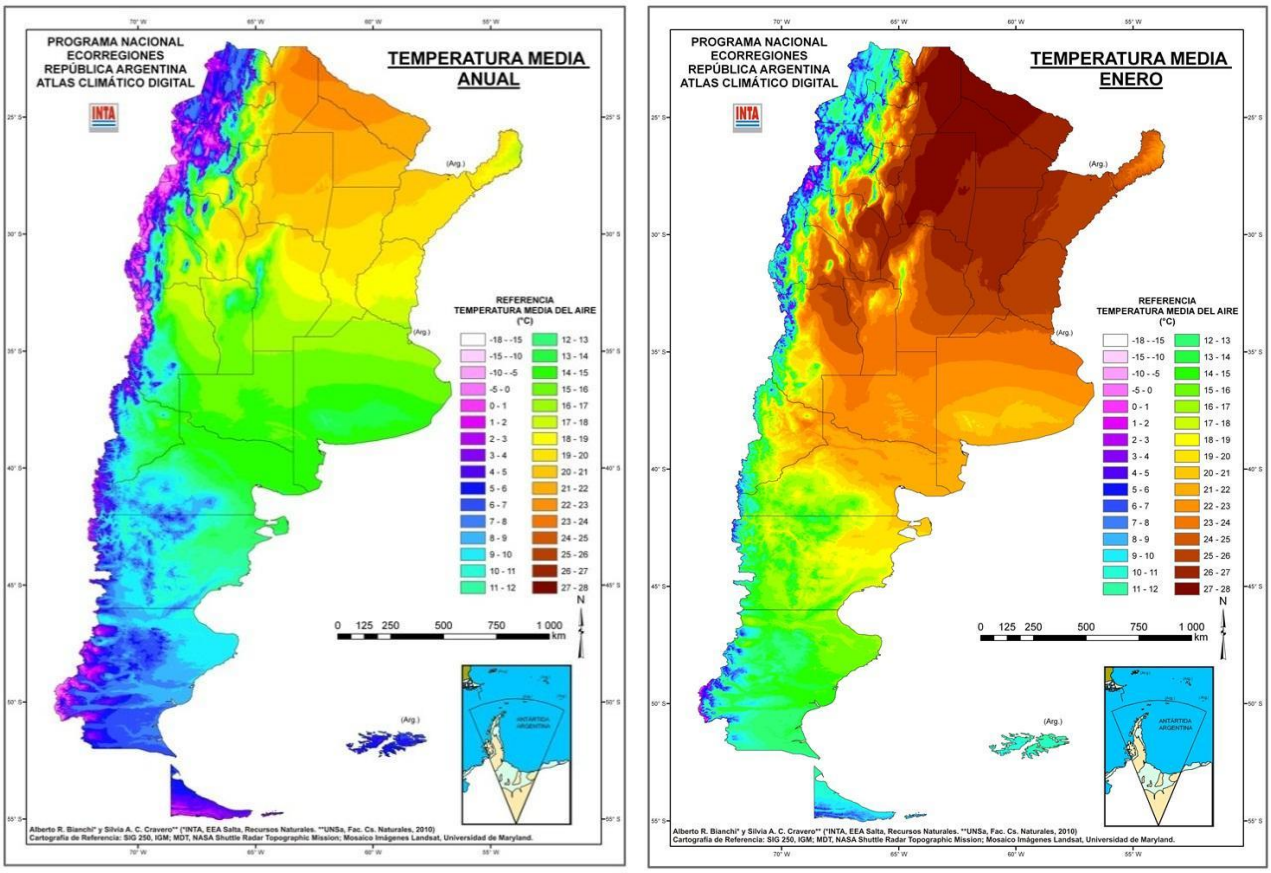


Imagen 2.2 - 2.3. Temperatura media anual y temperatura media del mes de Enero (imagen meteorológica con fuente del NOAA[1])

Además, esta disposición de clima representa los valores térmicos que disminuyen progresivamente hacia el Sur. En general, las temperaturas medias en la porción Norte, son superiores a 29° C en verano y 18° C en invierno, y de la misma forma en la porción Sur las temperaturas se mantienen menores de 8° C y 0° C, respectivamente. Por otro lado, se registran temperaturas máximas de 48,8° C en Salta, 46,9° C en Santiago del Estero y mínimas de -33° C en Chubut.

En un país tan climáticamente diversificado se vuelve esencial estudiar los efectos de la temperatura en nuestras construcciones y estructuras. Más concretamente en la dosificación, colado y compactación de las mezclas de hormigones que se utilizan.

Como ya se mencionó anteriormente las altas temperaturas propias de climas calurosos afectan al hormigón en estado fresco, en importantes propiedades de la mezcla: aumentan la demanda de

[1] La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) es una agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos cuyas actividades se centran en monitorear las condiciones de los océanos y la atmósfera.

agua de la mezcla, aumentan la pérdida de asentamiento, reducen los tiempos de fraguado, aumentan la tendencia al agrietamiento por contracción plástica, dificultad en el acabado y reducen el control del contenido de aire arrastrado. Además, afectan también propiedades importantes del hormigón endurecido, como la reducción de la resistencia última, el aumento de la tendencia a la humedad y las grietas por retracción térmica, la disminución de la durabilidad del material y la disminución de la uniformidad de la apariencia de la superficie (Springenschmid R., 1998) [15]. Asimismo, lo anterior ocasiona que el hormigón tenga una mayor velocidad de pérdida de revenimiento y una aceleración del proceso de hidratación, lo que reduce los tiempos de fraguado y desde el punto de vista mecánico, acelera la resistencia temprana del hormigón y reduce en un pequeño porcentaje, a la resistencia final del mismo.

Por estas y muchas otras razones, se deben tomar las precauciones adecuadas en situaciones en las que existan altas temperaturas, y de esta forma lograr una calidad uniforme del hormigón de diseño, que, a su vez se desempeñe adecuadamente en los estados plástico y endurecido.

En la recolección y recopilación de datos, información, trabajos de investigadores y papers, de origen nacional e internacional se observa que la temática: “hormigones en climas calurosos” en nuestro país se encuentra en una etapa previa a la actualización, dado que muchas fuentes nacionales ya se encuentran adoptando nuevos límites, que respetan los avances teórico-experimentales sobre el tema.

También es importante destacar, que, de la información obtenida de origen internacional con fuentes en Estados Unidos y Europa, se extrajeron datos, referencias, teorías y demostraciones, a utilizar en este proyecto de investigación, de tal modo que el avance se realice aprovechando los aciertos y evitando errores ya cometidos previamente, generando así, resultados más certeros y precisos sobre la temática en estudio.

2.2. ESTADO DEL ARTE

En la Argentina existen tres grandes referentes a la hora de hablar de Hormigonado en climas calurosos. Por un lado, esta al organismo del CIRSOC-201-2005 y por el otro, Vialidad Nacional y a la norma IRAM 1666 [6], sobre el hormigón elaborado y sus requisitos y controles de producción.

El primero como ya se explicó en el capítulo I, **no admite temperaturas para hormigonado mayores a 30 grados centígrados**, exigiendo distintos métodos para reducir la temperatura del cemento, agregados o mezcla en general.

En el punto 5.12.3 del reglamento CIRSOC 201-2005, se especifican los distintos métodos propuestos para reducir la temperatura del hormigón, estos son:

- Usar cemento con la menor temperatura posible. (Baja incidencia en la temperatura de la mezcla final, de 10 a 1).
- Mantener los acopios de agregados a la sombra, y refrigerarlos por humedecimiento con agua en forma de niebla para reducir su temperatura.
- Refrigerar el agua del mezclado.
- Emplear hielo en remplazo total o parcial del agua de mezclado.
- Mantener a la sombra o aislados térmicamente o pintados de color blanco o de color claro a los silos, tolvas, depósitos y cañerías que conducen el agua de mezclado, y al tambor de la hormigonera.

Imagenes 2.4 - 2.5 - 2.6. Metodos para reducir la temperatura final de mesclas de hormigón. (fuentes varias)

Por otro lado, existen otras indicaciones y estudios de otros métodos de que cumplen el mismo propósito, tales como:

- Programación de colocación de hormigón para limitar la exposición a las condiciones atmosféricas
- Métodos para limitar la pérdida de humedad durante el colado y acabado, tales como sombrillas, parabrisas, niebla y rociada.
- Vertido de nitrógeno líquido, adicionado directamente en el camión mezclador.
- Circular aire frio en los cubos de almacenamiento de áridos.

Vialidad nacional por otro lado, establece en su pliego de especificaciones técnicas sección 9.1.3.2, las "temperaturas de colocación" [5], que: *"La temperatura del hormigón fresco, inmediatamente antes de su descarga, colocación y compactación, debe ser igual o menor a treinta y dos grados centígrados (32 °C) […]".* Aun así, dicha indicación no excluye la posibilidad que esa temperatura evite la formación de fisuras por retracción térmica ni por contracción plástica. Por esta razón se accede a la posibilidad de que el Supervisor de obra exija estudios complementarios, o bien, también cuenta con la posibilidad de emplear medidas de mitigación o protección adicionales que permitan asumir temperaturas aún mayores, previniendo cualquier tipo de deterioro en el hormigón joven, con una adecuada confiabilidad. *"[…] En función de estos estudios y medidas adoptadas, el Supervisor de Obra podrá adoptar una temperatura diferente, que nunca podrá ser mayor a treinta y cinco grados centígrados (35 °C)".*

Entonces, según este último, durante el hormigonado en tiempo caluroso, cuando la temperatura del hormigón fresco, inmediatamente después de su colocación y compactación, sea superior a treinta grados centígrados (30 °C), sólo se permite la colocación del hormigón, previa autorización del Supervisor de Obra, si se toman precauciones adecuadas y se disponen los medios para protegerlo de los gradientes térmicos y de las altas tasas de evaporación.

De esta forma Vialidad Nacional dice que las medidas a tomar en caso de acercarse al límite máximo de temperatura, las medidas de protecciones serán las siguientes:

- Colocar pantallas que protejan al hormigón contra los rayos del sol.
- Prestar especial atención en las tareas de curado. Aplicarlo inmediatamente luego de finalizado el texturizado del hormigón. Eventualmente, en caso de atrasarse, se puede evaluar el empleo de neblinas o retardadores de evaporación.
- Controlar la evolución de las temperaturas del ambiente y del pavimento durante las primeras treinta y seis horas (36 h). Se deben tomar las medidas necesarias que permitan controlar el primer enfriamiento de modo tal que el gradiente de temperatura no supere los tres grados centígrados (3 °C) por hora, o un total de veintiocho grados centígrados

(28 °C) durante las primeras veinticuatro horas (24 h), para reducir los riesgos de fisuración térmica.

- Restringir los horarios de hormigonado para reducir la temperatura máxima a alcanzar por el pavimento.
- Incorporar cubiertas a los camiones o tolvas para proteger el hormigón de la incidencia o directa de los rayos solares.
- Trabajar con la menor cantidad de agua y asentamiento posibles, que permitan una colocación y terminación adecuadas.

Imagen 2.7 - 2.8 - 2.9 - 2.10 - 2.11 - 2.12. Metodos de curado. (fuentes varias)

Finalmente, la Norma IRAM 1666 valida lo expuesto por Vialidad Nacional estableciendo en el apartado 5.1.3, que "la temperatura del hormigón fresco en el punto de entrega debe ser como máximo el valor especificado por el usuario o, en su defecto, 32°C. Valor que puede elevarse 35°C si el usuario dispone de los medios necesarios para proteger al hormigón frente a la exposición de gradientes térmicos, y prevenir los riesgos de fisuración por origen térmico"

2.2.1. MANEJO DE LA TEMPERATURA

Dentro de este apartado se hace referencia a las medidas actuales para el control de temperatura de la mezcla de hormigón fresco previo al colado, principalmente las medidas rondan en torno a evitar el uso de materiales con alto aporte de temperatura.

Según el NRMCA (1962) [16], la temperatura del hormigón se puede calcular con un alto grado de aproximación, en función de las temperaturas de los ingredientes a través de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{0.22 * (T_a * M_a + T_c * M_c) + T_w * M_w + T_{wa} * M_{wa}}{0.22 * (M_a + M_c) + M_w + M_{wa}} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

En donde:

T: Temperatura del hormigón fresco [ºC]

T_a: Temperatura de los agregados [ºC]

T_c: Temperatura del cemento [ºC]

T_w: Temperatura del agua de mezcla [ºC]

T_{wa}: Temperatura de humedad libre en los agregados [ºC]

M_a: Masa de los agregados [Kg]

M_c: Masa del cemento [Kg]

M_w: Masa del agua de mezcla [Kg]

M_{wa}: Masa de humedad libre en los agregados [Kg]

Ejemplo:

Para realizar un metro cubico de hormigón en condiciones normales de temperatura y humedad, se tiene que:

Tabla 2.1. Calculo teórico de temperatura de hormigones. (Elaboración propia).

	Masa, M	Temperatura inicial, Ti	Calor específico, C	Energía para variar 1°C	ΔT para variar 1°C	Energía total
	[kg]	[°C]	[kJ/kg*°C]	[kJ]	[°C]	[kJ]
Cemento	410	66	0,9200	377,2	7,8	24895,2
Agua	146,04	27	4,1840	611,0	4,8	16497,8
Agregados	1741	27	0,9200	1601,7	1,8	43246,4
Sumatoria	2297			2514,7		79917

$T = \frac{0.22 * (T_a * M_a + T_c * M_c) + T_w * M_w + T_{wa} * M_{wa}}{0.22 * (M_a + M_c) + M_w + M_{wa}}$	20237,82 / 619,26	32,68

Como se observa en el ejemplo se puede actuar directamente sobre las propiedades de los materiales componentes de la mezcla para afectar el resultado final de la misma. Estas acciones pueden realizarse de forma adicional a las demás precauciones que hay que tener siempre, para el control de temperatura de todos los materiales, como mantener las mezcladoras, tolvas, cintas transportadoras, líneas de bombeo y otros equipos sin exposición directa a los rayos del sol, dejar tuberías de agua pintadas de blanco o enterradas, etc.

- <u>Agua</u>

  Como es bien explicado en el manual de diseño y control de mezclas de hormigón del PCA, de todos los materiales que influyen en la mezcla, el agua termina siendo el material más fácil de enfriarse. Ya sea por refrigeración, agregado de hielo triturado o nitrógeno líquido, una reducción de la temperatura del agua de aproximadamente 2ºC enfriará la mezcla de hormigón cerca de 0.5ºC. Esto porque el agua representa un bajo porcentaje dentro de la misma.

  A su vez el hielo molido, o en escamas, es más eficiente que el agua fría para disminuir la temperatura de la masa de hormigón, en este caso la reducción de temperatura no debe superar los 11ºC. Si esta es la opción a utilizar, el hielo reemplaza parte del agua de la mezcla, pero sin superar más del 75 % de ella. Por otro lado, se deberá considerar en dicho caso el calor de fusión del hielo, que es de aproximadamente de 335 kJ por Kg, y el cual modifica la ecuación anterior de esta forma:

$$T = \frac{0.22 * (T_a * M_a + T_c * M_c) + T_w * M_w + T_{wa} * M_{wa} - 80M_i}{0.22 * (M_a + M_c) + M_w + M_{wa} - M_i} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Ejemplo:

Siguiendo el ejemplo anterior, si se agregasen 25 kilogramos de hielo a la mezcla:

Tabla 2.2. Calculo teórico de temperatura de hormigones con hielo añadido como método reductor de la temperatura final (Elaboración propia).

	Masa, M	Temperatura inicial, Ti	Calor específico, C	Energía para variar 1°C	ΔT para variar 1°C	Energía total
	[kg]	[°C]	[kJ/kg*°C]	[kJ]	[°C]	[kJ]
Cemento	410	66	0,9	377,2	7,8	24895,2
Agua	178,2	27	4,2	745,6	3,9	20130,9
Agregados	1845	27	0,9	1697,4	1,7	45829,8
Hielo	25	0	4,2	105,0	-	-
Suma	2458,2			2925,1888		90855,9
Aporte de fusión del hielo				25 x 335 [KJ/KG] calor de fusión =		-8375,0
						82480,9

$T = \frac{0.22 * (T_a * M_a + T_c * M_c) + T_w * M_w + T_{wa} * M_{wa} - 80M_i}{0.22 * (M_a + M_c) + M_w + M_{wa} - M_i}$	19723,90 / 649,30	30,38

Si en los volúmenes manejados no se puede reducir la temperatura total de la mezcla mediante el uso de hielo, puede recurrirse a inyectar nitrógeno líquido en la mezcladora. En cualquier caso, del uso del mismo se debe evitar cualquier contacto con superficies metálicas del tambor de mezclado, ya que, esto podría ocasionar daños a la estructura del mismo. El uso de esta medida no afecta directamente a la cantidad de agua de la mezcla, pero si lo hará de forma indirecta al modificar la temperatura del hormigón fresco, disminuyendo la demanda de agua del mismo.

- <u>Agregados / áridos</u>

Contrariamente al agua, los agregados tienen una gran influencia en la temperatura final de la mezcla. Principalmente porque representan entre un 70% y un 85% de la masa total de la mezcla de hormigón. Se estima que una reducción de 1 grado centígrado de la masa de agregado grueso equivale aproximadamente a una reducción de temperatura final de 0.5ºC. Por otro lado, la temperatura de los mismos no es de fácil reducción, pero existen métodos simples para lograrlo, tales como: proteger los acopios del sol, humedecer la mezcla con un rocío de agua, etc. Y luego otros métodos más complejos como sumergir los acopios en agua fría o ventilar el interior de los áridos con tuberías de aire frío.

- Cemento

El cemento en general tiene una baja influencia en la temperatura final de la mezcla, aproximadamente una relación de 10ºC del cemento para 1ºC de la mezcla. Pero si bien no es eficiente como método de reducción, si lo es a la hora de limitar su aporte de temperatura de la mezcla. La razón de esta pauta se debe a que el cemento pierde lentamente su temperatura durante el almacenamiento, por lo que puede estar a altas temperaturas si es entregado al poco tiempo de su fabricación (producto de la molienda del Clinker). De esta forma es importante seguir los límites de 65ºC a 82ºC establecidos por asociaciones como la ACI en el comité 305 e igualmente controlar de cerca la temperatura del mismo para evitar temperaturas en el hormigón fresco no deseadas.

2.2.2. SITUACIÓN AMBIENTAL

En la actualidad los conceptos de ecología y medio ambiente han adquirido una gran importancia a nivel mundial. Situación que sin lugar a duda afecta a todas las actividades que se desenvuelven en nuestro planeta, dentro de las cuales, la industria de la construcción es una de las más afectadas de forma directa, por el tipo de actividades que desarrolla. Debido a este tipo de actividades, así como también por su consumo mundial y la cantidad de recursos, en muchos casos no renovables, que utiliza. Las mismas pueden tener consecuencias perjudiciales e incluso irreversibles para el medio ambiente.

Tener una mentalidad sustentable significa pensar en obtener ingresos económicos cuidando el medio ambiente y generando beneficios para la sociedad.

Adoptar una mentalidad empresarial sustentable es clave si se quieren maximizar los beneficios para todos trabajando con lo que se tiene disponible, aprovechando al máximo los recursos y reduciendo los costos.

En este sentido, sería válido hablar no solamente de cómo actuar sobre las medidas para mitigar o evitar el cambio climático global, sino también (y, sin dejar de lado la importancia de la primera), como enfrentar sus consecuencias actuales. La realidad nos hace conscientes de los cambios climáticos en el mundo y sin ir más lejos en nuestro país. Lluvias torrenciales, inundaciones, sequías, olas de calor extremas, aumento de la temperatura media anual, etc. Sería, en dicho contexto, un error seguir culpando al cambio climático por la imprevisibilidad de estos fenómenos, sin aceptar a los mismos como una normalidad temporal a la cual adaptarse hasta que puedan ser revertidos con el tiempo.

A modo ejemplo, si se dejara de emitir gases de efecto invernadero en la actualidad, igualmente seguirán existiendo impactos asociados al cambio climático ya ocurrido y los distintos gases de efecto invernadero seguirán teniendo igualmente persistencia en la atmósfera por varios años.

Se puede definir, entonces, la adaptación a este fenómeno, como un proceso de ajuste al clima, real o proyectado, y sus efectos. Adaptación, que en los sistemas humanos busca moderar o evitar los daños, o aprovechar las oportunidades beneficiosas.

Como el cambio climático es un proceso paulatino, que se esconde en la variabilidad del natural del clima, es lógico que los episodios climáticos extremos llamen más la atención, tanto en su intensidad como en su frecuencia, y como se explica en el libro “La Argentina y el cambio climático: De la física a la política” [17], son consecuencia directa de un aumento en la temperatura media del territorio.

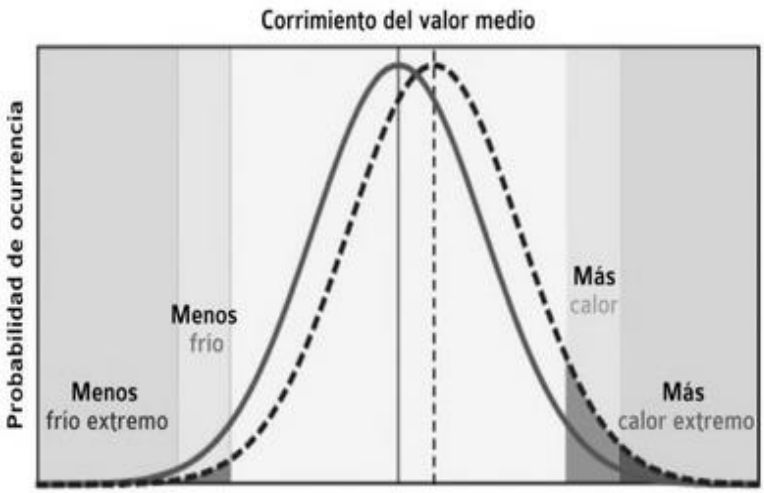


Gráfico 2.1. Ilustración del efecto de un cambio relativamente pequeño en el valor de la temperatura en la distribución estadística de los extremos. (IPCC, 2014) [18]

Como se puede ver el Gráfico 2.1., es representativo de una campana de gauss, un pequeño aumento en la temperatura media, aumenta al doble o más, la frecuencia de los valores extremos que superan los umbrales de tolerancia.

En el Mundo los efectos del cambio climático se dejan ver de diversas maneras, así como también, por la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor, sequías, inundaciones y tormentas. A su vez el cambio climático no es globalmente uniforme y afecto negativamente a algunas regiones más que a otras, que incluso pudieron tener efectos beneficiosos, como el aumento del área agrícola.

En los siguientes diagramas, ver Gráfico 2.2., se puede ver cómo el cambio climático ha afectado a la ciudad de Córdoba, Argentina durante los últimos 40 años. La fuente de datos utilizada es el

ERA5[2], que abarca el período comprendido entre 1979 y 2021, con una resolución espacial de 30 km.

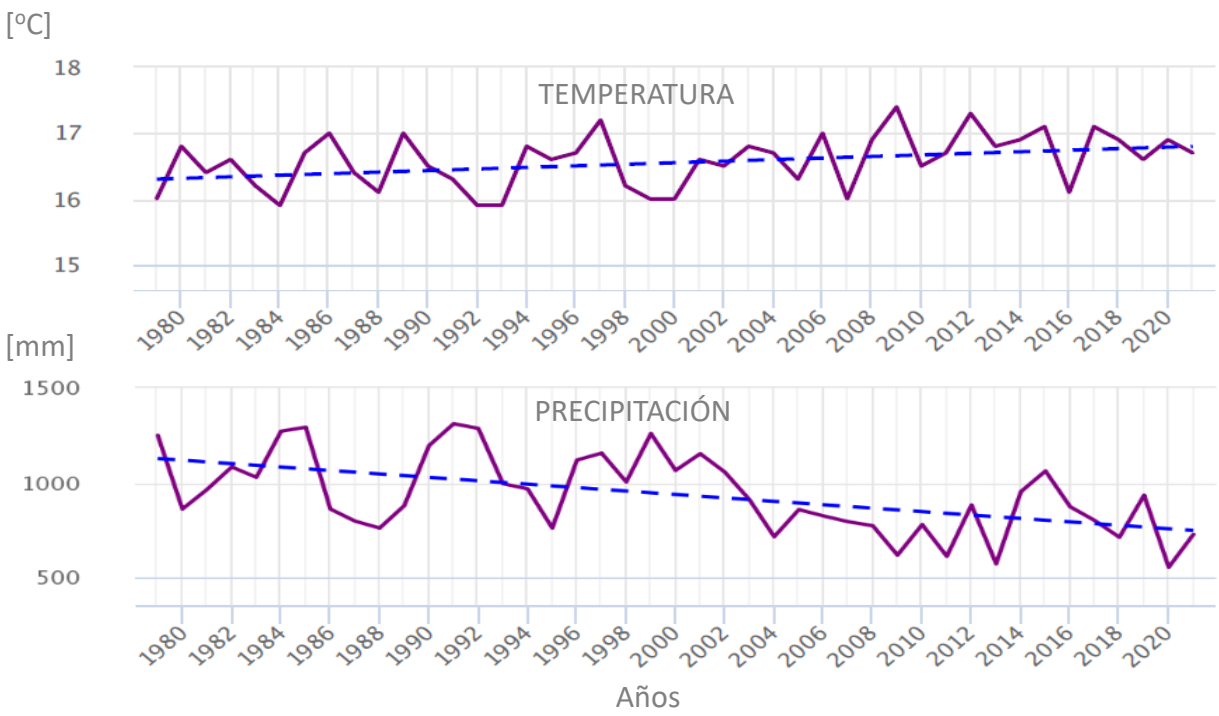


Gráfico 2.2. Efectos del cambio climático global sobre la temperatura y precipitación de la Ciudad de Córdoba para los últimos 40 años. (Fuente ERA5)

En estos se puede observar claramente la pendiente de tendencia lineal para cada variable, siendo positiva (creciente) para la temperatura media y negativa (decreciente) para la precipitación media respectivamente. Los resultados mostrados coinciden con otros estudios y están a la expectativa de otros próximos a su publicación, como lo es el AR6 WG1 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el cual es el órgano internacional encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático.

En resumen, se puede observar aumentos en la temperatura media anual de aproximadamente 1ºC y un descenso en la precipitación media anual de casi 400 mm. Valores que no parecen mucho a simple vista, pero que se traducen en un gran número de fenómenos y anomalías. Este es el caso

[2] ERA5 es el reanálisis de ECMWF de quinta generación para el clima global durante las últimas 4 a 7 décadas. Actualmente, los datos están disponibles desde 1950, divididos en entradas del Almacén de datos climáticos para 1950-1978 (extensión anterior preliminar) y desde 1979 en adelante (versión final más actualizaciones oportunas, esta página).

que se muestra en la imagen meteorológica, ver Imagen 2.14., del NOAA, de las temperaturas máximas en el mes de enero del 2022.

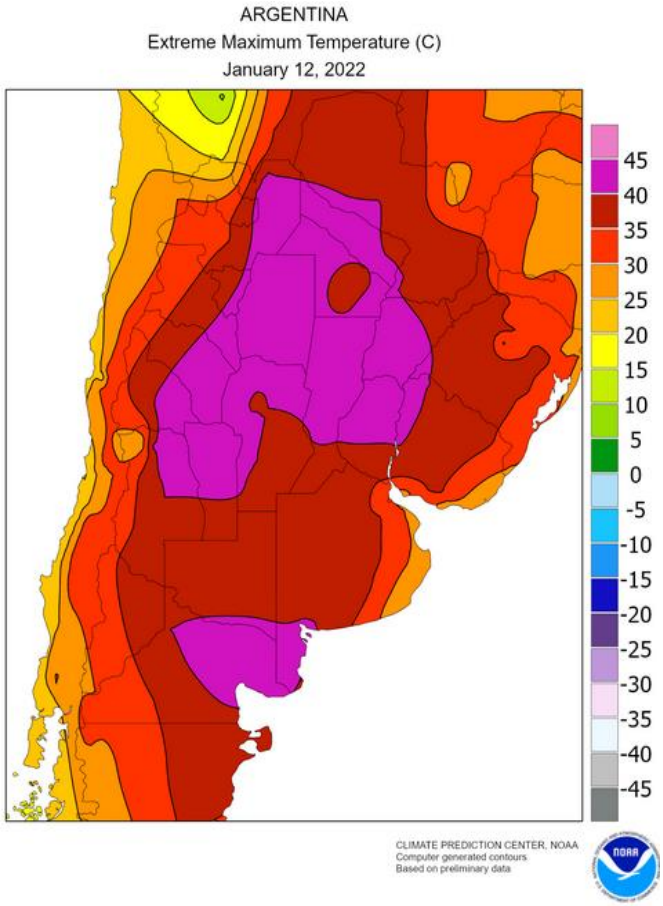


Imagen 2.14. Temperaturas máximas del mes de Enero (imagen meteorológica del NOAA).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, es razonable asumir que, en gran parte del año, las mezclas de hormigón fresco, que se realizan en nuestro país, superaran las temperaturas límites establecidas. Esto es ambientalmente perjudicial, si se considera que el enfriamiento de las mezclas de hormigón se realiza muchas veces a través de procesos de alto consumo energético directo o indirecto, como son los casos del uso de hielo triturado para reemplazar parcialmente el agua de la misma, o añadir nitrógeno líquido, o pasar aire frío por los áridos, etc.

2.2.2.1. Gasto energético – económico por uso de escamas de hielo para la reducción de temperatura de la mezcla de hormigón

Según datos obtenidos de la organización de comida y agricultura de las naciones unidas, para una fábrica de hielo que se planifica desde el comienzo, los costos que hay que tener en cuenta son numerosos y variados, y dependen mucho de las condiciones locales. Por ejemplo, pueden

incluir el costo del terreno, los edificios, las carreteras, los servicios de suministro de electricidad y de agua y el desagüe. En los costos fijos anuales habrá que tomar en consideración la depreciación, el mantenimiento, los intereses sobre el capital, seguros, impuestos y gastos generales. Los principales costos de funcionamiento que hay que tener presentes son la energía, la mano de obra, el agua y, cuando sea el caso, la entrega.

Ahora si se toman en cuenta únicamente los gastos energéticos directos por la fabricación de hielo en escamas se pueden rescatar que los mismos rondan entre los **50 - 60 kWh/tn**, que, a razón de aproximadamente 25 kg por metro cubico de hormigón (como el caso del ejemplo desarrollado en la Tabla 2.2.), estos valores equivaldrían a **40 m³ de hormigón**. Económicamente, el precio de compra de esta energía en la argentina ronda alrededor de los **25.000 pesos** por la misma cantidad.

De la misma forma, el costo comercial de un kilo de hielo en la Argentina ronda los 50 pesos, de lo que equivaldría a gastar **1.250 pesos por metro cubico de hormigón a enfriar.** Que es similar a los valores energéticos.

Deduciendo entonces que, 40 m³ de hormigón con temperaturas superiores a las del límite impuesto por el reglamento argentino, cuesta aproximadamente 25.000 pesos para enfriarlos.

Los datos presentados en a continuación, ver Gráfico 2.3., son las cantidades de hormigón que se produjeron en nuestro país según los datos de la asociación argentina de tecnología del hormigón.

Tabla 2.3. Cantidad de hormigón producido por año (Elaboración propia).

	2015	2016	2017	2018	2019
Producción[m³]	5.131.718,0	4.630.690,0	5.564.709,0	5.677.752,0	5.436.186,0
Producción [tn]	2.231.182,0	2.013.343,0	2.419.439,0	2.468.588,0	2.363.559,0

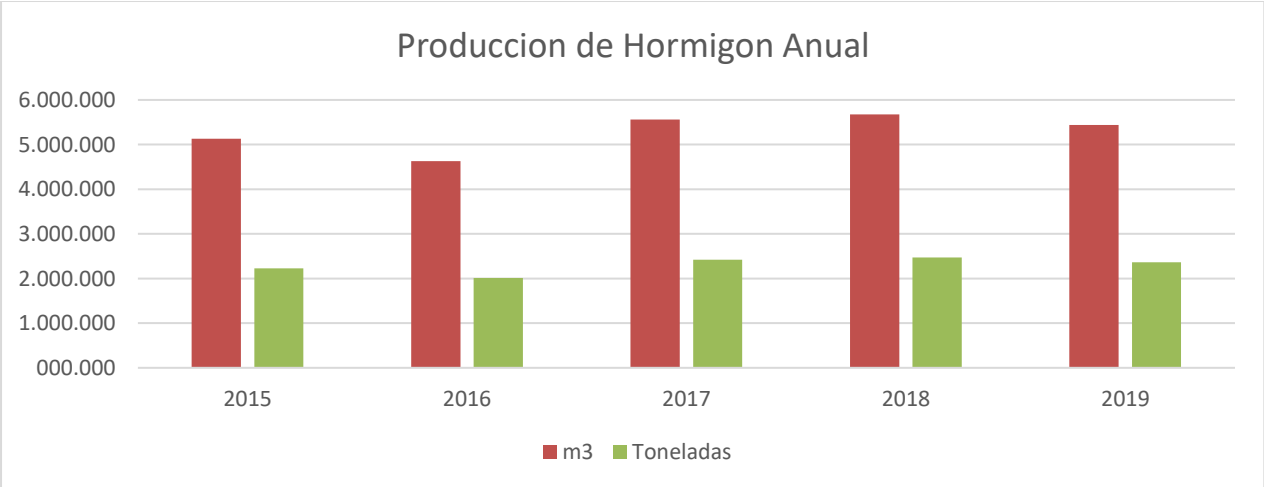
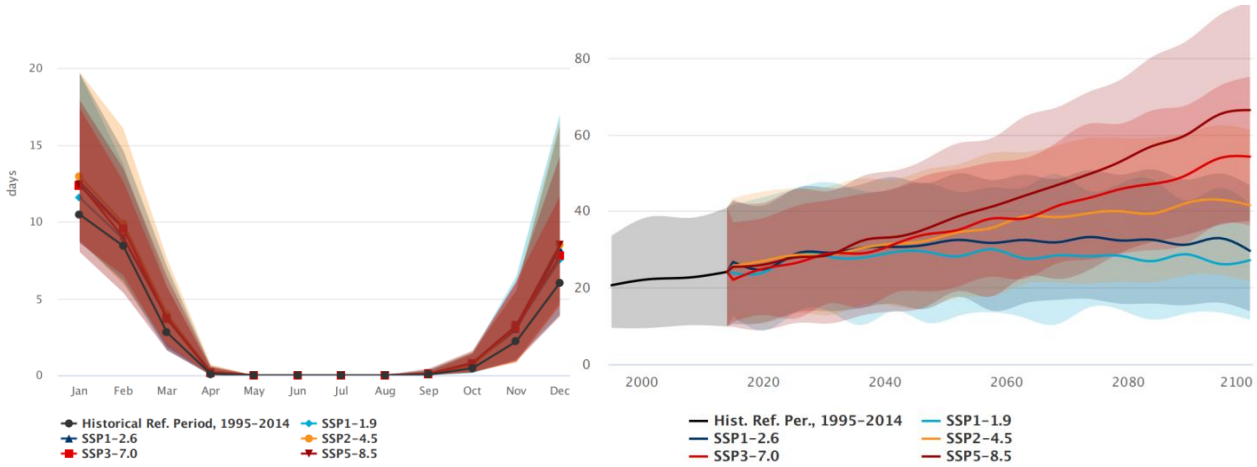


Gráfico 2.3. Producción anual de hormigón de las empresas hormigoneras asociadas a las AATH.

Luego, utilizando las herramientas de proyección climática provistas por “The Climate Change Knowledge Portal” (CCKP)[3], se puede estimar que porcentaje del año tendrá temperaturas por encima de los 35 grados centígrados, que si bien, dicha temperatura, está por encima de la temperatura de interés para este estudio, la misma, sirve como referencia para este análisis.

Los datos de proyección climática referenciados, son datos modelados de las compilaciones de los modelos climáticos globales de los “proyectos de comparación de modelos acoplados” (CMIP)[4], supervisados por el Programa Mundial de Investigación del Clima. Ver Gráficos 2.4 - 2.5..



Gráficos 2.4 - 2.5. Temperaturas máximas diarias proyectadas para Córdoba, Argentina a partir de datos estadísticos de referencia en 1995 a 2014 (Fuente CCKP).

En los gráficos expuestos se puede observar que la suma de días que superan los 35 ˚C, ronda entre los **36 días** concentrados en los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, es decir, aproximadamente un 10% del periodo estival del año.

Para este análisis se supuso que los días del año en los que las temperaturas superan los 30 grados centígrados, son igual al doble de días cuyas temperaturas superen los 35 ˚C. Entonces se estima que, en un 20% de los días del año, las mezclas de hormigón serán producida en condiciones climáticas consideradas calurosas, según el reglamento argentino.

[3] El Portal de Conocimientos sobre el Cambio Climático (CCKP) es el centro de información, datos y herramientas relacionados con el clima para el Grupo del Banco Mundial (GBM). El Portal proporciona una plataforma en línea desde la cual se accede y analiza datos completos relacionados con el cambio climático y el desarrollo. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/

[4] En climatología, el Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados (CMIP en sus siglas en inglés, Coupled Model Intercomparison Project) es el marco de comparación diseñado para mejorar nuestro conocimiento del cambio climático

De esta estimación se puede decir que la producción de hormigón, para la cual se necesitará un control y corrección de temperatura, es aproximadamente un promedio de 460.000 toneladas por año.

Tabla 2.3. Cantidad de hormigón producido por año en climas calurosos, con temperaturas que igualan o superan los 30 °C (Elaboración propia).

	2015	2016	2017	2018	2019	**Promedio**
20% de la producción **[m³]**	1.026.344	926.138	1.112.942	1.135.550	1.087.237	1.057.642
20% de la producción **[tn]**	446.236	402.669	483.888	493.718	472.712	459.844

El gasto energético "relativo" de esta técnica es de:

$$Gasto\ energetico\ = \frac{1.057.642}{40} * 25 = \mathbf{661,03\ MWh} \qquad \text{(Ec. 3)}$$

El costo "relativo" de esta técnica es de:

$$Costo\ = \frac{459.844}{40} * 25.000 = \mathbf{287,4\ \boldsymbol{millones\ pesos}} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

Cabe destacar una vez más, que este análisis es **"relativo"**, es decir, solo tiene en cuenta los costos energéticos directos de la fabricación de hielo, o la compra del producto para un área determinada; además, orientado desde una producción anual de hormigón en condición de clima caluroso, de las empresas hormigoneras colaborantes para el análisis, de la ATHH, referenciado. Condiciones en las cuales, estos valores diferirían de la realidad exacta, ya que, no contemplan los costos de uso, transporte, almacenamiento, costo de oportunidad, etc.; pero que sirven de referencia para la metodología analizada.

2.2.3. SITUACIÓN INDUSTRIAL

En el mundo, la mayoría de los sistemas constructivos están siendo desplazados por los sistemas constructivos industrializados. Esto se debe a que, el sector de la construcción, actualmente, es la actividad productiva menos eficiente que existe, principalmente por la predominancia histórica de la construcción convencional, artesanal. Modo de construcción en el que se ve reflejado las principales

complicaciones producto de la improvisación y falta de control en situaciones complicadas como es el caso del hormigonado en climas calurosos, que se suman a las otras desventajas de este tipo de método constructivo: siniestralidad elevada, baja especialización, precariedad de las condiciones de trabajo, dilatados plazos de obra, altos costes por el elevado impacto de la mano de obra, defectos reiterados en la ejecución, etc.

La construcción industrializada o semi industrializada aparece como una gran alternativa a la primera, con la externalización de los elementos constructivos en centros de producción. Los beneficios de este modelo constructivo se deben a distintos factores, con los que esta cuenta:

- Mano de obra especializada, con rutinas de trabajo estandarizadas.
- Rapidez: menor costo del capital invertido y mayor grado de participación tecnológica.
- Industria: Lugar cerrado sin demoras por mal tiempo
- Producción simultánea
- Control de calidad y ensayos que permite un mayor control y de ser necesario correcciones sobre mezclas o piezas estandarizadas
- Materiales: dosificaciones más uniformes y mejor adaptadas a cada etapa de una obra en hormigón

Los principales beneficios se observan en obras con un mayor grado de seguridad, orden y calidad, ejecutadas en menor tiempo y con costos y procesos estandarizados.

En lo que respecta al tema de este trabajo, se hace interesante el hecho de resaltar las diferencias entre los distintos métodos constructivos que manipulan las mezclas de hormigón en estado fresco de maneras similares, pero diferentes. No sería correcto considerar iguales los criterios de seguridad aplicados al control de temperatura, para una planta de pre moldeado y una planta hormigonera, que en una obra en donde se utiliza balde y una mezcladora pequeña, por la sencilla razón que un método constructivo esta industrializado y el otro no. En una industria, por ejemplo, se puede garantizar un hormigonado continúo siguiendo fórmulas de dosificación con muy bajos niveles de error y en donde se pueden tomar los recaudos necesarios para cada situación climática correspondiente.

Esta apreciación entra en consideración si se analizan las jurisprudencias presentes en nuestro reglamento CIRSOC 201-2005. El mismo establece un control de conformidad para los datos obtenidos de las mezclas de hormigón utilizadas en una obra determinada. Este control constituye un conjunto de acciones y decisiones destinadas a la recepción de hormigón, y se basa en la realización de ensayos normalizados que miden las propiedades del hormigón, siguiendo criterios (referidos al hormigón fresco y al hormigón endurecido) destinados a establecer si el hormigón que

se colocó en una estructura cumple con los requisitos especificados por este reglamento y los documentos del proyecto.

Se establecen en el mismo, dos modos de control de conformidad aplicados a diferentes modos de producción, puesta en obra y control de producción del hormigón. Estos son:

- Modo 1

  El hormigón es producido en una planta productora que opera con un sistema de calidad. La planta elaboradora puede estar instalada dentro o fuera del recinto de la obra. El director de obra tiene acceso al control de producción de la planta y conoce sus registros. El control de conformidad se realiza de acuerdo con el artículo 4.2.3 [19].

- Modo 2

  El hormigón es producido en condiciones que no satisfacen los requisitos establecidos para el modo 1. El control de conformidad se realiza de acuerdo con el artículo 4.2.4 [20].

Con esta diferencia el reglamento varía el tamaño de los lotes, la cantidad de muestras, la veracidad de los resultados ensayados y las fórmulas determinantes de la resistencia característica. Según los modos de producción del hormigón.

Se puede establecer, una clara semejanza entre los modos para definir los distintos **criterios de conformidad** y lo anteriormente planteado sobre los **criterios de seguridad** para mezclas de hormigón producidas en climas calurosos, pero en ambientes diferentes.

De esta forma se podría adoptar entonces, los mismos modos de diferenciación, o similares, para para evaluar las condiciones particularmente generales de hormigonado con altas temperaturas.

Con esto, se puede ampliar el campo de validez propuesto realizando un análisis volumétrico de los porcentajes de hormigón producidos en planta o ínsito, para determinar si de esta forma, dicha diferenciación justificaría o no dejar de adoptar un único criterio de seguridad global.

Para este análisis resulta conveniente observar los porcentajes de cemento portland despachados según su envase, ver ANEXO I. Los datos fueron obtenidos de las estadísticas anuales para el 2020 de la Asociación Argentina de Fabricantes de Cemento Portland, [21], y a partir de ellos considerando que casi el 100% de los despachos a granel están dirigidos a plantas hormigoneras o plantas de pre moldeado, y que los despachos en bolsa se dividen aproximadamente en un 30% para plantas industrializadas con tecnología rompe bolsas y un 70% a obras con hormigonado ínsito.

Tabla 2.4. Cantidad de cemento Portland vendido en función de su forma de despacho (Elaboración a partir de las Imágenes del ANEXO I, AAFCP).

	Bolsa	Granel	TOTAL
	Acumulado	Acumulado	
Año 2020	6.932.083	2.940.914	12.125.405
Año 2021	7.364.102	4.761.303	12.125.405

Tabla 2.5. Cantidad de cemento Portland según destino (Elaboración a partir de las Imágenes de Tabla 2.4.).

	Industria	Obra
	Acumulado	Acumulado
Año 2020	5.020.539	4.852.458
Año 2021	6.970.534	5.154.871

Finalmente, de estos datos se observa que ambos “modos” realizados para producir hormigón, cuentan con cifras muy significativas y prácticamente igualadas, por lo que adoptar criterios diferentes, y quizás, menos conservadores para el caso de la producción en plantas industrializadas de hormigón, en una primera instancia, sería adecuado.

2.3. EXPECTATIVAS A FUTURO:

En la actualidad, la industria de la construcción en la Argentina, se encuentra limitada en cierta medida por la normativa del reglamento argentino CIRSOC 201.2005, que regula el hormigonado en climas calurosos. Debido a esta misma, gran cantidad de las obras y plantas hormigoneras del país cuentan con gastos elevados para mantener temperaturas bajas en las mezclas de hormigón, sin contar con el respaldo de optar por alternativas que acompañen de mejor manera dicha situación, como bien lo hacen, otros reglamentos que abarcan el mismo tema.

Debido a las razones mencionadas se cree necesario, estudiar con mayor profundidad, el comportamiento en estos rangos de temperatura. Con la intención de conocer más profundamente los fenómenos en estudio, que conduzcan a formular teorías sobre el hormigón que permitan generalizar su descripción y/o explicar mejor su funcionamiento. Generando de esta forma un mejor entendimiento y protocolos para prevenir dichos límites y la posibilidad de contrarrestar los efectos directos e indirectos de superarlos.

Por otro lado, no hay que olvidar que altas temperaturas en mezclas de hormigón, también están relacionadas con un aumento energético, el cual podría ser aprovechado en distintas situaciones de curado, como es el caso del curado con vapor. Beneficios que quedan sujetos a un estudio futuro.

Se espera que, con el presente estudio, se pueda establecer parámetros dentro de los cuales sea posible trabajar en climas caluros, con temperaturas mayores a los límites actuales, de forma consiente, segura, controlada y específica, mientras se descansa sobre una normativa legal, que abarque un mayor número de posibilidades.

2.3.1. AATHH

Los temas desarrollados quedan próximos a presentarse en el congreso anual de la AATH, con el fin de sumar investigaciones con respecto al tema, que apoyen las iniciativas puestas en curso por otras normativas argentinas y este trabajo.

A su vez proponer un ambiente de debate en el que se puedan encontrar aspectos dentro de la tesis desarrollada para discutir como: elaboración, tratamiento, colado y curado de las mezclas de hormigón en climas calurosos. Los cuales puedan mejorarse, corregirse o añadírseles otras teorías para completar y complementar este capítulo de estudio.

Finalmente, dicha oportunidad es ideal, para encarar diferentes temas en situaciones similares, o bien, en desarrollo, y así, seguir aportando a la comunidad científica que define a la tecnología del hormigón en la Argentina.

3. CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

El hormigón es un material que gana resistencia gradualmente como resultado de reacciones químicas producto de la hidratación del cemento con agua. Este proceso de hidratación, para una especifica dosificación de hormigón, se relaciona, en condiciones “normales”, con la ganancia de resistencia de forma directa. La cual llegará a su máxima en función del tiempo y temperatura, mientas que suficiente humedad sea administrada al proceso.

3.1. HIDRATACIÓN DEL HORMIGÓN

El proceso de hidratación de un hormigón sucede durante sus primeras 24 horas después de la mezcla (Holt, 2001 [22]; Esping, 2007) [23], y el mismo experimenta tres fases estructurales:

1. Plástico: en esta etapa, el hormigón aún es líquido, plástico, viscoelástico y trabajable.

2. Semi plástico: comienza después del fraguado inicial, donde comienza a formarse un esqueleto rígido y el hormigón se vuelve gradualmente rígido.

3. Rígido: comienza después del set final. Durante esta fase el calor máximo de hidratación es alcanzado y la fuerza aumenta.

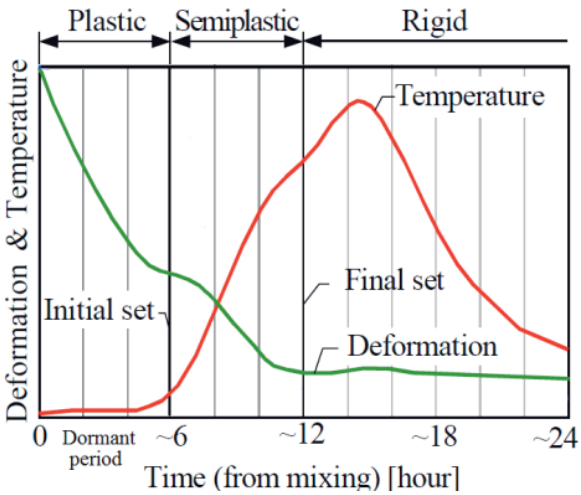


Gráfico 3.1. Relación entre las tres fases estructurales, en edad temprana deformación y el calor de hidratación. (Faez Sayahi 2019, basado en Esping & Löfgren (2005)). [24]

La hidratación del cemento Portland es una secuencia compleja de reacciones químicas superpuestas entre los componentes del Clinker, el sulfato de calcio y el agua, que conducen al fraguado y al endurecimiento. Debido a la hidratación progresiva, un esqueleto sólido se formará gradualmente dentro de la masa de hormigón, lo que ira otorgando al material sus propiedades. Este proceso se explica de la siguiente forma:

Inmediatamente después de mezclar cemento y agua comienzan a ocurrir reacciones químicas entre el aluminato de calcio con el sulfato de calcio (ambos existentes en el cemento Portland), formando la ettringita la cual es un hidrato de trisulfato de aluminato de hexacalcio y puede ser observado por un microscopio. Esta reacción tiene lugar en una primera y segunda etapa, al generar un estallido de calor y su rápido enfriamiento (Etapas 0 y I, ver Gráfico 3.2.).

Después de estas etapas iniciales se ingresa a un período de inducción o período de latencia (Etapa II). Durante el período de inducción se produce una hidratación relativamente baja y un aumento en la concentración de calcio Ca2+

El fraguado (Etapa III) se define como el inicio de la rigidez en el hormigón fresco (Esping, 2007). Esta etapa a su vez tiene lugar en el borde entre las fases plástica y semi plástica. Este fenómeno es la consecuencia de un cambio de una suspensión concentrada de partículas floculadas a un

sólido esquelético viscoelástico capaz de soportar una tensión aplicada, consulte el Gráfico 3.2.. Así mismo, el fraguado está controlado principalmente por la hidratación de C3S y ocurre cuando el período de inducción termina por una rápida hidratación de C3S que conduce a un rápido aumento de la temperatura del hormigón (Etapa III), véase Mindess en el. (2003) [25]. El calor generado durante la hidratación aumenta la temperatura del hormigón en mayor o menor grado, dependiendo del volumen de hormigón colocado, del medio ambiente circundante, de la cantidad de cemento y del tipo de cemento portland empleado. Como regla general, hay un aumento de 5°C a 9°C (10°F a 15°F) de temperatura para cada 45 kg (100 lb) de cemento portland, resultante de la hidratación del cemento (ACI comité 211, 1997) [26].

El fraguado final se alcanza cuando los elementos reactivos en el hormigón, comienzan a estabilizarse, enfriándose de forma gradual. En este punto la mezcla de hormigón es lo suficientemente rígido para soportar su propio peso y soportar las tensiones; momento que marca el paso de una fase semi plástico, para entrar en la fase rígida.

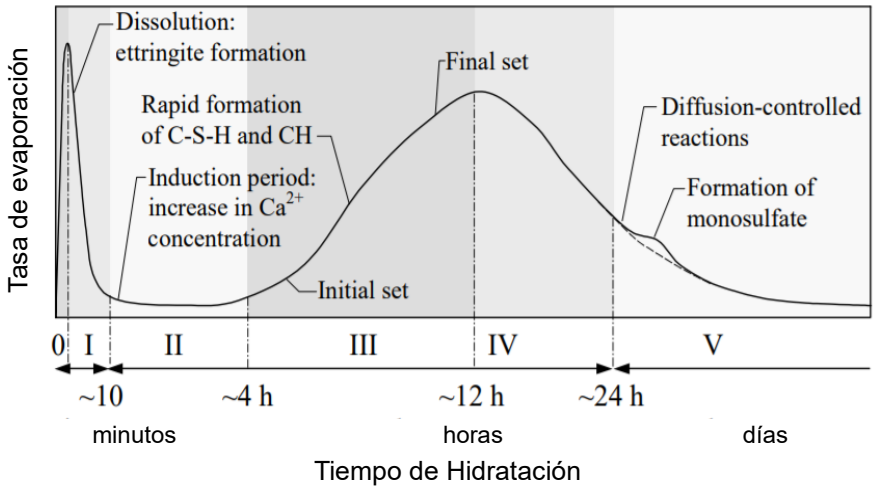


Gráfico 3.2. Representación esquemática de la evolución del calor de hidratación del cemento. (Oskar Esping & Ingemar Löfgren, 2005; basado en Gartner at al. (2002)) [27]

En resumen, la hidratación estará influenciada principalmente por una serie de parámetros los cuales son los siguientes:

1. La relación agua-cemento
2. Los finos del cemento y su composición (los principales componentes del Clinker)
3. La adición de materiales complementarios (como cenizas volantes y sílice)
4. Aditivos (superplastificante, acelerador, retardador, etc.)
5. **La temperatura**.

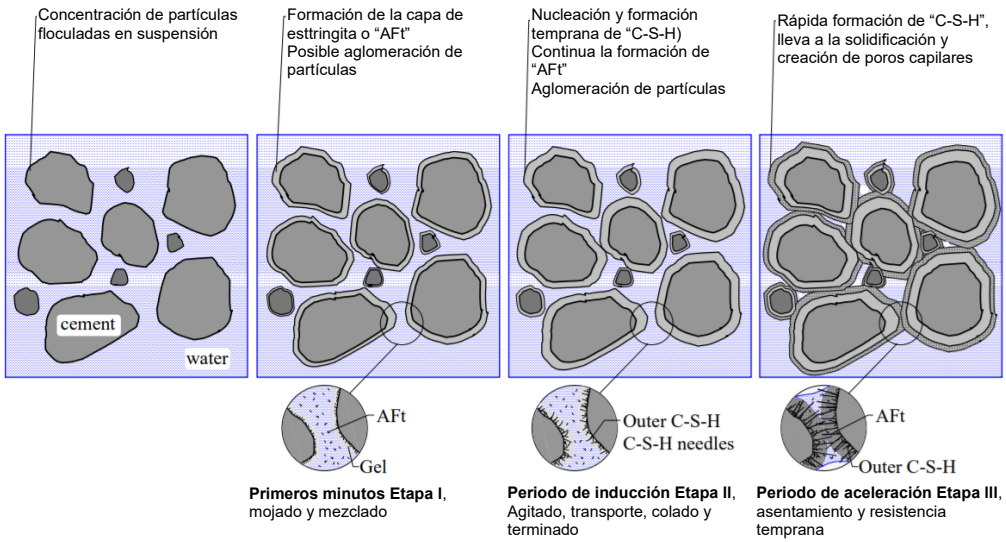


Imagen 3.2. Representación esquemática del proceso de formación microestructural en la hidratación del hormigón. (Oskar Esping & Ingemar Löfgren, 2005)

Las etapas son comprobables mediante experiencia de medición de temperatura en el interior de un elemento de hormigón, o bien, una probeta en condiciones normales de obra.

Para las mediciones se utilizó un registrador de datos de temperatura, TESTO 176 T4. Este instrumento sirve para registrar los valores de medición individuales y de las series de mediciones. De aquí se lleva un registro de las temperaturas en los extremos de 4 sondas especiales, 2 de los cuales se utilizaron para comparar la variación de temperaturas de una probeta en situación normal de obra, y el segundo liberado para medir la temperatura del ambiente. El Gráfico que se obtiene es muy similar al observado anteriormente, si se toma las variaciones de temperaturas.

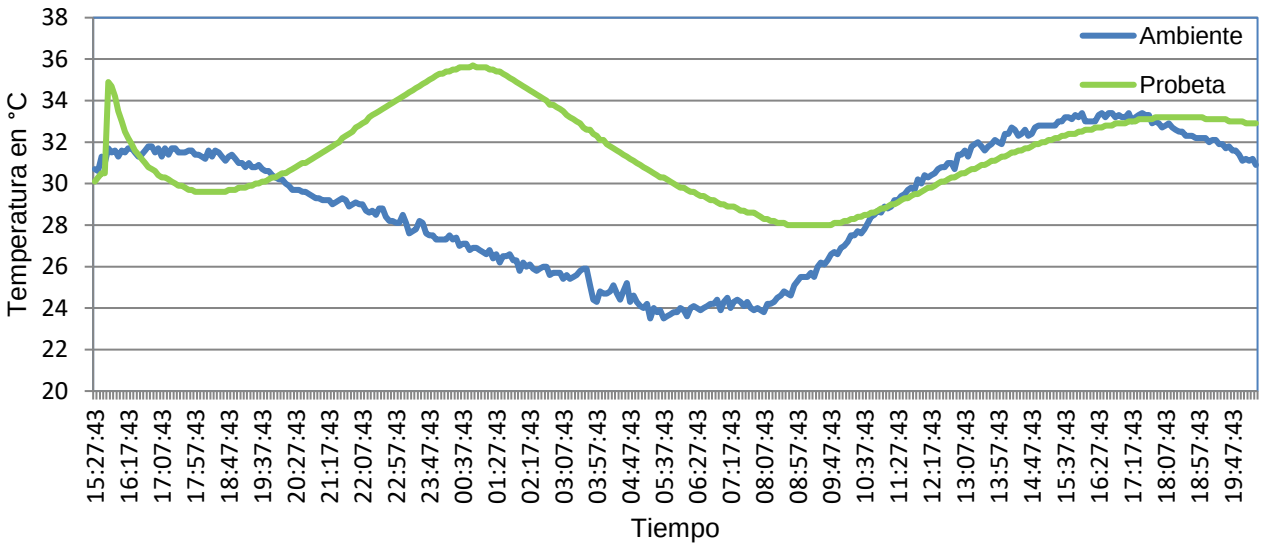


Gráfico 3.3. Variación de temperatura para una probeta de hormigón y del ambiente, en el tiempo (Elaboración propia)

Este análisis demuestra cada una de las estepas y revalida el tiempo en el que la principal hidratación del cemento sucede.

Para el análisis teórico del hormigón hay que tener en claro que tanto el fraguado, la permeabilidad, la estabilidad dimensional y la resistencia del hormigón a la intemperie, al desgaste y al ataque químico, como también a las solicitaciones externas a las que será sometido, dependen del **material, la dosificación de la mezcla, la temperatura inicial del hormigón, la velocidad del viento, la temperatura ambiente y las condiciones de humedad durante el período de colocación y curado**.

3.2. EFECTOS EN CLIMAS CALUROSOS

El hormigonado en climas calurosos, este sujeto a los distintos parámetros climáticos, que generan sobre las mezclas de hormigón, y sus materiales componentes, efectos que modifican el comportamiento normal del mismo. La mayoría de ellos ya se encuentran ampliamente estudiados y en este capítulo se desarrollarán algunos de los más importantes.

Por un lado, los efectos de la temperatura sobre el hormigón afectan al **fragüe**, lo que tiene un impacto directo con el **proceso de hidratación** presentado anteriormente y por consecuencia en su **resistencia inicial y final**.

Por el otro lado, estas condiciones climáticas extremas influyen sobre los parámetros que regulan el estado de **humedad** de los materiales componentes del hormigón y la mezcla en sí, al igual que la magnitud de **evaporación**. Factores que influyen directamente en la cantidad de agua final de la mezcla, lo que resulta en problemas de perdida de revenido, fisuración plástica, agua disponible para el proceso de hidratación, etc.

De esta forma se espera que un hormigón elaborado en climas calurosos presente menor resistencia final y posibles defectos en su estructura interna o superficial, que afecten negativamente su durabilidad y prestaciones de servicio.

3.2.1. EVAPORACIÓN

La evaporación es el paso continuo de una sustancia en estado líquido, al estado gaseoso. Esta transformación tiene lugar en la superficie de un líquido debido a:

a) la absorción de energía térmica en el agua, del ambiente y temperatura del hormigón;

b) baja humedad relativa

Además, la acumulación de moléculas de agua evaporada sobre la superficie aumenta la humedad en el perímetro y en consecuencia disminuye la evaporación. Por lo tanto, el viento puede impulsar la evaporación eliminando las moléculas de agua que escapan y reduciendo el ambiente relativo humedad.

Entonces la evaporación está en función del tamaño de la superficie expuesta, la temperatura, la saturación de vapor del aire por encima de la superficie y de igual manera la velocidad del viento.

En las mezclas de hormigón este fenómeno físico presenta problemas varios, al disminuir el agua de la mezcla y secar la superficie, modificando las propiedades de diseño de la mezcla y dejando la superficie expuesta a agentes externos que terminan por dañar la estructura de hormigón. Por esta razón este fenómeno debe ser estudiado y medido, para así determinar las mejores medidas a tomar para prevenir sus efetos.

En la actualidad conocer la tasa de evaporación en la industria de la construcción es un problema bastante común, pues ésta se calcula de forma indirecta mediante la utilización del Nomograma 3.1 del ANEXO II, el cual fue extraído del Manual de Practicas con Hormigón, publicado por el Instituto Americano del Hormigón ACI,1999. Este nomograma está basado en la fórmula de Menzel (la cual sirve para medir la evaporación del agua) y se encuentra respaldado por la norma, ACI 305R-96. La tasa de evaporación obtenida es una buena aproximación, si se considera que durante el proceso de fraguado se forma una película delgada de agua en la superficie del hormigón y está a su vez, será la capa que provea al material de un ambiente propicio para su hidratación.

Este nomograma fue desarrollado por primera vez por Bloem (1960) [28] basado en los valores numéricos presentados por Lerch (1957) [29], que a su vez utilizó una fórmula presentada por Menzel (1954) [30]:

El mismo tiene como variables de entrada los factores ambientales que influencian la evaporación:

- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Temperatura del hormigón
- Velocidad del viento

La variable de salida es:

- Tasa de evaporación

Uno de los problemas con este sistema, es que el mismo se basa en la hipótesis que la evaporación en agua y hormigón son iguales, y que además la evaporación es la misma a cualquier altitud. Hechos que son en ambos casos incorrectos.

Según ACI, para un hormigón normal, se deben tomar precauciones cuando la tasa de evaporación del agua supera 1,0 kg / m^2.hr (ACI, 1999). Este valor es 0,75 y 0,5 kg / m^2 /hr en los códigos canadienses y australianos, respectivamente (Uno, 1998 [31]). Sin embargo, esta no es la única situación posible, se ha observado que el agrietamiento puede ocurrir incluso a una tasa de evaporación tan baja como 0,2 kg / m^2 hr, sí se tienen condiciones ambientales áridas muy adversas (Almusallam, et al., 1999 [32]).

3.2.1.1.ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EVAPORACIÓN

Cuando se trata de valores específicos y cuestiones de cumplimiento frente a incumplimiento, se reconoce que la precisión del nomograma podría dar lugar a problemas de interpretación. Por lo tanto, la fuente de referencia en la especificación ACI 305.1 es la ecuación de Menzel y no el nomograma.

La ecuación de Menzel que se utiliza para cuantificar dicha tasa de evaporación es:

$$W = 0.44(e_o - e_a)(0.253 + 0.096\,V) \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Donde:

W = peso del agua evaporada, $[lb/ft2/h]$

e_o = presión de vapor saturado a la temperatura de la superficie de evaporación, $[psi]$

e_a = presión de vapor del aire ambiente, $[psi]$

V = velocidad del viento horizontal promedio a 20 pulgadas (500 mm) por encima de la superficie de hormigón, $[mph]$.

Para usar esta ecuación, es necesario un valor para la presión de vapor de saturación del agua a la temperatura del hormigón. Esa presión es la que ejerce el vapor de agua al 100% de humedad relativa a una temperatura T, cuando T es igual a la temperatura del hormigón.

Luego para evitar el cálculo de la presión de vapor de agua de saturación para varias temperaturas, (Weast 1987 [33]), propone una tabla con algunos resultados. La misma se puede observar la Tabla 3.1. en el ANEXO II. Estos valores, están dentro de la precisión de la naturaleza

aproximada de las mediciones y la naturaleza de la propia ecuación de tasa de evaporación. Esto lleva a varios problemas:

1. Calcular la tasa de evaporación se vuelve más engorroso debido a la necesidad de buscar manualmente o interpolar los valores de la tabla;

2. Es difícil desarrollar una ecuación matemática suficientemente precisa que se ajuste a todos los datos tabulares. Existen muchas ecuaciones para la presión de vapor de saturación que son precisas en un rango estrecho de temperaturas, pero no en el rango experimentado en la construcción con hormigón;

3. El redondeo y las conversiones de unidades pueden afectar significativamente la precisión de la tasa de evaporación calculada.

Basado en la ecuación anterior, Uno (1998) propuso una ecuación de operación única para estimar el agua tasa de evaporación, que no utiliza la presión de vapor como entrada, ya que una temperatura-vapor relación de presión se incorpora en la ecuación. La fórmula se expresa como:

$$E = 5 * ([T_c + 18]^{2,5} - r * [T_a + 18]^{2,5}) * (V + 4) * 10^{-6} \quad \text{(Ec. 6)}$$

Donde

$E =$ tasa de evaporación del agua, $[kg/m2\ /h]$

$Tc =$ temperatura del hormigón (superficie del agua), $[^{\circ}C]$

$Ta =$ temperatura del aire, $[^{\circ}C]$

$r =$ humedad relativa, $[\%]$

$V =$ velocidad del viento, $[km/h]$

Tanto la fórmula de Uno como el nomograma de la ACI son ampliamente utilizadas en investigación y en obras de construcción, por su sencillez en la estimación de la tasa de evaporación del agua. En la Tabla 3.2. del ANEXO II, se compara la tasa de evaporación medida experimentalmente 1 h después de colar el hormigón, por ambos métodos. De aquí se observa que ambos métodos concuerdan muy de cerca en el valor de la tasa de evaporación final.

Cuando la tasa de evaporación es alta, se espera que se acerque a la tasa de sangrado del hormigón, y en dicho caso, se deben tomar precauciones. Se emplearán contramedidas para reducir

las condiciones de evaporación sobre el hormigón. Estas contramedidas pueden incluir el uso de películas mono moleculares, empañamiento, cortinas cortavientos, sombreado y otras.

3.2.2. EXUDACIÓN

El hormigón es un material compuesto por elementos de diferentes densidades. A causa de ello, durante el periodo de inactividad que precede al fraguado, las partículas sólidas sedimentan dando lugar a la acumulación de agua en la superficie. Este fenómeno llamado exudación, si no es controlado, puede conducir a la obtención de un hormigón en la zona superior de los elementos estructurales de mayor relación agua - cemento y, en consecuencia, mayor porosidad y menor resistencia. Por el contrario, si se presenta en bajas medidas dejara la capa superior del hormigón susceptible al secado.

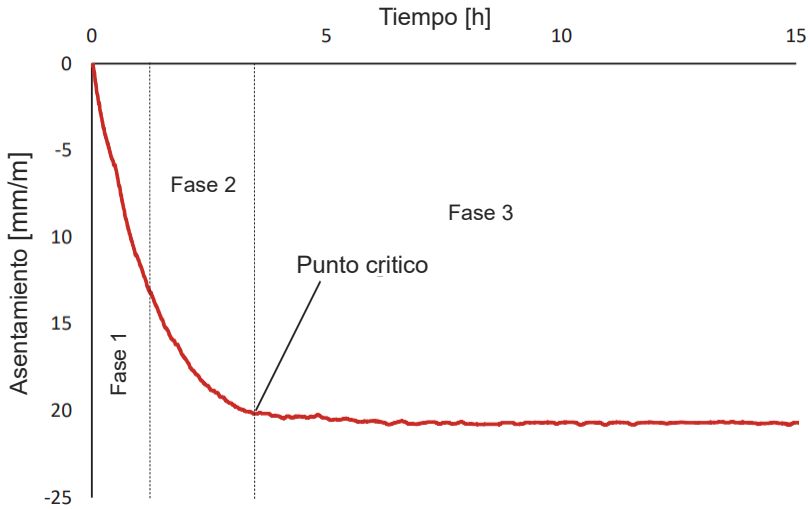


Gráfico 3.4. Asentamiento del hormigón dividido en base a las tres fases del proceso de secado de materiales cementosos (Faez Sayahi 2019).

En el caso que la tasa de evaporación sea alta, el volumen de agua exudada comenzara a secarse. Una vez que la película de agua exudada en la superficie del hormigón se evapora por completo, los esfuerzos de tracción, inducidos por la presión capilar, comienzan a acumularse en el sistema de poros. A su vez esta tensión provocara una contracción masiva del hormigón, que inicialmente tendrá una dirección vertical y que lograra transportar más agua desde el interior de los poros del hormigón a la superficie (Lura, et al., 2007 [34]). Sin embargo, este volumen de agua no se acumulará en la superficie, ya que, en esta etapa del proceso de exudación, el hormigón se encuentra en régimen de secado y la evaporación se produce más rápido que el sangrado. Dada dicha situación para un modelo de secado de materiales porosos, se explicaría el desarrollo de un efecto en cadena en donde el transporte de agua hacia la superficie es causado por un doble efecto

del **asentamiento y la capilaridad presión**.

Esta situación termina cuando los meniscos se mueven hacia los poros del hormigón. En este punto crítico, el hormigón es tan rígido que la presión capilar ya no puede comprimirlo verticalmente. Al mismo tiempo el asentamiento se detiene y el efecto de exudación del hormigón continúa únicamente con la contracción horizontal de la mezcla, debido a las crecientes tensiones de tracción inducidas por la presión capilar progresiva. Por lo tanto, cualquier otro movimiento de agua hacia la superficie del hormigón, proviene de los poros y es causado por la succión negativa producto de la presión capilar.

El proceso de secado mencionado anteriormente, representa a los materiales porosos químicamente inertes, sin lugar a ninguna reacción química (Ghourchian et al. 2018 [35]). Igualmente cabe aclarar que la capacidad de exudación, o sangrado del hormigón en general, disminuye gradualmente como resultado de la consolidación continua y la consiguiente pérdida de vías de drenaje entre la superficie y el interior del hormigón (Lura, et al., 2007), como también por la reducción de la permeabilidad intrínseca de la matriz a causa de la hidratación del hormigón (Ghourchian et al. 2018). En consecuencia, a diferencia de una superficie de agua libre, **la tasa de evaporación de los materiales cementicos disminuye gradualmente con el tiempo, incluso en condiciones ambientales constantes**.

Este efecto generalizado será función principalmente de la magnitud de la exudación producida inicialmente, como así también de las características de la mezcla, sus áridos componentes y de la geometría de las piezas a elaborar.

Debido a que las tasas de exudación varían de cero a más de 1,0 kg / m^2 hr, con el tiempo y normalmente no se miden, es común suponer un valor para la tasa crítica de evaporación. El valor citado con más frecuencia es 1,0 kg / m^2 hr. Pero en casos de mezclas de hormigón que incorporan cenizas volantes, humo de sílice o cementos finos, por ejemplo, suelen tener una tasa de exudación baja o insignificante, lo que hace que dichas mezclas sean muy sensibles al secado superficial y la contracción plástica, incluso en condiciones de evaporación moderada (ACI 234R [36]).

3.3. FISURACIÓN PLÁSTICA

La contracción plástica se define en la literatura como la contracción del hormigón fresco, expuesto al secado, que tiene lugar durante el tiempo en que el hormigón es "plástico", véase, p. Neville (2000) [37]. La duración suele ser corta y finaliza cuando el hormigón ha fraguado por completo, debido a la toma de resistencia que resiste las tensiones de la fisura.

Si la contracción no es uniforme, o si hay restricción, se desarrollan tensiones de tracción que pueden provocar grietas, ya que el hormigón tiene una resistencia a la tracción y una capacidad de deformación bajas en esta etapa plástica. Estas grietas se denominan generalmente “grietas por contracción plástica” y pueden ser o no perjudiciales para la integridad estructural y la durabilidad. De igual manera resultan antiestéticas ya que generalmente son anchas, largas y visibles a simple vista. Además, no es raro, especialmente en losas, que estas grietas atraviesen toda la profundidad del elemento.

El proceso de contracción plástica en una mezcla de hormigón en estado fresco se ilustra en el Gráfico 3.5. En el momento inmediatamente después del colado, las partículas sólidas de la mezcla se asientan por gravedad. En consecuencia, parte del agua de la mezcla fuera del sistema de poros hacia la superficie del hormigón, acción que también se conoce como “sangrado” o “exudación” (Lura, et al., 2007). Esta lámina de agua que se forma sobre el hormigón, **si es controlada**, prevendrá el secado y garantiza que la mezcla tendrá suficiente humedad para hidratarse. Así mismo hay que tener en cuenta que pueden existir factores externos que influyan sobre esta “capa protectora” en forma de perdidas, de estas posibles causas la perdida más común, cuando se habla de climas cálidos, es la **evaporación**.

Estudios demuestran que los factores ambientales que promueven las grietas en edades tempranas son la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa. Estos factores, junto con la temperatura del hormigón, gobiernan la tasa de evaporación del hormigón.

De esta forma, si la tasa de sangrado es mayor que la tasa de evaporación, el agua se acumula y forma una fina capa en la superficie del hormigón. Una vez que la tasa de evaporación excede la tasa de sangrado, esta agua la película comienza a disminuir, hasta que desaparece por completo y la superficie de hormigón está seca. En este punto, se alcanza el tiempo de secado, y el hormigón entra en el llamado estado de secado (Lura, et al., 2007). El agua capilar comienza a evaporarse y se forman meniscos de agua en los poros superficiales del hormigón. Este es también el momento en el que comienza a acumularse una presión capilar negativa, consulte Gráfico 3.5..

Entonces el asentamiento inducido por la gravedad de las partículas sólidas es impulsado por la tensión originada por la presión capilar en el sistema de poros (Leeman, et al., 2014 [38]). El asentamiento se reduce y eventualmente se detiene debido a la pérdida de trabajabilidad, que a su vez es causada por la progresión de presiones y solidificación en los poros. En cambio, la contracción horizontal continúa y, por lo tanto, toda la masa de hormigón se contrae. En consecuencia, los poros se vuelven más finos y más agua capilar se mueve hacia la superficie del hormigón, debido al aumento del valor absoluto de la presión intrínseca (Slowik, et al., 2008 [39]). Estas fuerzas capilares están en proporción inversa al radio del menisco y aumentarán con la disminución de los espacios entre partículas (bajo w/b, alta finura, etc.). Por lo tanto, cuando la

curvatura de los poros aumenta a medida que la evaporación subsiste, se alcanzara en cierta instancia un valor final de rotura del menisco, por donde penetra el aire.

Si ahora, el hormigón está restringido de alguna manera (por ejemplo, por el molde, el refuerzo, el cambio de la sección profundidad, restricción interna, etc.), las tensiones de tracción surgirán en la masa de hormigón (Slowik & Schmidt, 2013 [40]). Si estos esfuerzos exceden la baja resistencia a la tracción del hormigón plástico, el agrietamiento puede producirse, en los poros vacíos por donde ha penetrado el aire.

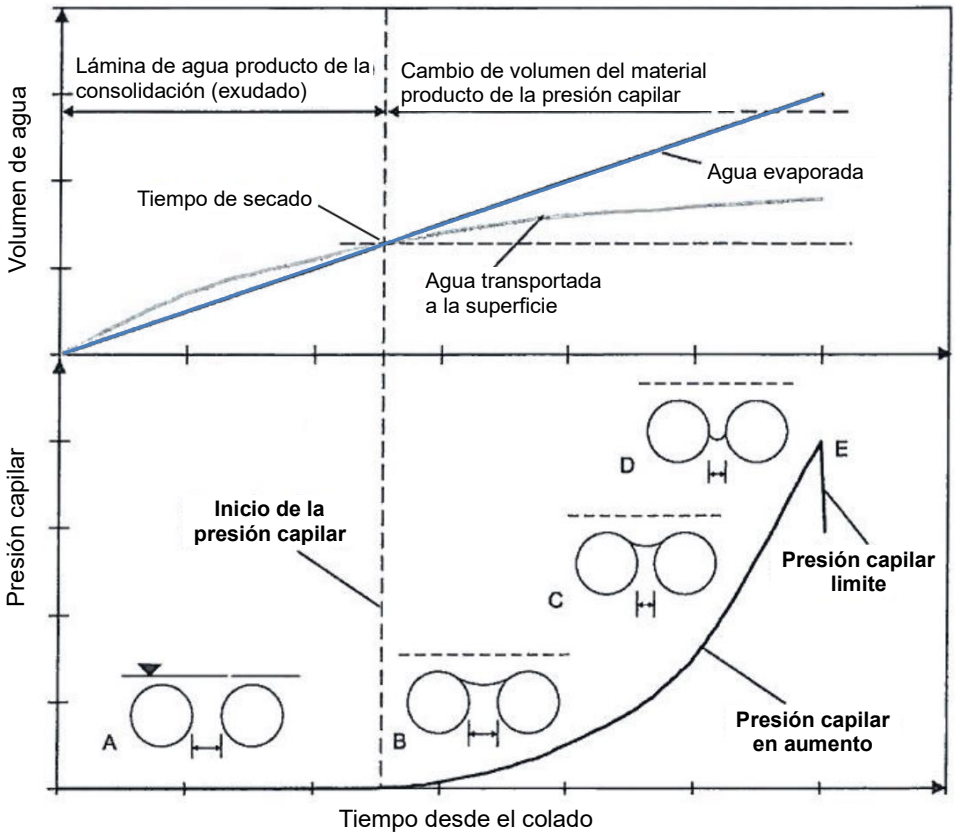


Gráfico 3.5. Mecanismo de formación de la presión capilar y la consecuente retracción plástica en el hormigón, (Schmidt & Slowik, 2013)

La teoría prevaleciente es que la contracción plástica es causada directamente por la evaporación del agua de la superficie del hormigón. Las observaciones prácticas respaldan la teoría de la contracción plástica, ya que las grietas tienden a ocurrir en condiciones climáticas cálidas, secas y ventosas, lo que lleva a un secado extenso del hormigón.

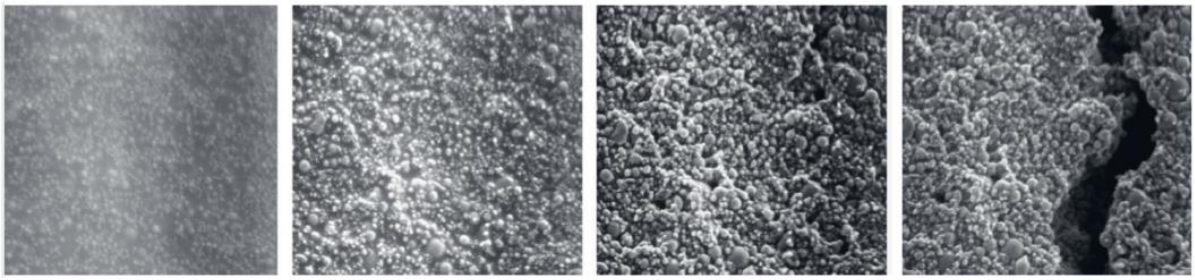


Imagen 3.3 Imágenes de microscopio electrónico de barrido de suspensión seca de cenizas volantes y agua, factor de aumento 300, (Slowik, et al. 2008).

Hay que tener en cuenta que, si en un hormigón donde se evita la evaporación, la presión capilar (negativa) comenzará a desarrollarse a medida que fragua el hormigón de forma natural. Cuando comienza a formarse un esqueleto sólido, la contracción química no se transforma totalmente en un cambio de volumen externo. Si se restringe el suministro de agua, se formarán poros vacíos dentro de la pasta y se producirá un menisco de aire-agua.

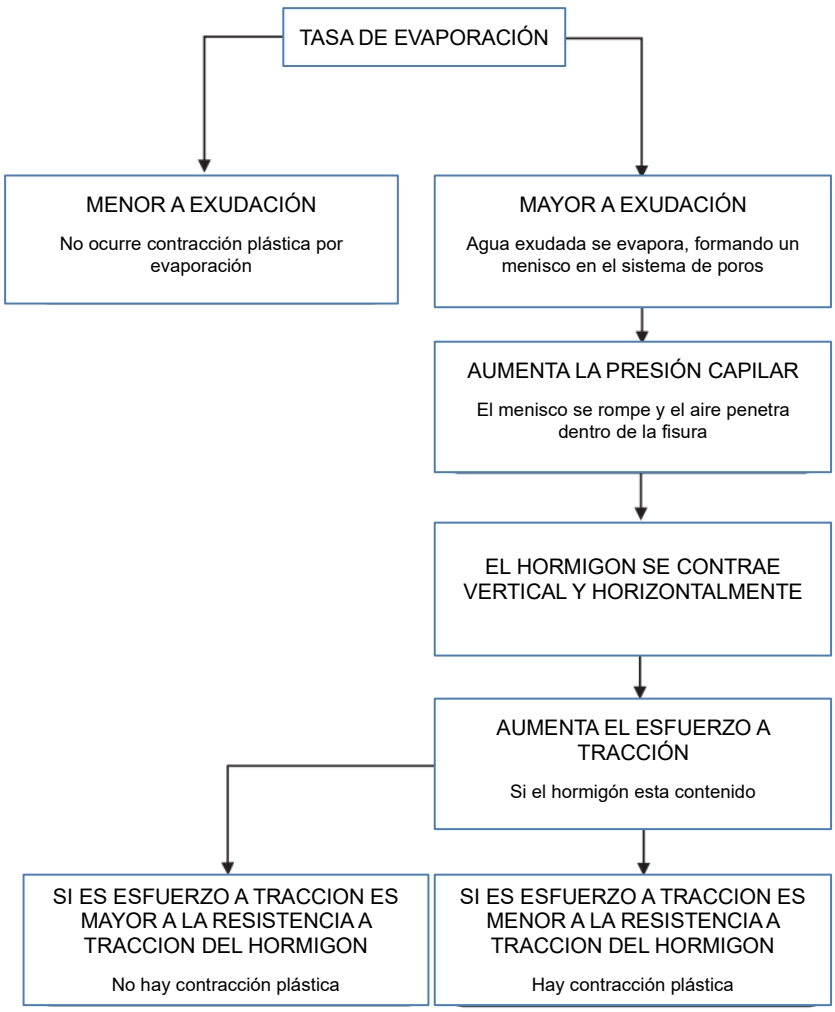


Gráfico 3.6. Proceso de contracción plástica, (Faez Sayahi 2019).

En consecuencia, los efectos de la contracción plástica pueden mitigarse mediante procesos de curado posteriores a la colada, que en general, se basan en la reducción de la evaporación de las aguas superficiales. De esta forma las medidas pueden ser, entre otras:

- Cubrir la superficie de hormigón con una lámina de plástico (Hedin, 1985 [41]). Además, los
- Colocar productos comerciales en forma membrana como la pulverización de alcoholes alifáticos sobre la superficie de hormigón fresco (Cordon & Thorpe 1965 [42]).
- Además, una barrera cortavientos puede prevenir o reducir el flujo de aire sobre la superficie de hormigón y, por lo tanto, disminuir la evaporación (Uno, 1998).

Por otro lado, compensar el agua evaporada rehumedeciendo la superficie de hormigón es otra forma de proteger el hormigón fresco contra el agrietamiento. Esto se puede realizar:

- Por un lado, reduce la tasa de evaporación al aumentar la humedad relativa ambiental (HR), y, por otro lado, reemplaza parte del agua superficial perdida (Slowik & Schmidt, 2010).

3.4. EFECTO SOBRE REVENIDO:

Se le llama **revenimiento** a la diferencia de altura que hay entre la parte superior del molde y la parte superior de la mezcla fresca cuando ésta se ha asentado después de retirar el molde. Esta distancia representa la **trabajabilidad** de una mezcla de hormigón y es muy necesaria para manipular el hormigón, tanto en obra o en planta, y lograr los resultados geométricos buscados de la pieza a elaborar.

Dentro de los factores principales que influyen en esta propiedad se tiene: relación a/c y porcentaje de cemento hidratado de la mezcla.

Por un lado, se ha hablado que la hidratación del cemento progresa con el tiempo, de forma que las reacciones químicas van fijando el agua de amasado y aumentan progresivamente la viscosidad de la mezcla hasta que el material comienza a comportarse como un seudo sólido. La velocidad de estas reacciones químicas aumenta con la temperatura a razón aproximada del doble por cada aumento de temperatura en 10°C. Razón por la que los efectos de los climas calurosos se notan en la toma de resistencia temprana de la mezcla.

Por otro lado, otros factores como el grado de **saturación de los agregados**, que en tiempos cálidos es supuesto bajo, y la **evaporación**; influirán sobre la relación a/c, volviendo la mezcla más "densa" y difícil de trabajar, disminuyendo al mismo tiempo, el agua disponible para la hidratación del cemento modificando posiblemente la resistencia de diseño del hormigón.

Estos conceptos permiten explicar el comportamiento del hormigón durante su manipuleo hasta completar su colocación, compactación y terminación superficial en situaciones climáticas extremas. En dicha situación, tanto el transcurso del tiempo, como el aumento de la temperatura de la mezcla y/o ambiente, disminuirán entonces, la cantidad de agua libre que otorga movilidad a la mezcla y consecuentemente disminuye la trabajabilidad del hormigón fresco. Por otra parte, a medida que aumenta la temperatura ambiente será mayor la cantidad de agua de mezclado necesaria para obtener una determinada trabajabilidad. También se incrementa la cantidad de agua de mezclado requerida para producir una determinada variación de la trabajabilidad.

Por estas razones se puede señalar que durante el periodo en que el hormigón se encuentra en un estado fluido, habrá una disminución continua de su trabajabilidad, que es mayor en la primera media hora luego del mezclado y después continua en forma casi lineal en el tiempo.

La velocidad de perdida de trabajabilidad es menor en mezclas con bajo contenido de cemento o altas razones de a/c y se incrementa a medida que aumenta la temperatura del hormigón. En caso de hormigones elaborados para obras, es importante que la mezcla fresca posea la trabajabilidad requerida en el momento de llegar al pie de obra. De lo contrario se deberá prever la opción de remezclar con un agregado de agua para restaurar parte de la misma. En caso de no estudiar correctamente el uso de esta opción, la mala práctica del remezclado con agregado de agua, puede generar problemas secundarios no deseados.

Finalmente, en cualquier caso, se puede evitar que los tiempos de fragüe se reduzcan si se emplean **retardadores de fragüe** que permitirán naturalizar la perdida de trabajabilidad producto de estas condiciones ambientales extremas.

3.5. EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA:

El hormigón mezclado, colocado y curado a temperaturas elevadas normalmente desarrolla una resistencia inicial más alta que el hormigón producido y curado y temperaturas más bajas, pero las resistencias son generalmente más bajas a los 28 días en edades posteriores. El Gráfico 3.7 muestra que, con el aumento de las temperaturas de curado, la resistencia a 1 día aumenta y la resistencia a 28 días disminuye (Klieger 1958 [43]; Verbeck y Helmuth 1968).

Esto ocurre por tres razones elementales:

- La temperatura inicial externa favorece el crecimiento rápido de los productos de hidratación en la superficie, durante la etapa inicial de fragüe. Esto resulta en un desarrollo de una microestructura inestable y débil, en comparación a las mezclas que fraguan en temperaturas normales.
- La reducción del tiempo de fragüe, que genera el desarrollo de una estructura irregular en la pasta de hormigón, desarrollando las reacciones químicas en puntos con mayor temperatura, acabando los reactivos para que otras zonas de la mezcla se desarrollen de igual forma.
- La variación de la relación agua-cemento que imposibilita la hidratación total de la mezcla.

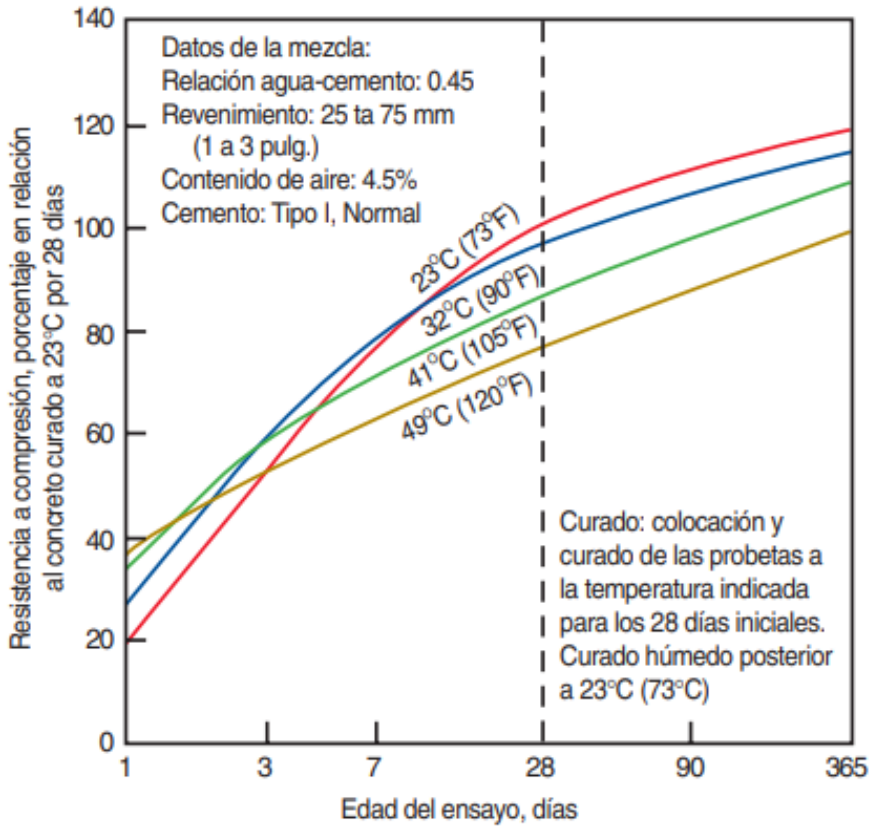


Gráfico 3.7. Efecto de las temperaturas elevadas del hormigón sobre la resistencia a compresión en varias edades (Diseño y Control de Mezclas de Concrete, ACI, basado de Klieger 1958)

Algunos investigadores concluyen que una microestructura relativamente más uniforme de la pasta de cemento hidratada puede ser responsable de una mayor resistencia de las mezclas de hormigón colado y curado a temperaturas más bajas. Los aditivos retardadores deben estar de acuerdo con los requisitos de ASTM C 494 [44], AASHTO M 194 (tipo B) [45], COVENIN 0356 [46], IRAM 1663 [47], NCh2182.Of1995 [48], NMX-C255 [49], NTC 1299 (tipo B) [50], etc.

Estas teorías fueron presentadas a lo largo de muchos años, Prien (1951); Verbeck and Helmuth (1968); etc. Los mismos señalan que altas temperaturas presentes durante las edades tempranas del mezclado y colado del hormigón aceleran el proceso de hidratación influenciando positivamente la resistencia temprana del hormigón. Por otra parte, los mismos condicionantes de este efecto, también influyen en el proceso **fragüe**, afectando la microestructura del hormigón hidratado que, a su vez, evoluciona negativamente con respecto a la resistencia final del hormigón.

3.6. EFECTOS DE UN CURADO APROPIADO

Resultados de laboratorio han demostrado que los resultados negativos por altas temperaturas en la resistencia final del hormigón, se repiten para ensayos de piezas a las cuales no se le fue realizado un curado apropiado. Esto se demuestra con la reducción de resistencia para muestras cilíndricas en función del tiempo en el cual las mismas son colocadas en un medio húmedo para su almacenamiento, previo a sus testeos. Los datos ilustran que el curado inadecuado combinado con altas temperaturas de colocación perjudica el proceso de hidratación y reduce la resistencia.

Al hablar del curado en climas calurosos como procedimiento básico se debe aplicar agua encima de la superficie expuesta, permitiendo disminuir los efectos de la evaporación sobre la misma. El agua de curado, a su vez, no puede estar 11°C (20°F) más fría que el hormigón debido a que la diferencia de temperatura puede causar problemas de fisuración por tensiones térmicas de contracción térmica en el hormigón endurecido o en superficies planas.

La necesidad de curado húmedo es mayor durante las primeras horas después del acabado. Para prevenir el secado de las superficies expuestas, el curado húmedo debe comenzar tan pronto como se haya realizado el acabado superficial y debe continuar por lo menos por 24 horas (periodo durante el cual el fragüe del hormigón tiene mayor protagonismo) y en clima caluroso, es preferible que dure aún más tiempo. Sin embargo, otras medidas complementarias pueden establecerse como, mientras la superficie aún está húmeda, proteger el hormigón del secado a través de papel para curado, lámina plástica que refleja el calor o compuestos de curado formadores de membrana.

así mismo una vez terminado el proceso de curado las superficies curadas húmedas se deben secar lentamente después del periodo de curado para reducir las posibilidades de fisuración y afogarado de la superficie.

Como conclusión las medidas a seguir para un curado correcto que busque evitar o disminuir los efectos de un clima caluroso pueden ser:

a) Levantar los parabrisas temporarios para reducir la velocidad del viento sobre la superficie del hormigón.

b) Levantar sombrillas temporarias para reducir la temperatura sobre la superficie del hormigón.
c) Proteger el hormigón con cubiertas temporarias, tales como los forros de polietileno, durante cualquier retraso significativo entre la colocación y el acabado.
d) Rociar la losa inmediatamente después de la colocación y antes del acabado, tomando cuidado para prevenir la acumulación de agua que reduce la calidad de la pasta de cemento en la superficie de la losa.
e) Adicionar fibras plásticas a la mezcla de hormigón para ayudar a disminuir la formación de fisuras plásticas.

Dichas medidas se siguen actualmente en la Argentina, junto con otros ejemplos de los cuales se habló más en detalle en el Capítulo II.

4. CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y MATERIALES DE TRABAJO

4.1. INTRODUCCIÓN

El diseño de hormigones comprende básicamente realizar una mezcla de dos componentes esenciales: agregados y pasta (Kosmatka, 2002). La pasta está compuesta por cemento portland, agua y ocasionalmente aditivos; mientras que los agregados unidos por esta pasta, normalmente se denominan como arenas (áridos finos) y rocas (áridos gruesos).

Ambos componentes mezclados recrean una masa que en su estado fresco puede ser moldeada a fin que en un determinado tiempo de secado, fragüe, se puede contar con un nuevo material sólido de características propias ya consolidadas.

A continuación, se define un plan de trabajo desarrollado en cinco etapas.

La primera de ellas consiste en la obtención e identificación de la materia prima procedente del medio local/ regional de la industria de la construcción. El material será seleccionado mediante un protocolo que permita establecer sus características principales. Además, en esta primera etapa,

deberá acondicionarse el lugar físico, Laboratorio de Materiales de UCC[5] y/o Laboratorio de Materiales de Astori Estructuras[6], para realizar los diferentes ensayos de las futuras etapas.

La segunda fase consiste en el procesamiento de la materia prima, caracterización de los áridos, entre otros ensayos, obteniendo así la información necesaria para la elaboración de un hormigón a utilizar en etapas posteriores y de interés al estudio e hipótesis formulada.

La tercera etapa consiste en definir el hormigón patrón, verificando que cumplen con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201.2005, en su determinación de las propiedades físico-mecánicas.

La cuarta etapa consiste en generar diferentes mezclas (hormigones en repetición) evaluando en estado fresco y endurecido sus propiedades con el fin de determinar sus características y su comportamiento. Esta evaluación se realizará con ensayos de temperatura, asentamiento, densidad, porcentaje de vacíos, carga a compresión, vista microscópica de falla, etc.

La quinta y última etapa será discutir los resultados y plantear las conclusiones: en esta etapa se interpretará los resultados obtenidos en las prácticas de laboratorio. Se procederá a la elaboración de informes y la presentación de los mismos en dos congresos naciones/ internacionales referidos a la temática.

4.2. MATERIALES

El presente estudio comprende dos etapas.

La primera etapa se desarrolló íntegramente en el laboratorio con ensayos normalizados para la caracterización la materia prima, la dosificación de un hormigón H-45 y su caracterización en estado fresco y endurecido para temperaturas menores a 30 °C.

El Hormigón como material es una mezcla homogénea compuesta por una pasta de cemento portland y agua, con agregados gruesos y finos, que en estado fresco tiene cohesión y trabajabilidad, y que luego por el fraguado y endurecimiento de la pasta cementica, adquiere resistencia. Además de estos componentes básicos, también puede contener aditivos químicos y/o adiciones minerales pulverulentas.

Para la fabricación del hormigón (pastones de prueba) se empleó:

1) CEMENTO PORTLAND DEL CPN50

[5] Universidad Católica de Córdoba, Argentina

[6] Astori Estructuras S.A. es una empresa industrial especializada en la construcción y montaje de estructuras prefabricadas en hormigón armado

El cemento utilizado responde a la Norma IRAM 50000 [51] y 50001 [52], Se utilizará como primera opción: Cemento CPN50, proveedor: Avellaneda, cuyo Protocolo de Calidad y Certificado INTI se adjunta en ANEXO IV.

2) ÁRIDOS NATURALES

Se pueden diferenciar en dos fracciones, una fracción gruesa (rocas trituradas) correspondiente a un tamaño mayor a 4 mm y tamaño máximo a determinar en mm, y una fracción fina (arena) menor de 4 mm.

Los áridos utilizados para el desarrollo de este trabajo son agregados que se encuentran altamente disponibles de forma comercial para la ciudad de Córdoba. Respondiendo a las siguientes características:

A. AGREGADO FINO- ARENA PARANA.

- <u>Ensayos de Caracterización</u>

A continuación, en la Tabla 4.1. se detallarán resultados actualizados del agregado fino utilizado, realizados en laboratorios propios de ASTORI ESTRUCTURAS. En el Gráfico 4.1. se adjunta la curva granulométrica de la Arena Fina con las respectivas curvas límites según IRAM 1627 [53].

Tabla 4.1. Resultados de ensayos Arena Fina Paraná		
AGREGADO FINO	**TIPO: ARENA FINA PARANA**	
	ORIGEN DEL MATERIAL: SANTA FE Proveedor: Barranca Fighera/Santa Rosa	
ENSAYOS FISICOS	Unidad	RESULTADO
Módulo de Fineza	---	**1,71**
Densidad Relativa SSS (IRAM 1520 [54])	kg/m^3	**2,60**
P.U.V.S (IRAM 1548 [55])	kg/m^3	**1241**
P.U.V.C (IRAM 1548)	kg/m^3	**1383**
Absorción (IRAM 1520)	%	**0,20**
Pasante Tamiz 200 (IRAM 1540 [56])	%	**1.00**
Materia Orgánica (IRAM 1647 [57])	p.p.m.	**< 500**

- Curva granulométrica arena fina Paraná (IRAM 1505 [58] - IRAM 1627)

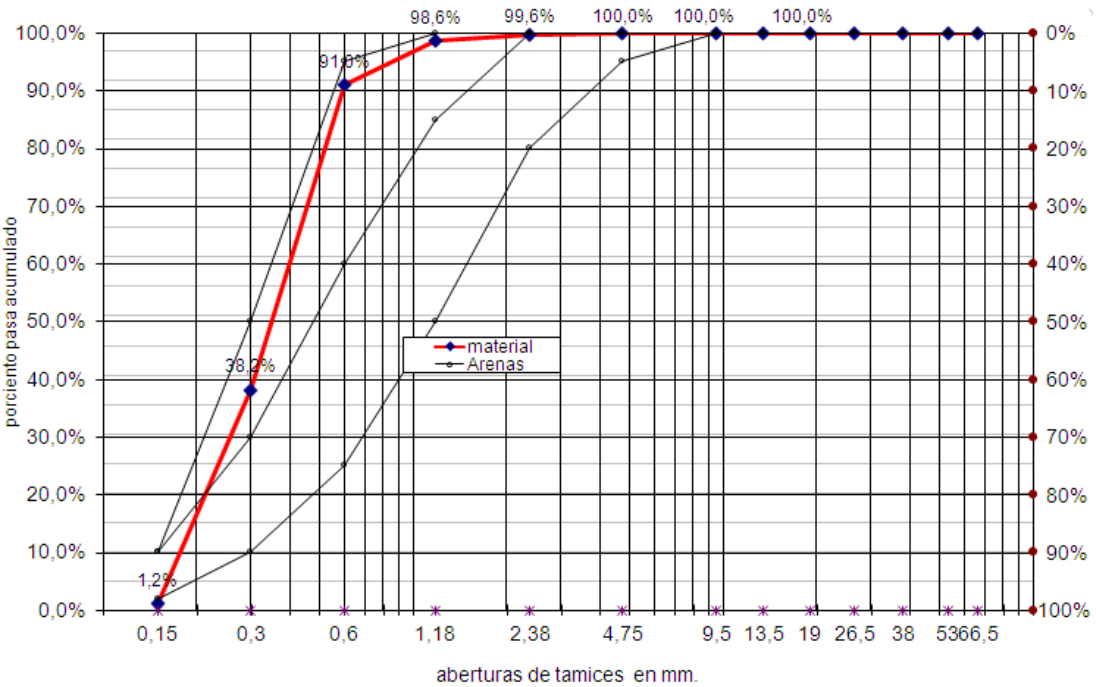


Gráfico 4.1. Curva Granulométrica Arena Fina Paraná.

B. AGREGADO FINO- ARENA GRUESA

- Ensayos de Caracterización

A continuación (Tabla 4.2.) se detallarán resultados actualizados del agregado grueso utilizado, realizados en laboratorios propios de ASTORI ESTRUCTURAS. En el Gráfico 4.2. se adjunta la curva granulométrica de la Arena Gruesa con las respectivas curvas límites según IRAM 1627.

Tabla 4.2. Resultados de ensayos Arena Gruesa Lavada

AGREGADO FINO	**TIPO: ARENA GRUESA LAVADA**	
	ORIGEN DEL MATERIAL: RIO PRIMERO Proveedor: Pieracord	
ENSAYOS FISICOS	Unidad	RESULTADO
Módulo de Fineza	---	**3.45**
Densidad Relativa sss (IRAM 1520)	kg/m^3	**2,60**
P.U.V.S (IRAM 1548)	kg/m^3	**1302**
P.U.V.C (IRAM 1548)	kg/m^3	**1471**
Absorción (IRAM 1520)	%	**0,9**
Pasante Tamiz 200 (IRAM 1540)	%	**0,2**
Materia Orgánica (IRAM 1647)	p.p.m.	**< 500**

- Curva granulométrica arena gruesa (IRAM 1505- IRAM 1627)

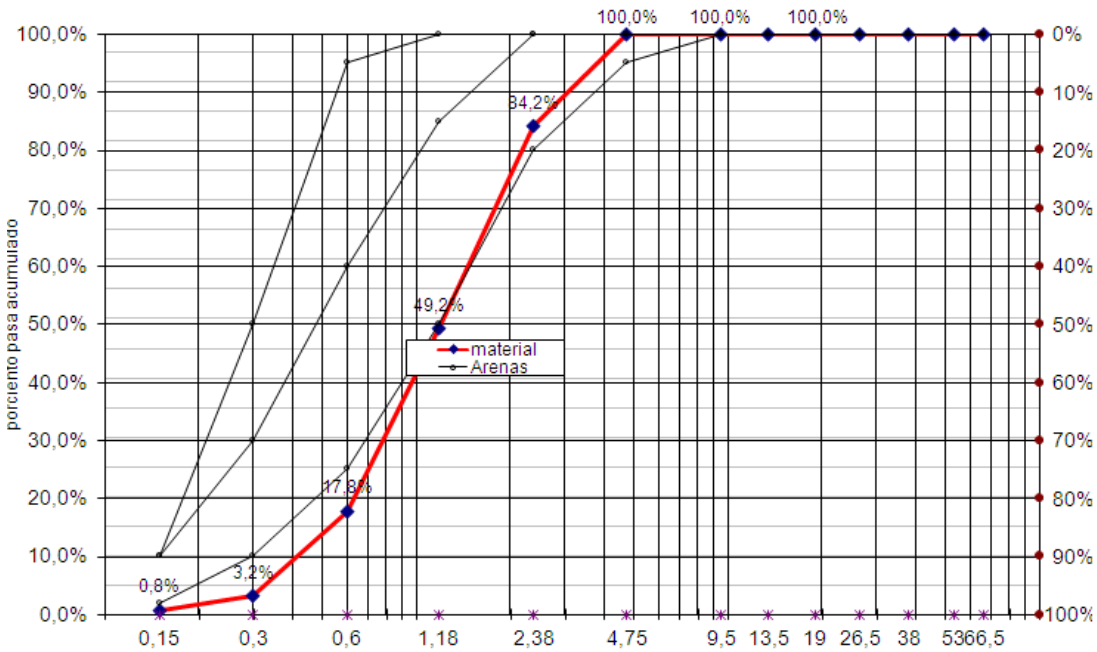


Gráfico 4.2. Curva Granulométrica Arena Gruesa.

C. AGREGADO GRUESO

- Ensayos de Caracterización

A continuación (Tabla 4.3. y Gráfico 4.3.) se detallarán resultados actualizados del Agregado Grueso utilizado, realizados en laboratorios propios de ASTORI ESTRUCTURAS.

Tabla 4.3. Resultados de ensayos Triturado 6-13

AGREGADO GRUESO	**TIPO: TRITURADO 6-13 mm**	
	ORIGEN DEL MATERIAL: LA CALERA Proveedor: Cantesur	
ENSAYOS FISICOS	Unidad	RESULTADO
Módulo de Fineza	---	**6,23**
Densidad Relativa SSS (IRAM 1533 [59])	kg/m^3	**2,74**
P.U.V.S (IRAM 1548)	kg/m^3	**1431**
P.U.V.C (IRAM 1548)	kg/m^3	**1563**
Absorción (IRAM 1533)	%	**0,5**
Pasante Tamiz 200 (IRAM 1540)	%	**0,4**
Tamaño Máximo Nominal*	mm	**13**

**El tamaño máximo nominal del agregado grueso cumple con lo especificado en Cirsoc 201-2005 Art. 3.2.4.2.c [60].*

- Curva granulométrica agregado grueso (IRAM 1505- IRAM 1627)

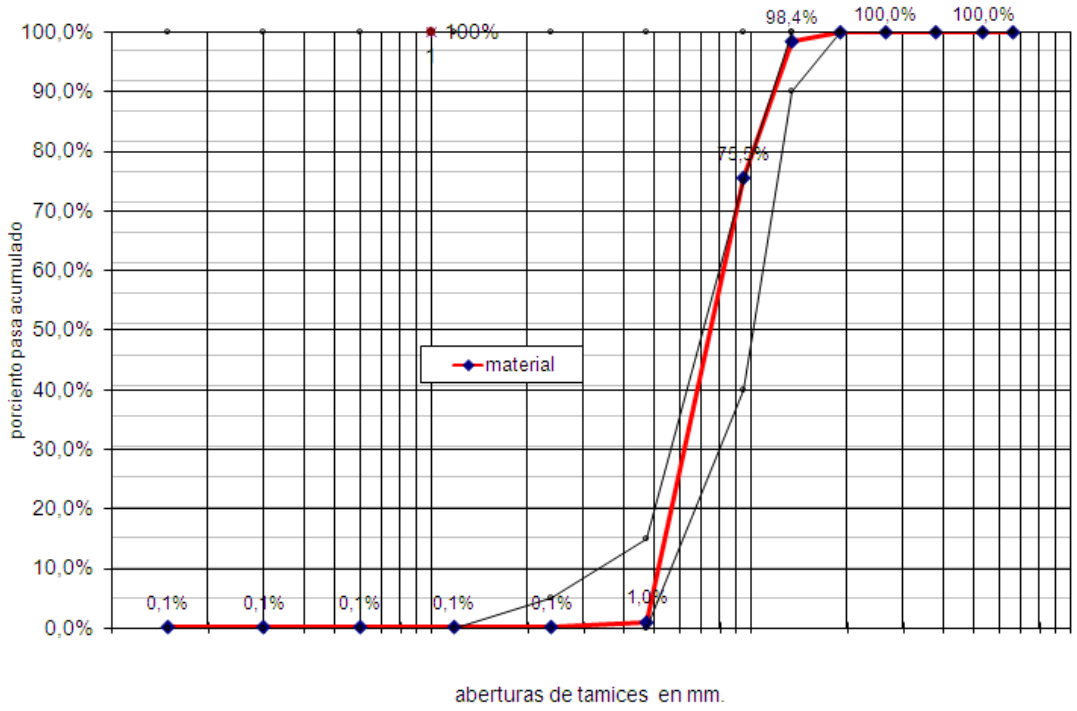


Gráfico 4.3. Curva Granulométrica Agregado Grueso.

- <u>Ensayos Realizados en Laboratorios externos.</u>

Tabla 4.4. Resultados de ensayos Triturado 6-13

AGREGADO GRUESO	**TIPO: TRITURADO 6-13 mm**	
	ORIGEN DEL MATERIAL: LA CALERA Proveedor: Cantesur	
ENSAYOS FISICOS	Unidad	RESULTADO
Sulfato (Expresado como S03) (IRAM 1647)	g/100g	**0.01**
Sales solubles (IRAM 1647)	g/100g	**<0.01**
Cloruros Solubles en Agua (CL-) (IRAM 1857 [61])	g/100g	**<0.01**
Desgaste Los Ángeles (IRAM 1532 [62])	%	**20.4**
Lajosidad (IRAM 1687/1)	%	**20**
Elongación (IRAM 1687/2)	%	**11**

D. ENSAYOS SOBRE AGREGADOS- R.A.S

En el ANEXO II se adjunta Examen RAS. De los resultados de dichos ensayos se detallan las conclusiones siguientes:

- Muestra 1: ARENA FINA PARANA

Comentarios Finales: "Según los datos obtenidos a nivel macroscópico, la Muestra 3 contiene 97,60% de cuarzo, 1,17% de chert/calcedonia y 0,73% de rocas volcánicas, junto a otras litologías minoritarias (<1%). A su vez, según el estudio microscópico la fracción retenida en el tamiz N° 50 (mayoritaria) contiene 96,8% de cuarzo (sin evidencia de deformación a nivel microscópico), 1,2% de chert (no se observó calcedonia bajo microscopio), 1% de rocas volcánicas y 1% de agregados graníticos. Tanto en el estudio bajo microscopio de la fracción mayoritaria como en el estudio ponderado en el total de la muestra, el contenido de chert + el potencial aporte de vidrio volcánico en las rocas volcánicas se encuentra por debajo del 3%, por lo que su contenido está dentro de los límites establecidos por norma. Teniendo en cuenta estos resultados, **la arena fina es apta para ser utilizada como agregado fino para hormigón según el Reglamento CIRSOC 201-2005 y la Norma IRAM 1512 [63], desde el punto de vista petrográfico."**

El ensayo completo se adjunta en ANEXO II.

- Muestra 2: ARENA GRUESA LAVADA

Comentarios Finales: "Según los datos obtenidos a nivel macroscópico, la Muestra 2 contiene 58,51% de cuarzo, 11,49% de feldespatos, 22,15% de agregados graníticos (sin evidencia de marcada deformación a nivel macroscópico), 3,52% de agregados gnéisicos y 2,61% de micas, junto con otras litologías minoritarias (<1%). A su vez, según el estudio microscópico la fracción retenida en el Tamiz Nº16 (mayoritaria) contiene 52,4% de cuarzo. 13,2% de feldespatos, 24,1% de agregados graníticos, 7,6% de agregados gnéisicos y 1,6% de anfibolitas + anfibol, junto a otras litologías minoritarias (<1%). Si bien se detectó 7,6% de agregados gnéisicos en el examen bajo microscópico en la fracción mayoritaria, el ponderado sobre el total de la muestra es <5% por lo que el aporte de cuarzo fuertemente tensionado o micro-cristalino por re-cristalización está dentro de los límites establecidos por norma. Teniendo en cuenta estos resultados, **la arena gruesa es apta para ser utilizada como agregado fino para hormigón según el Reglamento CIRSOC 201-2005 y la Norma IRAM 1512, desde el punto de vista petrográfico."**

El ensayo completo se adjunta en ANEXO II.

- Muestra: TRITURADO PÉTREO 6-12

Comentarios Finales: “Según los datos obtenidos, la muestra proporcionada está compuesta de un 85,53% de ortogneises, 5,85% de esquistos, 5,78% de rocas ígneas, 1,55% de agregados con pátinas y 1,29% de gneises con granate. Ponderando el contenido de cuarzo tensionado en los tipos de agregados que lo contienen (Tipo 2 y 4) sobre el total del material suministrado, se determinó que la muestra de agregados contiene menos de 5% de cuarzo fuertemente tensionado, micro-fracturado o micro-cristalino (< 62 µm), no superando el límite propuesto en el Reglamento CIRSOC 201-2005 o la Norma IRAM 1531 [64] para utilizar este tipo de material como agregados para hormigón. Por lo tanto, la muestra de agregados suministrada puede ser utilizada sin restricciones por la RAS (reacción álcali-sílice).

Los ensayos completos se adjuntan en ANEXOS II.

3) AGUA

Utilizada en la fabricación y curado del hormigón, es potable, cumpliendo con todas las prescripciones señaladas en la normativa CIRSOC 201-2005 de aplicación.

4) ADITIVOS

Pueden tener diferentes funciones: Reducir el agua de amasado, controlar la hidratación, aumentar la resistencia, etc.

En dicho caso en lo que respecta al aditivo empleado, se utilizó un fluidificante de última generación con fuerte reducción de agua. En el ANEXO V, se presenta el protocolo de caracterización del aditivo, información provista por el fabricante al momento de la ejecución de los ensayos.

El aditivo utilizado en la mezcla es un superplastificante SIKA VISCOCRETE 20HE, cuya ficha técnica se adjunta en el ANEXO V. El lugar de almacenaje asegura las condiciones previstas por el fabricante.

4.3. METODOS

4.3.1. CONTEXTO TEÓRICO

Dentro del análisis de un hormigón, el diagrama de tensión deformación es una de las variables que más influye en la definición de la capacidad portante de una sección de este. Esta a su vez se define por:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Módulo de elasticidad
- Deformación de rotura en compresión y tracción
- Parámetros de forma

Aunque estas características se consideren variables aleatorias, entre ellas existe un cierto grado de correlación estadística, que dependerá del contexto en el cual se enfoque el problema. En estos se pueden definir dos situaciones extremas:

1. Independencia estadística de las restantes características del diagrama con respecto a la resistencia de compresión.
   En este caso se elaboran un conjunto de elementos de hormigón con la misma resistencia media de compresión $\overline{\sigma}'_{bu}$, en las que las fuentes de aleatoriedad (como la naturaleza de los materiales, condiciones de elaboración y curado) se manifiestan libremente

2. Dependencia estadística perfecta de las restantes características del diagrama con respecto a la resistencia a compresión
   Este caso corresponde a una serie de elementos de hormigón con la misma resistencia media a compresión $\overline{\sigma}'_{bu}$, en que la naturaleza de los materiales y la tecnología de producción están bien definidas y son variables.

Ambos casos, han sido estudiado por diversas experiencias, de las cuales se puede observar que: aun cuando algunos parámetros se les pudiera atribuir una naturaleza determinística, los parámetros ε'_{bu}, ε_{bu} ,σ_{bu} muestran una clara correlación estadística respecto a la resistencia a compresión, en particular para las dos últimas.

Se destaca que los gráficos de tensión-deformación corresponden a determinaciones experimentales realizadas generalmente en el laboratorio, en condiciones que difieren sensiblemente de las que prevalecen en servicio. Destacando que es significativa la influencia que tiene la velocidad de aplicación y la repetición de las cargas sobre el diagrama de $\sigma - \varepsilon$ del hormigón, como también lo es, por otro lado, la variación de tensiones en la sección. Estas variables

afectan, además, de la forma del diagrama, principalmente el valor de la deformación de rotura ε'_{bu}. Similar a lo que ocurre en el caso de la tracción donde no solo σ_{bu}, sino también ε_{bu}, depende fuertemente de la variación de tensiones en el material.

No obstante, siempre es posible elegir una idealización del diagrama $\sigma - \varepsilon$ del hormigón, como las que han adoptado los diferentes reglamentes de estructuras de hormigón, en las cuales se acepta un diagrama parábola rectángulo como aproximación al comportamiento del hormigón en flexión a los fines del dimensionamiento. En la configuración del diagrama del CIRSOC 201.2005 se encuentran implícitas algunas suposiciones, por ejemplo, en el citado diagrama se está estableciendo, implícitamente, una correlación entre el módulo de elasticidad ε_b y el valor de cálculo de resistencia β_R, que es $\varepsilon_b = 1000 \cdot \beta_R$. Se supone, por ejemplo, que el valor de la deformación ultima ε'_{bu}posee deterministamente el valor de 3,5 0/00

La elección de un valor definido para ε'_{bu} proviene del criterio de rotura adoptado, que es evitar deformaciones excesivas y no refleja la naturaleza aleatoria de la verdadera deformación de rotura. En todo caso, dado que el hormigón presenta una importante rama descendiente en el diagrama real de $\sigma - \varepsilon$ y que la armadura transversal provoca un asentamiento significativo de su “ductilidad”, puede aceptarse que la probabilidad de que ε'_{bu} no alcance el valor de 3.5 0/00 en flexión es despreciable.

De acuerdo con las aproximaciones introducidas en la definición del diagrama idealizado, resulta que **la aleatoriedad del diagrama $\sigma - \varepsilon$ del hormigón quedaría definida exclusivamente por el carácter aleatorio de la resistencia a compresión en una estructura.**

4.3.1.1. DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES

Para el dimensionamiento de la estructura y de la especificación de los materiales, desde hace ya varios años se ha establecido el criterio del valor característico de la resistencia que corresponde al fractil del 5%. A los fines del estudio de la probabilidad de falla, no basta el conocimiento del valor característico real de la resistencia o tensión de fluencia, sino que se requiere un conocimiento más detallado de la totalidad de la distribución estadística, particularmente en la vecindad y por debajo del valor característico.

Una primera aproximación a la ley de distribución de dichas características mecánicas es la distribución normal, la que ha sido y es utilizada frecuentemente en los reglamentos de los materiales. La distribución normal puede aproximar aceptablemente la distribución real de la resistencia en el rango valor medio +- 2 veces la desviación normal, en particular si el coeficiente de variación es bajo (aproximadamente menor a 0.25). Sin embargo, la distribución normal no es

adecuada al aproximarse el extremo inferior de la distribución de resistencias, que es un determinante para evaluar el riesgo de falla de una estructura.

La razón fundamental de la deficiencia comentada de la distribución normal es que definida en el intervalo (-∞; +∞), mientras que la distribución real de resistencias de un material está acotada inferiormente en un valor nulo o cercano a cero. Esta deficiencia se agrava a medida que el coeficiente de variación aumenta de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de valores negativos en una distribución normal en función del coeficiente de variación; puede apreciarse que dicha probabilidad es baja para valores del coeficiente de variación de hasta 0.25, creciendo luego drásticamente.

Debido a esta limitación de la ley normal es que resulta más conveniente para ajustar dicho análisis con una ley matemática más apropiada, la distribución log-normal. Esta se utiliza para representar la distribución de resistencia y otras propiedades mecánicas de los materiales. Esta ley, definida en el intervalo de (0; +∞) está exenta de la limitación señalada para la ley normal. Sin embargo, esto significa que la distribución real de resistencias responde estrictamente a la ley log-normal, particularmente en el extremo inferior de la distribución, siendo suficientemente sencilla, constituye una mejor aproximación de la ley normal

Esta mejor aproximación se manifiesta en mayor medida cuando el coeficiente de variación aumente. Se observa que en todos los casos la distribución log-normal se ajusta mejor a los histogramas que la normal. Esto vale tanto para los estudios de probabilidad de falla, como para su incorporación en los criterios de aceptación y rechazo de materiales en los reglamentos.

El conocimiento que se posee sobre la distribución de resistencia de los materiales proviene, en su gran mayoría, de ensayos de probetas a los fines de control de producción o de aceptación de los mismos. Si bien esta información es de gran utilidad, intuitivamente se reconoce que la distribución de resistencia de esos mismos materiales colocados en la estructura puede diferir sensiblemente. Por ello, conviene establecer una diferenciación clara entre los conceptos de resistencia “convencional” y resistencia “efectiva”, valida tanto para el hormigón como para el acero.

- **La resistencia convencional** es aquella que se mide en forma estrictamente normalizada sobre probetas del material de estudio.

- **La resistencia efectiva** es la que participa en la capacidad portante de los elementos estructurales y puede diferir sensiblemente de la convencional. Esto es especialmente cierto para el hormigón.

Dado que la calidad de los materiales a emplear en las estructuras se especifica y controla en condiciones normalizadas (valores convencionales) y que la seguridad de la estructura depende de las resistencias “efectivas”, para conveniente identificar los factores que afectan las resistencias “efectivas”

4.3.1.2.CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN

La calidad del hormigón como se conoce se mide por la resistencia a compresión de cilindros (cubos en algunos países), moldeados con el hormigón fresco. Este cilindro se llena y compacta cuidadosamente en forma normalizada con una muestra extraída de un pastón, la que ha sido previamente homogenizada. Este cilindro será desmoldado a las 24 horas y conservado en un ambiente saturado de humedad con temperatura controlada hasta que alcanza la edad de ensayo, generalmente 28 días. El cilindro es encabezado y ensayado a la compresión axial en estado saturado de humedad. El resultado de este ensayo es lo que se designa como “resistencia convencional” y su objetivo es establecer un índice de la calidad del hormigón establecido. Es decir, indica la resistencia potencial que alcanzaría esa mezcla bajo condiciones casi óptimas de compactación y curado.

La distribución estadística de “resistencias convencionales” del hormigón producido señala exclusivamente la variación de calidad debido al proceso de elaboración. Esta variación es debida a imprecisiones en la medición de las cantidades de los materiales componentes, a variaciones en las características de los materiales componentes y variación de condiciones externas al cilindro durante esas primeras 24 horas, dependiendo de la eficiencia del control de calidad ejercida por el productor.

Dentro de los mismos aspectos mencionados sobre el proceso de elaboración, se destacan los efectos por las posibles variaciones de temperatura para las distintas muestras de pastones de prueba, correspondientes al tema en estudio. De aquí recordar que dicho factor climático, como ya fue mencionado en el capítulo anterior, tiene su mayor grado de incidencia dentro de las etapas de hidratación y fragüe del hormigón, que de igual manera mantiene un lapso de tiempo similar a al tiempo de desmolde de la probeta. Es decir, que las primeras 24 horas, previas al desmolde de una probeta cilíndrica contemplaría en su justa medida, los efectos adversos de las temperaturas extremas. Las cuales podrán ser interpretadas con los ensayos a compresión.

Por otro lado, la distribución estadística de “resistencias efectivas” del hormigón en la estructura, será la resultante de, por un lado, la distribución de “resistencias convencionales” originales y, por el otro, de todos los factores que intervienes entre el momento en que el hormigón es descargado

de la mezcladora hasta que alcanza la edad en que debe soportar las cargas. Dichos factores son, especialmente, de naturaleza aleatoria y puede considerarse que los principales son:

- Criterio de aceptación del hormigón.
- Condiciones de transporte, colocación y compactación.
- Condiciones climáticas (temperatura, viento, humedad, etc.).
- Efectividad del curado realizado.
- Edad y condiciones de protección.
- Tipo de solicitaciones aplicadas.
- Forma y tamaño del elemento.

En resumen, la resistencia a compresión, será el indicador por excelencia para determinar la calidad de una muestra en condiciones de laboratorio, afectadas según este estudio, a las temperaturas ambientales normales o extremas. Luego se deberán discutir las pautas a seguir para garantizar la correcta independencia a las demás variables con el fin de mantener dicha resistencia a lo largo de la vida útil de diseño.

4.3.2. RESISTENCIA CARACTERÍSTICA

La resistencia característica según la Norma IRAM 1666 es un "*valor estadístico de la resistencia a compresión que corresponde a la posibilidad de que una cierta porción de los resultados de la población, para una clase especifica de hormigón exceda dicho valor*."

Dicho fractil de resultados defectuosos estaba determinado por el reglamento CIRSOC 201-1982 [66] con un valor del 5%, y fue aumentando con la actualización del CIRSOC 201-2005 a un 10%.

La resistencia característica del hormigón puede calcularse con la siguiente formula:

$$\sigma`_{bk} = \sigma`_{bm} - K \cdot s \qquad \text{(Ec. 7)}$$

De donde

$$\sigma`_{bm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma`_{bi}}{n} \qquad \text{(Ec. 7.1)}$$

$\sigma`_{bm}$ =Resistencia promedio

$\sigma`_{bi}$ = Resistencia individual, es el valor que se obtiene como el promedio de las resistencias de 2, o más, probetas moldeadas con la misma muestra de hormigón y ensayadas a la misma edad

$n =$ Numero de ensayos

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\sigma`_{bi} - \sigma`_{bm})^2}{n`}} \qquad \text{(Ec. 7.2)}$$

$s =$ Deviación normal

$n` =$ Numero de ensayos (si n` < 30 $n \rightarrow n - 1$)

$K =$ Coeficiente estadístico dado por Tabla 4.5., correspondiente al porcentaje de que los resultados de que los ensayos arrojen resistencias menores que la resistencia característica especificada.

Tabla 4.5. Coeficiente estadístico K (Fuente Dosificación de hormigones para Bombas)

Por ciento del total de resultados de ensayos	k	
1	2,33	
2	2,05	
3	1,88	
4	1,75	
5	1,65	R. Viejo
6	1,56	
7	1,46	
8	1,41	
9	1,34	
10	1,28	R. Nuevo
15	1,04	
20	0,84	
25	0,67	
30	0,52	
35	0,39	
40	0,25	
45	0,13	

Por otro lado, la resistencia característica también se puede calcular en función del coeficiente de variación δ,

$$\sigma`_{bk} = \sigma`_{bm} \cdot (1 - K \cdot \delta) \qquad \text{(Ec. 8)}$$

De donde,

$$\delta = \frac{s}{\sigma`_{bm}}$$

$\delta =$ Coeficiente de variación

4.3.3. DOSIFICACIÓN DE MEZCLA

La dosificación del hormigón, al igual que el hormigón de base, se realizó mediante el Método Racional de dosificación. El mismo se desarrolla a continuación:

4.3.3.1. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN RACIONAL

El método racional se determinó en forma "teórica-experimental", mediante estudios y ensayos realizados en laboratorio. El mismo se basa en dos pilares fundamentales: la ley de la relación agua/ cemento y la ecuación volumétrica.

El método parte de una ecuación volumétrica a la que se iguala a 1000 litros, volumen total de la mezcla.

$$Vc + Vg + Vf + Vw + Va + Vaditivo = Vt = 1 \qquad \text{(Ec. 9)}$$

En donde:

$Vc = Pc.\delta c$

Vc: Volumen sólido de Cemento Portland

Pc: Peso del cemento portland [Kg/m^3]

δc: Densidad absoluta del cemento portland $= 3.15 \left[\frac{Kg}{lt}\right]$

$Vg = Pg.\delta g$ (Ec. 9.1)

Vg: Volumen solido del agregado grueso

Pg: Peso del agregado grueso [Kg/m^3]

δg: Densidad relativa del agregado grueso en condición saturado a superficie seca.

$Vf = Pf.\delta f$ (Ec. 9.2)

Vf: Volumen solido del agregado fino

Pf: Peso del agregado fino [Kg/m^3]

δf: Densidad relativa del agregado fino en condición de saturado a superficie seca.

$Vw = Pw.\delta w\ Pw$ (Ec. 9.3)

Vw: Volumen del agua de amasado

Pw: Peso del agua de amasado [Kg/m^3]

δw: Densidad absoluta del agua $= 1 \left[\frac{Kg}{lt}\right]$

Va: Volumen de aire incorporado

$Vaditivo = Pad.\delta ad$

Vad: Volumen del aditivo mineral pulverulento.

Pad: Peso de la adición mineral pulverulenta [Kg/m^3].

δad: Densidad absoluta de la adición mineral pulverulenta.

Vt: Volumen total de la mezcla igual a 1000 litros.

Dicha ecuación también puede ser expresada como:

$$Pc.\delta c + Pg.\delta g + Pf.\delta f + Pw.\delta w + Va + Pad.\delta ad = 1000 \quad \text{(Ec. 10)}$$

Para la resolución de esta ecuación se puede agregar que:

- La relación de mezcla está dada por:

$$\frac{Pf}{Pg} = \frac{X}{Y} \quad \text{(Ec. 11)}$$

Con lo que, despejando, se puede calcular el peso de los agregados finos en función de los agregados gruesos

$$Pf = x/y * Pg \quad \text{(Ec. 12)}$$

- El tenor cemento y la relación agua cemento para la mezcla será:

$$\frac{Pw}{Pc} = z \quad \text{(Ec. 12.1)}$$

Con estos datos, se puede calcular la cantidad de agua de mezcla en función de la cantidad de cemento y el tenor cemento.

$$Pw = Pc * z \qquad \text{(Ec. 13)}$$

Finalmente remplazando en la ecuación 111, se obtiene que:

$$Pg = [1000 - (Pc.\delta c + Pw + Va + Pad.\delta ad)]/[(1/\delta g) + (x/y).(1/\delta f)] \qquad \text{(Ec. 14)}$$

En el caso en que la mezcla de hormigón contenga aire incorporado y/o materiales pulverulentos, se deberían calcular también. Como la dosificación planteada no contiene estos materiales, los términos en las ecuaciones se simplifican.

En la Tabla 4.6. se observa la dosificación de los materiales en función del cálculo realizado con el método anteriormente descripto. Los pastones fueron realizados en laboratorio con respecto a un hormigón H-45 referencia.

Tabla 4.6. Dosificación H-45. Proporción de materiales

Material	Unidad	Cantidad
Cemento CP50 ARI	Kg/m³	410
Arena Gruesa Lavada	Kg/m³	528
Arena Fina Paraná	Kg/m³	418
Agr. Grueso 3-13	Kg/m³	899
Agua	Kg/m³	176
Aditivo	Kg/m³	2,2
Densidad teórica	Kg/m³	2424,2
Relación aproximada (a/c)	-	0,425
Extendido Teórico	cm	55

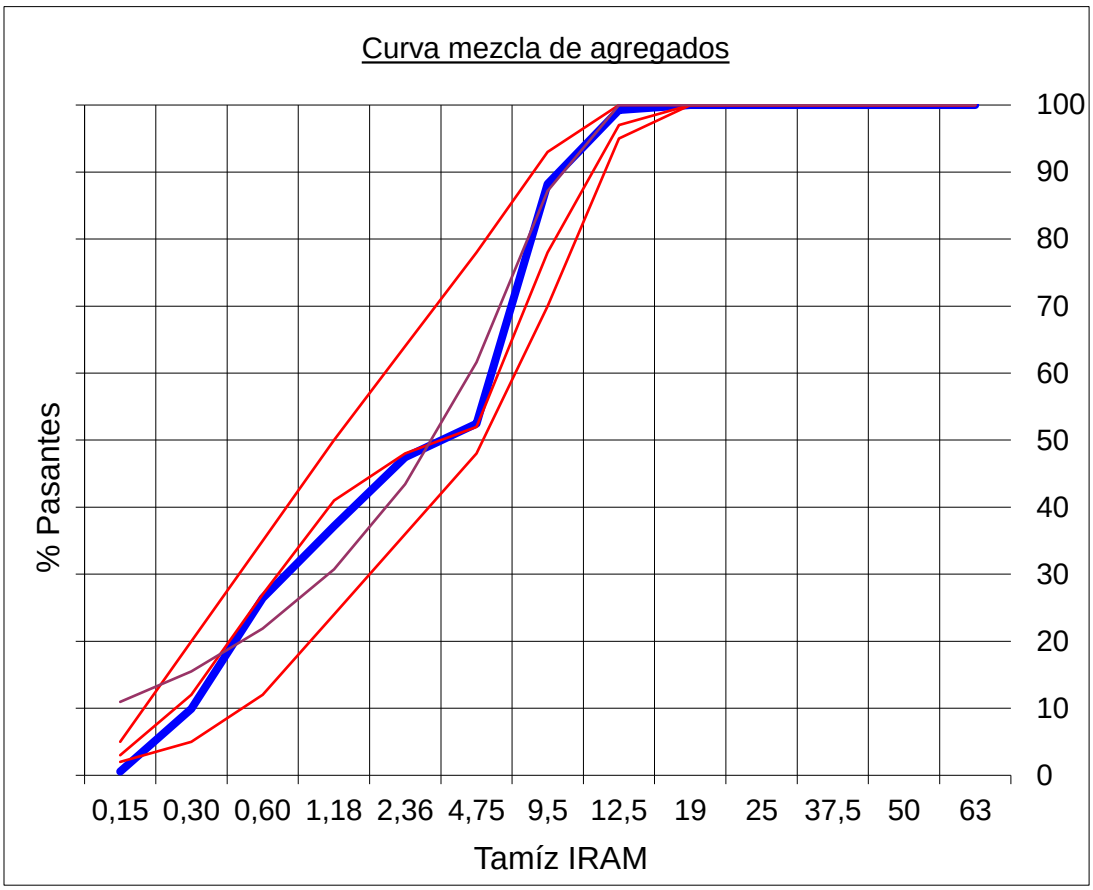


Gráfico 4.4. Curva Granulométrica de la mezcla.

4.3.4. PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Una vez determinados los pesos de los elementos constitutivos del hormigón, ver Tabla 4.6. Dosificación H-45. Proporción de materiales, se procedió a extraer el material de los silos de acopio y realizar pesadas proporcionales a cada material para las correspondientes muestras, más una cantidad de material para determinar la humedad del mismo y generar las correcciones correspondientes.

- Cemento

  Se extrajo de silo perfectamente hermético, y se procedió a pesar para la totalidad de los pastones propuestos, el objetivo es que el cemento sea de la misma partida para todos los pastones. Estas bolsas fueron etiquetadas y embaladas de forma tal que no ingrese humedad en las mismas.

- Áridos

Los áridos finos como los gruesos se retiraron del acopio de la empresa Astori Estructuras S.A, para ello, una vez obtenidos los pesos aproximados para cada pastón, se colocó en bolsas de plástico dejando alrededor de 5kg en exceso de cada material esto se realizó para determinar la humedad y realizar correcciones de ser necesario.

- Agua

  El agua utilizada fue de red, agua potable. La cantidad necesaria se dividió en dos recipientes en partes iguales para permitir la dilución del aditivo con el agua de mezclado.

- Aditivo químico

  Se colocó un vaso de precipitado sobre la balanza, se taró la misma se obtuvo el peso necesario.

4.3.5. PASTON DE PRUEBA

Una vez separados y pesados los materiales se procedió a la preparación de los pastones en una máquina hormigonera con una capacidad de 75 litros. Los pasos para realizarlo fueron los siguientes:

a) Antes de comenzar las tareas se procedió a humedecer la hormigonera, con agua, al igual que el resto de los elementos necesarios para hacer los ensayos en estado freso (cono de Abrams, bandeja para verter el hormigón, pala, balde de ensayo Washington, cuchara).
b) Luego se procedió a colocar los materiales, ya pesados, dentro de la hormigonera en orden granulométrico descendiente; primero el árido triturado, después la arena gruesa, la arena fina, el cemento, el agua con aditivo y sin aditivo químico, y finalmente el aditivo restante.
c) Una vez que los materiales fueron ingresados a la hormigonera se los mezclo por un lapso de 2 a 3 minutos, hasta que la mezcla fuese homogénea.
d) Se dejó reposar el hormigón por 1 minuto, mientras se le tomó la temperatura de la mezcla y la del ambiente expuesto.
e) El material se volcó sobre una bandeja. Sobre esta se procedió a uniformizar el material antes de los ensayos.

f) Posteriormente se ejecutó el ensayo del cono de Abrams para determinar el asentamiento de la mezcla, posteriormente densidad y aire incorporado con aparato Washington.
g) A continuación, se procedió al llenado de las probetas, para ensayos en estado endurecido, en moldes normalizados (diámetro: 15cm, altura: 30cm) más la aplicación de una película de aceite desmoldante para su posterior desmolde. El llenado de las probetas se ejecutó de igual manera que el ensayo de asentamiento, en tres capas iguales y compactando con una varilla de acero de en cada una de las capas con 25 golpes.

Los cilindros a ensayar se llenaron y compactaron siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 1534 [67], obviando las indicaciones generales de temperatura para los materiales componentes. A su vez, la muestra fue extraída de un pastón, que fue previamente homogenizado siguiendo las indicaciones de la norma IRAM 1541 [68]. Posteriormente se desmoldaron a las 24 horas y se conservaron en un ambiente saturado de humedad con temperatura controlada hasta que se alcanzó la edad de ensayo.

4.3.6. MUESTREO DE HORMIGON

La segunda etapa se planteó a escala industrial, procediendo con un plan de muestreo para el hormigón diseñado, generando las muestras en el **punto de entrega** (IRAM) e **inmediatamente antes de su descarga, colocación y compactación** (Vialidad Nacional) a fin de evaluar el hormigón en estado fresco y su evolución de resistencias a 3, 7 y 28 días.

La toma de muestra, del plan de muestreo, se realizó en el período estival de los años 2021-2022 en días consecutivos (130 días), generando 130 muestras, para las cuales se realizaron un total de 7 probetas para cada una de ellas. Las muestras, se clasificaron de acuerdo a la temperatura de colación en 5 tipos (Tabla 4.7.), y cada muestra fue considerada si y sólo si se verificaban las condiciones pautadas de acuerdo a los parámetros definidos en la Tabla 4.8., que permitió un tratamiento estadístico de los resultados.

Tabla 4.7. Clasificación de muestras por intervalos de temperatura.

Rango de Temperaturas	Tipo
Inferiores a 30 °C	A
Entre 30 °C y 32 °C	B
Entre 32 °C y 34 °C	C

Entre 34 °C y 36 °C	D
Mayores a 36 °C	E

Tabla 4.8. H-45. Ensayos sobre hormigón, parámetros y tolerancias.

Parámetro / Tipo		Norma IRAM de aplicación	H-45									
			A		B		C		D		E	
Temperatura Hº	[ºC]	1893 [69]	<	30	30	32	32	34	34	36	36	<
Asentamiento	[cm]	1536 [70]	55 +/- 5*									
Densidad	[kg/m^3]	1562 [71]	2424 +/- 40*									
Aire incorporado	[%]	1602 [72]	2 +/- 1*									

* Valores adoptados de acuerdo a la Tabla 4.9.. Resultados en ensayos hormigón fresco

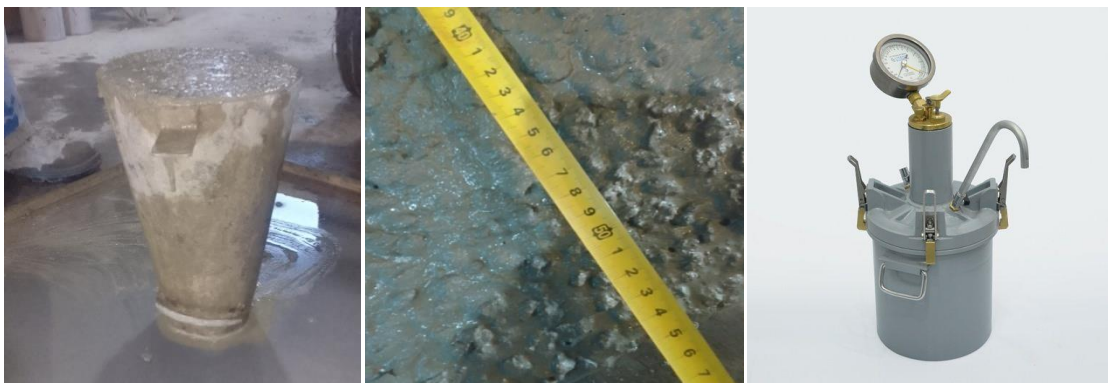
El control de hormigón se realizó de acuerdo al formulario FO-LA-009_Muestreo de Hormigón, con **una muestra de hormigón por día**. Luego en laboratorio se caracteriza el hormigón, según la dosificación Tabla 4.6. Dosificación H-45. Proporción de materiales, en estado fresco y endurecido a partir de los siguientes ensayos:

- <u>Hormigón fresco:</u>

  Asentamiento (Norma IRAM 1536)

  Densidad (Norma IRAM 1562)

  Aire Incorporado (Norma IRAM 1602).



Imágenes 4.1: a) Ensayo de extendido invertido con cono de Abrams. b) Aspecto del hormigón en estado fresco. c) Ensayo Washington

- Hormigón endurecido:

Compresión simple. Cada cilindro fue encabezado y ensayado a la compresión axial en su estado saturado de humedad, de acuerdo a la norma IRAM 1546 [73].

Imagen 4.2. Ensayo de compresión axial.

Tabla 4.9. Resultados en ensayos hormigón fresco.

Propiedad/ Hº	Unidad	Pastón 1	Pastón 2	Pastón 3	Pastón 4
Extendido	cm	51	50	55	54
Densidad	Kg/m³	2420	2430	2422	2426
Aire Incorporado	%	2	2	2	2
Temperatura	ºC	22	22,5	24	20

Tabla 4.10. Valores promedio de las resistencias en hormigón endurecido.

Ensayo Compresión Simple	Norma	Unidad	Resultado
3 días	IRAM 1546	MPa	40,5
7 días			46,7
28 días			56,2

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de los primeros 130 ensayos realizados, tanto los realizados en estado fresco y en estado endurecido. Se obviará en este capítulo la metodología de cada ensayo para enfocar el estudio en los resultados.

Se detallará a continuación los parámetros establecidos para el hormigón base. El mismo siguió los lineamientos del reglamento argentino, CIRSOC 201, a debatir, dentro del cual se hace especial hincapié en cumplir con los límites de temperatura de este.

Luego se realizará una comparativa con los demás resultados para los otros hormigones elaborados de manera similar, pero bajo condiciones acordes a las temperaturas naturales de elaboración, en este caso superiores.

Para su correcto análisis, todo el espectro de condiciones de temperatura diferentes, fuera de los limites normales, fueron separadas en rangos de 2 grados. Esto último con la intención estudiar los efectos reales de cada condición climática afectando a un elemento estructural de manera aislada. De manera contraria, se espera que un análisis global de cualquiera de las propiedades del hormigón, ya sea en estado fresco como endurecido, resultaría en una aprobación estadística de todos los valores actuando de forma conjunta, sin evaluar los efectos de cada situación por menor que sea su probabilidad de ocurrencia. Dicho de otra forma, el impacto de un bajo porcentaje de estados críticos es pequeño en comparación a la totalidad de las muestras estudiada, pero crítico para la elaboración de un elemento directamente dependiente de ella.

5.2. RESULTADOS

5.2.1. Temperatura

La recopilación de datos de temperaturas demuestra lo previsto en el análisis térmico anteriormente realizado para los hormigones elaborados en el contexto climático de Córdoba para los meses de enero y febrero.

Con estas condiciones climáticas existentes y sin ningún tipo de acción preventiva, o correctiva, para la disminución de temperatura de la mezcla de hormigón, se pudo observar claramente que las temperaturas de la mezcla sobrepasaron fácilmente los limites teóricos exigidos en un 72% de

los casos. Estos pastones fueron elaborados dos veces por día en los horarios de la mañana y la tarde.

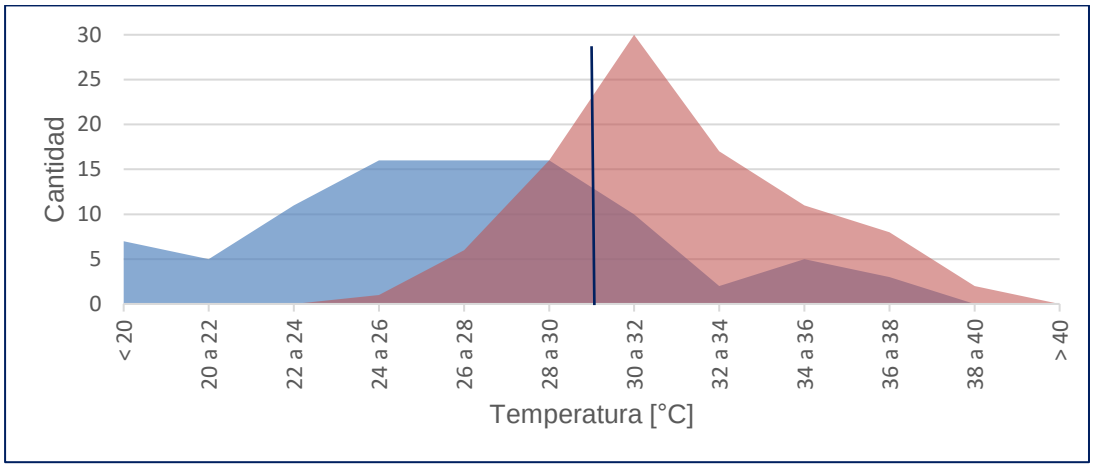


Gráfico 5.1. Temperatura ambiente – Temperatura del hormigón.

En general se observó que la temperatura de la mezcla de hormigón se elevó 5ºC por encima de la temperatura ambiente. Resultando en una variación de temperatura entre los 25 y los 38,8 grados.

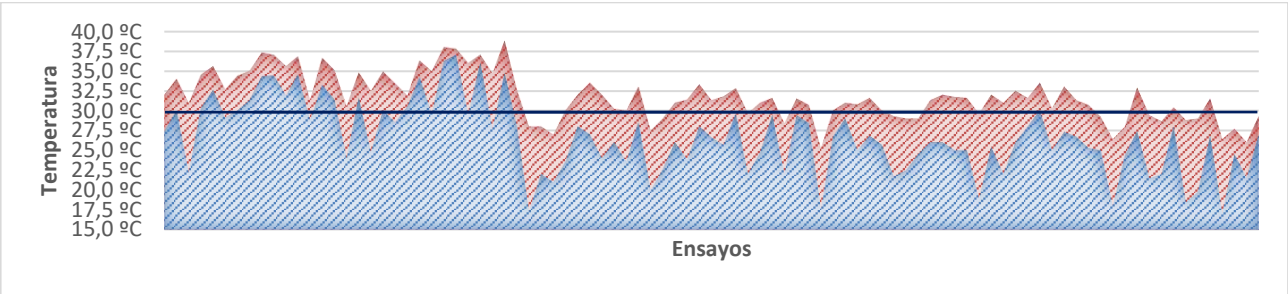


Gráfico 5.2. Temperatura ambiente – Temperatura del hormigón.

Como se previó, la temperatura se ordenó en rangos de 2°C de temperatura. Para cada uno de estos rangos, se vuelve lógico pensar que, si se mantienen similares estas condiciones iniciales, sus resultados se podrían unificar dentro de una situación específico para su estudio.

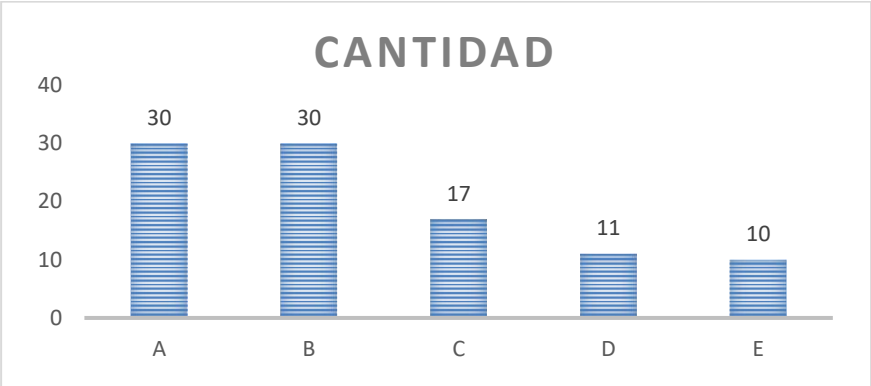


Gráfico 5.3. Cantidad de valor por tipo de hormigón

5.2.2. Resistencia a compresión

De los resultados obtenidos en los múltiples ensayos a la compresión, se puede calcular una resistencia característica global, la cual es la siguiente:

Tabla 5.1. Datos estadísticos

DATOS ESTADISTICOS	
Min	40,47
Max	63,23
Media	54,23
Desviación	5,14
Coeficiente de variación	0,09
Resistencia característica	45,75

Se puede observar cómo un estudio global de la resistencia característica devuelve un valor sobredimensionado de resistencia, valor a partir del cual, se puede realizar un cálculo inverso del factor K necesario para obtener una resistencia característica de 40 MPa. Este procedimiento se realizó utilizando la herramienta solver del programa Excel.

El análisis matemático de este factor devuelve un valor de **2,36** lo que equivaldría a un 0% de los resultados con resistencias menores que la resistencia característica especificada.

En las Tabla 5.2. y el

Tabla 5.3. se muestran los resultados para las 130 muestras agrupados por intervalos de temperaturas de acuerdo a lo establecido en la Tabla 4.7. Clasificación de muestras por intervalos de temperatura., de sus propiedades en estado fresco y endurecido.

Tabla 5.2.H-45. Resultados promedio de ensayos en estado fresco por tipo.

Parámetro \ Tipo		H-45				
		A	B	C	D	E
		< 30	30 < x < 32	32 < x < 34	34 < x < 36	36 <
Número de muestras		20	30	28	26	18
Extendido	[cm]	54	52	52	53	53,5
Densidad	[kg/m^3]	2461	2458	2455	2455	2452
Aire incorporado	[%]	1,9	1,8	2,1	1,6	1,7

Tabla 5.3. H-45. Resultados promedio de ensayos de compresión a diferentes edades por tipo.

Dias \ Tipo	Resistencias medias (f´cm) y desvíos (s) [MPa]									
	A		B		C		D		E	
	f´cm	Desvío	f´cm	Desvío	f´cm	Desvío	f´cm	Desvío	f´cm	Desvío
3	42,3	---	41,7	---	41,7	---	43,2	---	42,2	---
7	47,8	---	45,3	---	43,1	---	43,8	---	43,6	---
28	55,7	4,7	53,7	4,2	52,7	4,9	52	4,7	49,1	5,3

En el Gráfico 5.3. se muestra la resistencia media y su línea de tendencia producto de la dispersión de muestras ensayadas a la compresión en función de la temperatura.

En el 5.4. se representa la disminución del valor de control para una resistencia característica H-45 (Tabla 5.4.), a medida que aumenta la temperatura (cambio de tipo). La resistencia característica se calcula en función de los valores expresados en la Tabla 4, de acuerdo a la ecuación de control establecida por la norma IRAM 1666 en la sección A.7.10.1.1.b) [74] y/o CIRSOC 201-2005 en la sección 4.2.3.4 [75], la cual se expresa de la siguiente forma:

Tabla 5.4. Valor de control para resistencia característica H-45 por tipo.

Rango de Temperaturas	Tipo	Valor de control [MPa]	Observación
Inferiores a 30 °C	A	49,6	VERIFICA
Entre 30 °C y 32 °C	B	48,3	VERIFICA
Entre 32 °C y 34 °C	C	46,2	VERIFICA

Entre 34 °C y 36 °C	D	46,0	VERIFICA
Mayores a 36 °C	E	42,3	NO VERIFICA

Se observa, que para los intervalos comprendidos entre el tipo A y el D el valor de control de resistencia característica decae un 7,25% [(49,6 - 46,0) / 49.6] en ΔT ≥ 6 °C, es decir, se obtuvo una caída en la resistencia característica igual al 1,21%, o menor (debido a que la clasificación A incluye temperaturas que contemplan valores desde los 25 °C), por cada grado centígrado aumentado. Luego para el intervalo de temperaturas del tipo E, se puede observar una mayor caída del valor de control igual a un 7,46% [(46,0– 42,3) / 49.6] en ΔT = 2,5 °C (Tmax. = 38,5 °C), o bien, una caída del 3% por grado centígrado.

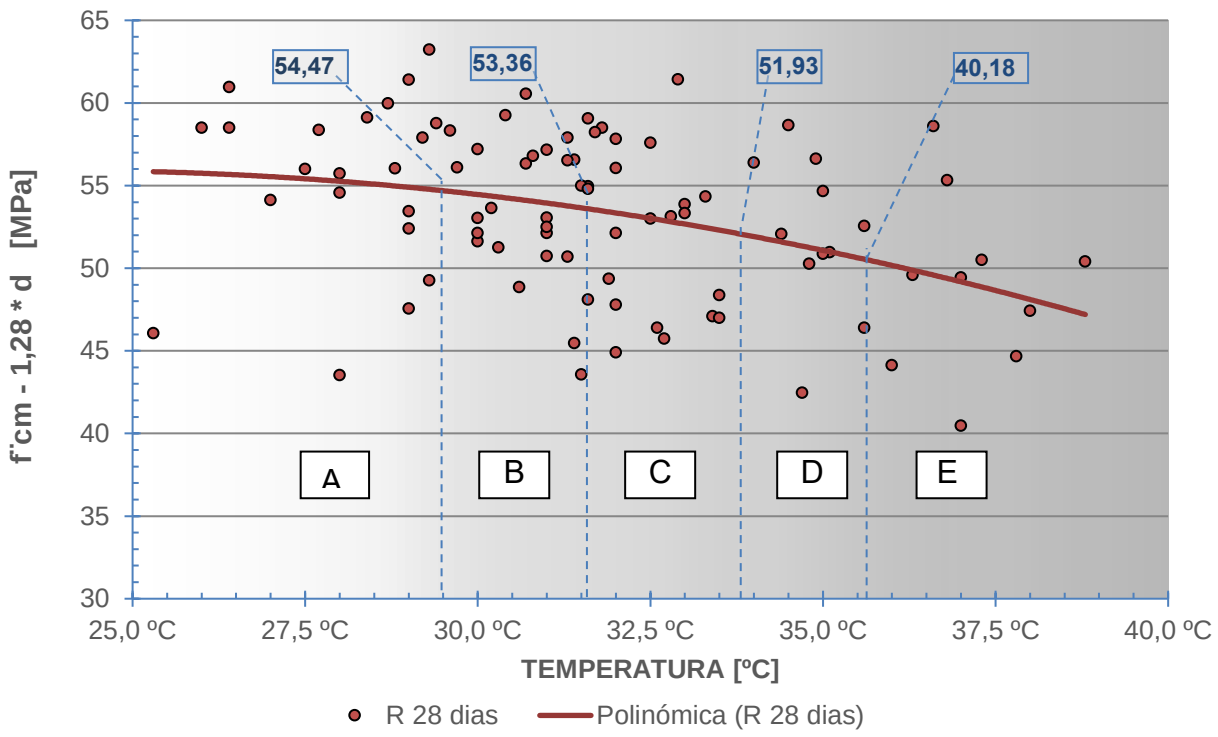


Gráfico 5.3. Resistencia media vs Temperatura. Efecto de la temperatura en la dispersión de la resistencia media (Elaboración propia)

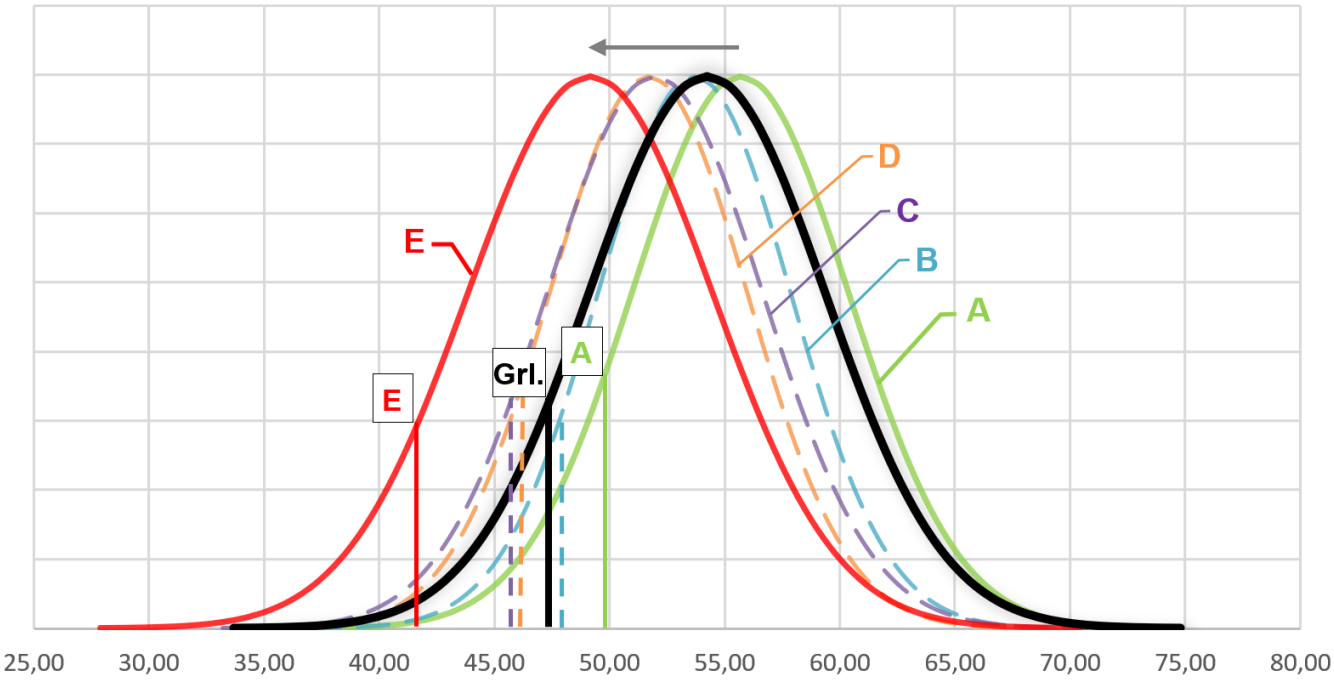


Gráfico 5.4. Resistencia característica vs temperatura. Disminución de la f´cm en función del aumento de temperatura.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos con los ensayos, materiales empleados y el plan de muestreo con 130 muestras en el presente trabajo, se puede concluir que:

- En estado fresco, todas las muestras cumplieron con los parámetros establecidos (Tabla 4.8. H-45. Ensayos sobre hormigón, parámetros y tolerancias.).

- En estado endurecido se produce una caída del valor de control de la resistencia característica impactando en la clase de hormigón para valores superior a 36 °C, es decir que el hormigón de diseño H-45 no verifica para las muestras en el tipo E.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 4.9. Resultados en ensayos hormigón fresco. y considerando como imprescindibles las condiciones de curado y protección del hormigón a edades tempranas, se establece que es viable la utilización de hormigones con temperaturas superiores a las expresadas por el reglamento CIRSOC 201-2005. A partir de lo cual es posible establecer un nuevo límite para la temperatura de colocación

de hormigones en climas calurosos igual a 35 °C, valor que, a su vez, mantiene un margen de seguridad de 1 °C.

- Se continuará con la presente investigación aumentando el número de muestras hasta 250 unidades a fin de aumentar la cantidad de muestras de cada lote de temperatura o tipo. Además, definir el comportamiento y evolución de las resistencias de los hormigones para diferentes tipos de curados y determinar parámetros de durabilidad, por ejemplo, mediante el ensayo de penetración de agua a presión en hormigón endurecido.

- Cabe destacar que todos los ensayos realizados en esta investigación se ajustaron con un criterio de control de conformidad correspondiente a los requisitos establecidos para el modo 1 de control, propuesto por el reglamento CIRSOC 201-2005. Definiendo en dicho caso, que el nuevo criterio de seguridad sugerido, se adapta para situaciones en las cuales se respete el mismo modo de producción y control.

En base a las conclusiones finales del trabajo se puede estimar que:

- A partir de lo planteado en el capítulo 2, sobre la situación ambiental-industrial. Se puede reutilizar el análisis sobre los **gastos energéticos y económicos por uso de escamas de hielo para la reducción de temperatura de la mezcla de hormigón,** ahora, para los días en los que la temperatura se encuentra entre los 30 °C y 35 °C (10% del total de la producción,); y acotado aún más para situaciones en las que se cumplan los requisitos del modo 1 de control para la producción del hormigón (45% del total de la producción). Entonces, el ahorro "**relativo"** por la adaptación de la norma seria,

$$Produccion\ de\ H°\ x\ 0{,}1\ x\ 0{,}45\ x\ costo\ de\ hielo\ equivalente\ = \qquad \text{(Ec. 15)}$$
$$2.363.559{,}0 * \ 0{,}1\ * 0{,}45 * 25.000 = \mathbf{88\ millones\ de\ pesos}$$

Cabe aclarar que no sería exagerado multiplicar este valor por un factor de 4 para contemplar todos los costos no contemplados en el análisis.

7. CAPÍTULO VII: REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

[1] CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI-CIRSOC.

[2] Cap. 5.12.2. Temperatura de colocación del hormigón fresco. CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI- CIRSOC. Pag. 5-19.

[3] Vialidad Nacional “Pliego de especificaciones técnicas generales para pavimentos de hormigón”. (Ed. 2017).

[4] Instituto Racionalización Argentino de Materiales. Norma 1666:2020. Hormigón elaborado. Requisitos y control de la producción

[5] Sección 9.1.3.2. Temperaturas de colocación. “Pliego de especificaciones técnicas generales para pavimentos de hormigón”. (Ed. 2017). Pag. 19.

[6] Cap. 5.1.3. Temperatura. Norma IRAM 1666:2020. Hormigón elaborado. Requisitos y control de la producción. Pag. 15.

[7] ASTM C-94; C94M-03a. Society for Testing and Materials. Especificaciones normalizadas para el hormigón premezclado. Sección 11.9. Pag. 10.

[8] ACI 305R-10. American Concrete Institute. Guia para la colocación del hormigón en Clima Caluroso. (2010).

[9] Capitulo 13. Colado en Clima Caluroso. PCA Portland Cement Association. Pag. 273-283. (2004)

[10] Alberto Giovambattista, Raúl L. Zerbino, Graciela M. Giaccio, Carlos A. P. Fava, Carlos A. Milanesi, Luis P. Traversa, Darío Falcone, Angel A. Di Maio, Claudio J. Zega, Edgardo F. Irassar, Fabián H. Iloro. “Bases de un código modelo para la tecnología de las obras de hormigón”. Primera edición. - La Plata: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica - LEMIT, 2020.

[11] Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; and Panarese, William C.; “Design and Control of Concrete Mixtures”, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2002, 358 pages.

[12] Maldonado, N.G. y Carrasco, M.F. (Ed.) 2012. “Ese material llamado hormigón”. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 366 páginas.

[13] Cap. 5.12.3. Reducción de la temperatura del hormigón. CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI- CIRSOC. Pag. 119.

[14] Rezzonico 2012

[15] Springenschmid, R. (1998). Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages (1st ed.). CRC Press.

[16] NRMCA, Cooling Ready Mixed Concrete, NRMCA Publication No. 106, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 1962.

[17] Barros, V., Camilloni, I. (2016) La Argentina y el cambio climático, de la física a la política. Eudeba, 286 págs.

[18] IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

[19] Cap. 4.2.3. “Criterios de conformidad para el Modo 1 de Control”. CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI- CIRSOC. Pag. 68

[20] Cap. 4.2.4. “Criterios de conformidad para el Modo 2 de Control”. CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI- CIRSOC. Pag. 70.

[21] Datos estadísticos de la asociación de fabricantes de Cemento Portland, 2020 http://afcp.info/Anuarios/Anuario-2020.pdf

[22] Holt E.E., (2001): “Early age autogenous shrinkage of concrete”. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 446, 184 p.

[23] O. Esping, “Early age properties of self-compacting concrete- Effects of fine aggregate and limestone filler”, doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.

[24] Faez Sayahi, 2019, “Plastic shrinkage cracking in concrete”, Impresa por Luleå University of Technology, Graphic Production 2019

[25] Mindess, Sidney; Young, J. Francis; Darwin, David, “Concrete”, 2003, 2nd Edition Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, U.S.A. 644 p.

[26] ACI 211.3R-02 “Metodo de diseño de mezclas de concreto” (1997).

[27] Oskar Esping & Ingemar Löfgren, 2005; basado en Gartner at al. (2002), “Cracking due to plastic and autogenous shrinkage - Investigation of early age deformation of self-compacting concrete”,

[28] Stanton Walker and Delmar L. Bloem1960, Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete

[29] Lerch W., (1957), “Thermal coefficient of expansion of concrete aggregates” Publication Date: 1957-1

[30] Menzel CA. "Causes and prevention of crack development in plastic concrete". Proceedings of the Portland Cement Association. 1954, pp.130-136.

[31] P.J. Uno, Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. ACI Mater J. 95 (1998) 365-375

[32] A. Almusallam, M. Abdul-Waris, M. Maslehuddin, A. Al-Gahtani, Placing and shrinkage at extreme temperatures. Concr Int. 21(1999):75-79.

[33] Weast, R. C., ed., 1987, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 68th edition, CRC Press, Boca Raton, FL.

[34] Lura, P., Pease, B., Mazzotta, G.B., Rajabipour, F. and Weiss, J., (2007) Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks. ACI Materials Journal, Vol. 104(2).

[35] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, (2018) A poromechanics model for plastic shrinkage of fresh cementitious materials, Cement and Concrete Research 109 120-132.

[36] ACI 234R-96. American Concrete Institute. “Use of Silica Fume in Concrete”

[37] Neville A.M., (2000): Properties of Concrete, fourth edition. Pearson Educion Limited.

[38] A. Leemann, P. Nygaard, P. Lura, Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of selfcompacting concrete. Cem Concr Compos. 46 (2014)1-7.

[39] Slowik V, Schmidt M, Fritzsch R (2008) Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. Journal of Cement and Concrete composites 30: 557-565.

[40] Schmidt M, Slowik V. "Instrumentation for optimizing concrete curing". Concrete International. 2013;35.

[41] Hedin, C., "Plastiska Krympsprickor – Motåtgärder", Internal technical report 85-3. Central laboratory of Betongindustri AB, 1985, (in Swedish).

[42] Cordon, W. A., Thorpe, J. D., "Control of Rapid Drying of Fresh Concrete by Evaporation Control", ACI Journal, Proceedings Aug. 1965, pp. 977-984.

[43] Klieger, P., 1958, “Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength,” ACI JOURNAL, Proceedings V. 54, No. 12, June, pp. 1063-1081. Also, Research Department Bulletin 103, PCA Association, Skokie, IL

[44] ASTM C494. (2017). Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para hormigones. Estados Unidos.

[45] AASHTO M 194 (tipo B), “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”

[46] COVENIN 0356, 1994, “Aditivos químicos utilizados en el concreto. Especificaciones”

[47] IRAM 1663, 2002-06-28. “Aditivos químicos”

[48] NCh 2182. Of. 95 “Hormigón y mortero – Aditivos – Clasificación y Requisitos”.

[49] NMX-C-255-ONNCCE-2003 “Industria de la Construcción – Aditivos Químicos para Concreto-Especificaciones y Métodos de Ensayo”.

[50] NTC 1299, 2008-12-16. “Aditivos químicos para concreto”.

[51] Norma IRAM 50000 “Cemento portland normal”.

[52] Norma IRAM 50001 “Sistemas de gestión de la energía”.

[53] IRAM 1627, 1997. “Granulometría de los agregados para hormigones.”

[54] IRAM 1520, 2002-12-12. “Agregados finos - Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua”.

[55] IRAM 1548, 2003-10-10. “Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos”.

[56] IRAM 1540, 2004-08-31. “Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 µm, por lavado”.

[57] IRAM 1647, 1994-12-02. “Agregados para hormigón de cemento pórtland. Métodos de ensayo”.

[58] IRAM 1505, 2005-05-04. “Análisis granulométrico”.

[59] IRAM 1533, 2012-12-12. “Agregados gruesos - Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua”.

[60] CIRSOC 201.1982 “Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado”. (1982). INTI- CIRSOC.

[61] IRAM 1857, 2000-06-23. “Hormigón de cemento pórtland – Determinación del contenido de ion cloruro de hormigón”

[62] IRAM 1532, 2000-03-24. “Agregados gruesos – Método de ensayo de resistencia al desgaste con la maquia “Los Ángeles””

[63] IRAM 1512, 2013. “Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos”.

[64] IRAM 1531, 2016. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo.

[65] IRAM 1601, 2012. “Agua para morteros y hormigones de cemento”.

[66] Art. 3.2.4.2.c. Granulometría del agregado grueso. CIRSOC 201.2005 “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. (2005). INTI- CIRSOC. Pag. 48.

[67] IRAM 1534-2004. Hormigón. Preparación y curado de probetas de laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.

[68] IRAM 1541, 2004. Hormigón de Cemento Portland. Hormigón fresco. Muestreo.

[69] IRAM 1893, 2018. Hormigón de Cemento. Método de ensayo para la determinación de la temperatura del hormigón en estado fresco.

[70] IRAM 1536, 1978: Hormigón seco de cemento Pórtland. Determinación de la consistencia del hormigón de cemento portland por método del tronco cono.

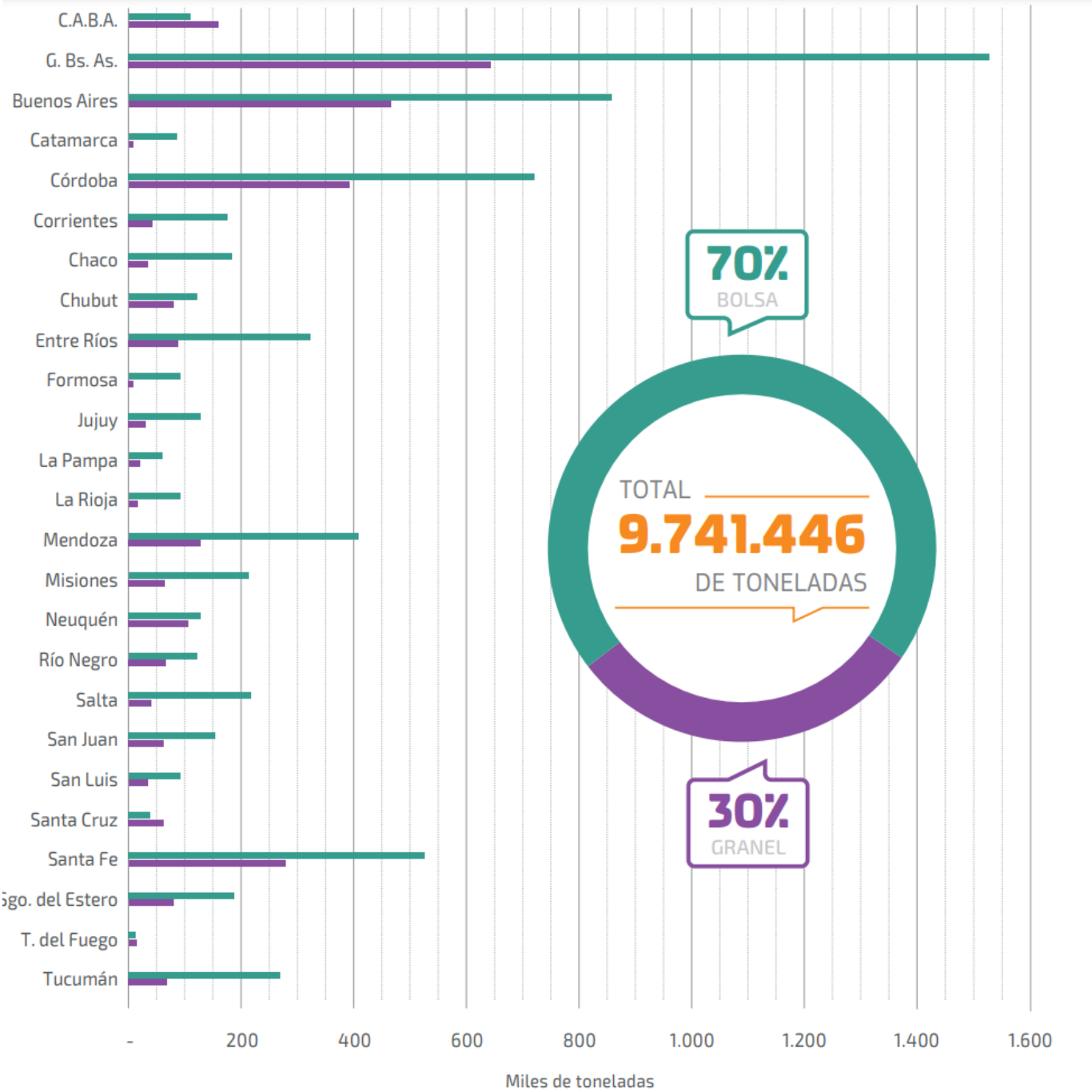
[71] IRAM 1562, 2012. Hormigón fresco de cemento. Método para la determinación de la densidad, (masa de la unidad de volumen) y el cálculo del rendimiento y del contenido de aire (gravimétrico).

[72] IRAM 1602-2, 1988. Hormigón de Cemento Portland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros. Método B.

[73] IRAM 1546-2013. Hormigón de Cemento Portland. Método de Ensayo a compresión.

[74] Sección A.7.10.1.1. Evaluación de los resultados por métodos analíticos. IRAM 1666:2020. Hormigón elaborado. Requisitos y control de la producción. Pag. 39.

ANEXO I


C.A.B.A.
G. Bs. As.
Buenos Aires
Catamarca
Córdoba
Corrientes
Chaco
Chubut
Entre Ríos
Formosa
Jujuy
La Pampa
La Rioja
Mendoza
Misiones
Neuquén
Río Negro
Salta
San Juan
San Luis
Santa Cruz
Santa Fe
Sgo. del Estero
T. del Fuego
Tucumán
-
200
400
600
800
1.000
1.200
1.400
1.600
Miles de toneladas
70%
BOLSA
TOTAL
9.741.446
DE TONELADAS
30%
GRANEL

POR PROVINCIA SEGÚN ENVASE

Cifras expresadas en toneladas

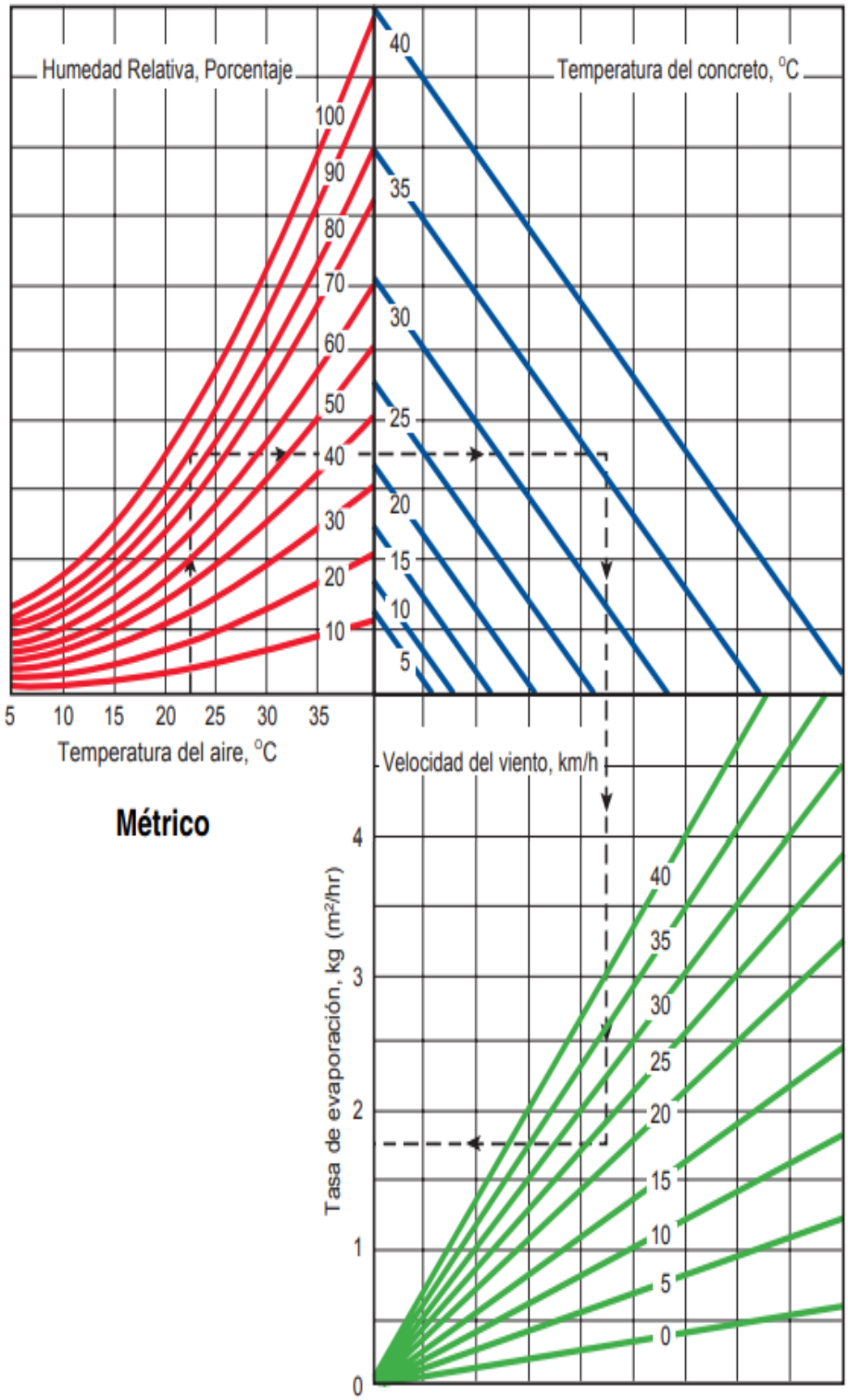
Bolsa Granel

Provincia	Granel		Bolsa		Total
CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES	109.024	41%	156.258	59%	265.282
GRAN BUENOS AIRES	649.716	30%	1.524.574	70%	2.174.290
BUENOS AIRES	436.850	35%	828.582	65%	1.265.432
CATAMARCA	9.729	10%	90.092	90%	99.821
CÓRDOBA	395.389	35%	723.411	65%	1.118.801
CORRIENTES	48.537	22%	175.655	78%	224.191
CHACO	40.404	18%	189.668	82%	230.072
CHUBUT	78.794	39%	125.531	61%	204.325
ENTRE RÍOS	91.192	22%	323.780	78%	414.973
FORMOSA	7.850	7%	98.739	93%	106.589
JUJUY	31.935	21%	123.462	79%	155.397
LA PAMPA	10.616	17%	53.028	83%	63.644
LA RIOJA	4.730	5%	98.099	95%	102.829
MENDOZA	137.168	25%	401.658	75%	538.826
MISIONES	33.874	14%	213.729	86%	247.603
NEUQUÉN	105.326	45%	129.203	55%	234.529
RÍO NEGRO	61.565	33%	127.359	67%	188.924
SALTA	43.131	16%	231.339	84%	274.470
SAN JUAN	60.343	29%	151.207	71%	211.550
SAN LUIS	36.367	28%	93.561	72%	129.928
SANTA CRUZ	55.578	57%	41.819	43%	97.397
SANTA FE	279.824	35%	525.705	65%	805.529
SANTIAGO DEL ESTERO	68.464	27%	186.475	73%	254.938
TIERRA DEL FUEGO	13.194	49%	13.600	51%	26.794
TUCUMÁN	70.587	23%	234.726	77%	305.313
TOTAL	**2.880.186**	**29,6%**	**6.861.260**	**70,4%**	**9.741.446**

Cifras expresadas en toneladas

Región	Granel		Bolsa		Total
Buenos Aires	758.740	31%	1.680.832	69%	2.439.572
Cuyo	233.878	27%	646.426	73%	880.304
NEA	130.664	16%	677.791	84%	808.455
NOA	228.574	19%	964.193	81%	1.192.768
Pampeana	1.213.871	33%	2.454.507	67%	3.668.378
Patagonia	314.458	42%	437.511	58%	751.969
Total	**2.880.186**	**30%**	**6.861.260**	**70%**	**9.741.446**

ANEXO II



Nomograma 3.1. de la ACI,1999 para estimar la tasa de evaporación en hormigones, basado en (Menzel 1954).

Tabla 3.1. Presión de saturación del agua en función de la temperatura.

Temperatura Hormigón [ºC]	Presión de saturación [KPa]	Temperatura Hormigón [ºC]	Presión de saturación [KPa]
4	0.81	25	3.167
5	0.872	26	3.36
6	0.934	27	3.564
7	1	28	3.779
8	1.07	29	4.004
9	1.15	30	4.242
10	1.23	31	4.492
11	1.31	32	4.753
12	1.402	33	5.029
13	1.497	34	5.319
14	1.598	35	5.623
15	1.705	36	5.94
16	1.817	37	6.274
17	1.937	38	6.624
18	2.063	39	6.99
19	2.197	40	7.374
20	2.338	41	7.777
21	2.486	42	8.198
22	2.643	43	8.198
23	2.809	44	9.099
24	2.983	45	9.582

Tabla 3.2. Tasa de evaporación según Menzel y Uno.

Group	Condition	Case	Concrete temperature, C (F)	Air temperature, C (F)	Relative humidity, percent	Wind speed, kph (mph)	Evaporation Eq.(2.1)Menzel, kg/m^2/hr (lb/ft^2/hr)	Evaporation Eq. (2.3) [Eq. (2.2)] Uno, kg/m^2/hr (lb/ft^2/hr)
1	Increase wind speed	1	21 (70)	21 (70)	70	0 (0)	0.07 (0.015)	0.06 (0.012)
		2				8 (5)	0.19 (0.038)	0.17 (0.036)
		3				16 (10)	0.30 (0.062)	0.28 (0.061)
		4				24 (15)	0.42 (0.085)	0.40 (0.086)
		5				32 (20)	0.54 (0.110)	0.51 (0.110)
		6				40 (25)	0.66 (0.135)	0.63 (0.135)
2	Decrease relative humidity	7	21 (70)	21 (70)	90	16 (10)	0.10 (0.020)	0.09 (0.20)
		8			70		0.30 (0.062)	0.28 (0.061)
		9			50		0.49 (0.100)	0.47 (0.102)
		10			30		0.66 (0.135)	0.66 (0.143)
		11			10		0.86 (0.175)	0.85 (0.184)
3	Increase concrete temperature and air temperature	12	10 (50)	10 (50)	70	16 (10)	0.13 (0.026)	0.12 (0.026)
		13	16 (60)	16 (60)			0.21 (0.043)	0.20 (0.041)
		14	21 (70)	21 (70)			0.30 (0.062)	0.28 (0.061)
		15	27 (80)	27 (80)			0.38 (0.077)	0.41 (0.085)
		16	32 (90)	32 (90)			0.54 (0.110)	0.53 (0.115)
		17	38 (100)	38 (100)			0.88 (0.180)	0.70 (0.150)
4	Decrease air temperature	18	21 (70)	27 (80)	70	16 (10)	0.00 (0.000)	0.00 (0.004)
		19		21 (70)			0.30 (0.062)	0.28 (0.061)
		20		10 (50)			0.60 (0.125)	0.66 (0.143)
		21		−1 (30)			0.81 (0.165)	0.87 (0.187)
5	Cold air high RH and wind	22	27 (80)	4 (40)	100	16 (10)	1.00 (0.205)	1.13 (0.235)
		23	21 (70)				0.63 (0.130)	0.72 (0.154)
		24	16 (60)				0.35 (0.075)	0.45 (0.088)
6	Cold air and variable wind	25	21 (70)	4 (40)	50	0 (0)	0.17 (0.035)	0.17 (0.035)
		26				16 (10)	0.79 (0.162)	0.84 (0.179)
		27				40 (25)	1.75 (0.357)	1.84 (0.395)
7	Average weather conditions	28	27 (80)	21 (70)	50	16 (10)	0.86 (0.175)	0.88 (0.183)
		29	21 (70)				0.49 (0.100)	0.47 (0.102)
		30	16 (60)				0.22 (0.045)	0.20 (0.036)
8	High concrete and air temperature + low RH	31	32 (90)	32 (90)	10	0	0.34 (0.070)	0.32 (0.069)
		32				16 (10)	1.64 (0.336)	1.60 (0.345)
		33				40 (25)	3.58 (0.740)	3.50 (0.760)

ANEXO III

CONICET UNC Universidad Nacional de Córdoba CICTERRA
STAN - Análisis Petrográficos de Materiales Geológicos
Av. Vélez Sarsfield 1611 – X5016GCA Córdoba, Argentina

INFORME

Tipo de ensayo solicitado: Análisis petrográfico de agregados gruesos y finos para hormigón según norma IRAM 1649 (y requerimientos de las normas IRAM 1531 y 1512), y estado físico de las rocas que componen los agregados gruesos según normas IRAM 1702 y 1703 para uso vial.

Ensayo solicitado por: ASTORI ESTRUCTURAS S.A.

N° de muestra: Se suministró una muestra de piedra partida (agregado grueso 6-12 mm) denominada "1831 - Cantesur" y una de agregados finos denominada "1829 - Pietracor" correspondiente a arenas gruesas lavadas.

Cantidad de muestras: 2 (dos)

Fecha de recepción de muestras: 29/03/2022

Fecha de entrega de informe: 22/04/2022

A pedido del solicitante se realizó el análisis petrográfico de las rocas, minerales y demás materiales que componen la muestra de agregados gruesos y finos según norma IRAM 1649, y se verificaron los requerimientos de las normas IRAM 1531 y 1512 para agregados gruesos y finos respectivamente. Además, se determinó el estado físico de las rocas que componen los agregados gruesos según normas IRAM 1702 y 1703. Se efectuaron *observaciones macroscópicas y microscópicas* (lupa de mano, estereomicroscopio, microscopio petrográfico).

Abreviaturas de minerales/rocas utilizadas en el informe:

Minerales/rocas

Ag: agregado granítico
Am: agregado metamórfico
As: agregado sedimentario
Bt: biotita
Ep: epidoto
Feld: feldespatos (Pl/Kfs)
Grt: granate
Hbl: hornblenda (anfíbol)
Kfs: feldespato potásico
Kln: caolinita
Mc: mica (muscovita/biotita)
Ms: muscovita
Opq: minerales opacos
Pl: plagioclasa
Qz: cuarzo
Ser: sericita
Sil: sillimanita
Ttn: titanita

Otros

N//: nicoles paralelos
NX: nicoles cruzados

Característica de las muestras:

La muestra de **agregados gruesos** proporcionada ("1831 - Cantesur") está contenida en dos bolsas plásticas de 13,08 kg y 12,96 kg. Se procedió al cuarteo de la misma mediante cuarteador tipo Jones obteniéndose una muestra representativa de 6,68 kg.

Los agregados gruesos presentan recubrimiento superficial de tipo limo-arcilloso que dificulta su observación. Por lo tanto, las muestras fueron previamente lavadas y secadas para su posterior estudio procurando no alterar la estructura de los materiales. Posteriormente se separaron las diferentes fracciones mediante tamizado utilizando tamices IRAM 51 mm (2''), 38 mm (1 1/2''), 25 mm (1''), 19 mm (3/4''), 12,7 mm (1/2''), 9,5 mm (3/8'') y 4,8 mm (N°4). De cada fracción se registraron los pesos, se determinaron las diferentes litologías y se calcularon los porcentajes ponderados. Se contaron e identificaron 500 partículas por cada fracción a excepción del material retenido en el tamiz 12,7 mm, debido a la presencia de un número menor de partículas.

De forma complementaria, se realizó el estudio microscópico (con microscopio óptico de polarización) sobre sección delgada de cada uno de los tipos de agregados observados a nivel macroscópico, a fin de verificar las litologías presentes en las muestras y de aportar mayor información sobre el estado de alteración, deformación, mineralogía, etc.

La muestra de **agregados finos** proporcionada ("1829 - Pietracor") está contenida en dos bolsas plásticas de 12,96 kg y 12,94 kg. Se procedió al cuarteo de la misma mediante cuarteador tipo Jones obteniéndose una muestra representativa de 6,26 kg.

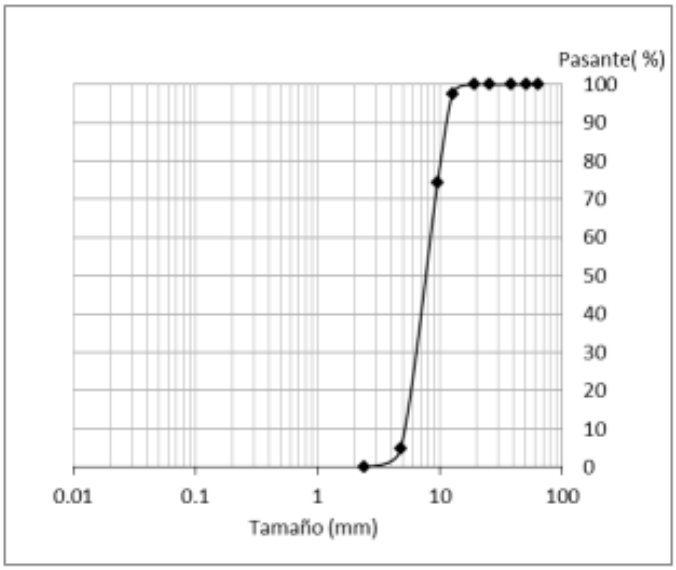
Los agregados finos no requirieron de lavado, pero sí fueron secados para eliminar la humedad contenida en las muestras. Posteriormente se separaron las diferentes fracciones mediante tamices IRAM 4,8 mm (4,76 mm o N°4), IRAM 2,4 mm (2,38 mm o N°8), IRAM 1,2 mm (1,19 mm o N°16), IRAM 590 µm (0,59 mm o N°30), IRAM 297 µm (0,297 mm o N°50) y IRAM 149 µm (0,149 mm o N°100). Se registraron los pesos de cada fracción determinándose las diferentes litologías, y se calcularon los porcentajes ponderados.

Se contaron e identificaron 500 partículas por cada fracción a excepción del material retenido en el tamiz N°4, debido a la presencia de un número menor de partículas.

De forma complementaria, se realizó el estudio microscópico (con microscopio óptico de polarización) sobre sección delgada del material retenido en la fracción mayoritaria de la muestra a fin de determinar por conteo modal los diferentes constituyentes. Esta información se contrastó con la determinación realizada por macroscopía y sirvió para aportar mayor información sobre el estado de alteración, deformación, mineralogía, etc.

MUESTRA "1831 - CANTESUR"

Distribución granulométrica (Figura 1):



Tamiz	Abertura nominal (mm)	Peso retenido (kg)
2 1/2"	63,500	0,00
2"	50,800	0,00
1 1/2"	38,100	0,00
1"	25,400	0,00
3/4"	19,050	0,00
1/2"	12,700	0,16
3/8"	9,525	1,56
N°4	4,760	4,64
Pas. N°4		0,32
Total		6,68

Figura 1. Curva de distribución granulométrica de los agregados gruesos.

Litologías identificadas:

Tipo A_1 (Figura 2): Ortogneis anfibólico (inalterado). Roca de grano medio (< 2,5 mm) y de color gris a gris-verdoso. Posee textura granoblástica inequigranular y está compuesta por anfibol (hornblenda), biotita y minerales opacos (~ 40%), plagioclasa (~ 45%) y cuarzo (~ 15%). Como minerales accesorios se observa, epidoto, apatita y circón (< 1%). El anfibol es subhedral a anhedral y se presenta mayormente como granos con núcleos poiquilíticos (con inclusiones de cuarzo y biotita). Los minerales opacos son anhedrales (≤ 0,2 mm) y la biotita subhedral (≤ 1,5 mm). La plagioclasa (≤ 2,5 mm) es anhedral a subhedral, con inclusiones de anfibol y biotita principalmente y se encuentra levemente alterada a sericita en sectores localizados. El cuarzo (≤ 1 mm) es anhedral y presenta leve extinción ondulante. Las inclusiones de cuarzo (< 1%) en los anfiboles poseen tamaños < 0,060 mm.

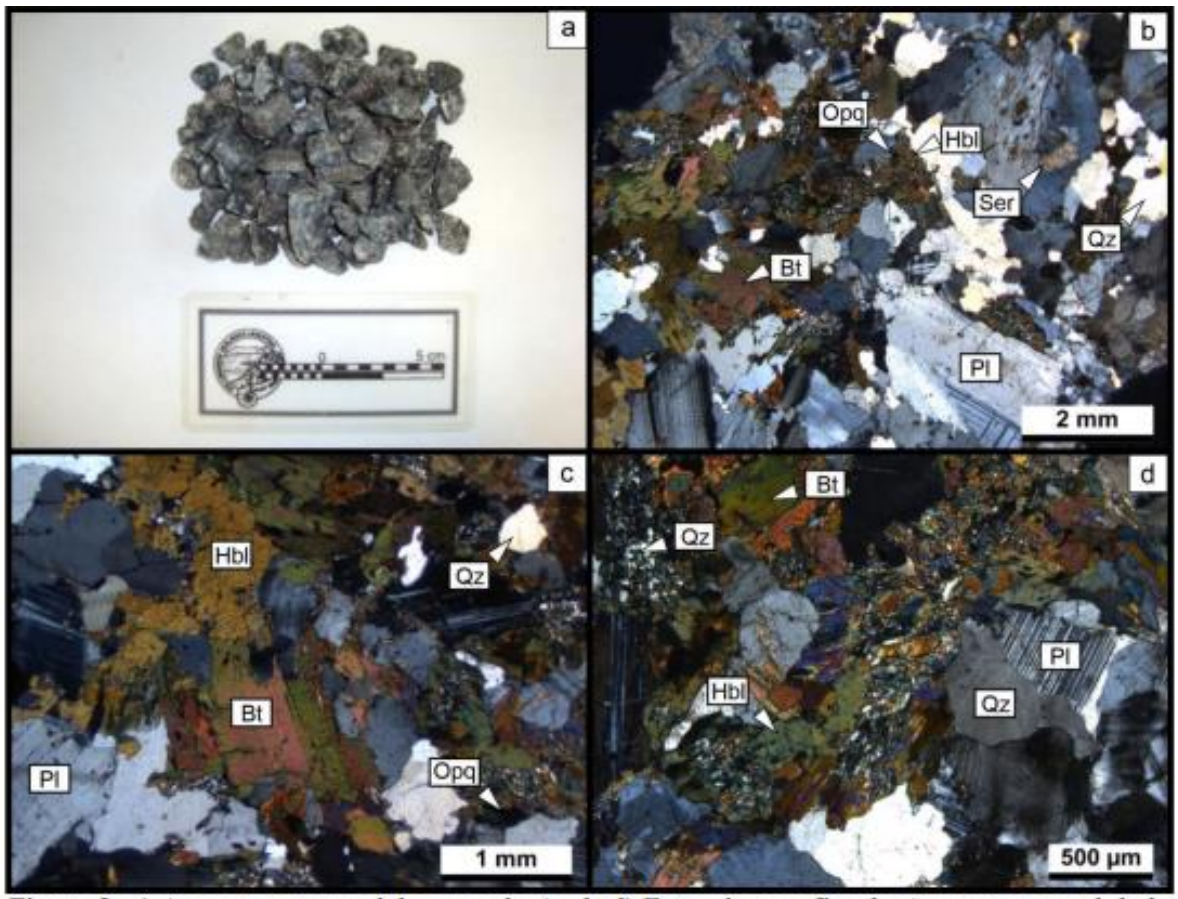


Figura 2. a) Aspecto externo del agregado A_1. b-d) Fotomicrografías. b: Aspecto general de la textura del agregado (NX). c: Detalle de un sector rico en anfíbol y biotita (NX). d: Detalle de un sector rico con anfíbol poiquilítico (NX).

Tipo B_1 (Figura 3): Migmatita inalterada. Roca de color gris a gris-rosado. Es una roca de foliación marcada y textura lepidogranoblástica con bandas leucocráticas granoblásticas y eventuales porfiroblastos (~ 5 mm, ~ 10%) de granate. El granate es subhedral, se encuentra levemente fracturado y presenta inclusiones de biotita, minerales opacos y cuarzo. Las bandas o lentes leucocráticos están compuestos por plagioclasa subhedral a anhedral (levemente alterada a sericita y epidoto) y feldespato potásico subhedral a anhedral (~ 30%), cuarzo (~ 40%) y finas bandas de biotita subhedral. Las bandas máficas están compuestas por biotita, sillimanita y minerales opacos, con escaso cuarzo y feldespatos. El granate + biotita + sillimanita + minerales opacos se encuentran en ~ 30%. Como accesorios se reconoce circón y apatita (< 1%). El cuarzo es anhedral y presenta leve extinción ondulante (< 2,5 mm). El contenido de cuarzo microcristalino < 0,062 mm es < 1%.

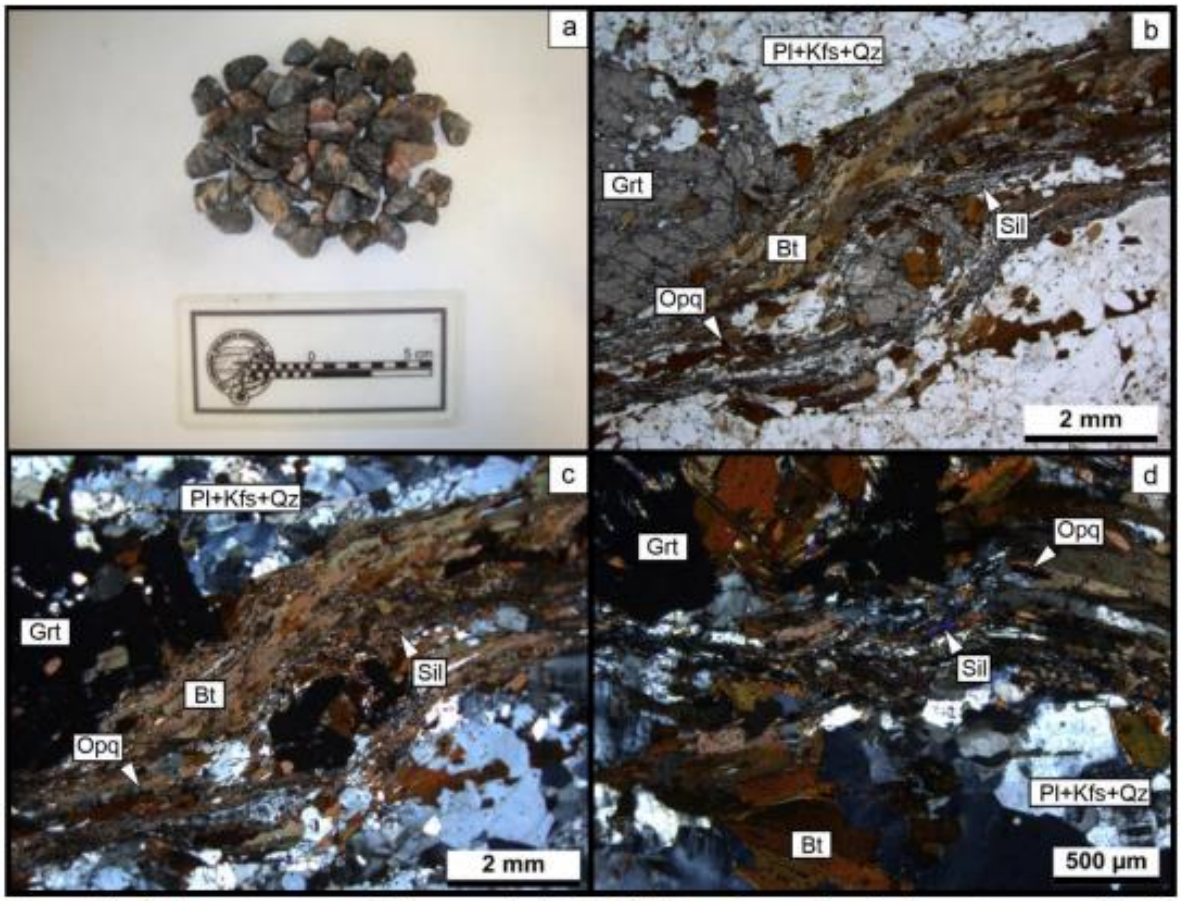


Figura 3. a) Aspecto externo del agregado B_1. b-d) Fotomicrografías. b: Aspecto general de la textura del agregado (N//). c: Mismo sector a NX. d: Detalle de un sector rico en granate, biotita, sillimanita y minerales opacos (NX).

Tipo C_1 (Figura 4): Mismo agregado que el B_1. Externamente parece estar más alterado pero internamente se lo observa en estado fresco (los feldespatos poseen leve alteración a sericita/caolinita). En este caso no se diferencian bandas leucocráticas y melanocráticas siendo la textura lepidogranoblástica. La biotita + granate + sillimanita + minerales opacos se encuentran en mayor proporción (~ 35%). Se observan algunos granates en la matriz de la roca (0,5 mm) y algunas finas bandas discretas de sillimanita. En sectores localizados se reconoce un mineral de bajo color de interferencia levemente alterado a minerales de grano fino que podría corresponder a cordierita.

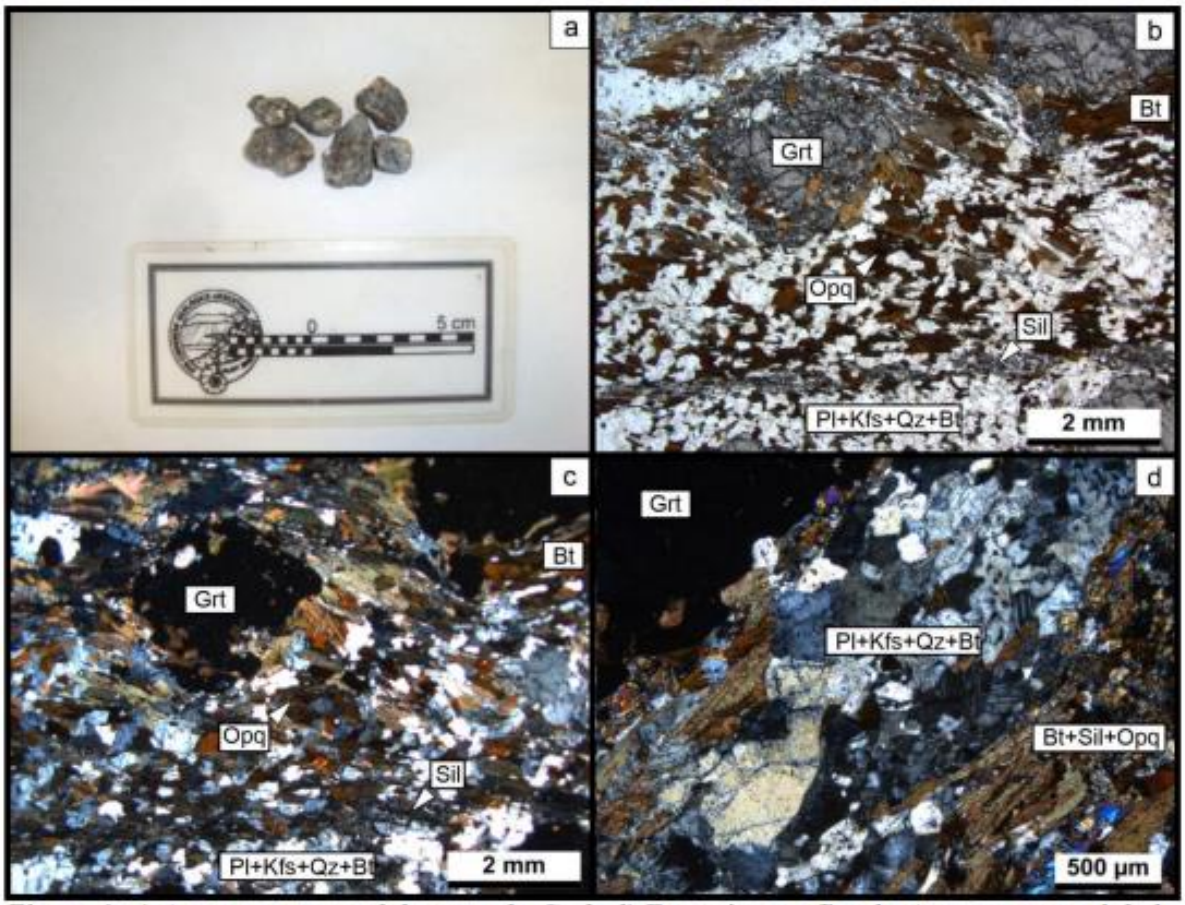


Figura 4. a) Aspecto externo del agregado C_1. b-d) Fotomicrografías. b: Aspecto general de la textura del agregado (N//). c: Mismo sector a NX. d: Detalle de un sector leucocrático rico en cuarzo y feldespatos limitado por bandas máficas ricas en granate, biotita, sillimanita y minerales opacos (NX).

Tipo D_1 (Figura 5): Ortogneis anfibólico inalterado. Roca de color gris verdoso. Es una roca de foliación leve y textura porfiroblástica con matriz de textura granonematoblática de grano fino. Los porfiroblastos son de granate subhedral (~ 4,5 mm), levemente fracturado y con inclusiones de feldespato, minerales opacos y escaso cuarzo. También se observan algunos porfiroblastos de plagioclasa, subhedral (3,5-4 mm) con inclusiones de plagioclasa, cuarzo, biotita y circón. El porcentaje de porfiroblastos es ~ 20%. La matriz (< 1 mm) está compuesta por anfibol (hornblenda), minerales opacos, granate, titanita, biotita (~ 50%), y plagioclasa + cuarzo (~ 30%). Como accesorios se reconoce circón y apatita (< 1%). El cuarzo es anhedral y en sectores localizados presenta leve extinción ondulante (< 0,5 mm). El contenido de cuarzo microcristalino < 0,062 mm es ~ 5%.

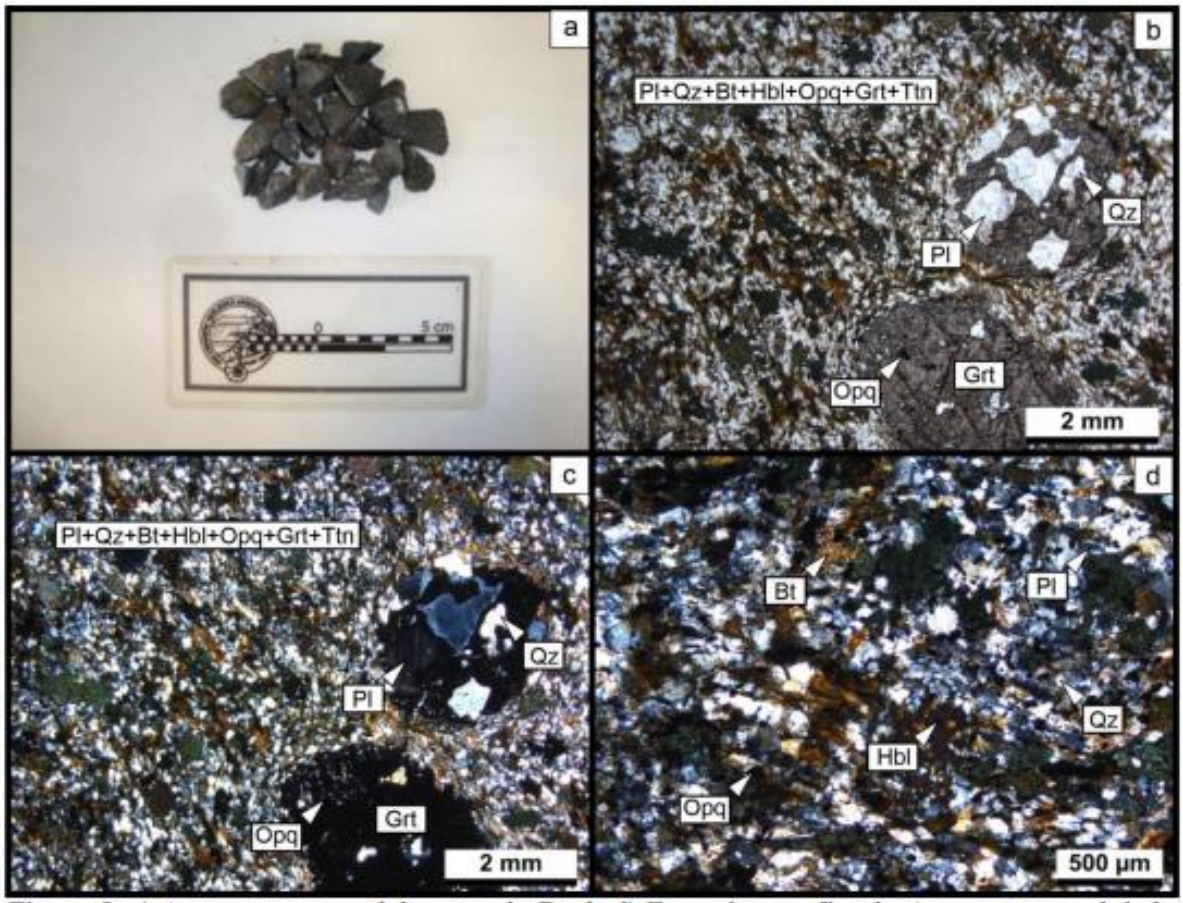


Figura 5. a) Aspecto externo del agregado D_1. b-d) Fotomicrografías. b: Aspecto general de la textura del agregado (N//). c: Mismo sector a NX. d: Detalle de la matriz de la roca (NX).

Tipo E_1 (Figura 6): Agregados graníticos. Rocas de color gris claro, rosado y amarillento. Dentro de este grupo se reconocen agregados graníticos, tonalitas y fragmentos de ortogneises ricos en cuarzo y feldespato. A continuación se describe una de las litologías más abundantes en este grupo que corresponde a un ortogneis granítico. Es una roca de textura granoblástica de tamaño de grano < 2,5 mm. Posee leve orientación y está compuesta por feldespato (~ 60%) anhedral a subhedral (plagioclasa > feldespato potásico) leve a moderadamente alterados (sericita y caolinita, ± óxidos/hidróxidos de hierro) en especial en sectores fisurados de los cristales. El cuarzo (~ 40%) es anhedral y por sectores subhedral, presente moderada extinción ondulante. Hay finas fajas de deformación (< 1%) donde se reconoce cuarzo + feldespatos de grano muy fino < 0,062 mm que cortan la textura general de la roca. Como minerales accesorios se observa biotita, minerales opacos, apatita y circón. Por sectores localizados hay un escaso desarrollo de mirmequitas (< 1%).

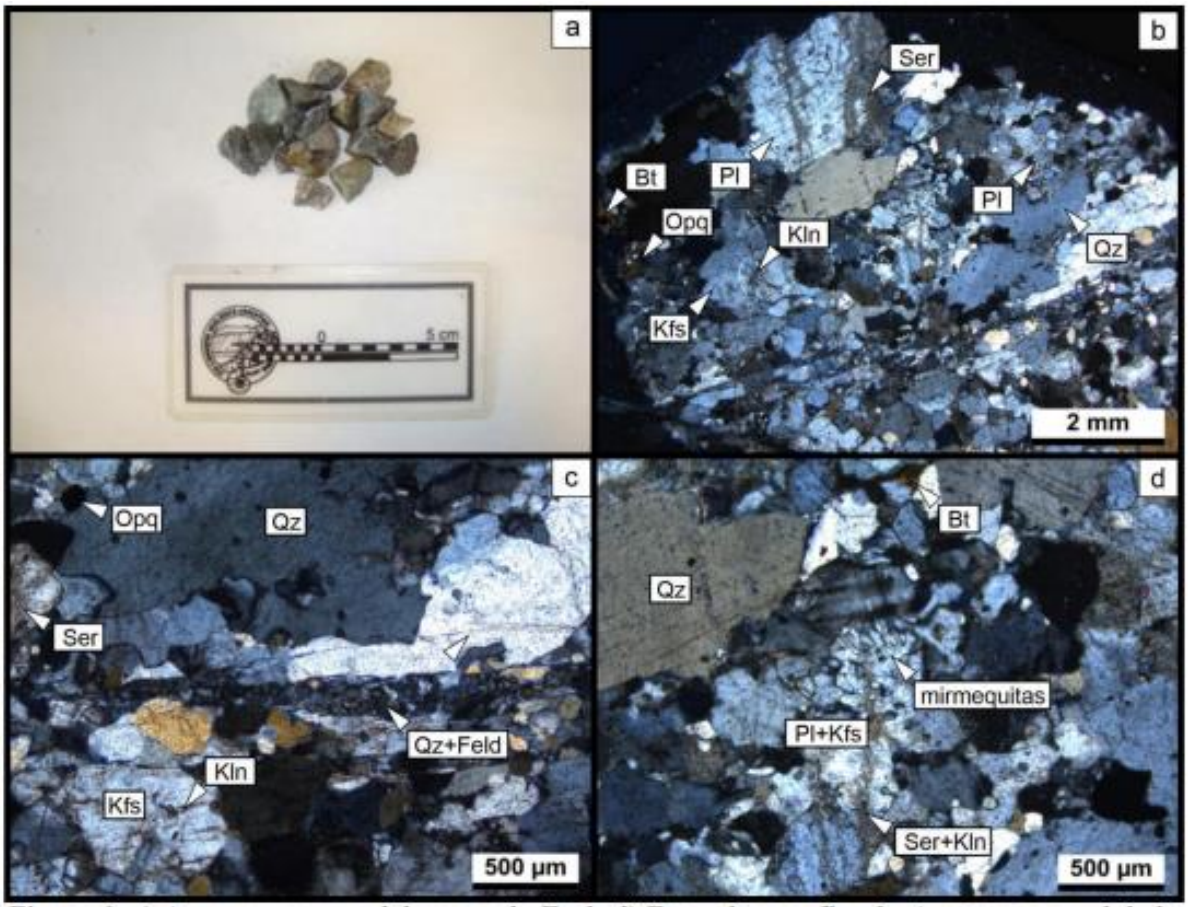


Figura 6. a) Aspecto externo del agregado E_1. b-d) Fotomicrografías. b: Aspecto general de la textura del agregado (NX). c: Detalle de las fajas de deformación (NX). d: Detalle de un sector con mirmequitas (NX).

Características superficiales de los agregados gruesos:

En general los agregados son subangulosos a subredondeados. Poseen recubrimiento superficial parcial de material limo-arcilloso.

Material pasante tamiz N° 4 (Figura 7): 320 gr. Corresponde a una mezcla polilitológica de tamaño bimodal de agregados de ~ 4 mm y material limo-arcilloso.

Figura 7. Material pasante el tamiz N° 4.

Composición de las fracciones retenidas (Tabla 1 y 2) – IRAM 1649:

Tabla 1. Composición de las fracciones retenidas en los diferentes tamices

Composición de fracciones retenidas en tamices IRAM indicados								
Porcentaje individual retenido en el tamiz IRAM	3/4"		1/2"		3/8"		N°4	
	0,0		2,5		24,5		73,0	
Constituyentes	Número de partículas	(%)	Número de partículas	(%)	Número de partículas	(%)	Número de partículas	(%)
Tipo A_1	0	0,0	49	71,01	390	78,00	391	78,20
Tipo B_1	0	0,0	9	13,04	62	12,40	64	12,80
Tipo C_1	0	0,0	3	4,35	6	1,20	6	1,20
Tipo D_1	0	0,0	3	4,35	24	4,80	22	4,40
Tipo E_1	0	0,0	5	7,25	18	3,60	17	3,40
TOTALES	0	0,0	69	100,0	500	100,0	500	100,0

Tabla 2. Porcentajes ponderados de los constituyentes en cada fracción

Constituyentes	Porcentaje de constituyentes ponderados en cada fracción de tamiz IRAM				
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	**Composición ponderada de la muestra**
Tipo A_1	0,00	1,79	19,13	57,05	**78,0**
Tipo B_1	0,00	0,33	3,04	9,34	**12,7**
Tipo C_1	0,00	0,11	0,29	0,88	**1,3**
Tipo D_1	0,00	0,11	1,18	3,21	**4,5**
Tipo E_1	0,00	0,18	0,88	2,48	**3,5**
Total en la fracción de tamiz	0,00	2,52	24,53	72,96	**100,0**
Total en la muestra, condición 1 (inalteradas)					**100,0**

Composición de las fracciones retenidas (Tabla 3 y 4) – IRAM 1702:

Se trabajó sobre la misma cantidad de partículas que en el apartado anterior, pero en este caso registrando los pesos de cada fracción. Los resultados se cotejan con los porcentajes en masa máximos admisibles de material no apto establecidos en la norma IRAM 1703 para uso vial (Tabla 5).

Tabla 3. Composición de las fracciones retenidas en los diferentes tamices

Composición de fracciones retenidas en tamices IRAM indicados								
Porcentaje individual retenido en el tamiz IRAM	3/4"		1/2"		3/8"		N°4	
	0,0		2,5		24,5		73,0	
Constituyentes	gramos	(%)	gramos	(%)	gramos	(%)	gramos	(%)
Tipo A_1	0,0	0,0	103,1	73,34	538,84	77,83	232,78	77,24
Tipo B_1	0,0	0,0	21,98	15,64	86,24	12,46	38,68	12,84
Tipo C_1	0,0	0,0	3,35	2,38	9,38	1,35	3,91	1,30
Tipo D_1	0,0	0,0	3,93	2,80	35,59	5,14	14,8	4,91
Tipo E_1	0,0	0,0	8,22	5,85	22,25	3,21	11,19	3,71
TOTALES	0,0	0,0	140,58	100,0	692,3	100,0	301,36	100,0

Tabla 4. Porcentajes ponderados de los constituyentes en cada fracción

Constituyentes	Porcentaje de constituyentes ponderados en cada fracción de tamiz IRAM				
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	**Composición ponderada de la muestra**
Tipo A_1	0,0	1,85	19,09	56,35	**77,3**
Tipo B_1	0,0	0,39	3,06	9,37	**12,8**
Tipo C_1	0,0	0,06	0,33	0,95	**1,3**
Tipo D_3	0,0	0,07	1,26	3,58	**4,9**
Total en la fracción de tamiz	0,0	0,15	0,79	2,71	**3,7**
Total en la muestra, condición 1 (inalteradas)					**100,0**

Tabla 5. Porcentajes en masa máximos de material no apto (Tabla I, norma IRAM 1703).

Tipo de Obra	Tipo de material		
	Perjudicial	Deficiente	
		Blando	Semiduro y/o total no aptos
1) Tratamientos bituminosos 2) Carpetas asfálticas 3) Bases estabilizadas granulares bajo tratamientos bituminosos	**1**	**2**	**4**
1) Bases estabilizadas granulares bajo carpetas asfálticas. 2) Base de hormigón asfáltico bajo tratamientos bituminosos o carpetas asfálticas. 3) Hormigón de calzadas y obras de arte	**1**	**3**	**6**
1) Bases diversas bajo hormigones	**2**	**4**	**8**
1) Sub bases	**2**	**5**	**10**
Resultados obtenidos en este estudio	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Presencia de componentes potencialmente reactivos (conteo modal ponderado):

La muestra en su conjunto posee ~ 1,2 % (porcentaje ponderado) de cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino < 0,062 mm (Tabla 6), por debajo del límite estipulado en la norma IRAM 1531.

Tabla 6. Minerales y rocas potencialmente reactivos (Tabla 3, IRAM 1531, 2016).

Reacción	Minerales / Rocas	Contenido máximo (%)	Contenido ponderado en la muestra analizada (%)
Reacción álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	5,0	~ 1,2
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)		
	Ftanita, chert	3,0	0
	Calcedonia		
	Tridimita	1,0	0
	Cristobalita		
	Ópalo	0,5	0
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0	0
Reacción álcali-carbonato (RAC)	Dolomita (tamaño de grano promedio menor que 50 µm)	40,0	0

Comentarios finales:

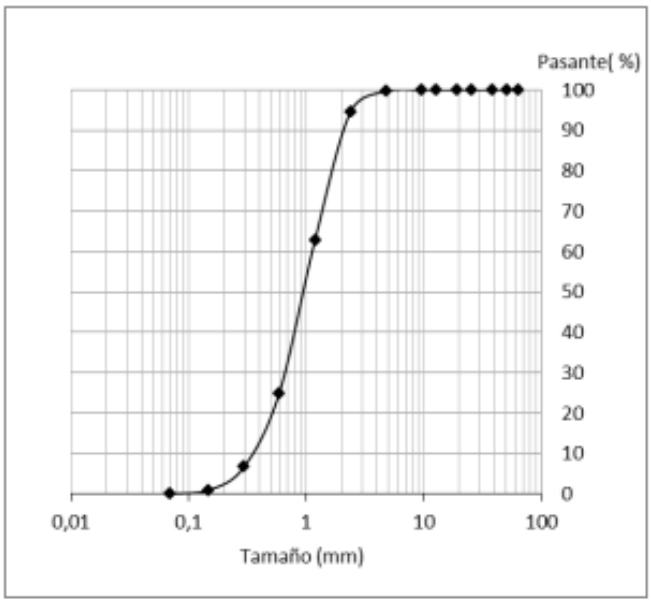
Según los datos obtenidos, la muestra "1831 - Cantesur" presenta las siguientes características:

En base a los criterios y procedimientos de la norma IRAM 1649, la muestra está compuesta por 78,0% de ortogneises anfibólicos inalterados (agregado A_1), 14,0% de migmatitas inalteradas (agregado B_1 + C_1), 4,5% de ortogneises anfibólicos de grano fino inalterados (agregado D_1) y 3,5% de agregados graníticos inalterados (E_1). En conjunto, se reconoce 100,0% de materiales inalterados. A su vez, la muestra posee ~ 1,2% de cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado y/o microcristalino < 0,062 mm (conteo modal ponderado), por lo que a nivel petrográfico corresponde considerarla como **no reactiva** ya que no supera el límite de 5% estipulado en el Reglamento CIRSOC 201 o la norma IRAM 1531 (Tabla 3 de la versión 2016) para este tipo de componentes potencialmente reactivos.

Según los criterios y procedimientos de la norma IRAM 1702, la muestra está compuesta por 77,3% de ortogneises anfibólicos inalterados (agregado A_1), 14,1% de migmatitas inalteradas (agregado B_1 + C_1), 4,9% de ortogneises anfibólicos de grano fino inalterados (agregado D_1) y 3,7% de agregados graníticos inalterados (E_1). En conjunto, se reconoce 100,0% de materiales inalterados. Según estos resultados, la muestra posee **porcentajes en masa de materiales no aptos inferiores a los límites establecidos para todo tipo de obra** según la norma IRAM 1703.

MUESTRA "1829 - PIETRACOR"

Distribución granulométrica (Figura 8):



Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (kg)
N°4	4,760	0,02
N°8	2,380	0,32
N°16	1,190	1,98
N°30	0,590	2,38
N°50	0,297	1,14
N°100	0,149	0,36
Pas. N°100		0,06
Total		6,26

Figura 8. Curva de distribución granulométrica de la arena natural.

De forma complementaria se realizó el estudio microscópico con microscopio óptico de polarización sobre una sección delgada de la fracción retenida sobre el tamiz N° 30, a fin de verificar las litologías presentes en la muestra y de aportar mayor información sobre el estado de alteración, deformación, mineralogía, etc.

Litologías identificadas:

Tipo 1 (Figura 9 a-d): Cuarzo. Corresponden a granos aislados o a un conjunto de granos de cuarzo transparentes a opacos de color blanquecino, de fractura concoidea irregular y por lo general de brillo vítreo. Poseen sedimento limo-arcilloso adherido. A nivel microscópico por lo general no presentan deformación o evidencian leve extinción ondulante (Figura 10 a-d).

Tipo 2 (Figura 9 a-c): Agregados graníticos. Corresponden a agregados graníticos y migmatitas de grano medio a fino (< 2 mm) de coloración gris o rosada, fractura irregular y compuestos principalmente por cuarzo, feldespatos y micas. No se observan evidencias de deformación dúctil a nivel macroscópico. A nivel microscópico se observan algunos granos con leve extinción ondulante (Figura 10 a, b y d).

Tipo 3 (Figura 9 a): Agregados metamórficos. Corresponden mayoritariamente a anfibolitas con hornblenda y plagioclasa principalmente (~ 70%), y escasos gneises y migmatitas cuarzo-biotíticos (~ 30%). Son de color negro a gris oscuro y fractura irregular. A nivel microscópico

la mayoría corresponde a anfibolitas compuestas principalmente por hornblenda y plagioclasa (Figura 10 b y d). Los gneises/esquistos son escasos. Ambos agregados presentan alteración parcial de los feldespatos.

Tipo 4 (Figura 9 b, c y d): Feldespatos. Corresponden a granos de feldespatos (feldespato potásico y plagioclasa) de color rosado a blanco, marcado clivaje y brillo vítreo. A nivel microscópico se reconoce principalmente plagioclasa con feldespato potásico minoritario, con alteración leve a moderada a sericita/caolinita (Figura 10 a-d).

Tipo 5 (Figura 9 b y c): Micas. Corresponden a granos aislados de biotita o muscovita (muscovita > biotita). Son cristales laminares y de bordes rectos o irregulares (Figura 10 a y b).

Tipo 6 (Figura 9 b): Granate. Son cristales de color bordó a rojizos, fractura irregular y brillo vítreo.

Tipo 7 (Figura 9 c): Agregado sedimentario. Corresponde a un agregado muy deleznable compuesto por partículas limo-arcillosas (< 0,062 mm). El material posee poca coherencia y se desmenuza al entrar en contacto con agua.

Tipo 8: Anfibol. Son cristales de color negro a verde oscuro con clivaje marcado y brillo vítreo.

Tipo 9: Minerales opacos. Son cristales de color negro a rojizos con clivaje irregular y brillo metálico.

Tipo 10: Epidoto. Son cristales de color verde claro con clivaje irregular y brillo vítreo.

Además, se ha identificado calcita por debajo del 0,1% (no identificada durante el proceso de conteo, pero reconocida durante la inspección de la muestra bajo el microscopio).

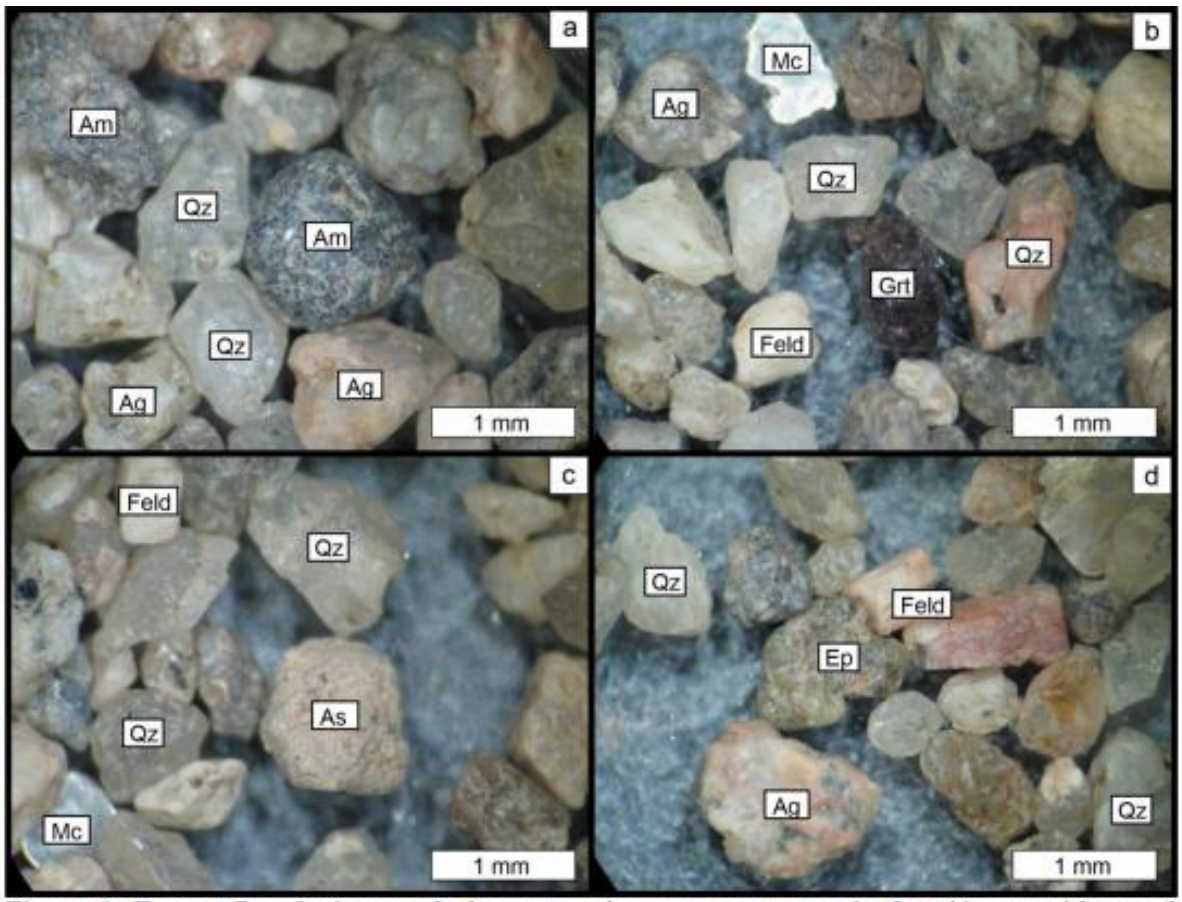


Figura 9. Fotografías. Imágenes de los agregados que componen la fracción retenida en el tamiz N° 30). a) Cuarzo, agregado metamórfico y agregado granítico. b) Cuarzo, feldespato (plagioclasa y feldespato potásico), mica (muscovita), granate y agregado granítico. c) Cuarzo, feldespato, agregado sedimentario (loess) y mica (muscovita). d) Feldespato, cuarzo, agregado granítico y epidoto.

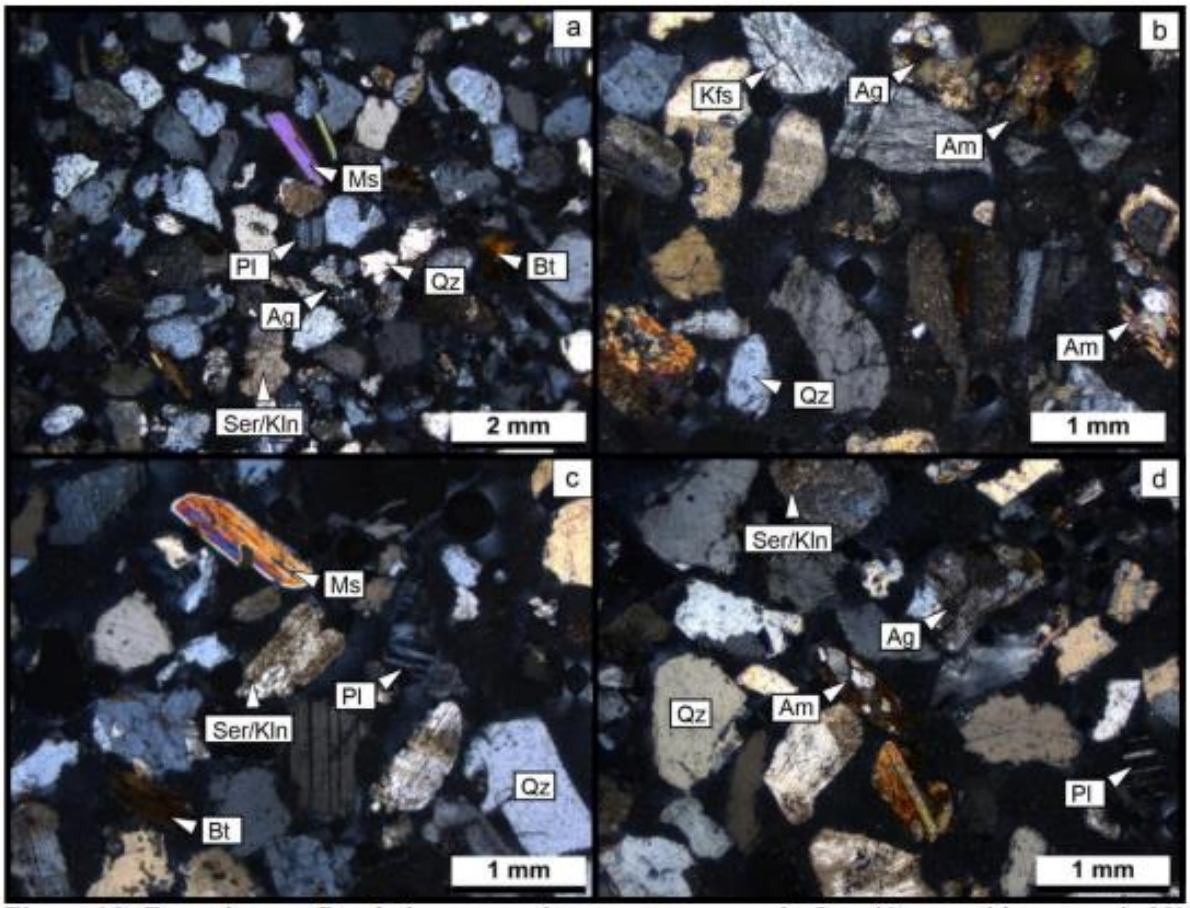


Figura 10. Fotomicrografías de los agregados que componen la fracción retenida en tamiz N° 30 (NX). a) Granos de cuarzo, agregado granítico, feldespatos (plagioclasa y feldespatos potásicos alterados parcialmente a sericita/caolinita) y micas (biotita y muscovita). b) Agregado granítico, agregado metamórfico, feldespatos y cuarzo. c) Granos de cuarzo feldespatos parcialmente alterados, y micas. d) Granos de cuarzo, agregados graníticos, agregados metamórficos y feldespatos parcialmente alterados.

Características superficiales de los agregados:

En general los agregados son redondeados a subangulosos, aunque algunos son marcadamente angulosos (en especial los de mayor tamaño). Los recubrimientos superficiales de material limo-arcilloso son comunes, probablemente por la elevada rugosidad de las partículas.

Composición de las fracciones retenidas (Tabla 7 y 8) – IRAM 1649:

Material pasante tamiz N° 100: 60 gr. Corresponde a una mezcla de tamaño uniforme de los agregados anteriormente descriptos, con un predominio de cuarzo.

Tabla 7. Composición de las fracciones retenidas en los diferentes tamices

Composición de fracciones retenidas en tamices IRAM indicados												
Porcentaje individual retenido en el tamiz IRAM	N° 4		N°8		N° 16		N° 30		N° 50		N° 100	
	0,32		5,16		31,94		38,39		18,39		5,81	
Constituyentes	N° de partíc.	(%)	N° de partíc.	(%)	N° de partíc.	(%)	N° de partíc.	(%)	N° de partíc.	(%)	N° de partíc.	(%)
Tipo 1	52	37,1	206	41,2	201	40,2	396	79,2	421	84,2	411	82,2
Tipo 2	60	42,9	164	32,8	168	33,6	30	6,0	19	3,8	0	0,0
Tipo 3	20	14,3	72	14,4	13	2,6	0	0,0	3	0,6	4	0,8
Tipo 4	8	5,7	57	11,4	111	22,2	47	9,4	22	4,4	13	2,6
Tipo 5	0	0,0	1	0,2	5	1,0	13	2,6	21	4,2	40	8,0
Tipo 6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,2	6	1,2	3	0,6
Tipo 7	0	0,0	0	0,0	2	0,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Tipo 8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	13	2,6	6	1,2	22	4,4
Tipo 9	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	4	0,8
Tipo 10	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	0,4	3	0,6
TOTALES	140	100,0	500	100,0	500	100	500	100	500	100	500	100

Tabla 8. Porcentajes ponderados de los constituyentes en cada fracción

Constituyentes	Porcentaje de constituyentes ponderados en cada fracción de tamiz IRAM						
	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	**Composición ponderada de la muestra**
Tipo 1	0,1	2,1	12,8	30,4	15,5	4,8	**65,7**
Tipo 2	0,1	1,7	10,7	2,3	0,7	0,0	**15,6**
Tipo 3	0,0	0,7	0,8	0,0	0,1	0,0	**1,8**
Tipo 4	0,0	0,6	7,1	3,6	0,8	0,2	**12,3**
Tipo 5	0,0	0,0	0,3	1,0	0,8	0,5	**2,6**
Tipo 6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	**0,3**
Tipo 7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	**0,1**
Tipo 8	0,0	0,0	0,0	1,0	0,2	0,3	**1,5**
Tipo 9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**0,0**
Tipo 10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	**0,1**
Total en la fracción de tamiz	0,3	5,2	31,9	38,4	18,4	5,8	**100,0**

Composición de la fracción retenida en el tamiz N° 30 determinada mediante microscopía (Tabla 9), y presencia de componentes potencialmente reactivos (conteo modal ponderado, Tabla 10):

Tabla 9. Composición de la fracción retenida en tamiz N° 30 determinada por microscopía

Constituyentes	Número de partículas	**Composición porcentual**
Tipo 1 – cuarzo	177	**35,4**
Tipo 2 – agreg. graníticos	99	**19,8**
Tipo 3 – agreg. metamórficos	40	**8,0**
Tipo 4 – feldespatos	120	**24,0**
Tipo 5 – micas	60	**12,0**
Tipo 6 – granate	4	**0,8**
Tipo 7 – agregado sedimentario	0	**0,0**
Tipo 8 – anfibol	0	**0,0**
Tipo 9 – minerales opacos	0	**0,0**
Tipo 10 – epidoto	0	**0,0**
Total	500	**100,0**

Las diferencias observadas entre los porcentajes de cada componente determinados por lupa binocular (Tabla 7) y microscopio óptico (Tabla 9) para la fracción retenida en el tamiz N° 30 se deben a la precisión de cada método. Por ejemplo, a nivel macroscópico muchas partículas clasificadas como cuarzo o feldespato, son clasificadas como agregados graníticos a nivel microscópico porque corresponden a una asociación de cristales de cuarzo (con cantidades menores de feldespato y/o muscovita). Algo similar sucede con las partículas de anfibol y micas, y los agregados metamórficos. No se reconoció por microscopía agregados con cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino < 0,062 mm.

Tabla 10. Minerales y rocas potencialmente reactivos (Tabla 3, IRAM 1512, 2013).

Reacción	Minerales / Rocas	Contenido máximo (%)	Contenido ponderado en la muestra analizada (%)
Reacción álcali-sílice (RAS)	Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado	5,0	0
	Cuarzo microcristalino (tamaño de grano promedio menor que 62 µm)		
	Ftanita, chert	3,0	0
	Calcedonia		
	Tridimita	1,0	0
	Cristobalita		
	Opalo	0,5	0
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0	0

Comentarios finales:

Según los datos obtenidos, la muestra "1829 - Pietracor" presenta las siguientes características:

En base a los criterios y procedimientos de la norma IRAM 1649 la muestra está compuesta por 65,7% de cuarzo, 15,6% de agregados graníticos, 1,8% de agregados metamórficos, 12,3% de feldespatos, 2,6% de micas, 1,5% de anfibol y otras litologías minoritarias (cada una ellas en porcentajes < 1%). A su vez, según el estudio microscópico, la fracción retenida en el tamiz N° 30 contiene 35,4% de cuarzo (con escasa o leve extinción ondulante), 19,8% de agregados graníticos, 8,0% de agregados metamórficos, 24,0% de feldespatos, 12,0% de micas, y otras litologías minoritarias (cada una ellas en porcentajes < 1%). Según este estudio, la muestra no posee cuarzo fuertemente tensionado y/o microcristalino < 0,062 mm, por lo que se encuentran por debajo del límite de 5% estipulado en el Reglamento CIRSOC 201, o la Norma IRAM 1512 (Tabla 3 de la versión 2013) para este tipo de componente potencialmente reactivo. Por lo tanto, corresponde considerar a la muestra como **no reactiva** desde el punto de vista petrográfico.

ANEXO IV

CEMENTOS AVELLANEDA

Buenos Aires, 20/04/22

Sr. Cliente
Presente

Referencia: **Protocolo cemento Extra CPN50 (ARI, MRS) (IRAM 50001), a granel**

De mi mayor consideración:

Cumplo en dirigirme a UD. a efectos de hacerle llegar un resumen de los resultados de los ensayos de caracterización de nuestro cemento pórtland normal de moderada resistencia a los sulfatos y alta resistencia inicial, Extra, CPN50 (ARI, MRS) (GRANEL), IRAM 50001, procedente de planta Olavarría, correspondientes al período 15/02/22 al 11/04/22.

Fecha	R200	Blaine	EA	FIN	FFI	C1	C28	PPC	MG	SO3	RI
15/02/22	0,0	420				22,5	66,1	2,8	0,6	2,6	
16/02/22	0,0	423				22,6	63,7	2,8			
17/02/22	0,0	433				22,9	65,2	2,8	0,7	2,3	
18/02/22	0,0	436				21,1	64,9	3,1			
19/02/22	0,1	430	0,01	150	202	21,6	61,8	2,9	0,7	2,7	0,9
20/02/22	0,1	435				22,3	64,8	3,1			
21/02/22	0,1	435				23,8	66,1	3,0			
22/02/22	0,0	438				22,3	66,2	3,0	0,7	2,7	
23/02/22	0,0	431				22,2	65,8	3,1			
24/02/22	0,1	428				22,3	64,0	3,0	0,7	2,7	
25/02/22	0,0	423				22,0	65,8	2,6			
26/02/22	0,1	427	0,03	151	200	23,5	66,5	3,0	0,7	2,7	0,9
27/02/22	0,1	430				22,2	66,6	3,1			
28/02/22	0,0	410				24,6	66,6	2,9			
02/03/22	0,0	430				21,6	63,5	3,1			
03/03/22	0,0	431				24,2	66,8	3,1	0,7	2,7	
04/03/22	0,0	438				21,8	64,7	2,8			
05/03/22	0,0	414	0,02	169	204	22,3	62,3	3,0	0,9	2,7	1,0
07/03/22	0,0	422				21,2	65,0	3,0			
08/03/22	0,0	433				20,5	64,3	3,3	0,7	2,8	
09/03/22	0,0	438				21,2	63,3	2,8			
10/03/22	0,0	422				22,1	66,7	3,2	0,7	2,6	
11/03/22	0,0	419				21,8	66,0	2,9			
12/03/22	0,0	430	0,03	145	190	25,1	65,1	3,2	0,9	2,7	1,0
13/03/22	0,0	430				23,0	64,9	2,9			
14/03/22	0,0	431				27,5	67,4	3,2			
15/03/22	0,1	419				22,5	62,3	2,9	0,8	2,6	
16/03/22	0,1	425				22,6		3,1			
17/03/22	0,1	419				22,9		3,0	0,7	2,6	
18/03/22	0,0	415				21,9		3,0			
19/03/22	0,0	422	0,00	145	190	24,1		3,1	0,9	2,8	0,8
21/03/22	0,1	425				24,4		3,1			

CEMENTOS AVELLANEDA

22/03/22	0,1	434				24,2		3,0	0,8	2,5	
23/03/22	0,1	438				24,0		3,3			
24/03/22	0,1	430				22,9		3,3	0,7	2,5	
25/03/22	0,1	420				22,0		3,3			
26/03/22	0,1	420	-0,01	145	190	22,6		3,2	0,9	2,5	1,0
28/03/22	0,0	423				23,6		3,1			
29/03/22	0,1	419				23,7		3,0	0,8	2,5	
30/03/22	0,0	428				21,6		2,9			
31/03/22	0,1	430				20,9		2,9	0,8	2,6	
01/04/22	0,2	436	0,02	151	201	22,6		3,3	0,9	2,6	1,0
04/04/22	0,0	449				23,2		3,1			
05/04/22	0,0	438				23,8		3,0	0,9	2,6	
06/04/22	0,1	446				24,6		3,2			
07/04/22	0,1	442				22,7		3,0	0,7	2,6	
08/04/22		447				23,3		3,1			
09/04/22	0,1	436				23,4		3,2	0,8	2,5	
11/04/22	0,1	447				25,1		3,1			

R200: Residuo sobre tamiz 75 µm (%); Blaine: Superficie específica por permeametría Blaine (m^2/kg); SO3: Óxido de azufre (%); PPC: Pérdida por calcinación (%); RI: Residuo insoluble (%); FIN y FFI: Tiempos de fraguado inicial y final (minutos); AUT: Expansión en autoclave (%); MG: Óxido de magnesio (%); C1 y C28: Resistencia a 1 y 28 días (MPa).
NOTA: El presente protocolo constituye una certificación de cumplimiento de la norma IRAM 50001 correspondiente al cemento CPN50 (ARI, MRS). Los resultados de resistencia a compresión del cemento, que se informan en el protocolo adjunto, son obtenidos a partir del ensayo IRAM 1622, empleando para ello arena normalizada (DIN EN 196-1), de procedencia alemana, agregado que también es utilizado por el Organismo de Certificación del INTI-Construcciones para el control del producto y la entrega de la licencia de uso de los certificados de conformidad.

En la tabla que sigue se informan los valores promedio del contenido de aluminato tricálcico (C_3A) del clínker empleado en la fabricación del cemento Avellaneda CPN50 (ARI, MRS), correspondientes a las moliendas realizadas durante los meses de noviembre de 2021 a marzo de 2022. Por tratarse de un cemento normal, la única adición mineral que lleva este cemento es filler calcáreo, como "componente minoritario" (< 5 %).

Contenido de C_3A (%)	Nov/21	Dic/21	Ene/22	Feb/22	Mar/22
	3,4	3,0	3,2	3,1	3,7

Sin más, quedando desde ya a vuestra entera disposición, lo saludo atte.

Dr. Mg. Ing. Carlos A. Milanesi
Gerente de Promoción y Asistencia Técnica

ANEXO V

HOJA TÉCNICA

Sika® ViscoCrete®-20 HE

Superplastificante de alto rango

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Sika® ViscoCrete®-20 HE es un superplastificante de tercera generación para hormigones y morteros. Cumple los requerimientos para superplastificantes reductores de agua de alto rango de acuerdo a la norma EN 934-2

USOS

Sika® ViscoCrete®-20 HE fue especialmente desarrollado para plantas de producción de hormigón donde se requiera desarrollo de resistencias tempranas, potente reducción de agua y mejoras en la fluidez.
Sika® ViscoCrete®-20 HE se utiliza principalmente para las siguientes aplicaciones:

- Hormigón premoldeado
- Hormigón Fast-track
- Homigón in situ donde que requiera la utilización de encofrados deslizantes.
- Hormigón autocompactante (Self Compacting Concrete - SCC)

CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

Sika® ViscoCrete®-20 HE es un potente superplastificante que actúa a través de diferentes mecanismos de acción: adsorción en la superficie de finos y efectos estéricos que separan las partículas de cemento mejorando su dispersión e hidratación.
Alcanza las siguientes ventajas y propiedades:

- Alto incremento en el desarrollo de resistencias tempranas, resultando muy recomendable para la habilitación o desencofrado rápido del hormigón colado in situ o premoldeado.
- Reductor de agua extremadamente potente, dando como resultado una alta densidad, elevada resistencia y reducción de permeabilidad al agua.
- El efecto de superplastificante, mejora la fluidez, facilitando la colocación, la compactación y la terminación de la superficie.
- Especialmente adecuado para la producción de hormigón autocompactante. (Self Compacting Concrete SCC)
- Disminución de los efectos de contracción por la elevada reducción de agua.
- Reduce el tiempo de desencofrado.
- Reduce tiempos de curado.

Sika® ViscoCrete®-20 HE no contiene cloruros o cualquier otro componente que pudiera favorecer la corrosión del acero. Por ello puede utilizarse sin restricciones en estructuras armadas o estructuras de hormigón pretensado.

NORMAS / APROBACIONES

Conforme a los requerimientos de EN 934 – 2, Tabla 3.1/3.2

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Base química	Solución acuosa de policarboxilatos modificados
Presentación	Tambores de 220 kg. Tanques de 1000 kg.

Hoja técnica
Sika® ViscoCrete®-20 HE
Enero 2019, Versión 01.01
021301011000000037

	Tanques por kg y a granel bajo pedido.
Apariencia / Color	Líquido poco viscoso color miel o ligeramente opaco.
Vida útil	12 meses desde la fecha de producción si se almacena en su envase original sin abrir y sin daños.
Condiciones de almacenamiento	Conservar a temperaturas entre +5°C y +30°C. Proteger de la acción solar directa y de la helada.
Densidad	~1.09 kg/l a +20 °C
pH	~4.5
Contenido convencional de material seco	~40.0 M.-%

INFORMACIÓN TÉCNICA

Guía de hormigonado	En relación a la producción y colocación del hormigón, cuando se utiliza Sika® ViscoCrete®-20 HE, se deben seguir las reglas prácticas del correcto hormigonado de acuerdo a las normas y reglas de orden general. Se deben llevar a cabo ensayos de laboratorio antes del hormigonado in situ, especialmente cuando se usan nuevos diseños de mezcla, se incorporan nuevos materiales componentes o se producen cambios en los mismos El hormigón fresco debe ser curado apropiadamente tan pronto como sea posible.

INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

Dosificación recomendada	• Para trabajabilidad media: 0.2 - 0.8% del peso del cemento. • Para hormigones de alta trabajabilidad, muy baja relación agua/ cemento y para hormigón autocompactante: 1.0 - 2.0% del peso del cemento.
Compatibilidad	Sika® ViscoCrete®-20 HE puede ser combinado con otros productos de Sika Importante: siempre realizar ensayos antes de combinar productos en mezclas específicas o contactar a nuestro Departamento Técnico para mayor información.
Restricciones	Sika® ViscoCrete®-20 HE no debe incorporarse sobre el cemento seco.

INSTRUCCIONES DE APLICACIÓN

Sika® ViscoCrete®-20 HE se incorpora en el agua de amasado o en la mezcladora al mismo tiempo que se añade el agua.
Para aprovechar la ventaja de la alta reducción de agua, recomendamos un preamasado húmedo cuidadoso del material sólido durante 60 segundos como mínimo antes de la incorporación del aditivo.
Para evitar el exceso de agua en el hormigón, la dosificación final debe comenzar solo después de 2/3 del tiempo de mezclado húmedo.

LIMITACIONES

Cuando se use Sika® ViscoCrete®-20 HE el diseño de la mezcla debe ser adecuado de acuerdo a los materiales utilizados a través de la realización de ensayos.
La incorporación excesiva de agua o la sobre dosificación puede causar segregación.
Hormigón autocompactante:
Cuando se use Sika® ViscoCrete®-20 HE para elaborar hormigón autocompactante debe ser usado un diseño de mezcla adecuado.

Helada:
En caso de congelación del aditivo Sika® ViscoCrete®-20 HE,el producto puede ser utilizado si se descongela lentamente, a temperatura de unos 20 °C.y se agita en forma intensa.

VALORES BASE

Todos los datos que se indican en esta Hoja Técnica, están basados en ensayos de laboratorio. Las mediciones en obra de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.

RESTRICCIONES LOCALES

Observe, por favor, que como resultado de regulaciones locales específicas desempeño de este producto puede cambiar de acuerdo a las regulaciones locales de país a país. Consultar la Hoja Técnica del producto para una descripción exacta de los campos de aplicación.

ECOLOGÍA, SEGURIDAD E HIGIENE

El usuario debe leer las Fichas de Datos de Seguridad correspondientes más recientes antes de utilizar cualquier producto. Para obtener información y asesoramiento sobre la manipulación, el almacenamiento y la eliminación seguros de los productos químicos, los usuarios deberán consultar la Hoja de Datos de Seguridad (SDS) más reciente que contenga datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otros relacionados con la seguridad.

NOTAS LEGALES

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento y la experiencia actual de Sika de sus productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con todas y cada una de las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede ofrecer de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno brindado, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. Corresponde al usuario evaluar la conveniencia del producto para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos en cualquier momento y sin necesidad de notificación alguna. Se reservan los derechos de propiedad de terceras partes. Los pedidos son aceptados bajo las presentes condiciones y de conformidad con los términos de las Condiciones Generales de Venta y Suministro al momento de efectuarlos. Los usuarios deben obligatoriamente conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas Técnicas de Productos, copias de las cuales se mandarán a quién las solicite.

Sika Argentina S.A.I.C.
www.sika.com.ar
Juan Bautista Alberdi 5250
(B1678CSI) Caseros
Teléfono: 4734-3500
Asesoramiento Técnico: 4734-3502/3532
info.gral@ar.sika.com

Vialidad Nacional establece en su “Pliego de especificaciones técnicas generales para pavimentos de hormigón”, sección 9.1.3.2, las “temperaturas de colocación” [5]. En esta sección se define la temperatura en el hormigón fresco inmediatamente antes de su descarga, colocación y compactación en 32° C, determinando para ello ciertas especificaciones y tomando los recaudos necesarios con las exigencias del Supervisor de Obra hacia el contratista a modo de realizar estudios complementarios que permitan prevenir algún deterioro en el hormigón joven: “…En función de estos estudios y medidas adoptadas, el Supervisor de Obra podrá adoptar una temperatura diferente, que nunca podrá ser mayor a treinta y cinco grados centígrados (35 °C)…”.

El IRAM establece términos similares en la norma IRAM 1666 [6], en su punto 5.1.3 “temperatura”, donde el hormigón fresco en el punto de entrega debe ser, como máximo, el valor máximo especificado por el usuario o, en su defecto, 32 °C. Este valor puede elevarse hasta 35 °C si el usuario dispone de los medios necesarios para proteger al hormigón frente a la exposición a gradientes térmicos, y prevenir los riesgos de fisuración por origen térmico.