



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y
NATURALES**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ASIGNATURA: PRÁCTICA SUPERVISADA

INFORME TÉCNICO PROFESIONAL

**“DESARROLLO DE HORMIGONES PARA PAVIMENTOS CON
TECNOLOGIA DE ALTO RENDIMIENTO EN LA CIRCUNVALACION
DE LA CIUDAD DE CORDOBA”**

ALUMNO: NOVILLO CORVALÁN, Santiago

MATRÍCULA: 38.500.609

PLAN: 20105-11

TUTOR: Dr. Ing. FALAVIGNA, Claudio

SUPERVISOR EXTERNO: CANTARELLA, Juan Pedro

AÑO 2020

RESUMEN

El presente Informe Técnico Profesional representa las tareas desarrolladas en la empresa Holcim Argentina, RMX negocio de hormigones, durante la Práctica Supervisada junto al supervisor de calidad Juan Pedro Cantarella y el técnico de calidad Marcos Pintos.

En el transcurso de la pasantía fueron surgiendo distintos tipos de trabajos, participando el alumno en tareas de diseño, desarrollo, puesta en obra y control de recetas de hormigón para la construcción, mediante tecnología de alto rendimiento, de la calzada de un tramo de la circunvalación de la ciudad de Córdoba, Argentina.

Esta práctica supervisada se centra principalmente en tres actividades las cuales se fueron dando en conjunto y retroalimentándose acorde a resultados y necesidades de obra: la primera corresponde al *Diseño y Desarrollo* de una receta de hormigón vial apta para ser usada con tecnología de alto rendimiento. La segunda actividad corresponde a la *Producción y Puesta en Obra* del hormigón en cuestión en los tramos arroyo La Cañada – avenida Fuerza Aérea y avenida Fuerza Aérea distribuidor Santa Ana de la avenida Circunvalación de la ciudad de Córdoba. Y por último, la tercera actividad consistió en llevar a cabo todos los *Controles acorde a Pliegos de Vialidad y Normas Iram correspondientes*, tanto de la materia prima como del producto en estado “fresco” y “puesto en obra”.

En primer lugar, se realiza una introducción que busca exponer los objetivos a satisfacer mediante la realización de la Práctica Supervisada, y el plan de actividades llevado a cabo.

Seguidamente, a lo largo del informe, se procede a detallar las tres actividades principales desarrolladas por el alumno, haciendo mención de los problemas ocurridos para los cuales se necesitó de la intervención tanto del alumno como del Supervisor de Calidad Juan Pedro Cantarella y el Técnico de Calidad Marcos Pintos. Así también, se destacarán los diversos inconvenientes o condicionantes que fueron surgiendo a lo largo de ellas.

Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas tras la experiencia de realización de la Práctica Supervisada y de la redacción del Informe Técnico Final, desde un punto de vista tanto académico – laboral como personal.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	7
1.2.	OBJETIVOS DEL INFORME TÉCNICO	7
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2.	EMPRESA	9
2.1	LAFARGEHOLCIM	9
2.2	HOLCIM ARGENTINA	10
2.3	RMX HOLCIM (Ready Mix Concrete)	11
3.	OBRA – CIERRE ANILLO DE LA CIRCUNCALACION DE CORDOBA	13
3.1	DESCRIPCION DE LA OBRA	13
3.2	TRAMO N°4	17
3.2.1	ASPECTOS TÉCNICOS	18
3.2.2	OBRAS EJECUTADAS	19
4.	DESARROLLO Y DISEÑO DEL HORMIGON VIAL	19
4.1	EL HORMIGON	19
4.2	LOS PAVIMENTOS DE HORMIGON	20
4.3	TIPOS DE PAVIMENTO DE HORMIGON	21
4.3.1	PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE CON JUNTAS	22
4.3.2	COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA	23
4.3.2.1	Calzada de hormigón	24
4.4	DISEÑO DE HORMIGON VIAL	24
4.4.1	DISEÑO DE MEZCLA Y DOSIFICACION	24
4.4.2	METODO DE DISEÑO DEL ICPA (ICPA, 2014)	25
4.4.2.1	Etapas del Método Racional de Diseño	25
4.5	HORMIGON VIAL CON TECNOLOGIA DE ALTO RENDIMIENTO	26
4.5.1	PAVIMENTACION CON ENCOFRADOS DESLIZANTES	26
4.5.1.1	TAR – Características Técnicas	28
4.6	PLANTAS ELABORADORAS DE HORMIGON	34
4.6.1	PLANTA ELABORADORA UTILIZADA EN EL PROYECTO	36
4.7	PROCESO DE DESARROLLO DEL HORMIGON SOLICITADO	39
4.7.1	ELECCION DEL CEMENTO A EMPLEAR	40
4.7.2	ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO ADECUADO	42
4.7.3	INCORPORACIÓN DE AIRE EN FORMA INTENCIONAL	43
4.7.4	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS	44
4.7.5	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA ESTIMADA DE LA MEZCLA	47
4.7.6	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO	48

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

4.7.7 ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN A/C (AGUA/CEMENTO)	48
4.7.8 CALCULO DEL CONTENIDO UNITARIO DE CEMENTO (CUC)	50
4.7.9 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS (FINOS Y GRUESOS)	51
4.7.10 AJUSTE EN PASTONES Y PRUEBA INDUSTRIAL	51
5. CONTROLES DE CALIDAD	53
5.1 PLAN DE CALIDAD	54
5.1.1 CALIBRACION DE MEDIOS DE MEDICION	55
5.1.2 CONTROL DE MATERIALES	56
5.1.2.1 Materiales con sistema de calidad certificado	57
5.1.2.2 Materiales sin sistema de calidad certificado	59
5.1.3 ENSAYOS DE HORMIGON EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO	65
5.1.3.1 Ensayos al hormigón en estado fresco	66
5.1.3.2 Ensayos al hormigón en estado endurecido	70
6. CONCLUSIONES	74
6.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS	74
6.2 CONCLUSIONES PERSONALES	77
7. BIBLIOGRAFIA	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Imagen empresarial de LafargeHolcim.....	7
Figura 2.2. Imagen empresarial de LafargeHolcim.....	9
Figura 2.3. Negocios de LafargeHolcim en Argentina	10
Figura 2.4. Imagen de Ready Mix Concrete.....	11
Figura 2.5. Ubicación de planta Hormigoneras en Ciudad de Córdoba.....	11
Figura 2.6. Hormigones de la línea Ultra Series.....	12
Figura 3.1. Último tramo construido en la circunvalación de Córdoba.....	13
Figura 3.2. Tramo ampliado de la Circunvalación de Córdoba.....	14
Figura 3.3. Traza original vs modificada.....	15
Figura 3.4. Tramo de Circunvalación Fadea	16
Figura 3.5. Intercambiador Córdoba – Calos Paz	17
Figura 4.1. Sólidos que constituyen el hormigón.....	18
Figura 4.2. Distribución de cargas en los pavimentos	20
Figura 4.3. Pavimento de hormigón en construcción.....	21
Figura 4.4. Vista en planta de un pavimento rígido	21
Figura 4.5. Barras de unión.....	22
Figura 4.6. Canasto de pasadores.....	22
Figura 4.7. Estructura de un pavimento rígido	22
Figura 4.8. Hormigón colado frente a terminadora	26
Figura 4.9. Calidad de conducción histórica en Minnesota USA.	26
Figura 4.10. Esquema de pavimentadora con encofrados deslizantes.....	27
Figura 4.11. Orugas deslizantes	28
Figura 4.12. Distribuidor de hormigón	28
Figura 4.13. Cámara de vibrado	29
Figura 4.14. Tramper o Viga oscilante	29
Figura 4.15. Molde Lateral	30
Figura 4.16. Insertor automático de pasadores.....	30
Figura 4.17. Insertor automático de barras	31
Figura 4.18. Fratás automático	31
Figura 4.19. Equipo de aspersión de antisol	32
Figura 4.20. Pala cargadora frontal.....	33
Figura 4.21. Planta dosificadora y planta mezcladora.....	33
Figura 4.22. Camión moto hormigonero siendo cargado.....	34
Figura 4.23. Mezclador central.....	34
Figura 4.24. Interior del mezclador central	35
Figura 4.25. Ensayo del cono de Abrams	36
Figura 4.26. Ubicación del obrador de José J. Chediack	37
Figura 4.27. Carga de hormigón en camiones tipo batea.....	37
Figura 4.28. Silos de almacenaje de cemento	38
Figura 4.29. Tipos y composición de los cementos IRAM 50000	39
Figura 4.30. Laboratorio de hormigones del CDI.....	40
Figura 4.31. Hormigón para cliente Chediack	41
Figura 4.32. Consistencia, rangos de asentamiento, tolerancias y métodos de compactación, extractos del CIRSOC-2005.....	41
Figura 4.33. Cantidad de aire incorporado en función del tamaño máximo del agregado grueso (CIRSOC-2005 – Tabla 5.3).....	42
Figura 4.34. Curva de agregado total.....	43
Figura 4.35. Fisuras por contracción plástica.....	45
Figura 4.36. Abaco: Demanda de agua del hormigón en función del asentamiento y el MF del agregado total.....	46

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Figura 4.37. Resistencia a la compresion vs Relacion a/c	48
Figura 4.38. Razones a/c maximas especificadas por razones de durabilidad.....	48
Figura 4.39. Valores de resistencia a la compresion del hormigon desarrollado	49
Figura 4.40. Planilla de pastones de prueba en laboratorio	51
Figura 4.41. Prueba a escala industrial.....	52
Figura 5.1. Plan de calidad	53
Figura 5.2. Diagrama de flujo de calibracion y certificacion de equipos y medios de medición	54
Figura 5.3. Protocolo de Calidad CPC50	56
Figura 5.4. Ensayos realizados al cemento en planta	56
Figura 5.5. Protocolos de aditivos según norma IRAM 1663.....	57
Figura 5.6. Parámetros a observar en los aditivos químicos	58
Figura 5.7. Tabla de control de ensayos de agregados gruesos	59
Figura 5.8. Tabla de control de ensayos de agregados finos	59
Figura 5.9. Curva granulometrica agregado grueso	60
Figura 5.10. Curva granulometrica agregado fino	61
Figura 5.11. Partícula de agregado humedo en la que se muestra la districucion de agua interior y exterior	62
Figura 5.12. Tabla de ensayos y frecuencias al hormigón en sus diferentes estados .	65
Figura 5.13. Termómetro digital tipo pinche	66
Figura 5.14. Equipo de medicion de aire Washington	67
Figura 5.15. Paso a paso del ensayo de medición de aire	68
Figura 5.16. Cálculo para medición de la densidad del hormigón	69
Figura 5.17. Metodologia de compactación y terminacion de probetas	70
Figura 5.18. Bachas con probetas sumergidas en agua en su interior	71
Figura 5.19. Prensa de ensayo de resistencia a la compresión	71
Figura 5.20. Principio físico del ensayo de compresión.....	72
Figura 5.21. Planilla de registro de ensayos de probetas.....	72
Figura 5.22. Probeta prismatica para ensayo de resistencia a la flexión.	73
Figura 6.1. Tabla resumen Problemas/Soluciones.....	76

1. INTRODUCCIÓN

A los fines de concluir los estudios de la carrera de Ingeniería Civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN), se realiza el presente Informe Técnico Final (ITF) debido a que resulta necesario que el alumno lleve a cabo la Práctica Supervisada (PS) durante un periodo no menor a 200 horas, dentro de alguna entidad receptora (en este caso RMX HOLCIM ARGENTINA) que desarrolle sus actividades dentro de las áreas relacionadas con la carrera.

Las 200 horas fueron cumplimentadas por el alumno durante un determinado periodo de la pasantía rentada realizada en la empresa en cuestión en un transcurso de tiempo de 18 meses. Para cumplimentar las horas requeridas el alumno asistió media jornada, de lunes a viernes durante 4 meses aproximadamente, realizando tareas de oficina técnica, laboratorio y campo en el lugar donde se encontraba la obra en cuestión.

Las oficinas se encuentran en una de las plantas hormigoneras de la empresa, Planta Norte, ubicada en la calle Monseñor Pablo Cabrera 7440, Córdoba Argentina. La empresa en su momento poseía 4 plantas hormigoneras ubicadas estratégicamente en los cuatro puntos cardinales de la ciudad. La planta encargada de abastecer el proyecto de Cierre de Circunvalación era la Planta Oeste; contando la misma con una planta dosificadora y un mezclador central, pieza fundamental para lograr el hormigón buscado.

Durante el transcurso del desarrollo de la Práctica Supervisada, el alumno cumplió determinados objetivos, tanto específicos como generales permitiéndole para futuro una correcta inserción en la vida personal y profesional como Ingeniero Civil.

1.2. OBJETIVOS DEL INFORME TÉCNICO

Los objetivos particulares de este informe técnico están asociados a la instrucción en el desarrollo y diseño de formulaciones para hormigones viales colocados con tecnología de alto rendimiento. El cumplimiento de los controles respectivos según pliegos y reglamentos, en sus diferentes estados (fresco y endurecido), como así también el conocimiento acerca de los pavimentos de rígidos y de las buenas prácticas a la hora de colar, trabajar y curar los mismos.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Al finalizar la Practica Supervisada, he adquirido los siguientes conocimientos o experiencias:

- *Diseñar hormigones* acorde a requerimientos de obra.
- Aprender a cerca del uso de *pliegos, normas y reglamentos* de la construcción.
- Aprender a dar seguimiento y cumplimiento a *planes de calidad* certificados.
- Aprender el *funcionamiento* de una *multinacional*, con su permanente trabajo en equipo, divisiones jerárquicas, asignación de roles, responsabilidades y requerimientos administrativos, técnicos, profesionales y personales.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- Ser partícipe de *auditorías* internas y externas para aprender a prepararse para las mismas y crecer con sus resultados y recomendaciones.
- *Supervisar y controlar* obras de arquitectura e ingeniería.
- Tomar consciencia de la importancia que tiene el *hormigón* a la hora de realizar una obra civil.
- Tomar consciencia de lo que puede significar *no respetar* las Técnicas Constructivas aprendidas para la construcción de una obra de arquitectura o ingeniería, con los consiguientes daños físicos a trabajadores y/o personas ajenas a ella.
- Tomar consciencia de la importancia que implica el buen conocimiento y posterior cumplimiento de la *higiene y seguridad* en obra; la salud propia y la de mi equipo debe primar siempre por sobre toda otra cosa.
- Aprender a realizar *informes técnicos* de todo tipo según requerimientos del cliente.
- Observar detalladamente los síntomas que el entorno y la misma obra nos muestra a fin de obtener *conclusiones* correctas y tomar las medidas correspondientes a cada caso, con el fin de elaborar un correcto informe ante eventuales reclamos o quejas de clientes.
- Aprender de los *errores* cometidos por parte de otros profesionales e internalizar los mismos.
- Aprender del trato y *trabajo en equipo*, priorizando siempre el compañerismo, buena predisposición y empatía.
- Aprender a tratar con *clientes*; atención, asesoramiento, recomendaciones, etc. Siendo siempre cordial, atento y conciliador.

2. EMPRESA

2.1 LAFARGEHOLCIM

Holcim Argentina es una compañía perteneciente al grupo LafargeHolcim, líder mundial en el diseño y fabricación de materiales y soluciones constructivas, prestando servicio a rehabilitadores, constructores, arquitectos, urbanistas e ingenieros en todo el mundo. En definitiva, clientes que van, desde pequeños proyectos locales, hasta infraestructuras más complejas y exigentes desde un punto de vista técnico y arquitectónico.



Figura 2.1. Imagen empresarial de LafargeHolcim

El Grupo, como se observa en la Figura 2.1, se encuentra presente en 80 países alrededor del globo con posiciones líderes en todas las regiones, empleando a alrededor de 90.000 personas y con una cartera de negocio diversificada con un balance equilibrado entre mercados maduros y en desarrollo, logrando 27.500 millones de CHF (francos suizos) en ventas netas, como vemos en la Figura 2.2. El mismo se encuentra organizado en cuatro grandes áreas de negocio: cemento, áridos, hormigón y soluciones y productos. Todo ellos con el compromiso inexcusable con la salud, la

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

seguridad y la sostenibilidad, lo que hace posible que tengamos un modelo de negocio eficiente y los equipos con los mejores resultados.

Esta gran multinacional surge de la fusión entre los dos grandes líderes mundiales de la construcción, la empresa suiza Holcim y la francesa Lafarge, allá por el año 2015. Con 2.300 instalaciones (incluyendo unas 1.400 plantas de hormigón, aproximadamente 600 canteras y alrededor de 200 fábricas de cemento y moliendas) es hoy el líder mundial indiscutido del negocio.



Figura 2.2. Imagen empresarial de LafargeHolcim

2.2 HOLCIM ARGENTINA

Holcim Argentina por su parte, como en el mundo, define con experiencia, trabajo e investigación, los más altos estándares de calidad en productos y servicios. Con una capacidad instalada de 4.8 millones de toneladas de cemento, más de un cuarto de millón de metros cúbicos de hormigón elaborado, y una amplia cobertura en el territorio nacional, como se puede ver en la Figura 2.3, se posiciona como líder del negocio de la construcción a nivel nacional. Fábricas, Moliendas y Centros de

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Distribución estratégicamente ubicados, brindan una extensa cobertura del territorio nacional y de las áreas con mayores índices de consumo, tanto de cemento como de hormigones y áridos.



Figura 2.3. Negocios de LafargeHolcim en Argentina

2.3 RMX HOLCIM (Ready Mix Concrete)

Dentro de la empresa encontramos una particular unidad de negocio, el negocio del hormigón, quien se llevará el protagonismo de este informe técnico. Aunque este sea el negocio que en términos de ganancias netas menos lucre, es el caballito de batalla de la empresa, la punta de lanza por el cual generar imagen, llegada al cliente, ventas

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

de cemento y agregados, una gran liquidez para la compañía en el corto plazo, entre otros muchos beneficios.



Figura 2.4. Imagen de Ready Mix Concrete

Hasta mediados del año 2019 RMX Holcim contaba con una capacidad instalada de medio millón de m³ de hormigón, distribuidos en cuatro plantas dosificadoras y una mezcladora; como se observa en la Figura 2.5, cuatro de ellas ubicadas estratégicamente en la ciudad de Córdoba y otra en la localidad del Bernal, provincia de buenos aires.

Actualmente, por cuestiones económicas y operativas, el negocio se ha reducido, contando con dos plantas dosificadoras en la ciudad de Córdoba, una de ellas la que se observa en la figura 2.4, y dos plantas en la localidad de Bernal, una dosificadora y una mezcladora para producción en serie de dovelas.

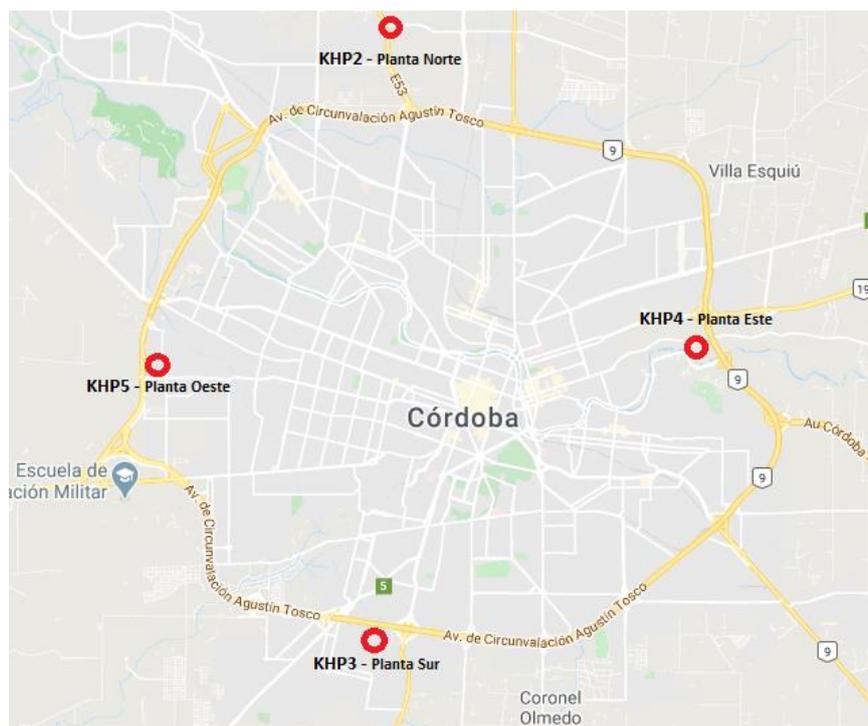


Figura 2.5. Ubicación de plantas Hormigoneras en Ciudad de Córdoba

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

A pesar de su contracción, el negocio de hormigones se encuentra en gran desarrollo técnico y comercial, contando actualmente con más de doscientas recetas de hormigones de línea y un brochure de más de veinte productos de alta performance denominados *Ultraserie*, algunos de los cuales observamos en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Hormigones de la Línea Ultraseries

Persiguiendo soluciones integrales, servicio técnico y comercial especializado, asistencia técnica en obra, equipos especiales, equipos de laboratorio, asistencia y trabajo en conjunto con un centro de innovación y de desarrollo propio de la compañía (CDI) y sobre todo, priorizando siempre la salud humana y medio ambiental, RMX Holcim se encuentra posicionada hoy como uno de los líderes del negocio a nivel nacional.

3. OBRA – CIERRE ANILLO DE LA CIRCUNCALACION DE CORDOBA

Tal como su título lo indica y he mencionado en algunas partes del documento, el presente informe será llevado a acabo a cerca los trabajos realizados para los pavimentos viales realización en el cierre de la circunvalación de córdoba.

3.1 DESCRIPCION DE LA OBRA

Como se observa en la Figura 3.1, se trata de la construcción de diecisiete kilómetros de traza que permitieron concluir luego de sesenta años la obra más esperada por los habitantes de la capital Cordobesa. Es una obra de gran envergadura que redunda en una circulación del tránsito más fluida de cuarenta y siete kilómetros de extensión que permite dividir el tránsito urbano del pasante con altos niveles de seguridad vial.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

La nueva traza de la avenida se encuentra compuesta de tres carriles por sentido de circulación con control total de accesos, intercambiadores, veintisiete puentes y un viaducto de 1800 metros de extensión, para resolver los cruces con otras vías arteriales y calles colectoras frentistas en toda su extensión.

Seis mil millones de pesos de inversión provincial (60%) y nacional (40%) fueron necesarios para culminar una de las obras más importantes del país durante su ejecución, contando la misma con estructuras viales únicas de su tipo; siendo necesarios movimientos de suelo que totalizaron los 7,2 millones de metros cúbicos entre excavaciones y terraplenes, esa cantidad de metros cúbicos representan unos 360 mil camiones que -puestos en fila-ocuparían la distancia que une La Quiaca con Ushuaia. 450 mil metros cúbicos de hormigón, que equivalen a 56.250 camiones mezcladores para la construcción de las calzadas, obras hidráulicas, puentes y otras estructuras, 90 mil toneladas de asfalto y 20 mil toneladas de acero, más el arduo trabajo de casi dos mil operarios.

La construcción de la Avenida Circunvalación, como puede verse en la Figura 3.2, se dividió en cinco tramos con el objetivo de agilizar su ejecución y avanzar desde distintos frentes de manera simultánea, cada tramo liderado por una empresa constructora en particular o uniones transitorias de las mismas. Los tramos licitados fueron de entre tres y cinco km aproximadamente cada uno, siendo las principales empresas adjudicadas Benito Roggio e Hijos, Rovella Carranza, SACDE, Boetto y Buttigliengo SA, AFEMA SA y Jose Chediack SAICA, empresa encargada de llevar a cabo la ejecución del tramo en base al cual desarrollaremos el presente informe.

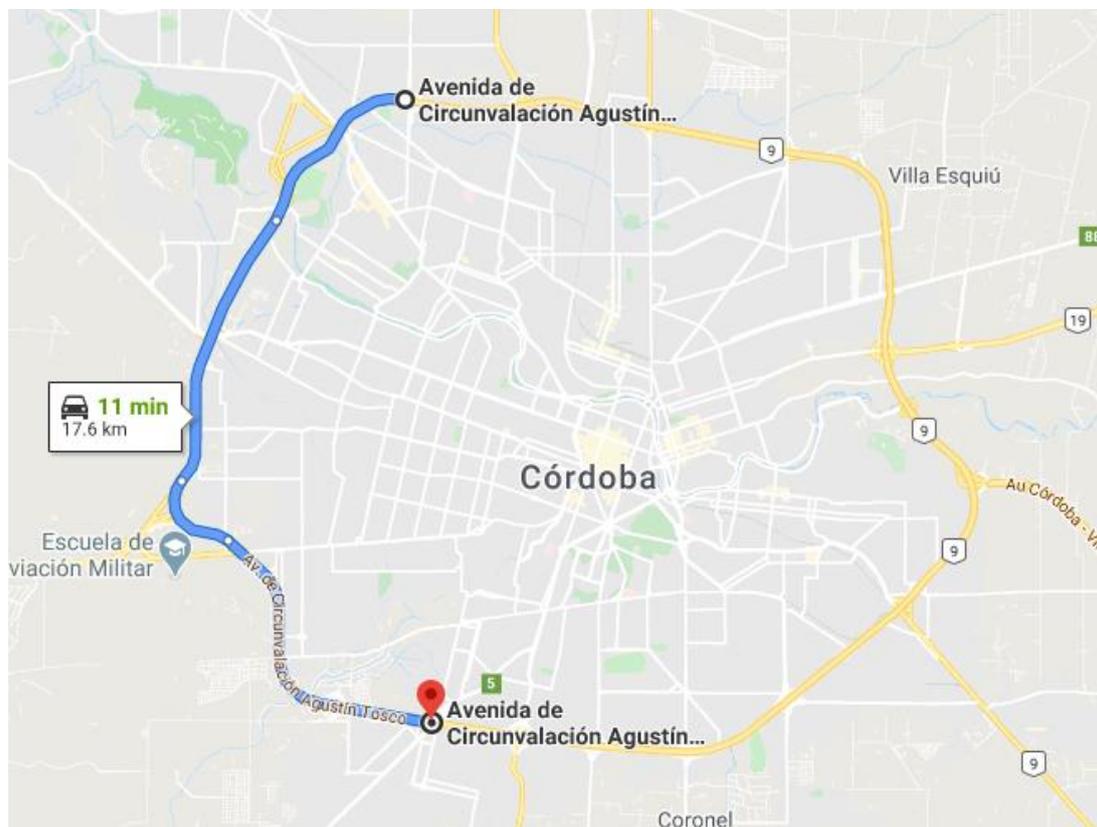


Figura 3.1. Último tramo construido de la circunvalación de Córdoba

Anillo cerrado



Figura 3.2. Tramo ampliado de la Circunvalación de Córdoba

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Los dos primeros tramos en comenzar fueron los que van desde Spilimbergo hasta el Estadio Kempes, pasando por debajo del nudo de la Mujer Urbana, y desde el Kempes hasta el nudo El Tropezón. Esos dos tramos suman casi cinco kilómetros y fueron los más complejos de los cinco en los que se plantearon el cierre de la Circunvalación. Se realizaron a lo largo de dos años por lecsa y por la UTE Roggio-Boetto y Buttigliengo, y suman un costo de 2.500 millones de pesos.

El que sigue es el tramo tres, este mide 3,8 kilómetros y va desde El Tropezón hasta la ruta 20. Esa traza es hoy bastante similar a la que anteriormente ocupaba la denominada Variante Pueyrredón, pero sumó colectoras, por lo que la Provincia tuvo que gestionar ante el Ejército la cesión de 27 hectáreas de tierra militar.

El cuarto tramo de la obra es donde la provincia propuso grandes cambios respecto a la traza que se había establecido hace más de una década, el motivo de los mismos fueron el ahorro de más de mil millones de pesos a través de la reducción de seis kilómetros de extensión de la misma, ahorro que no solo se materializó en estos seis km menos de ruta, sino a futuro en el gasto en transporte de los automovilistas y de la producción, que en su momento, se acercaba a los mil millones de pesos anuales. Se descartó la opción de rodear la Escuela de Aviación Militar, a cambio, hoy la traza pasa por dentro del predio de FADEA, tal como se observa en la Figura 3.3. Esta modificación también supuso que parte de la traza atravesase tierras pertenecientes a la Municipalidad de Córdoba, detrás del barrio Aeronáutico. Se trató de treinta y cuatro hectáreas que desde 1999 estaban destinadas a la ejecución de un parque que nunca se concretó.



Figura 3.3. Traza original vs modificada

3.2.1 ASPECTOS TÉCNICOS

Tipológicamente, el proyecto se encuadra como "autopista", con tres carriles de circulación por cada sentido, control total de accesos, intercambiadores y puentes para resolver los cruces con otras vías y calles colectoras.

El primer tramo, de sur a norte, comienza inmediatamente después de los puentes sobre el arroyo La Cañada conformándose, unos metros más delante de los mismos, por una trinchera de 1.140 metros, esto debido a la necesidad de incorporar un intercambiador a desnivel que vincule el proyecto del bulevar complementario a la avenida Circunvalación y el cruce debajo de la traza del ferrocarril, ramal Malagueño, y la avenida Donosa.

Continuando con la traza, la misma se desarrolla a nivel de terreno natural por unos 1.710 metros, para luego ingresar a los actuales terrenos de Fadea. Luego, en un tramo de 1.230 metros de longitud sigue también la tipología de trinchera para permitir el cruce bajo nivel con la avenida fuerza aérea y calle Alto Alegre. El distribuidor que allí se encuentra otorga una adecuada conectividad en ese sector de la ciudad, contando con un puente en Avenida Fuerza Aérea, ramales de giro a la derecha y rulos para resolver los movimientos principales de giro a la izquierda

Finalizada la trinchera, la calzada continúa en sección "normal" con la incorporación en el trayecto siguiente del empalme con la autopista Córdoba – Villa Carlos Paz. El mismo constituye una de las obras más relevantes del nuevo trazado y la conexión principal con la Autopista Carlos Paz. Tal como se observa en la Figura 3.5, consiste en un distribuidor multidireccional con ramales directos de dos carriles de circulación con igual velocidad de diseño que las calzadas principales. El distribuidor presenta ramales en 3 niveles e incluye cinco puentes en su diseño: cuatro de ellos en calzadas principales y uno sobre el ramal de acceso desde el oeste.

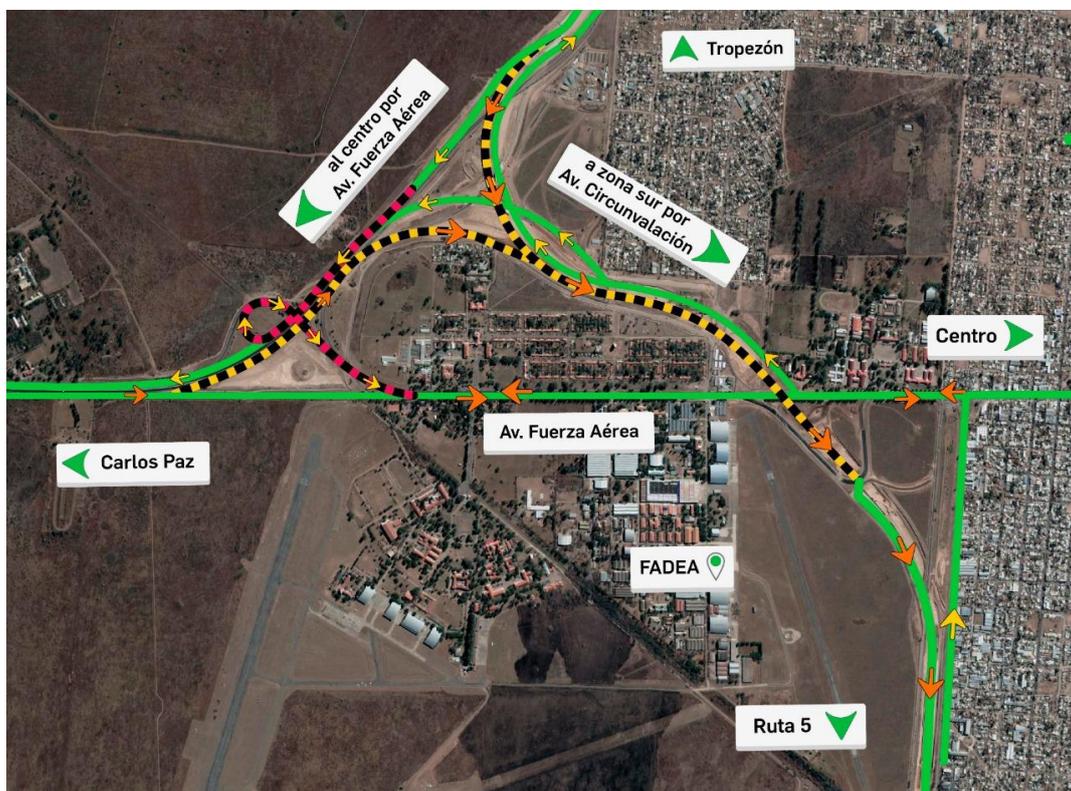


Figura 3.5. Intercambiador Córdoba – Carlos Paz

3.2.2 OBRAS EJECUTADAS

Las principales obras requeridas para llevar a cabo tanto el tramo en cuestión como los 17 kilómetros totales fueron, la pavimentación mediante hormigón de las calzadas principales y banquetas, pavimentación de calles colectoras, realización de importantes obras hidráulicas construidas por dos grandes sistemas (Arco Noroeste y Arco Suroeste) la mayoría de los mismos ubicados debajo de la calza principal, señalización vertical y demarcación horizontal, colocación de barreras de defensa, iluminación y reforestación completa de los tramos involucrados.

A continuación, será explicitado el diseño, desarrollo, puesta en obra y control del hormigón necesario para realizar una de las tareas más importantes antes mencionadas, la pavimentación de las calzadas principales mediante tecnología de alto rendimiento

4. DESARROLLO Y DISEÑO DEL HORMIGON VIAL

El objetivo principal de este informe técnico, fue el desarrollo y control en obra de un hormigón con las características y especificaciones técnicas necesarias para corresponder a un hormigón de tipo vial, apto colocación con terminadora de alto rendimiento y especificaciones técnicas de obra (pliego de la DNV 1998 y reglamento CIRSOC-2005).

Por esta razón, es que para poder hablar de pavimentos de hormigón y su diseño, primero daré una introducción a cerca de lo que es en sí mismo el hormigón, seguido de un desarrollo a cerca de los pavimentos rígidos y sus características, para luego poder pasar si, a hablar sobre el proceso de diseño y desarrollo en sí mismo.

Siendo el hormigón el componente principal de todo paquete estructural que conforma este tipo de pavimentos, conocer las características de los mismos nos permitirá también, abordar con mayor claridad y precisión los procesos de diseño y controles de calidad que serán expuestos.

4.1 EL HORMIGON

El hormigón es una suspensión concentrada de sólidos en agua; sólidos que varían ampliamente en tamaño y densidad de partículas, tal como podemos ver en la Figura 4.1.

Rango de Tamaño	Designación	Rol en el Hormigón Fresco
> 5 mm (usualmente hasta 40 mm)	Agregado Grueso o "Grava"	Volumen → Relleno
5 mm - 100 µm	Agregado Fino o "Arena"	Superficie → Cohesión + Volumen → Relleno
100 µm – 1 µm	Ligantes + Polvo de Agregado "Finos"	Superficie → Cohesión + Volumen → "Microfiller"

Figura 4.1. Sólidos que constituyen la mezcla de hormigón

Las partículas de arena y grava se encuentran separadas por una lámina de “pasta cemento” compuesta por agua, finos (ligante, mas polvo de los agregados) y aire (atrapado durante la mezcla o incorporado).

Esta mezcla de materiales, gracias a una reacción química irreversible y exotérmica que se da por la hidratación de las partículas de cemento al rodearse de agua, adquiere una gran rigidez y resistencia a la compresión; propiedad que hace del mismo la matriz de toda construcción, obra civil o proyecto de infraestructura, tanto a pequeña como gran escala.

Los usos y aplicaciones del hormigón son tan variados como las obras de construcción que los soliciten. Es un material tan versátil como la capacidad de su diseñador y materiales que lo conforman.

Al ser un material que lleva una combinación muy variada de materias primas, se ve afectado por una reacción química irreversible, y posee dos estados marcadamente diferenciados (fresco y endurecido), es que posee en cada etapa de su producción, una gran cantidad de ensayos y requerimientos a ser cumplidos para que su calidad sea acorde a los requerimientos de la estructura que lo solicite.

Siendo que en este informe nos centraremos en el desarrollo de un hormigón vial, más adelante en el mismo, abordaremos los ensayos que fueron requeridos a la hora de controlar la producción y puesta en obra del mismo.

4.2 LOS PAVIMENTOS DE HORMIGON

Tradicionalmente, los pavimentos se han dividido en dos grandes categorías: rígidos y flexibles. Estos términos, si bien en algunos casos resultan una excesiva simplificación, responden en buena medida a cómo reaccionan frente a las cargas y al ambiente.

Los pavimentos de asfalto, así como los de adoquines, son los que se encuentran dentro de la categoría de flexibles. Generalmente constan de una delgada capa de rodamiento construida sobre una base y una subbase, que descansan sobre un sustrato compactado o sobre el suelo natural. El factor considerado en el diseño de pavimentos flexibles es la resistencia del conjunto que conforman las diferentes capas. Estas estructuras, cuando son solicitadas por cargas, presentan mayores deflexiones, distribuyendo la carga hacia las capas inferiores en superficies relativamente pequeñas.

Los pavimentos de hormigón, por el contrario, presentan bajas deflexiones cuando son solicitados ya que debido a su alto módulo de elasticidad son capaces de distribuir las cargas en mayores superficies, reduciendo de esta manera los esfuerzos transmitidos a las capas inferiores, comportamiento que puede ser observado en la Figura 4.2.

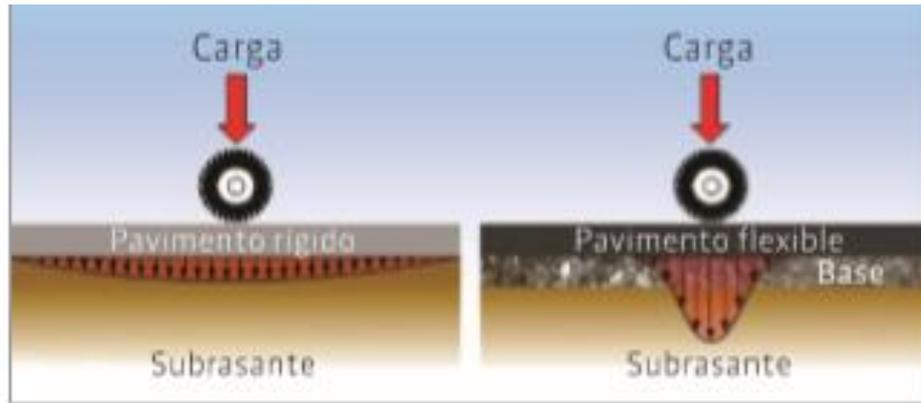


Figura 4.2. Distribución de cargas en los pavimentos

Una particularidad que tiene estos últimos tipos de pavimento, es que la calzada de hormigón experimentara contracciones, expansiones y deflexiones, productos tanto de las cargas como del ambiente, y estas acciones son las que generalmente inducen el desarrollo de fisuras.

La generación de las mismas, constituyen discontinuidades y puntos débiles que atentan contra la vida útil de las estructuras. Por este motivo es que se busca controlar los inconvenientes que pudieran generarse, asegurando una transferencia de carga más efectiva. Para ello, los diferentes tipos de pavimentos rígidos incorporan juntas, armadura de refuerzo o ambos elementos. Vale aclarar que de emplearse refuerzo de acero, este solo es utilizado para el control de fisuras y no como refuerzo estructural.

4.3 TIPOS DE PAVIMENTO DE HORMIGON

Los tipos de pavimentos rígidos comúnmente empleados son:

- De hormigón simple con juntas
- De hormigón armado con juntas
- Continuamente armados

Estos tres tipos de diseño pueden utilizarse para pavimentos nuevos, para reconstrucción y como recubrimiento de estructuras existentes.

Los pavimentos de hormigón pretensado y pre moldeado tienen las mismas aplicaciones que los anteriores, pero su empleo no ha sido muy difundido. Otros tipos de pavimentos rígidos incluyen los de hormigón compactado con rodillo y los de hormigón poroso.



Figura 4.3. Pavimento de Hormigón en construcción

Siendo que el hormigón desarrollado durante la ejecución del presente informe fue utilizado para la construcción de un pavimento rígido simple con juntas, tal cual el que se observa en la Figura 4.3, es que solo nos centraremos en la explicación de los mismos.

4.3.1 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE CON JUNTAS

Los pavimentos de hormigón simple son los más habitualmente empleados debido a su confiabilidad y a su mejor relación costo – eficiencia. La figuración es controlada dividiendo al pavimento en losas con una separación entre juntas transversales de 3,5 m a 6,0 m, que depende, entre otros factores, del tipo de base, el espesor y el coeficiente de expansión térmica.

Un factor importante que condiciona el desempeño de este tipo de pavimentos es la transferencia de carga a través de las juntas. Una mala transferencia de carga contribuye a problemas tales como el escalonamiento de las juntas, la erosión de bases por eyección de agua con suelo fino (bombeo) y roturas de las esquinas. En este tipo de juntas existen dos mecanismos de transferencia de carga: la trabazón de los agregados y el empleo de pasadores, representados en el croquis de la Figura 4.4 y fotografías de las Figuras 4.5 y 4.6.

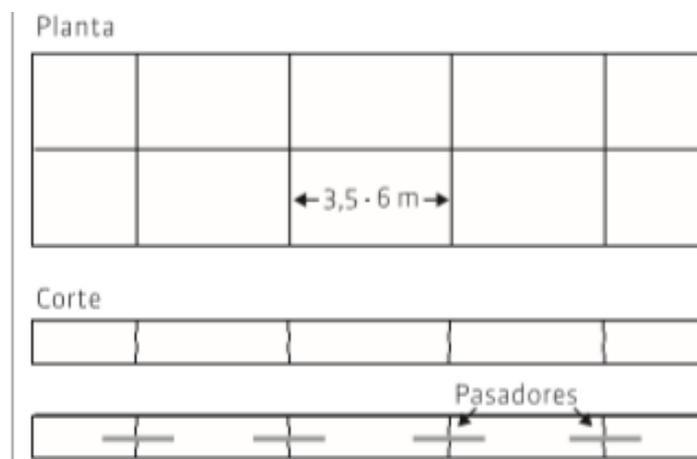


Figura 4.4. Vista en planta de un pavimento rígido

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Estos pavimentos contienen una suficiente cantidad de juntas como para controlar la ubicación de todas las fisuras desarrolladas, con el fin de evitar la degradación progresiva de sus bordes y mantener estanqueidad. Además, son las encargadas de absorber los movimientos de expansión y contracción de las losas.



Figura 4.5. Barras de unión



Figura 4.6. Canasto de pasadores

4.3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA

Una sección típica de un pavimento rígido está compuesta por una capa superior o calzada de hormigón, que es la encargada de proveer la mayor parte de su capacidad estructural. Esta base apoya sobre una base de material seleccionado que puede estar o no tratada con un ligante, que a su vez descansa sobre suelo natural o la subrasante, tal como puede observarse en la Figura 4.7.

Aunque este sea un tema que excede los objetivos del informe, mostrare la estructura tipo de un pavimento rígido, haciendo especial hincapié en la calzada de hormigón, siendo que ésta si se quiere, es la parte principal de la estructura y en la que nos centraremos durante los capítulos siguientes.

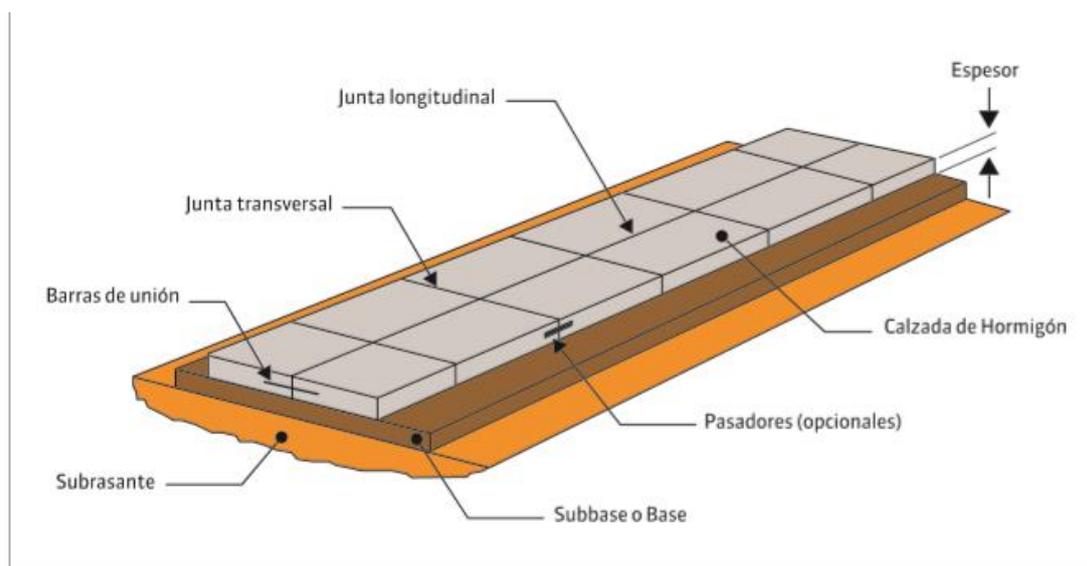


Figura 4.7. Estructura de un pavimento rígido

4.3.2.1 Calzada de hormigón

La calzada de hormigón conforma la capa superior del pavimento y es la responsable de proporcionar las características funcionales y en gran medida, la capacidad estructural requerida.

Desde el punto de vista funcional, será la encargada de brindar las características superficiales necesarias (drenaje superficial, fricción y regularidad) de acuerdo con el tipo de vía y las condiciones de servicio, que permitan una conducción segura y confortable.

Desde el punto de vista estructural, deberá brindar la resistencia suficiente para soportar las cargas durante el periodo de servicio, en tanto que funcionara además como barrera impermeable para las capas inferiores del pavimento, minimizando el ingreso de agua desde la superficie hacia el interior de la estructura.

El espesor de la calzada dependerá en gran medida del nivel de tránsito pesado previsto, oscilando entre 15 cm y 20 cm para vías urbanas o de bajo tránsito pesado y de 20 cm a 30 cm en rutas de mayor volumen de vehículos pesados.

4.4 DISEÑO DE HORMIGON VIAL

A continuación daré una breve explicación acerca de que se trata el proceso de diseño de un hormigón, requerimientos a cumplir y etapas del mismo. Luego hare mención de un método racional de diseño de hormigones propuesto por el ICPA (Instituto del Cemento Portland Argentino), el cual fue consultado por el equipo de Calidad de Hormigones Holcim para el desarrollo de la receta solicitada. Una vez expuesto el mismo, enumeraré los requerimientos presentados por el cliente (Jose J. Chediack SAICA) y como se utilizó el método para alcanzarlos.

4.4.1 DISEÑO DE MEZCLA Y DOSIFICACION

El diseño de mezclas es el proceso racional realizado para la determinación de las proporciones relativas de los materiales componentes para dar cumplimiento a las propiedades requeridas y especificadas de una mezcla de hormigón.

Incluye la dosificación propiamente dicha, que es la selección, evaluación y optimización técnico – económica de diferentes combinaciones de materiales disponibles para producir un hormigón que satisfaga los requerimientos especificados y necesarios en cuanto a trabajabilidad, resistencia y durabilidad, para un determinado uso, geometría y condiciones de colocación y exposición.

Generalmente, el proceso de dosificación incluye dos etapas:

- 1- Una primera etapa basada en un método racional para el diseño de mezclas.
- 2- Una segunda etapa en la que se realizan pastones de prueba y ensayos para evaluar y caracterizar las mezclas obtenidas y, eventualmente, verificar y ajustar los supuestos adoptados durante la aplicación del método.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Puede decirse entonces que el diseño de una mezcla de hormigón es un proceso que, básicamente, consiste en los siguientes pasos interrelacionados:

- Selección y caracterización de los materiales ponentes.
- Determinación de las cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, un hormigón de características adecuadas, tanto en estado fresco como endurecido.
- Verificación y ajuste mediante el ensayo de pastones de prueba.

4.4.2 METODO DE DISEÑO DEL ICPA (ICPA, 2014)

El método que enunciaré a continuación se presenta como útil para el diseño de mezclas consideradas convencionales. Por esta razón es que no fue seguido al pie de la letra para el diseño de la formulación del hormigón especial a cerca de la cual me explayare más adelante. Aun así servirá de guía para enumerar y entender con claridad el proceso aproximado de todo diseño de una mezcla de hormigón. Vale aclarar que este proceso no se limita a la sencilla aplicación de un método racional, cualquiera sea este, sino que se ve muy enriquecido sobre todo, con la experiencia de cada técnico o ingeniero que lleve a cabo la tarea.

Como input principal del método es necesario conocer las propiedades o características de los materiales componentes, así como las condiciones particulares de la obra y el equipamiento disponible para el mezclado, transporte y colocación del hormigón.

A demás, durante el proceso de aplicación, hay que considerar la interrelación que puede existir entre los distintos factores que influyen en las propiedades y características de las mezclas, lo cual requiere cierta experiencia de quien lo aplica y es indispensable un conocimiento básico de la tecnología del hormigón.

A continuación enumerare las etapas del método y luego procederé al análisis pormenorizado de cada una de ellas. Este análisis lo llevare a cabo teniendo en cuenta la aplicación de cada una de las etapas del método en la formulación del hormigón vial mezclado apto colocación con terminadora de alto rendimiento, desarrollado durante el presente informe técnico.

4.4.2.1 Etapas del Método Racional de Diseño

- 1- Elección del cemento a emplear (categorización por resistencia y aptitudes).
- 2- Elección del asentamiento adecuado.
- 3- Decisión sobre si se incorpora aire en forma intencional.
- 4- Distribución granulométrica de agregados.
 - Selección de la curva granulométrica apropiada para el agregado total
 - Combinación y ajuste de las diferentes fracciones disponibles para integrar la curva para el agregado total (mezcla de las distintas fracciones).

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- Cálculo del módulo de finura (MF) del agregado total, contemplando los retenidos sobre los tamices de la serie normal.
- 5- Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y el MF del agregado total.
- 6- Cálculo de la resistencia de diseño [f'_{cm}], en función de la resistencia especificada [f'_{c}] y el desvío estándar [S].
- 7- Estimación de la relación agua/cemento (a/c).
 - Determinación de la relación a/c necesaria en función de la resistencia media a la edad de 28 días según la categoría resistente del cemento a emplear.
 - Verificación del cumplimiento de la eventual exigencia de una relación a/c máxima por razones de durabilidad.
- 8- Cálculo del contenido unitario de cemento (CUC) y verificación del cumplimiento del contenido mínimo de cemento, si estuviera especificado por razones de durabilidad.
- 9- Determinación de la cantidad de agregados (fino y grueso) por diferencia a mil litros, de los volúmenes de: agua, cemento y aire incorporado estimado.

Antes de comenzar a desarrollar el proceso de diseño propio de este hormigón, pospondré el mismo para el punto N°7 del presente capítulo, y a continuación me centraré en los hormigones colocados con el sistema TAR (Tecnología de Alto Rendimiento), así como en el tipo de planta necesaria para producirlo. Esto nos ayudara a comprender el porqué de varias decisiones tomadas tanto en el proceso de diseño como de producción y colocación de la mezcla.

4.5 HORMIGON VIAL CON TECNOLOGIA DE ALTO RENDIMIENTO

Como es de esperar, el hormigón solicitado por la empresa constructora Jose J. Chediack SAICA, fue un hormigón vial apto para ser colocado con tecnología de alto rendimiento (TAR), 35 MPa de resistencia especificada, cinco centímetros de asentamiento (medido según como de Abrams) y tamaño máximo de agregado 40mm. El motivo principal de utilizar esta tecnología, fue el elevado volumen de hormigón a colocar y el corto plazo para llevar a cabo la tarea, 7 meses aproximadamente.

4.5.1 PAVIMENTACION CON ENCOFRADOS DESLIZANTES

La pavimentación con encofrados deslizantes se emplea, en general, en proyectos donde se requieren altos estándares de calidad y terminación, y/o elevados ritmos de producción, tal como fue el caso del tramo de la circunvalación de Córdoba al que estamos haciendo mención en este documento.

La característica distintiva en el uso de esta tecnología es el empleo de mezclas de bajo asentamiento como observamos en la Figura 4.8 (menos de 5 cm como solicito el cliente en este caso), de la forma que luego de la colocación del hormigón mediante la maquina terminadora, el pavimento mantenga la geometría con que fue moldeado.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba



Figura 4.8. Hormigón siendo colado frente a terminadora

Además, con el uso de esta tecnología se logran destacados niveles de calidad en terminación y bordes, que permiten obtener pavimentos de excelente regularidad (baja rugosidad). Este punto es tan relevante que en países como EEUU o Canadá, las empresas viales que trabajan con este tipo de tecnología, licitan sus obras teniendo en cuenta el premio (descuento) que recibirán de parte las concesionarias o gobiernos a cargo de financiar las rutas por los bajos índices de rugosidad que lograrán.

Podemos ver en la Figura 4.9 como por ejemplo en Minnesota, la tendencia del IRI (Índice Internacional de Rugosidad) fue disminuyendo cada año en las rutas realizadas por diferentes contratistas; generando esto no solo una mayor competitividad entre los mismos y mejores costos en las licitaciones, sino una mejora directa en la calidad de manejo, asociado directamente a un menor costo de transporte, representado este tanto por un ahorro de tiempos como gastos de combustible y reparaciones de los vehículos. Así lo muestra Mark Snyder en sus notas expuestas en junio de 2019, en la jornada técnica sobre Aplicación de Tecnologías de Alto Rendimiento para la construcción de Pavimentos de Hormigón.

PCC-A	Mean Smoothness (m/km)			
	2015	2016	2017	2018
Contractor A		0.98	0.73	
Contractor B		0.95		
Contractor C	0.91	0.97		0.76
Contractor D		0.95	0.95	0.86
Contractor E			0.87	
Contractor F			1.00	0.73
Contractor G	0.74	0.69	0.63	0.72
Contractor H	0.75	0.91	0.80	0.72
All Contractors	0.80	0.91	0.83	0.76

Figura 4.9. Calidad de Conducción Histórica en Minnesota USA

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

José J. Chediack es una de las pocas empresas constructoras del país que hoy en día cuenta con este tipo de tecnologías. Esto fue una gran ventaja para la misma, le permitió colocar más de 30 mil metros cúbicos de hormigón en tan solo siete meses y con la mejor calidad y terminación dentro de las seis empresas constructoras y más de diecisiete kilómetros construidos.

4.5.1.1 TAR – Características Técnicas

En la pavimentación con este tipo de tecnologías, el hormigón es extruido con la forma geométrica de la calzada, mediante el deslizamiento o paso de un molde a través de la masa plástica de hormigón. La sección de la losa está determinada por una plancha o molde mediano, cuyo nivel de elevación es ajustado automáticamente por sensores y dos encofrados laterales, que integran lo que comúnmente se denomina el “molde o encofrado deslizante” de la pavimentadora.

Los moldes y elementos mencionados para darle forma a la masa de hormigón, las herramientas para distribuir, consolidar y compactar la mezcla, así como las herramientas para la inserción de armaduras en la superficie, se encuentran montados y fijados en un equipo autopropulsado, es la denominada pavimentadora. En la Figura 4.10 se puede observar un esquema típico de una pavimentadora con encofrados deslizantes.



Figura 4.10. Esquema de pavimentadora con encofrados deslizantes

Básicamente, este equipo está conformado por un chasis o bastidor, en el cual se montan el o los moldes y las herramientas de compactación y terminación. Todo este conjunto se encuentra dispuesto sobre un sistema de cilindros hidráulicos que permite regular la altura de todo el equipo, los a su vez están armados sobre un tren rodante de orugas que posibilita su traslación. Podemos apreciar las mismas en la figura 4.11.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba



Figura 4.11. Orugas Deslizantes

Entre los componentes y/o herramientas disponibles en este tipo de terminadora se puede mencionar:

- Distribuidor de hormigón, que puede ser de tipo tornillo sin fin o cuchilla / pala distribuidora, que permiten el extendido de la mezcla en todo el ancho de pavimentación. Figura 4.12.



Figura 4.12. Distribuidor de Hormigón

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- Compuerta de alimentación, que forma un recinto o cámara de vibrado que hace más eficiente la compactación. Además permite regular su altura, dosificando el ingreso de hormigón a la cámara y el molde. Figura 4.13.



Figura 4.13. Cámara de Vibrado

- Detrás del gran encofrado metálico que se observa en la Figura 22, se encuentra la cámara de vibrado, compuesta por una gran cantidad de vibradores horizontales de inmersión, los mismos son los encargados de otorgarle aire y trabajabilidad a la mezcla.
- Tamper o Viga oscilante, que ayuda a compactar o aplanar el hormigón previo a su ingreso al molde, asegurando el recubrimiento del agregado grueso. Figura 4.14.



Figura 4.14. Tramper o Viga oscilante

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- Molde o plancha de nivel, y moldes laterales o bordeadores, que constituyen el encofrado deslizante propiamente dicho. Los mismos pueden observarse en la Figura 4.15, se extienden varios metros más hasta el final hasta pasar el fratás automático y poseen la altura necesaria del pavimento en cuestión.



Figura 4.15. Molde Lateral

La existencia de todos, o algunos de estos elementos depende del modelo, marca o tipo de pavimentadora. Por otro lado, entre las herramientas habitualmente opcionales, se puede mencionar.

- DBI (Dowel Bar inserter) o Inserter Automático de Pasadores, que permite la introducción y posicionamiento de los pasadores en el hormigón fresco, sin detención del equipo pavimentador. El sistema esta complementado con un dispositivo que rellena y repara la herida producida por esta tarea. Vale igualmente aclarar que siempre es conveniente que un operario supervise esta tarea y ayude a la maquina en caso de ser necesario. Figura 4.16.



Figura 4.16. Inserter Automático de Pasadores

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- TBI (Tie Bar Inserter) o Inserter Automático de Barras de Unión, que realiza la tarea de colocación de las barras de unión. Estos dispositivos pueden insertar en el centro de la pavimentación (en ancho completo) o en el borde lateral interno (operación en media calzada), en este último caso solo se introduce la mitad de la barra. Figura 4.17.



Figura 4.17. Inserter Automático de Barras

- Fratás automático, para el alisado mecánico de la superficie de pavimento, luego completadas todas las tareas de colocación, compactación e inserción de armaduras. Figura 4.18.

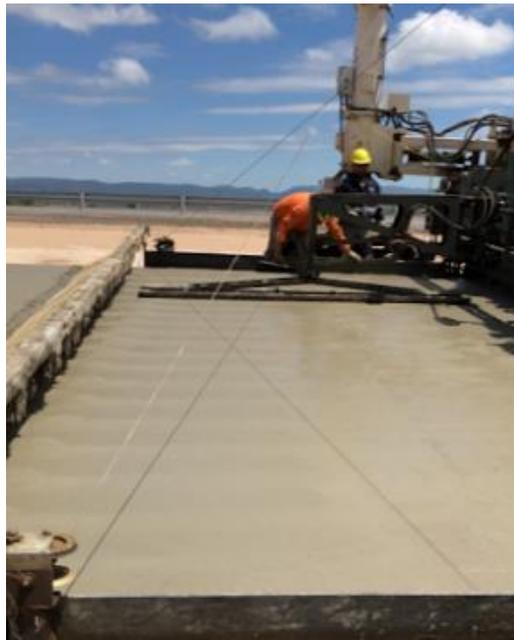


Figura 4.18. Fratás Automático

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Sumado a todo esto, la pavimentadora cuenta además, con un conjunto de máquinas y equipos involucrados en la tarea de colocación, compactación y acabado del hormigón; el denominado tren de pavimentación. Este esta generalmente compuesto, además de la terminadora, por:

- Un equipo pre-distribuidor, para extender y emparejar la mezcla de hormigón, en el ancho de trabajo de pavimentación. Con esta finalidad se pueden utilizar spreaders o equipos distribuidores, tales como otra pavimentadora de menor porte que la principal, cintas para descarga lateral o equipos de carga como excavadoras o palas cargadoras que ayuden en las tareas de distribución delante de la pavimentadora.
- Equipos de texturizado y curado, encargados del texturizado de la superficie de pavimento y del curado del hormigón cuando se utilizan membranas o compuestos químicos de aplicación por aspersion. Figura 28.

En el caso de la terminadora utilizada por el contratista Jose Chediack, tal como se puede apreciar en todas las imágenes, la misma correspondía a una americana modelo IMPO, del Grupo Wirgen. Esta contaba con todos los componentes y herramientas mencionadas en los puntos anteriores. Además, un tren de pavimentación conformado por:

- Un equipo de aspersion automático de Antisol (membrana de base solvente) tal como se observa en la Figura 4.19, para la colocación de la membrana protectora una vez acabado el hormigón.



Figura 4.19. Equipo de Aspersion de Antisol

- Una tela de alta rugosidad para conferir textural pavimento, tal lo observado en la Figura 4.18.
- Y una pala de carga frontal, la que estaba encargada, como vemos en la Figura 4.20, de ayudar en la distribución del hormigón una vez el mismo era descargado por los camiones tipo batea.



Figura 4.20. Pala Cargadora Frontal

4.6 PLANTAS ELABORADORAS DE HORMIGON

A la hora de elaborar hormigón a escala industrial, existen dos grandes tipos de plantas que nos permitirán hacerlo; plantas dosificadoras y plantas elaboradoras, un ejemplo de las mismas puede observarse en la Figura 4.21. Su principal diferencia radica en el lugar donde se produce la mezcla propiamente dicha de los materiales componentes del hormigón.



Figura 4.21. Planta Dosificadora y Planta Mezcladora

En el primer caso, la planta dosifica en determinados ciclos de carga, el peso total de la suma de los diferentes componentes que compondrán la mezcla de hormigón, dentro del trompo del camión motor hormigonero, tal como se observa en la Figura 4.22. Dentro del mismo, gracias a un sistema de aletas con forma de tornillo sin fin y un sistema de rotación, el hormigón es mezclado y homogeneizado.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba



Figura 4.22. Camión Motor hormigonero siendo cargado

En el segundo caso, la mezcla no se producirá dentro del camión, sino dentro de un equipo mezclador denominado mezclador centra, que tal como se observa en la figura 4.23, muy similar a un “lavarropas”. La máquina de forma automática dosificará el peso total de la suma de los diferentes componentes que compondrán la mezcla de hormigón. Tiene una capacidad promedio de producción de dos metros cúbicos cada cuarenta segundos.



Figura 4.23. Mezclador Central

Esta gran velocidad de producción se debe a un eficiente sistema de mezclado, conformado por un conjunto de aletas posicionadas en diversas direcciones que giran a gran velocidad; podemos observarlo en la figura 4.24.



Figura 4.24. Interior del Mezclador Central

4.6.1 PLANTA ELABORADORA UTILIZADA EN EL PROYECTO

Toda esta introducción viene a colación para entender el porqué de la elección entre una planta u otra a la hora de elaborar un hormigón.

Actualmente en el país casi el 100% de las empresas proveedoras de hormigón elaborado utilizan plantas dosificadoras, esto principalmente por su facilidad tanto para cargar el material al camión motor hormigonero, como para manejar los sistemas de carga. Solo unas pocas utilizan equipos con mezclador central, pero con adaptadores de carga para los camiones.

En el proyecto en cuestión, tal como mencionamos en la introducción del punto cinco del presente capítulo, el hormigón requerido fue un hormigón de 35 MPa de resistencia especificada, tamaño máximo de piedra 38mm y el dato más relevante en cuanto a producción y manipulación, 5 cm de asentamiento como máximo.

Básicamente, el asentamiento es una medida de la fluidez de la masa de hormigón que se obtiene a través del ensayo del Cono de Abrams. Como se observa en la Figura 4.25, esta medida resulta de llenar en tres capas un molde tronco cónico y retirar el mismo a una velocidad constante, comparando luego la altura de la masa de hormigón versus la altura normalizada de 30 cm del molde en cuestión. Los cm obtenidos serán la mitad del asentamiento de la mezcla ensayada. Cuanto mayor sea el asentamiento mayor será la fluidez, lo contrario pasa al disminuir el mismo, la mezcla se vuelve más seca, menos trabajable y difícil de manipular.

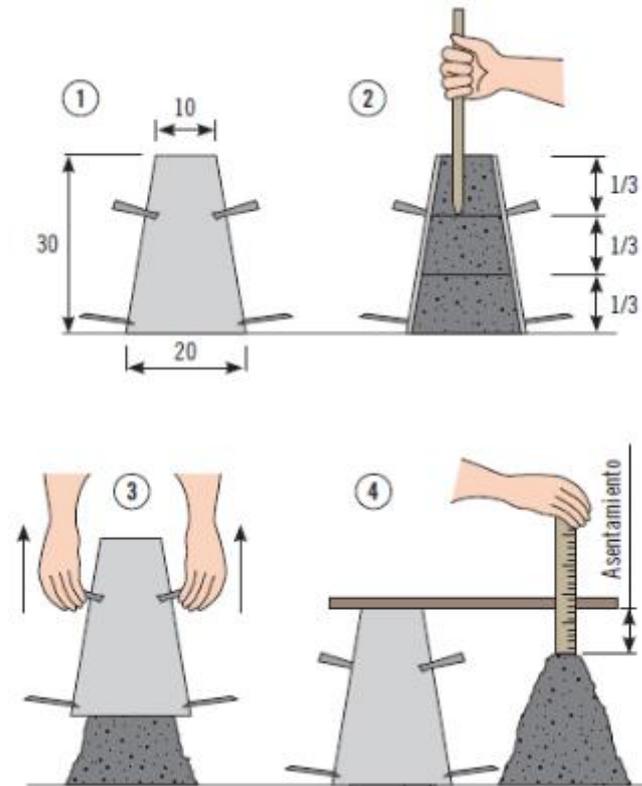


Figura 4.25. Ensayo del cono de Abrams

Este último tipo de mezclas son las requeridas para trabajar con pavimentadoras de encofrados deslizantes, el por qué, radica en el principio del nombre que reciben los equipos; los encofrados tiene una cierta y acotada longitud, la cual encofra o “sostiene” al hormigón por un periodo muy corto de tiempo, solo alguno minutos, respetando el ritmo de avance de la máquina. Muy a diferencia de sistemas de pavimentación con encofrados fijos, los cuales mantiene encofrando la mezcla durante por lo menos 24 horas.

Este es el porqué de esta medida de asentamiento tan poco usual, del hormigón solicitado por el cliente. Esto nos llevó, como empresa productora de hormigón, no solo a diseñar el producto solicitado, sino que también a tener que montar en el obrador del cliente, una planta mezcladora de alto rendimiento cero kilómetro, la misma que se puede ver en la Figura 4.23.

Podrán preguntarse porque no utilizar las plantas dosificadoras que la empresa ya poseía y producir el hormigón ahí, la decisión se tomó en base a los siguientes puntos:

- El primer y más importante punto se debió a que un hormigón con dicho asentamiento o menor, es prácticamente imposible de descargar por un camión moto hormigonero. Su excesiva dureza y falta de fluidez hacen que la mezcla directamente no se mueva dentro del trompo y el mismo empiece a girar en falso, sumado a su deficiente mezclado.
- Un segundo punto muy importante fue la posibilidad de instalar la nueva planta prácticamente sobre la obra. El obrador del cliente se ubicaba a menos de 100 metros de la traza del tramo que le correspondía realizar, tal como se observa en la Figura 4.26. Esto nos otorgó una gran ventaja a la hora de transportar el hormigón, los tiempos de transporte eran prácticamente nulos.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

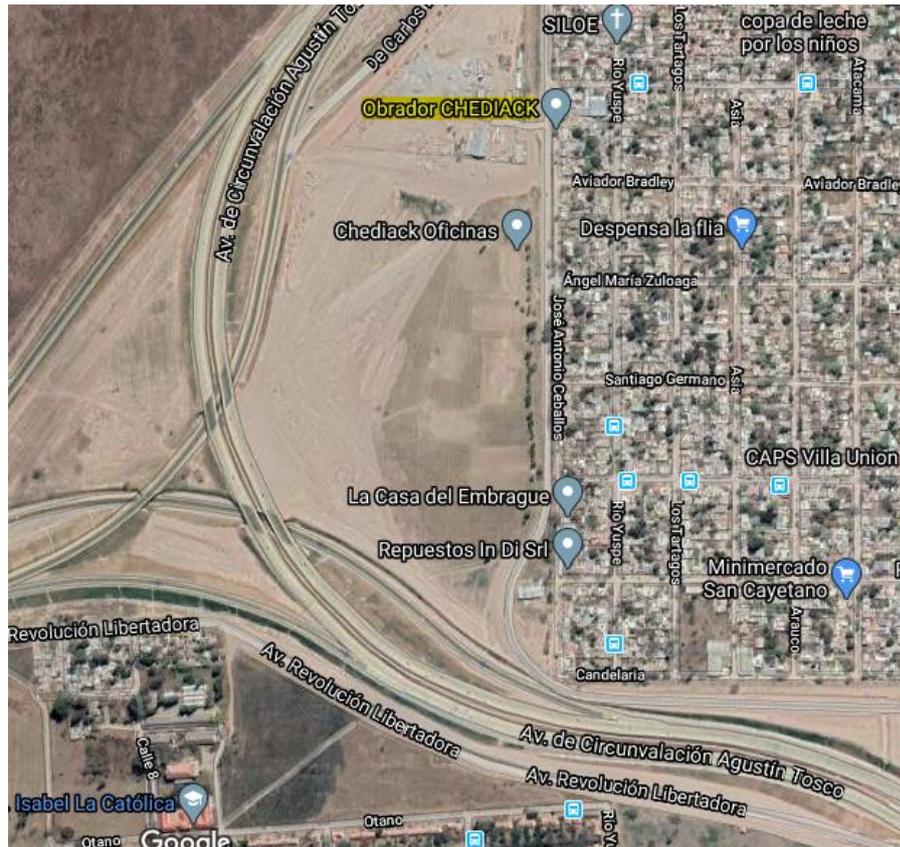


Figura 4.26. Ubicación del Obrador de José J. Chediack

- Un tercer punto muy importante fue relacionado con el tipo de transporte y descarga de este producto. Por la forma de operar de las plantas con mezclador central, el hormigón no puede ser descargado en un camión moto hormigonero, al menos no sin un adaptador especial, este debe ser descargado en camiones tipo batea por la compuerta inferior del equipo, tal como se puede ver en la Figura 4.27.



Figura 4.27. Carga de Hormigón en Camiones tipo Batea

- Como cuarto punto y de gran importancia también, fue la altísima elevada eficiencia de mezclado en un acotado periodo de tiempo, tal como

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

mencionaba en puntos anteriores, 2 metros cubicos cada cuarenta segundos promedio. Esto permitia llenar bateas de entre 6 y 12 metros cubicos de capacidad en tiempos bastante superiores a una planta dosificadora convencional.

- Y un quinto punto . fue que además de una elevada productividad la planta tiene una alta capacidad de acopio y estaba destinada a la elaboración de un único producto específico para el cliente. Esto resultó en una elevada productividad llegando a tener jornadas laborales de alrededor de los 800 m³/día, es decir casi cuatrocientos metros lineales.

La producción era tan elevada, que los tres silos de cemento observados en la Figura 4.28, con un capacidad de acopio de mas de 100 toneladas, no eran suficientes para abastecer las jornadas laborales. Tolvas de cemento provenientes desde la localidad de Campana circulaban permanentemente por el obrador y hasta habia veces que las mismas se usaban de silos de acopio hasta poder ser descargadas.



Figura 4.28. Silos de Almacenaje de Cemento

Hubieron otros puntos relevantes y de interés a la hora de utilizar este tipo de plantas, algunos que ayudaron, otros que fueron un problema. Los mismos seran tratados en los siguientes puntos, donde hablaremos tanto del proceso de diseño, como de colocacion y control de calidad del producto en todos sus estados.

4.7 PROCESO DE DESARROLLO DEL HORMIGON SOLICITADO

Ahora sí, conociendo las principales características condicionantes del hormigón en cuestión, así como su producción y colocación, en el presente capitulo abordaremos el proceso de diseño llevado a cabo. En primera instancia el mismo fue asignado al CDI (Centro de Desarrollo e Innovación de Holcim) en conjunto con RMX, pero luego, debido a problemas técnicos y necesidades económicas, el mismo pasó a manos del equipo de calidad de Hormigones, donde allí mi participación fue notoria.

4.7.1 ELECCION DEL CEMENTO A EMPLEAR

Como primer punto a analizar, se encuentra la elección del tipo cemento. Generalmente la misma está condicionada por un análisis técnico económico que incluye la disponibilidad en el lugar de emplazamiento de la obra de los distintos cementos y del nivel de resistencia que se pretende alcanzar.

También se debe tener en cuenta la existencia de requisitos en los pliegos de especificaciones acerca de contenidos mínimos de cemento y la eventual necesidad de obtener resistencias a corto plazo.

Los distintos tipos de cemento y sus categorías o intervalos de cemento se encuentran incluidos en las Normas IRAM 50000 y 50002, de las cuales resulta que todos ellos son aptos para su empleo en aplicaciones de uso general y para pavimentos en los que se trabaja empleando TAR. En la Figura 4.29 podemos ver el resumen de los mismos.

Tipo de cemento ⁽⁵⁾	Nomenclatura	Composición ⁽²⁾ (g/100 g)				
		Componentes principales				Compuestos minoritarios
		Clínker + Sulfato de calcio	Adiciones			
			Puzolana o ceniza volante silíceas (P ó CV)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)	
Cemento portland normal	CPN	100-95	—	—	—	0-5
Cemento portland con "filler" calcáreo	CPF	94-75	—	—	6-25	0-5
Cemento portland con escoria	CPE	94-65	—	6-35	—	0-5
Cemento portland compuesto (3)	CPC	94-65	dos o más, con: $6 \leq (P \text{ ó } CV + E + F) \leq 35$ y con $F \leq 25$			0-5
Cemento portland puzolánico (4)	CPP	85-50	15-50	—	—	0-5
Cemento de alto horno	CAH	64-25	—	36-75	—	0-5

Figura 4.29. Tipos y composición de los Cementos IRAM 50000

Vale aclarar que los cementos que cumplen la norma IRAM 50002 son aquellos especialmente diseñados e indicados para la ejecución de calzada de hormigón en la que se emplea pavimentadora de encofrados deslizantes, atendiendo las exigencias particulares de este tipo de obras.

En este caso en particular, el Cemento que se eligió utilizar fue el CPF40 (Cemento Portland Fillerizado de 40 MPa de Resistencia), por una cuestión muy simple, el mismo era producido en ambas plantas cementeras de Holcim ubicadas en Córdoba, a pocos minutos de la planta mezcladora.

Pero surgió un problema de no menor importancia que llevo meses de trabajo poder resolver. Básicamente, el cemento CPF40, con el CUC (Contenido Unitario de Cemento [kg/m³]) con el que había sido licitado el hormigón para la mezcladora, no llegaba a las resistencias a compresión finales requeridas por pliego. En primera

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

instancia se buscó subir el CUC para que de la misma forma subieran las resistencias finales, esto se logró, pero a costa de márgenes de ganancia casi nulos o negativos; las resistencias estaban al límite en el mejor de los casos, no había prácticamente ganancias, y los contenidos de cementos tenían que ser tan elevados, que pasaban a generar diversos problemas en su producción, tal como calores de hidratación excesivos, gran cohesión y pérdida de trabajabilidad, riesgos de fisuración por falta de exudación, etc.

Esto ocurre debido a que el CPF40 es fabricado con materias primas con un alto contenido de material reactivo en el corto plazo. Esto implica que es un cemento excelente para lograr hormigones de altas resistencias iniciales y trabajos en climas especialmente fríos (desarrolla grandes temperaturas iniciales), pero a la vez no se lo recomienda para usar en altos contenidos y climas calurosos, condiciones que se reunían en nuestro caso.

Por esta razón, a pesar de la incongruencia económica y logística, se optó por utilizar CPC50 (Cemento Portland Compuesto de 50 MPa de Resistencia) producido por la misma empresa en la localidad de Campana, Bs As. Ésta a pesar de ser la opción menos viable desde el punto de vista logístico y económico, dado el muy buen desempeño de este cemento, el mismo ofrecía la posibilidad de optimización de la fórmula de pastón para cumplir con las exigencias requeridas. Esta tarea era responsabilidad del equipo de Calidad de Hormigones del cual formé parte durante la práctica.

La cuestión no fue fácil, dado que la diferencia entre el contenido de cemento que solicitaba el cliente y la utilizada para la licitación era de más de 50 kilos. Dada la mala experiencia con el primer cemento utilizado, las primeras coladas comenzaron a producirse con el CUC solicitado por el cliente, mientras tanto, nosotros comenzamos una carrera diaria por lograr un hormigón con el mismo CUC con el que había sido licitado. Llegamos a realizar en algunas semanas mas de 18 pastones de hormigón en el laboratorio del CDI, el que se puede observar en la Figura 4.30.



Figura 4.30. Laboratorio de Hormigones CDI

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Logramos conseguir un hormigón apto TAR con el CUC licitado, es decir un producto que le haría ganar mucho dinero a la empresa, pero la realidad fue que el cliente siempre se dedicó a poner trabas y excusas a pesar de las pruebas y ensayos realizados. En termino generales, durante algunos tramos realizados logramos bajar en buena medida la utilización de cemento, siempre cumpliendo con las condiciones del pliego, pero en gran parte de la obra los CUC's utilizados fueron excesivamente altos, generando no sólo un problema deficitario para la empresa, sino grandes complicaciones logísticas y sobre todo productivas, las mismas serán mencionadas en capítulos siguientes cuando hablemos de los controles de calidad sobre materias primas y el hormigón en sus diferentes estados.

Como conclusión, el cemento utilizado para producir el hormigón requerido, fue un cemento compuesto de altísimo desempeño (CPC50).

4.7.2 ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO ADECUADO

Para el caso de pavimentos de hormigón en los que se emplea TAR es común especificar un asentamiento de 4 cm con una tolerancia de 2 cm, así fue como el cliente Chediack, solicitó un hormigón con un asentamiento máximo de 5 cm.

La realidad es que nunca llegamos a producir un hormigón con tal nivel de asentamiento, el requerido en términos prácticos siempre fue menor a 3 cm, es decir un hormigón extremadamente seco, prácticamente sin movimiento. Se puede apreciar un ensayo del mismo y observar la característica antes mencionada en la Figura 4.31.



Figura 4.31. Hormigón para cliente Chediack

Los asentamientos excesivos generarían riesgos como por ejemplo la segregación durante el transporte y caídas en los bordes una vez el encofrado se retirara.

La Figura 4.32. adaptada del Reglamento CIRSCO-2005, vincula ámbitos de consistencia, rangos de asentamiento y métodos de compactación.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Consistencia	Rangos de Asentamiento [cm]	Tolerancia	Métodos de compactación
Seca	2,0 a 5,0	± 1,0	Vibradores potentes de alta frecuencia
Plastica	5,0 a 9,0	± 2,0	Vibración o varillado o apisonado
Muy Plastica	10,0 a 15,0	± 2,0	Varillado o vibración leve
Fluida	15,0 a 18,0	± 3,0*	Varillado o muy leve vibración

Figura 4.32. Consistencia, rangos de asentamiento, tolerancias y métodos de compactación, extractos del CIRSOC-2005

Tal como se puede observar en la tabla, el hormigón tenía una consistencia extremadamente seca y el método de compactación utilizado fueron los vibradores que se encontraban en la cámara de vibrado de la pavimentadora, potentes y de alta frecuencia; por estas razones el asentamiento utilizado siempre fue menor a 3 centímetros.

4.7.3 INCORPORACIÓN DE AIRE EN FORMA INTENCIONAL

Si el análisis de las condiciones de exposición revela que el hormigón estará expuesto frecuentemente a temperaturas inferiores a -2 °C en condiciones de elevada humedad interna o directamente saturado, será imprescindible diseñar el hormigón con aire intencionalmente incorporado. Este objetivo se consigue mediante el auxilio de un aditivo incorporador de aire. La dosis debe evaluarse y ajustarse mediante pastones de prueba a escala de laboratorio y luego debe ser verificada en escala de obra.

La cantidad de aire necesaria puede estimarse de la tabla que se observa en la Figura 4.33.

Tamaño máximo del agregado grueso [mm]		13,2	19,0	26,5	37,5	53,0
Porcentaje de aire del hormigón [% en volumen] por Tipo de Exposición	C1 o colado bajo agua	5,5 ± 1,5	5,0 ± 1,5	4,5 ± 1,5	4,5 ± 1,5	4,0 ± 1,5
	C2	7 ± 1,5	6 ± 1,5	6 ± 1,5	5,5 ± 1,5	5,0 ± 1,5

Figura 4.33. Cantidad de aire incorporado en función del tamaño máximo del agregado grueso (CIRSOC-2005 – Tabla 5.3)

Se puede observar como a medida que aumenta el tamaño máximo nominal del agregado grueso empleado, disminuye la cantidad de aire necesaria para proveer una adecuada protección al hormigón que estará expuesto frente a posibles ciclos de congelamiento deshielo.

La incorporación intencional de aire influye también sobre la resistencia a la compresión y sobre la demanda de agua, es decir el agua necesaria para obtener el asentamiento seleccionado en el segundo paso del método.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Como valores tentativos, puede estimarse una pérdida de resistencia a la compresión del 3% al 5% por cada 1% de aire incorporado. A la vez en lo que respecta en demanda de agua, puede estimarse que se debe reducir en un 2% a 3% el agua de mezclado por cada 1% de incremento en el contenido de aire. Por lo que podemos decir que una correcta incorporación intencional de aire, por compensación de efectos, no debiera tener ningún impacto en la resistencia del hormigón.

En lo que respecta a nuestro caso, el pavimento no iba a estar expuesto a ciclos de congelamiento deshielo, por lo que a priori no era necesaria la incorporación intencional de aire. Igualmente debido a la consistencia extremadamente seca del hormigón, y la necesidad de recortar agua para lograr las resistencias requeridas, se utilizaron aditivos incorporadores de aire, los que ayudaron a que el aire del hormigón colocado sea aproximadamente 4%.

Esto no solo ayudo a reducir agua de la mezcla, sino que facilito en gran medida la descarga de la misma de las bateas, haciendo que la misma resbale y no se quedara pegada, sumando además y sobre todo, el trabajo realizado por la pavimentadora.

4.7.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS

Esta etapa incluye los siguientes pasos:

- Seleccionar una curva o ámbito granulométrico apropiado.
- Adecuar las proporciones de las fracciones disponibles para ajustarse a lo seleccionado en el punto anterior.
- Calcular el módulo de finura del agregado total, contemplando el retenido sobre los tamices de la serie normal.

Dentro de las herramientas que tenemos en la empresa a la hora de desarrollar un producto, contamos con planillas de dosificación, las cuales entre otras cosas, permiten ir jugando con las proporciones de agregados en el ámbito granulométrico que recomienda IRAM 1627, Fuller y algunos otros métodos.

Estos criterios antes mencionados son utilizados para optimizar la distribución de los tamaños de los agregados, teniendo siempre presente el concepto de “curva de agregado total”, es decir la curva formada por la combinación de todos los agregados que conforman la mezcla.

En el caso de algunos reglamentos o normas, como la IRAM que expongo anteriormente, dan entornos de “preferencia”, estos pueden emplearse para una primera aproximación. Otra alternativa, son las curvas teóricas de máxima compacidad como criterio de ajuste de las proporciones de las distintas fracciones, como por ejemplo la parábola de Fuller, también mencionada anteriormente.

En la Figura 4.34, la cual se expone a continuación, pueden observarse los entornos mencionados anteriormente y una de las curvas de agregado total utilizadas a la hora de producir el hormigón para la pavimentadora.

Cabe mencionar que esta curva, utilizando las planillas de dosificación mencionadas, se obtiene por un proceso de tanteo ajustando los porcentajes de cada fracción que

contendrá la misma. La curva se va moviendo dinámicamente acorde cada cambio realizado, permitiendo así observar el ajuste de la misma al criterio de diseño elegido.

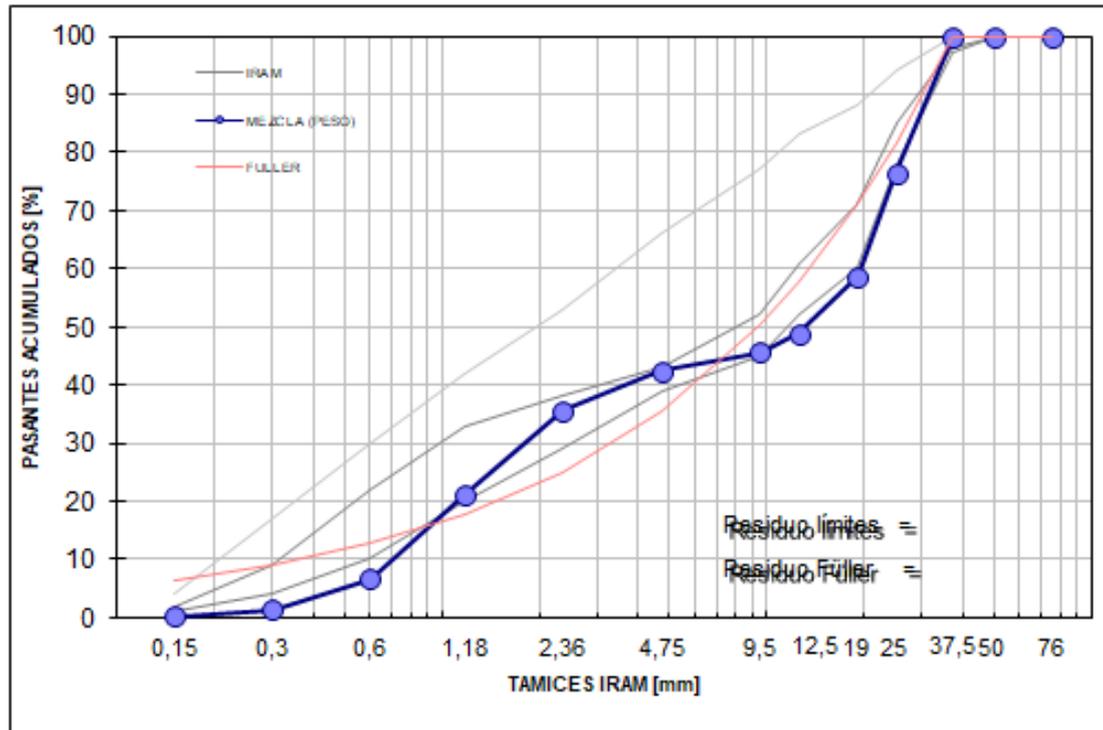


Figura 4.34. Curva de Agregado Total

Tal como podemos observar en la Figura 4.34, la curva utilizada en la formulación del hormigón es una curva bastante “completa”, es decir que posee materiales de casi todos los tamaños de las fracciones que la integran, que intenta simular la curva de Fuller y aproximarse al límite mayor de la norma IRAM.

También vemos como la misma no es totalmente correcta ni se aproxima al 100% a ninguno de los entornos allí observados. Esto se da ya que muy rara vez es posible cumplimentar el entorno granulométrico con los agregados disponibles, y este caso no fue la excepción. En estos casos, cuando los agregados disponibles no permitan integrar una curva granulométrica continua por falta de partículas de determinados tamaños, se puede utilizar una curva granulométrica discontinua, como fue el caso, siempre que se demuestre mediante ensayos de laboratorio, que con la distribución propuesta se pueden obtener hormigones de trabajabilidad adecuada, con contenidos de cemento y agua compatibles con las características necesarias para la estructura y los métodos constructivos a utilizar. Todos estos ensayos fueron los mencionados en el punto 4.7.1.

Como regla general, es recomendable contar con al menos dos fracciones para el agregado fino (arenas) y otras dos fracciones para el agregado grueso (piedras), de forma de tener la posibilidad de corregir eventuales variaciones individuales en la distribución de tamaños de partículas en alguna de las fracciones.

En el caso del hormigón que diseñamos, el mismo por pliego requería un agregado grueso de tamaño máximo 40mm. Para respetar este punto utilizamos un porcentaje de nuestra fracción de agregado grueso más grande (19-38mm) y un porcentaje de la fracción de agregado grueso intermedio (6-19mm). En el caso de los agregados finos, solo utilizamos arena gruesa lavada de río. Podríamos haber sumado arena fina para

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

ajustar aún más la curva, pero la misma solo proviene del Río Paraná y sus costos encarecían demasiado la mezcla, siendo todos los problemas de costos antes mencionados por resolver que se nos habían presentado.

En términos de porcentaje, la relación de agregado fino agregado grueso fue de un 40/60 aproximada y respectivamente, y dentro de los gruesos, un porcentaje de la fracción máxima relativamente superior a la intermedia. El porqué de esto no solo se debe a los costos (más finos, más cara la mezcla), sino que en este tipo de estructuras (pavimento), necesitamos lograr hormigones con un estructura granular “abierta”, es decir, que permita que la mezcla luego de ser colocada y terminada, exude controladamente el agua extra de amasado; esto evitara grandes y costosos problemas como son las fisuras por contracción plásticas que observamos en la Figura 4.35. Al este concepto lo desarrollaremos con mayor detalle en el capítulo N°5.



Figura 4.35. Fisuras por contracción plástica

Una vez definidos los porcentajes de participación de cada una de las fracciones, procedimos a calcular el MF (Modulo de Finura) del agregado total, parámetro de entrada del Abaco que se puede observar en la Figura 45. Este es el que se emplea en el siguiente punto del método de diseño para la determinación del agua estimada de la mezcla.

Cabe recordar que el MF es un índice que sirve para clasificar los agregados en función de su granulometría. Es la suma de los porcentajes retenidos acumulados de un árido, dividido 100. Es decir, es un índice que nos da una idea de cuan “gruesa” es una fracción, mientras más grande el MF, más gruesa la granulometría de dicha fracción de material.

En el caso del MF de la curva total, de la misma manera, el mismo nos indicará que tan gruesa, en términos de agregados pétreos, es nuestra mezcla. En la curva que desarrollamos, el MF obtenido fue siempre próximo a 5.6, aproximándonos a la recomendación de un límite superior de 5.5.

4.7.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA ESTIMADA DE LA MEZCLA

Empleando el Abaco que se observa en la Figura 4.36 podemos obtener el agua aproximada necesaria de la mezcla. Se identifica la curva que corresponda al MF del agregado total (5,6) y la ordenada de la intersección de la curva con la vertical correspondiente al asentamiento seleccionado en el punto 2.

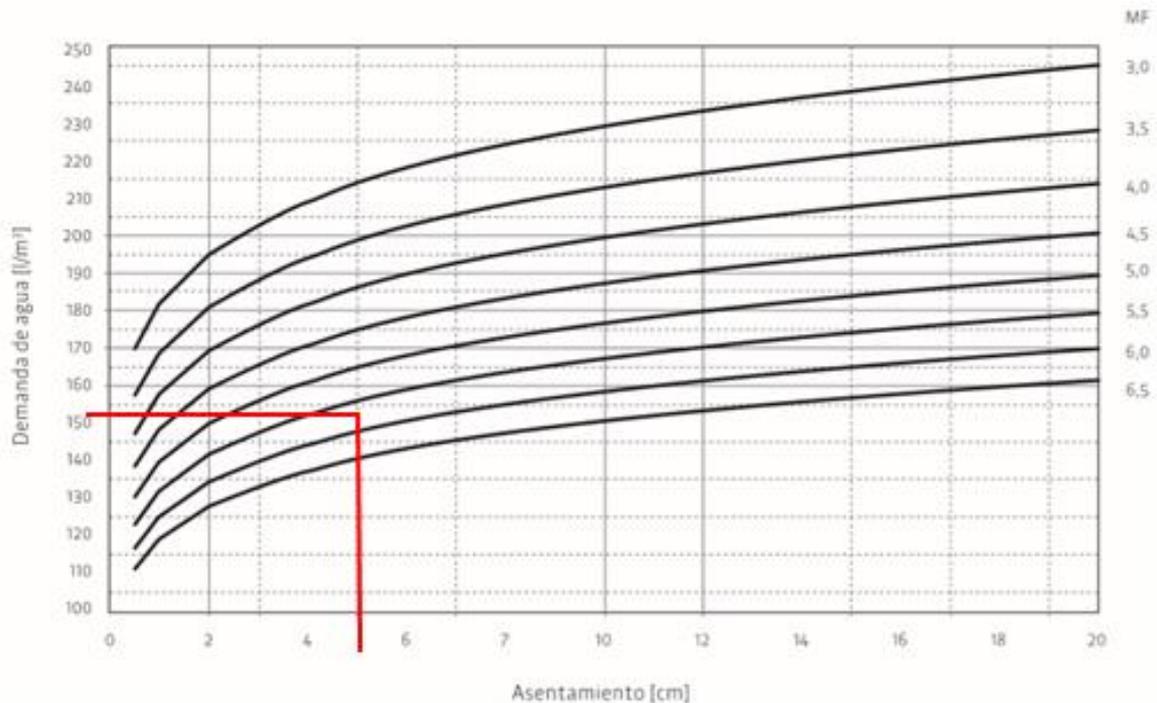


Figura 4.36. Abaco: Demanda de agua del hormigón en función del asentamiento y el MF del agregado total

Tal como puede verse en la Figura 45, ingresando al ábaco con un asentamiento de 5 cm y dirigiéndonos en sentido vertical hasta la curva aproximada de 5,6 de MF, al correrlos horizontalmente hacia la izquierda, obtenemos que la cantidad de agua necesaria para nuestra mezcla es de aproximadamente 150 litros por metro cúbico.

La realidad es que en mi caso, el agua fue estimada teniendo como parámetros de entrada, la demanda de agua de los materiales y sus características reológicas, eficiencia de los aditivos reductores de agua utilizados, y sobre todo, la relación agua cemento necesaria para lograr la resistencia especificada por pliego, de la cual hablaremos en el paso número siete. Aun así, el agua de amasado necesaria para lograr el asentamiento requerido, fue prácticamente la misma que la arrojada por el ábaco; aproximadamente 150 lts/m³.

Vale aclarar que el ábaco antes expuesto está diseñado para agregados gruesos redondeados (canto rodado) y por lo tanto, si se emplea piedra partida, el agua estimada debe incrementarse entre un 5% y 10%.

De la misma forma, si se hubiese decidido incorporar aire intencionalmente y/o utilizar un aditivo reductor de agua, la misma deberá ser reducida según contenido de aire incorporado (explicado en puntos anteriores) y especificaciones técnicas del aditivo reductor.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

En nuestro caso, la piedra utilizada fue agregado grueso triturado, y como ya es de conocimiento, utilizamos aditivos reductores de agua e incorporamos aire intencionalmente. Por estas razones, es que tal como lo hicimos nosotros, en la práctica, el diseñador de mezclas de hormigón, se rige más por la experiencia y conocimientos de sus materiales, que de ábacos o gráficos teóricos.

4.7.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

La determinación de la resistencia de diseño de la mezcla debe hacerse en función de los requerimientos de la obra (resistencia característica proyectada) y del tipo de elaboración y control previstos para la etapa de ejecución.

En nuestro caso la resistencia característica o especificada proyectada y solicitada por el cliente, fue de 35 MPa (mega pascales) a 28 días, medida según norma IRAM 1546.

Su modo de control lo desarrollaremos en el capítulo correspondiente a controles de calidad, pero vale aclarar que la misma fue medida en cada uno de los pastones de prueba realizado, siendo este una de los principales y más condicionantes parámetros de prueba.

4.7.7 ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN A/C (AGUA/CEMENTO)

La relación agua/cemento se puede definir como la razón entre el contenido efectivo de agua y el contenido de cemento en masa del hormigón fresco; siendo el contenido efectivo de agua, la diferencia entre el agua total presente en el hormigón fresco y el agua absorbida por los áridos.

Al hablar de tecnología del hormigón, esta razón (a/c), es el parámetro más importante y significativo; del mismo dependen la resistencia, durabilidad, y otros coeficientes como son la retracción y fluencia de la masa del hormigón.

El concepto en sí de la relación fue desarrollado por el investigador norteamericano Duff Abrams en 1918, estableciendo la razón existente entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión simple del hormigón. Como es matemáticamente una razón, debe usarse un signo de división (barra: /) y nunca un guion.

Dado que el peso del agua utilizada siempre debe ser menor que el peso del cemento, el resultante es menor que la unidad. La relación a/c crece cuando aumenta la cantidad de agua y decrece cuando aumenta el contenido de cemento, tal como puede observarse en la Figura 4.37. En todos los casos, cuanto más baja es esta relación, tanto más favorable son las propiedades de la pasta de cemento endurecida, o en nuestro caso, hormigón.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

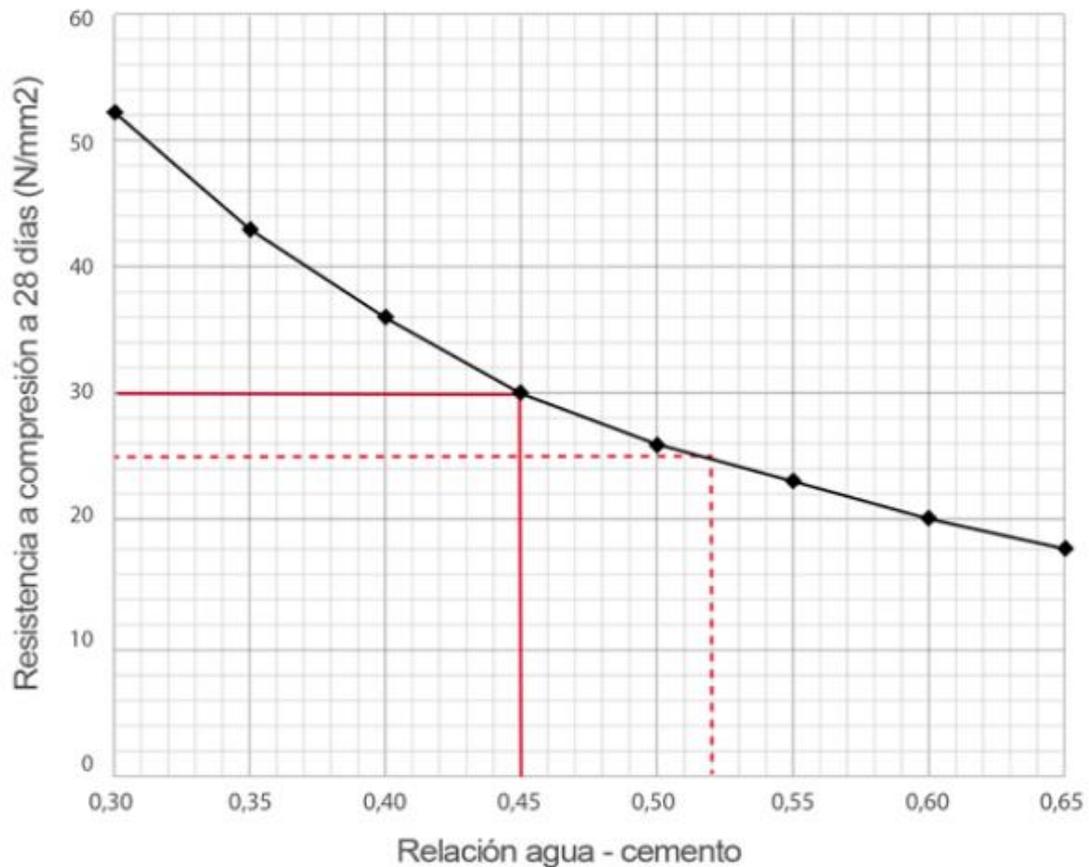


Figura 4.37. Resistencia a la compresión vs Relación a/c

Siendo que el hormigón solicitado fue para su utilización en una obra pública reglamentada por el reglamento CIRSOC-2005, es que una de las posibilidades para estimar la relación a/c del mismo, podría haber sido la verificación de la misma según las condiciones de exposición a las que el hormigón se viera solicitado. Estas se encuentran indicadas por el CIRSOC en la tabla 4-5 que se muestra en la Figura 4.38.

Requisitos	Tipos de Exposición de las estructuras según CIRSOC 201:2005 (ver Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4).									
	A1	A2	A3/M1	CL/M2	M3	C1 (2)	C2 (2)	Q1	Q2	Q3 (3)
a) Razón a/c máxima ⁽¹⁾										
Hormigón Simple	---	---	---	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón Armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón Pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
b) f'c min [MPa]										
Hormigón Simple	---	---	---	30	35	30	35	30	35	40
Hormigón Armado	20	25	30	35	40	30	35	30	35	40
Hormigón Pretensado	25	30	35	40	45	30	35	35	40	45

(1) Cuando se use cemento portland más una o varias adiciones minerales activas incorporadas directamente en planta elaboradora, se podrá reemplazar la razón agua/cemento (a/c), por la razón agua/ material cementicio [a/(c+x)], que tenga en cuenta la suma del cemento portland (c) y la cantidad de la adición mineral (x), cuando se trate de puzolanas según norma IRAM 1668:1968 o de escorias según norma IRAM 1667:1990.
(2) Debe incorporarse intencionalmente aire, en la cantidad requerida en la Tabla 5.3. del CIRSOC 201:2005
(3) Cuando corresponda se debe proteger a la estructura según 2.2.5.2.c3 ó 2.2.10.3 del CIRSOC 201:2005

Figura 4.38. Razones a/c máximas especificadas por razones de durabilidad

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Este no fue el caso, el hormigón se solicitó solo para cumplimiento de resistencia final (35 MPa). Por este motivo, para obtener la misma, nos guiamos en base a los siguientes tres puntos:

- Valores recomendados por el reglamento en tabla 4-5, según condiciones de exposición.
- Curva de relación a/c observada en la Figura 46.
- Experiencia y valores de relaciones a/c de hormigones de línea cercanos en resistencia.

Según los puntos antes mencionados y la cantidad de agua de amasado estimada en el punto anterior, la relación a/c que manejamos en el hormigón desarrollado rondo los 0,35-0,40 puntos.

4.7.8 CALCULO DEL CONTENIDO UNITARIO DE CEMENTO (CUC)

Con los datos ya obtenidos de la relación a/c y el contenido de agua para elaborar el metro cúbico de hormigón, resulta sumamente sencillo calcular el contenido de cemento a emplear. En nuestra cosa no fue así por los inconvenientes mencionados en el punto 4.7.1; por las características propias del cemento antes mencionadas, ni el valor con el que había sido licitado primeramente el proyecto, ni el arrojado a priori por el método de diseño empleado, lograba alcanzar la resistencia especificada de diseño (35 MPa). Fue esta la razón que nos llevó a cambiar el tipo de cemento a utilizar y realizar la gran cantidad de pruebas mencionadas en el punto en cuestión.

En términos generales, si existiera alguna limitación al contenido mínimo de cemento, ya sea porque es un aspecto contractual, reglamentario o por durabilidad, debe elegirse el mayor entre el calculado y el especificado.

No pudiendo revelar el contenido de cemento utilizado por metro cubico por cuestiones de confidencialidad, si puedo aclarar, tal como menciono en el punto 4.7.1, que el CUC final utilizado durante gran parte del volumen producido, fue excesivamente alto dado al gran desempeño del cemento que elegimos utilizar (CPC50). El mismo nunca se logró bajar por trabas presentadas por el cliente, en su mayoría sin sustento ni explicación, resultando así, tal como se observa en la Figura 4.39, un hormigón sumamente sobredimensionado en su resistencia final. Esto significó un gran beneficio tanto para el cliente como para la estructura ejecutada, pero un gran percañe económico para Holcim.

H350K05P4NNM	KHP5	4	30-04-19	28-05-19	28	51,4
H350K05P4NNM	KHP5	4	30-04-19	28-05-19	28	51,1
H350K05P4NNM	KHP5	2	30-04-19	28-05-19	28	56,0
H350K05P4NNM	KHP5	2	30-04-19	28-05-19	28	58,4
H350K05P4NNM	KHP5	2,5	02-05-19	30-05-19	28	46,3
H350K05P4NNM	KHP5	2,5	02-05-19	30-05-19	28	45,6
H350K05P4NNM	KHP5	2	02-05-19	30-05-19	28	50,0
H350K05P4NNM	KHP5	2	02-05-19	30-05-19	28	48,2

Figura 4.39. Valores de Resistencia a la compresión del hormigón desarrollado

4.7.9 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS (FINOS Y GRUESOS)

Este último paso es el más sencillo de todos y no requiere de ninguna ciencia, simplemente se obtiene por diferencia a 1000 de la suma de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Este volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso 4.

Es decir, mediante una sencilla planilla, conociendo el peso específico de todos los materiales, se ajustan las cantidades de agregado en las proporciones establecidas, para que el metro cúbico de hormigón cierre perfectamente en mil litros.

4.7.10 AJUSTE EN PASTONES Y PRUEBA INDUSTRIAL

Aunque con el punto anterior pareciera terminar el proceso de diseño, esto no es así, faltan los dos últimos pasos y más importantes, la verificación de la formulación obtenida, tanto en laboratorio como en obra.

Esto es así, ya que el proceso de diseño es un proceso dinámico de prueba y error, el cual se va retroalimentando a medida que las pruebas se van realizando y ajustando.

Dentro de los ajustes, las primeras pruebas se realizan en escala de laboratorio; en nuestro caso, tal como menciono en el paso 1, no muchos pastones fueron necesarios para lograr la mezcla solicitada, pero si más de 18 para lograrla y que cumpla no solo los requerimientos técnicos del cliente, sino los económicos de la compañía.

Utilizando planillas de dosificación tal como la que se observa en la Figura 4.40, se dosificaron y realizaron las pruebas. Gracias a las mismas, se pueden producir hormigones con las mismas características que el diseñado, pero sin la necesidad de producir un metro cubico del mismo. Estas tienen en cuenta absolutamente todos los parámetros y características de la mezcla, tanto de los materiales componentes, como los de diseño del hormigón (resistencia especificada, asentamiento, etc); de aquí la gran importancia de conocerlos a todos y haberlos estimado previamente.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

PLANILLA		O.T.		TIPO	GCPF40				
FECHA DE ELABORACION		#####		MARCA	Holcim				
				ORIGEN	MG				
				NUMERO					
TIPO Y ORIGEN DE LOS AGREGADOS				ADITIVOS					
AGREGADOS GRUESOS: Ptreos 19-38 - Ptreos 6-19 -				1	Sikament 90e %				
ARENAS: Parana - Arena gruesa Marchisone				2					
CARACTERISTICAS DEL HORMIGON									
RELACION a/c TEÓRICA		0,36	ARENA f/g	0 / 100	M.F. MEZCLA		5,79		
ARIDO F / ARIDO G		0,67	ARENA [%]	40,0	AIRE NATURALMENTE INC.		1,5%		
XXXXXX									
MATERIAL	PSSS	Dsss	H. ACOPIO	ABSORCION	DIFERENCIA	AGUA	DOSAJE CORREGIDO		
	[Kg/m3]		[%]	[%]	[%]	[lts]	[Kg/m3]	[g/pastón]	[g/m3]
Arena Parana		2630		0,60	-0,60				
Arena Arena gruesa	725	2630	4,36	0,60	3,76	27,11	752	20740	20740
Arido Ptreos 19-38	725	2780		0,70	-0,70	-5,04	720	19854	19854
Árido Ptreos 6-19	363	2760		0,85	-0,85	-3,06	360	9912	9912
Árido		1							
Agua	152	1000					133	3666	3666
Cemento	420	3100					420	11578	11578
Adición									
Sikament 90e		1							
Aditivo 2							#####	#VALOR!	#VALOR!
	densidad	volumen						volumen del	
	HoFco. - V	total - V						pastón - V	
TOTALES	2385	#DIV/0!				19,01	#####	27,57 lts	28 lts

Figura 4.40. Planilla de pastones de pastones de prueba en laboratorio

Una vez ajustada en laboratorio la receta y obtenido todas las cualidades requeridas, se procede a realizar una prueba a escala industrial.

En nuestro caso, esta prueba fue realizada en el obrador del cliente el día 29/08/18, unos días antes de comenzar con la producción. El hormigón fue dosificado ya no manualmente sino por la propia planta mezcladora instalada para el trabajo, cargado en una batea. Esto nos permitió, tanto a nosotros productores, como al cliente, evaluar una gran cantidad de parámetros; por un lado el comportamiento de la planta, la cual era nueva, y por otro, el comportamiento del hormigón dentro del camión, como se comportaba con el movimiento del mismo, durante su descarga, etc. Es decir para simular exactamente lo que sería el proceso de carga, transporte y descarga.

En cuanto al proceso de colocación y terminado, tal como se observa en la Figura 4.41, más allá que no se utilizó la pavimentadora propiamente dicha, si se armó un encofrado fijo, se colocó una regla vibradora de altas revoluciones, y se trabajó con vibradores de alta energía, para poder así simular de la mejor forma posible, el trabajo que realizaría la máquina.

La prueba fue muy positiva, solo debimos hacer unos cambios mínimos, pero de gran relevancia, en los siguientes parámetros:

- Velocidad de mezclado de la mezcladora
- Dosis del aditivo plastificante
- Dosis del aditivo incorporador de aire



Figura 4.41. Prueba a escala industrial

Así culminó nuestro proceso de diseño del hormigón solicitado, y los primeros días de octubre, lo vimos por primera vez mezclado, descargado, transportado, y sobre todo, colocado en la traza de la circunvalación.

5. CONTROLES DE CALIDAD

RMX Holcim Argentina trabaja bajo un sistema de gestión de producción y control de calidad certificado por ISO. Esto implica el cumplimiento de una gran cantidad de importantes y exigentes requisitos, los cuales aseguran y certifican, valga la redundancia, la calidad del producto final, en este caso el hormigón.

Este es el punto que más sobresale del negocio de hormigones, y por el que puedo asegurar que RMX Holcim sea uno de los líderes del mercado, tanto a nivel provincial, como nacional.

Toda obra vial pública, necesita de cumplir y seguir estrictos protocolos de producción y control de calidad de su proceso, haciéndose efectivos los mismos en los materiales involucrados en el mismo. Tal como he mencionado en apartados anteriores, siendo el hormigón el material por excelencia a la hora de realizar un pavimento rígido, este es donde se abocarán la mayor cantidad de controles, así como la exigencia y frecuencia de los mismos.

Es esta una de las razones por la que muchas empresas nos eligen, más allá que la inspección, el pliego, o las políticas de la propia empresa pueden estipular el control

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

de calidad y producción interno, Holcim como proveedor de hormigón con calidad certificada, es capaz de brindar al cliente esta seguridad, desligándose éste de esa responsabilidad y trasladándola al proveedor, en este caso, RMX Holcim.

Durante los meses de pasantía realizados en la empresa, no solo fui el encargado de llevar el plan de control de calidad de la compañía, velando por su cumplimiento y resultados, sino también el responsable de mejorarlo.

Por esto, a continuación, presentare el control de calidad que posee la empresa para asegurar la calidad de sus productos y como este es llevado adelante.

5.1 PLAN DE CALIDAD

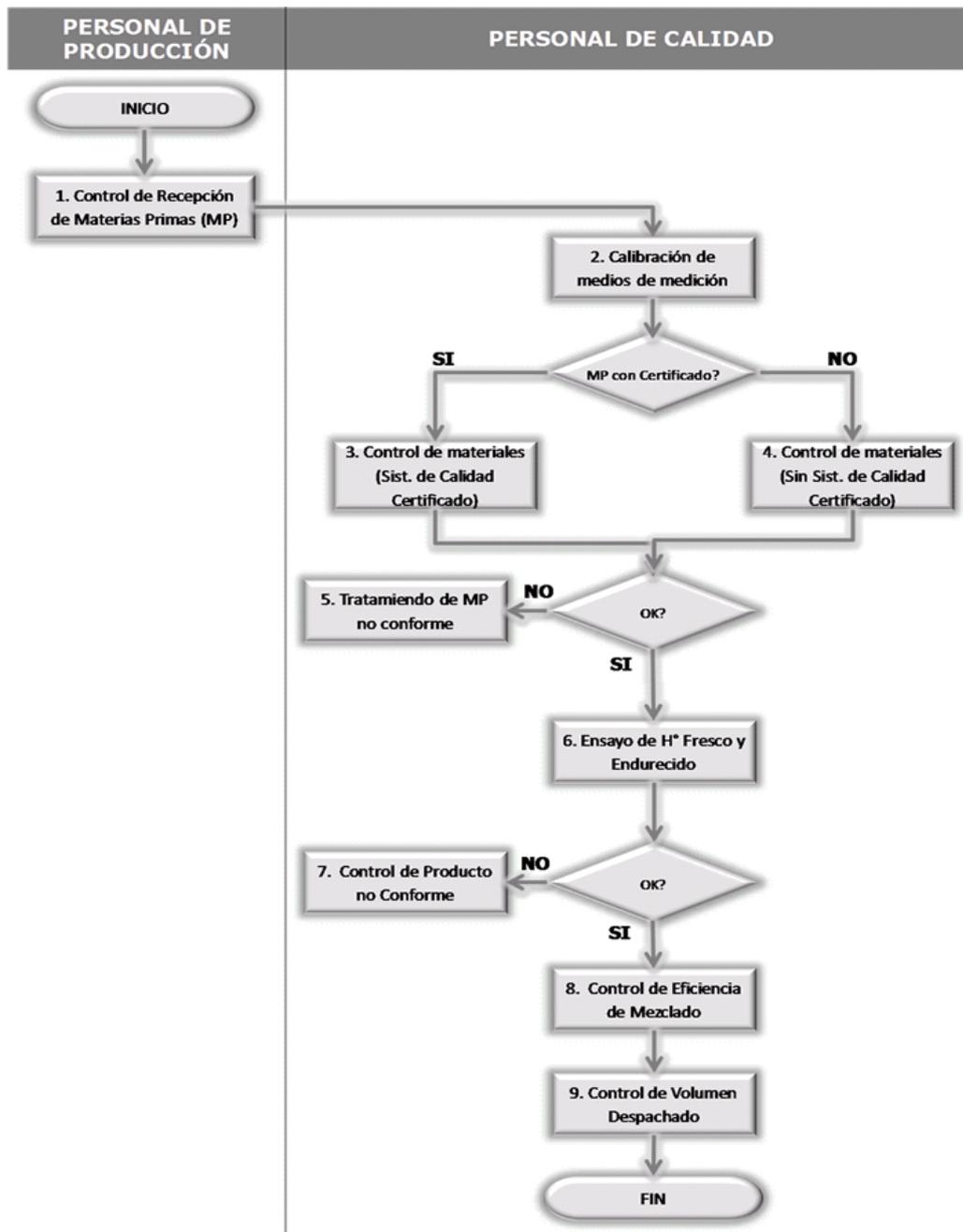


Figura 5.1. Plan de Calidad

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

En la Figura 5.1 se puede observar el diagrama de flujo del plan de calidad de la empresa. El mismo comienza con el control de recepción de materias primas, esta primera etapa del plan es llevada a cabo por personal de producción. Una vez ingresado el material a la planta, todo lo que vaya dentro del hormigón, será testeado y verificada su calidad. Detallaré a continuación punto por punto estas etapas.

5.1.1 CALIBRACION DE MEDIOS DE MEDICION

Absolutamente todos los equipos de medición y ensayo que se encuentran formando parte del proceso de producción y posterior control de calidad, son certificados y verificados, interna o externamente según corresponda tal como se observa en la Figura 5.2, y acorde a un plan de certificación y verificación previamente estipulado según requerimientos de norma y cada equipo.

Dentro de los equipos e instrumentos del laboratorio de hormigones que me toco calibrar/verificar durante el tiempo de desarrollo de la PPS, puedo mencionar los siguientes:

- Equipos de medición de aire (Washington)
- Balanzas mono plato
- Basculas
- Temperatura de cámara de curado
- Termómetros
- Conjunto de pesas patrones
- Tamices para ensayos granulométricos (finos y gruesos)

La calibración de estos equipos forma parte de los requerimientos necesarios para la certificación de calidad de nuestro proceso y producto, por esto es que el nivel de importancia de los mismos era realmente alta. Acorde a un plan detallado por equipo y fecha, durante el año fui verificando y calibrando todos los equipos. Esto no solo me aporó el aprendizaje que demanda una calibración, sino poder aprender y comprender el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.

Luego de cada calibración, todos los resultados eran documentados en las planillas correspondientes, donde acorde a los valores obtenidos, valores de norma, y herramientas estadísticas, cada uno de los equipos y herramientas eran verificados y aprobados, o enviados a calibrar de ser necesario.

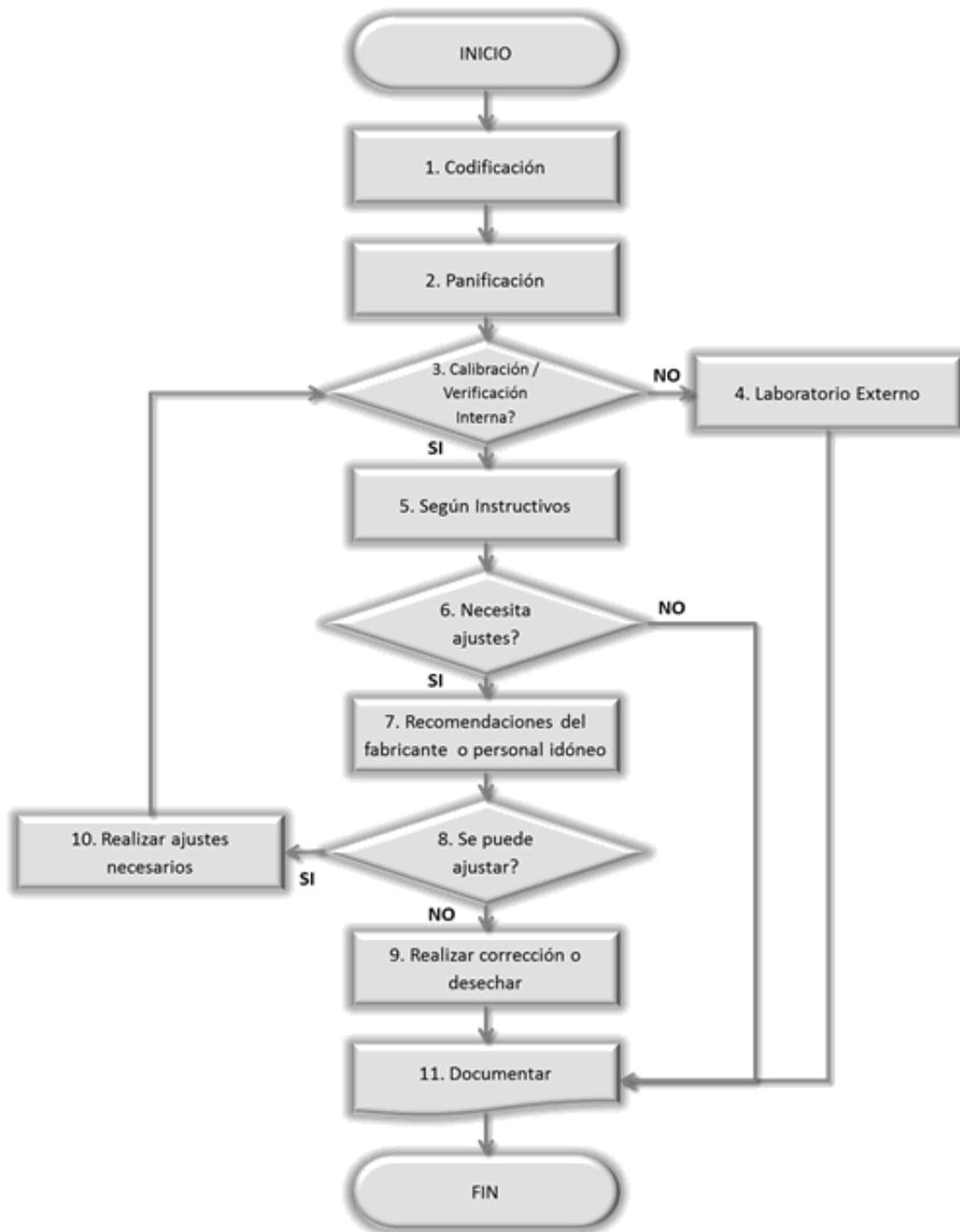


Figura 5.2. Diagrama de flujo de calibración y certificación de equipos y medios de medición

5.1.2 CONTROL DE MATERIALES

Dentro de todos materiales utilizados para poder elaborar hormigón, utilizamos algunos con certificación de calidad propia (ejemplo el cemento o aditivos), y otros como las piedras o arenas, los cuales no poseen certificado de calidad emitido por el proveedor. Por estas razones, el proceso de control de materiales se divide en dos grandes grupos, materiales con sistema de calidad certificado y materiales sin sistema

de calidad certificado, diferenciándose no solo en este punto, sino sobre todo en la cantidad y frecuencia de controles a realizarles una vez los mismos ingresan a la planta.

5.1.2.1 Materiales con sistema de calidad certificado

Dentro de los materiales que utilizamos para producir hormigón, los únicos elaborados bajo sistema de calidad certificado, son el cemento y aditivos químicos. Por esta razón, los ensayos de parámetros especificados por norma se reservan a los proveedores de los mismos; con cada partida de material, el proveedor tiene la obligación de enviarnos los protocolos de calidad de cada uno de sus productos y partidas de los mismos asociadas al lote de venta que recibimos.

En ambos casos, por control interno y para respetar y cumplir con los requerimientos de nuestro sistema y plan de calidad, se toman muestras y realizan inspecciones visuales a cada uno de los materiales en cuestión; los parámetros observados en cada caso se especifican a continuación.

Cemento:

El cemento a utilizar debe cumplir los requisitos de las normas IRAM 50.000 ó 50.001 según corresponda. El cumplimiento de los requisitos establecidos en las mencionadas normas se garantiza con la recepción de protocolos mensuales para cada tipo de cemento utilizado, que acrediten el cumplimiento de los requerimientos de IRAM 50.000 ó 50.001 correspondientes a las partidas recibidas. En la Figura 5.3 puede observarse uno de los protocolos del cemento utilizado para elaborar el hormigón vial en cuestión. El mismo es emitido por el laboratorio del CDI (Centro de desarrollo e Investigación) propio de la empresa.

Análisis químicos		Unidad	Valor medio	Requisitos IRAM 5000
Trióxido de azufre (SO ₃) (IRAM 1504)		g/100g	2,93	≤ 3,5
Perdida por calcinación (IRAM 1504)		g/100g	3,69	≤ 11,5

Ensayos físicos		Unidad	Valor medio	Requisitos IRAM 50000
Retenido tamiz 75μ (IRAM 1621)		%	0,25	≤ 15,00
Tiempo de fraguado inicial (IRAM 1619)		minutos	238	≥ 45

Ensayos físicos		Unidad	Valor medio	Requisitos IRAM 50001
Superficie específica Blaine (IRAM 1623)		m ² /kg	429	≥ 350

Ensayos mecánicos		Unidad	Valor medio	Coefficiente de variación [%] ³	Requisitos IRAM 50000
	2 días	MPa	29,4	2,3	≥ 20
	28 días	MPa	52,3	1,1	≥ 50

Figura 5.3. Protocolo de Calidad CPC50

Tal lo comentado en el párrafo anterior, no solo alcanza con recibir el certificado emitido por el proveedor de cemento, sino que también durante el tiempo como pasante de calidad, fui el encargado de designar al responsable de tomar una muestra

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

diaria de cemento de alguna tolva que ingresara a la planta. Esto para dos fines, por un lado verificar los parámetros que se observan en la Figura 5.4, y por otro, dejar esa muestra almacenada durante un periodo de 3 meses, esto como contra muestra por cualquier inconveniente que pudiera llegar a haber con la partida de cemento recibida.

Variable / Atributo de Materias Primas	Valor Normal	Frente a Anormalidad	Frecuencia de Observación
Color	Sin cambios evidentes entre partidas diferentes	El Coordinador / Supervisor de Calidad y Producción juzga si corresponde utilizarlo, verificar el cumplimiento de IRAM 50000 ó 50001, ó efectuar algún ajuste correctivo en la producción. Hacer Hallazgo.	Mínimo una tolva diaria
Grumos	Sin grumos		
Temperatura	60 - 70 ° C		

Figura 5.4. Ensayos realizados al cemento en planta

El parámetro más importante a controlar del cemento es su temperatura. Cuando la planta que realiza la molienda está muy cerca de nuestra planta hormigonera y es un cemento que utilizaremos en el corto plazo, mismo día o cercanos, el mismo puede ingresar con una elevada temperatura. Esto será perjudicial para el hormigón, especialmente durante tiempo caluroso; la temperatura del cemento elevará la de la mezcla, acelerando el proceso de fragüe, provocando problemas de apelmazamiento, caídas de asentamiento, y potenciales inconvenientes en el hormigón endurecido productos de estos inconvenientes durante el estado fresco, entre otros.

En nuestro caso, tal como fue expuesto en el capítulo cuatro, el cemento utilizado para producir nuestro hormigón vial, fue proveniente de la planta de molienda ubicada en la localidad de Campana, Bs As. Dada la distancia y tiempo de viaje, el hormigón ingresaba con una temperatura acorde y controlada, 50 – 60 °C.

Aditivos:

Los aditivos a utilizar deben cumplir con la Norma IRAM 1.663. El cumplimiento de los requisitos establecidos en dicha norma se garantiza con la entrega de los protocolos ó certificados de calidad que acreditan el cumplimiento de los requerimientos de IRAM 1663 correspondientes a cada partida de aditivos entregada, tal como se observa en la Figura 5.5.

Line num	Inspection operation	Nombre					
1	FAB-LQ	Fabricación LQ					
Line num	Descripción	Inspection method	Unidad	Specification value	Result	Lab person	Nota
1	ASPECTO	0101	N/A	1	Si	00903	
2	DETERMINACIÓN DE PH		N/A	7.23	Si	00903	
3	DENSIDAD DE LÍQUIDOS (25 °C)		g/cm3	1.15	Si	00903	
4	RESIDUO NO VOLÁTIL		%	32.27	Si	00903	BH-13.05
5	FORMACIÓN DE ESPUMA		cm3	0	Si	00903	

Figura 5.5. Protocolos de Aditivos según norma IRAM 1663

Al momento de la recepción de cada aditivo, el laboratorista designado por el técnico de calidad toma una muestra del mismo de acuerdo a la norma IRAM 1.663. Al menos 500 cm³ de la muestra deben ser almacenados en un recipiente transparente incoloro

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

y con cierre hermético. Este se debe identificar y conservar en lugar fresco y protegido de la incidencia directa de la luz del sol por no menos de 30 días en resguardo por eventuales problemas. Se debe conservar almacenada al menos la última muestra de cada tipo de aditivo recibido a efectos de establecer la comparación visual de sus atributos y detectar cambios entre partidas.

Los atributos a registrar al momento de la recepción de los aditivos convencionales se detallan en la tabla que se observa en la Figura 5.6.

Atributo del Aditivo	Conforme	Frente a no Conformidad	Frecuencia de Registro
Color	Sin cambios	Coordinador / Supervisor de Calidad y Producción juzga si corresponde: Verificar IRAM 1663 y/o efectuar alguna verificación técnica especial	Con cada partida recibida
Olor	Sin cambios		
Espumas	Sin cambios		
Materia Flotando	Ninguna		
Densidad	Según protocolo		
Ph	Según protocolo		
Sedimentos visibles	Ninguno		

Figura 5.6. Parámetros a observar en los Aditivos Químicos

Los aditivos presentan un consumo casi despreciable en el metro cubico de hormigón, pero no así la potencialidad de sus efectos y sobre todo costo. Por esta razón, más allá que la rotación del mismo sea muy inferior al lado del cemento o agregados pétreos, sus controles deben hacerse por igual y con la misma rigurosidad, especialmente la exigencia al proveedor de los protocolos de la partida entregada.

5.1.2.2 Materiales sin sistema de calidad certificado

Dentro de los materiales utilizados para producir hormigón, aquellos que no poseen un sistema de calidad certificado, corresponden a los áridos, tanto gruesos (piedras) como finos (arenas).

En ambos casos, su utilización, especialmente cuando los mismos provienen de una fuente de provisión nueva, debe verificarse siempre que los mismos reúnen los requerimientos previstos en la norma IRAM, 1531 para el caso de agregados gruesos, y 1512 para el caso de agregados finos.

Dentro de los ensayos enumerados por las normas antes mencionadas, en el laboratorio de hormigones contamos con el instrumental para realizar los siguientes:

Agregado grueso:

En la Figura 5.7, se presenta la tabla de control de ensayos de agregados gruesos. La misma especifica el tipo de ensayo, la norma correspondiente al mismo, y la frecuencia de ensayos, entre otros.

Material	Ensayo	Norma	Rango aceptable	Si está fuera de rango	Frecuencia mínima de ensayo	Registro a utilizar
Agregados Gruesos (para cada agregado grueso)	Análisis Granulométrico	IRAM 1505	Entre curvas A y C IRAM 1627	Rechazar ó Reclasificar	c/ 750 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas
	Densidad Relativa y Absorción	IRAM 1533	Dp 0,03 Ap 0,3% (1)	Coordinador/ Supervisor de Calidad y Producción define acciones	c/ 5000 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas
	Material que pasa el tamiz de 75 μ m	IRAM 1540	< 1%	Rechazar ó Reclasificar	c/ 2500 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas

Figura 5.7. Tabla de control de ensayos de agregados gruesos

Agregado Fino:

En la Figura 5.8, se presenta la tabla de control de ensayos de agregados finos. La misma especifica el tipo de ensayo, la norma correspondiente al mismo, y la frecuencia de ensayos, entre otros.

Material	Ensayo	Norma	Rango aceptable	Si está fuera de rango	Frecuencia mínima de ensayo	Registro a utilizar
Agregados Finos (Para cada agregado fino)	Análisis Granulométrico	IRAM 1512	Entre curvas A y C IRAM 1627	Causa de Rechazo	c/ 750 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas
	Densidad Relativa y Absorción	IRAM 1533	Dp 0,03 Ap 0,3% (1)	Coordinador/ Supervisor de Calidad y Producción define acciones	c/ 5000 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas
	Material que pasa el tamiz de 75 μ m	IRAM 1540	< 5%	Rechazar ó Reclasificar	c/ 2500 \bar{I} ingresadas	Registro de Materias Primas

Figura 5.8. Tabla de control de ensayos de agregados finos

Tal como pueden observarse en ambas figuras, los ensayos realizados a cada tipo de agregado son los mismos, varían principalmente en sus límites permitidos y frecuencia de realización.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

Nos centramos en estos cuatro ensayos, por las siguientes razones:

- Facilidad de realización
- Frecuencia necesaria de control estipulada por norma
- Potencialidad de variación de los parámetros ensayados
- Impacto de su variación en las propiedades el hormigón

Además de estos ensayos, las normas estipulan la realización de algunos otros, tal como limpieza, terrones de arcilla, materiales extraños, tamaños extraños, cambios de color, entre otros. Estos ensayos suelen evaluarse una vez por año y los mismos quedan a cargo del proveedor de agregados.

Durante los meses como pasante, fui el encargado del seguimiento y supervisión de los cuatro ensayos enumerados en las Figuras 56 y 57, sus resultados y posteriores cargas al sistema de información de la empresa. Así como también, de llevar a cabo los informes correspondientes, de información a nuestros clientes y reclamos por incumplimiento a nuestros proveedores.

Me resulta de gran interés exponer brevemente estos ensayos realizados en el laboratorio de hormigones para que los mismos permitan entender la relevancia que poseen los parámetros ensayados, a la hora de realizar hormigón. Los iré enumerando, dando una descripción de los mismos y algunas posibles consecuencias de su no cumplimiento.

1- Ensayo Granulométrico

La granulometría es la medición del tamaño de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. El método de determinación granulométrico más sencillo es aquel que hace pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado, que actúen como lo filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices, se toman los pesos retenidos en cada tamiz, y luego haciendo una suma acumulada de los pesos de cada uno de estos tamices, obtendremos una curva tal como la que se observa en la Figura 5.9.

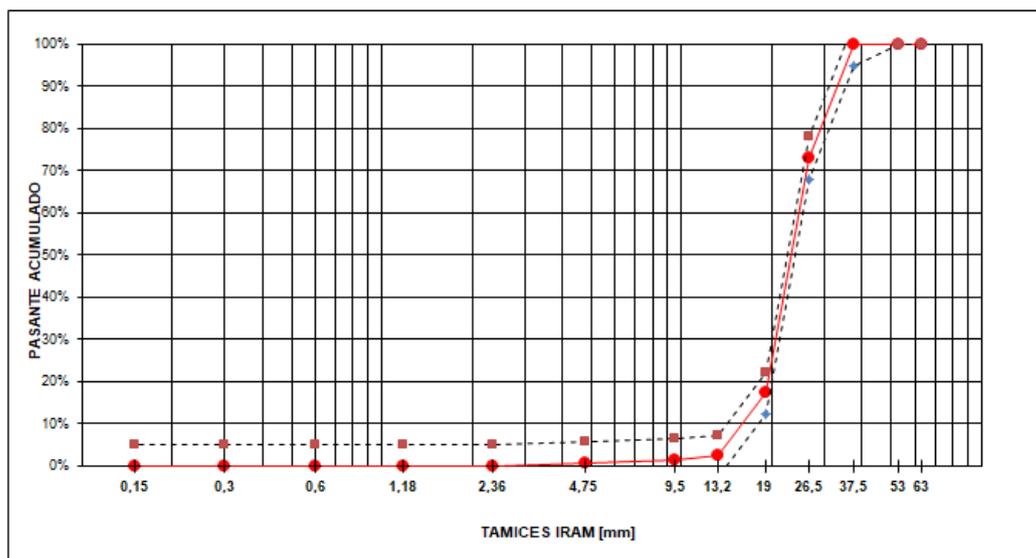


Figura 5.9. Curva granulométrica agregado grueso

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

La norma estipula dos límites, uno superior y otro inferior, para cada fracción o tamaño de agregado. La curva granulométrica obtenida en el ensayo debe encontrarse dentro de dichos límites para que el material se encuentre en consigna de ser aceptado y utilizado.

Los límites que se pueden observar en la Figura 5.9, no son límites de norma, sino que son límites propios del acopio de la fracción 19-38 mm; es decir, son límites mucho más estrictos y acotados, estos para que una variación en el acopio pueda ser observada con mayor facilidad ya que los límites de norma son bastante más amplios y menos exigentes.

Este método de ensayo vale tanto para agregados gruesos como finos, el único cambio que observaremos será un desplazamiento de la curva a derecha o izquierda, según se trate de un agregado grueso o fino respectivamente. En la Figura 5.10 podemos observar la curva granulométrica de una partida de arena gruesa utilizada en el hormigón vial. Veremos cómo la misma se desplaza hacia la izquierda, esto ya que en las abscisas del gráfico, encontramos el tamaño de las aberturas de cada tamiz ordenadas de forma creciente, es decir mientras más fino el agregado, mayor cantidad de material se concentrara en los tamices de menor abertura, aquellos que se concentran más cerca del eje de ordenadas.

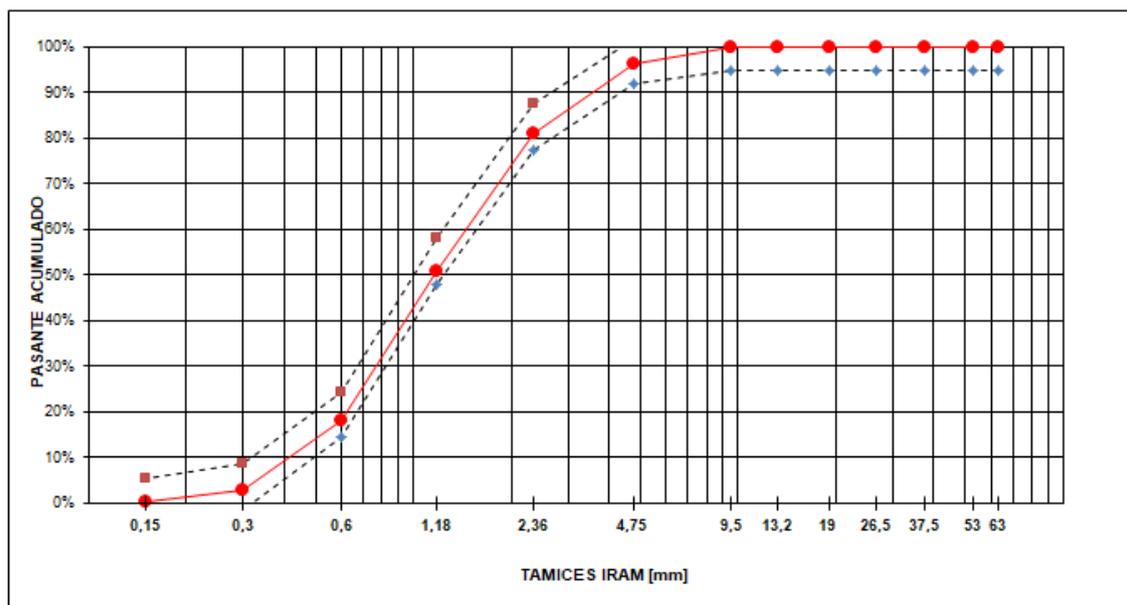


Figura 5.10. Curva granulométrica agregado fino

Tal como he mencionado en capítulos anteriores, la principal función de los agregados es la de ocupar volumen para de esa forma abaratar la mezcla. Por esta razón, al ser grande su utilización en la masa de hormigón, de la misma forma grande es su impacto cuando sus características no son las óptimas.

Dentro de los puntos más relevantes a tener en cuenta, la granulometría y el tamaño máximo de los agregados afectan la demanda de agua, relación agua/cemento, la trabajabilidad, economía, porosidad, contracción, durabilidad, entre otras.

El impacto de una mala granulometría es realmente considerable, siendo que a la vez la granulometría entregada generalmente es el parámetro que más variación posee. Por estas razones es que el ensayo granulométrico, para todas las fracciones y tipos

de agregados, es el de mayor frecuencia, un ensayo cada 750 toneladas de material recibido.

2- Ensayo de densidad y Absorción

Cuando se examina la aptitud física de los agregados, dos de las características más importantes a conocer, son la densidad y la absorción. Para poder medir estas características, es importante entender que todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que posibilita la entrada de agua en los espacios de los poros. Un agregado húmedo puede entonces tener agua tanto en su interior como en el exterior, como se muestra en la Figura 5.11.

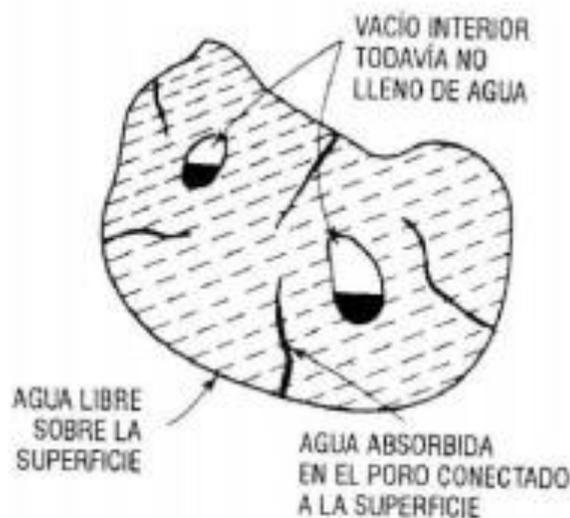


Figura 5.11. Partícula de agregado húmedo en la que se muestra la distribución de agua interior y exterior

Se conoce como *absorción*, al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un periodo de tiempo prescrito, sin incluir al agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

La *densidad* de un material se define como la masa por unidad de volumen, expresada en kg/m³.

Para el caso de los agregados pueden obtenerse distintos valores, en función de la condición en que la masa se esté considerando en el cálculo, pudiéndose encontrar los agregados en las siguientes condiciones:

- *Secados al horno (SH)*: condición en la cual han sido secados por calentamiento en un horno a 110 +/- 5 °C por suficiente tiempo para alcanzar una masa constante.
- *Saturados superficialmente secos (SSS)*: condición en la cual los poros permeables de las partículas de agregado son llenados con agua, a través de una prolongada inmersión en agua por un periodo de tiempo prescrito, pero sin agua libre sobre la superficie de las partículas.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

La norma IRAM 1533 define y demanda la determinación de las siguientes densidades:

- *Densidad SSS*: masa de agregado saturado superficialmente seco por unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo el volumen de vacíos impermeables y poros llenos de agua dentro de las partículas, pero no incluye los poros entre las partículas.
- *Densidad Relativa SSS*: relación de la densidad SSS del agregado a la densidad del agua a una temperatura definida.

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica que utilizamos para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en las mezclas de hormigón.

Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poros en el interior de las partículas constituyentes.

El ensayo se basa en sumergir una muestra en agua por 24 +/- hs. Después de transcurrido el tiempo, el material se remueve del agua, se seca la superficie de las partículas y se determina la masa. Para el caso de agregados finos, la muestra o una porción de ella se coloca en un recipiente graduado y el volumen de la muestra se determina por el método volumétrico; en el caso de agregado grueso, el volumen de la muestra es determinado por el método de desplazamiento de agua.

Finalmente, para ambos casos, la muestra se seca al horno o estufa y la masa se determina de nuevo. Utilizando los valores de masa obtenida y volumen, es posible calcular la densidad, densidad relativa y absorción.

Estos parámetros también son de gran importancia a la hora de elaborar hormigón; por un lado, la densidad nos permite que la cantidad de hormigón vendida sea la correcta, un cambio significativo en la densidad de los agregados provocará que el volumen entregado sea excesivamente mayor, o menor en el peor de los casos. Por su parte, el conocimiento preciso de la absorción de cada uno de los materiales involucrados en la mezcla de hormigón, nos permitirá estimar el agua de la mezcla que los mismos demandaran, esto a su vez, realizar los ajustes necesarios para que tanto la relación agua/cemento como el asentamiento, no se vean afectados.

3- Material fino que pasa el tamiz N°200 (75 um)

Mediante este ensayo, se determina por lavado, la cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 (75 um) de un agregado. Se separan la superficie del agregado partículas que pasan el tamiz mencionado, tales como: arcillas, agregados muy finos y materiales solubles en el agua.

El principio del ensayo consiste en evaluar el recubrimiento superficial que puede tener un agregado como consecuencia de material fino y su potencialidad de perjudicar el comportamiento del hormigón para el que vaya a ser empleado.

El procedimiento es relativamente simple y puedo resumirlo en los siguientes pasos:

- Secado de muestra de peso constante.
- Mezcla de la muestra con agua hasta cubrir la misma y agitado del recipiente que las contiene para que el agua separe el material fino del agregado.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- Colocar el tamiz N°16 sobre el N°200 y verter el agua de lavado que contiene los sólidos suspendidos y disueltos sobre los tamices.
- Adicionar una segunda carga de agua a la muestra en el recipiente, agitar y decantar como antes. Repetir la operación hasta que el agua de lavado esté clara.
- Retomar todo el material retenido sobre los tamices mediante un chorro de agua. Secar el agregado lavado y determinar la masa con aproximación al 0.1% de la masa original de la muestra.

Este ensayo también es de importancia, todo material fino que los agregados presenten en exceso, atentara contra la demanda de agua de la mezcla de hormigón. Es decir, para lograr el asentamiento de diseño, necesitaremos más agua que la estipulada, de forma que afectaremos no solo la relación agua/cemento y por consiguiente las resistencias, sino que además la economía de la receta por tener que ajustar este problema, sea con mayor cemento para compensar el agua necesaria de más, o con el agregado de aditivos plastificantes.

Es el parámetro con la frecuencia de ensayo más baja, por un lado, por parte de los agregados finos, en la ciudad de Córdoba utilizamos arenas lavadas de río, y por parte de los agregados gruesos, la presencia excesiva de finos en los mismos, es fácilmente observada con una inspección visual.

5.1.3 ENSAYOS DE HORMIGON EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

Dentro de todas las etapas del plan de calidad, aquellas correspondientes a la evaluación del hormigón en sus diferentes estados, resultan de elevada importancia; esto considerando que el hormigón entregado por Holcim forma parte de su producto final, por lo que sus características deben ser acordes a lo solicitado, tanto por el cliente como por las normas y reglamentos.

Hormigones Holcim cuenta con un equipo de 6 laboratoristas especialmente capacitados y una flota de 3 camionetas, abocadas solo al seguimiento de todos los hormigones vendidos. Durante mi tiempo como pasante, fui encargado, junto al técnico de calidad, de dar supervisión y seguimiento a este equipo y los ensayos realizados por el mismo. También de llevar el mantenimiento y carga de todas las planillas de seguimiento de cada uno de los ensayos a realizar según plan de calidad, su posterior análisis y presentación en las reuniones mensuales de gestión del negocio, sumado a su seguimiento diario para el correcto seguimiento de la calidad de los hormigones producidos.

El proceso comienza con la toma de muestras de hormigón para poder establecer las propiedades en su estado fresco y endurecido, estas se toman dentro de los términos de la norma IRAM 1666, particularmente la IRAM 1541. Deben cumplir los siguientes requisitos:

- Deben ser representativas y de tamaño suficiente.
- Se obtienen al momento o inmediatamente luego de la descarga, evitando la porción inicial o final del pastón y/o sectores que presenten segregación.
- No debe estar alterada o contaminada.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- La cantidad será un 40% mayor que la necesaria, y como mínimo de 30 litros
- Se la debe colocar en un recipiente estanco, limpio y de capacidad adecuada (carretilla) y siempre mezclarse manualmente antes de su uso.

A continuación se realizan los ensayos sobre las muestras tomadas. En la tabla observada en la Figura 5.12 se enumeran los ensayos a efectuar, los rangos de aceptación y la frecuencia de las muestras para los productos en los que Holcim es responsable del a mezcla provista.

Material	Ensayo	Norma de Referencia	Rango Aceptable	Frecuencia de Ensayo
Hormigón Fresco	Asentamiento en Cono de Abrams (As)	IRAM 1536	1,5 \leq As \leq 5 2,5 \leq 5 < As \leq 10 3 \leq 10 < As \leq 15 3.5 As \geq 15	En Obra: - Cada 100 m ³ de c/ familia de producto Si $f'_{c} < 40$ MPa (*) - Cada 50 m ³ de c/ familia de producto si $f'_{c} \geq 40$ MPa (*)
	Temperatura (***)	Proc. interno	T \leq 30°C en tiempo caluroso (32°C si contiene retardadores) igual o mayor que los valores establecidos por CIRSOC 201 para tiempo frío	En Obra: - Cada 100 m ³ de c/ familia de producto Si $f'_{c} < 40$ MPa (*) - Cada 50 m ³ de c/ familia de producto si $f'_{c} \geq 40$ MPa (*)
	Densidad	IRAM 1562	-/+ 2% de la Densidad Teórica	Cada 300 m ³ producidos (**)
	Aire	IRAM 1602	-/+ 1% respecto del valor especificado	Cada 300 m ³ producidos (**)
Hormigón Endurecido	Resistencia a Compresión	IRAM 1524 IRAM 1546 IRAM 1666-I	$f'_{ci} \geq 0,85 \cdot f'_{c}$ y $f'_{cm3} \geq f'_{c} + 3$	En Obra: - Cada 100 m ³ de c/ familia de producto Si $f'_{c} < 40$ MPa (*) - Cada 50 m ³ de c/ familia de producto si $f'_{c} \geq 40$ MPa (*)

Figura 5.12. Tabla de ensayos y frecuencias al hormigón en sus diferentes estados

5.1.3.1 Ensayos al hormigón en estado fresco

Tal como se observa en la Figura 5.12 y las recomendaciones de reglamentos y manuales, los ensayos sobre el hormigón fresco, incluyen la evaluación de la consistencia por evaluación del asentamiento, el contenido de aire, PUV (peso unitario volumétrico, densidad) y temperatura.

Las frecuencias de estos ensayos son las observadas en la Figura 60. Cabe mencionar que las mismas son más estrictas que las estipuladas por norma, esto para asegurar un mayor control e información de input para llevar a cabo los análisis de calidad.

Asentamiento:

Tal como mencione en el capítulo N°4, la determinación del asentamiento (IRAM 1536), es un ensayo que permite evaluar y ajustar la consistencia de los pastones, no solo al valor de consigna, sino sobre todo a las condiciones de hormigonado (humedad de los agregados, distancias de transporte, temperatura del ambiente, etc) para obtener así la trabajabilidad requerida en el frente de pavimentación.

Durante los días de producción del hormigón vial, el asentamiento era medido diariamente, al menos en los primeros tres a cinco viajes, y luego durante el resto de la jornada, intercalado entre dos o tres camiones. Tal como menciono anteriormente, esto permitía, estando en comunicación constante con el plantista, realizar los ajustes necesarios para compensar pérdidas de asentamiento durante el transporte, debido a distancias, condiciones climáticas, entre otras.

Temperatura:

La colocación de hormigón en climas rigurosos puede traer aparejados graves e irreversibles problemas. La realización del hormigón vial fue llevada a cabo durante los meses de noviembre de 2018 y abril de 2019, es decir tiempo sumamente caluroso. Este tipo de clima presenta los siguientes problemas:

- Aumento de la velocidad de hidratación.
- Aumento de la demanda de agua para mantener la trabajabilidad.
- Disminución del tiempo de fraguado.
- Acortamiento de la ventana de aserrado.
- Aumento del riesgo de aparición de fisuras plásticas y de origen térmico.
- Incremento de resistencias tempranas, pero posible menor resistencia final.

Por estas razones, y tal como lo recomiendan los reglamentos y normas, la temperatura era controlada diariamente y en todos los camiones entregados mientras el servicio de laboratorio estaba presente en obra, mediante un termómetro digital tipo pinche, como el que se observa en la Figura 5.13.



Figura 5.13. Termómetro digital tipo pinche

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

La temperatura máxima permitida por norma que puede tener el hormigón durante el momento de su colocación, es de $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, es decir 32°C . Días con temperaturas exteriores de más de 35°C , un hormigón con un alto contenido de cemento, áridos almacenados al rayo del sol y agua de amasado contenida en un tanque australiano descubierto, hacían que hubiera días en los que resultaba casi imposible lograr que los pastones no sobrepasaran los 32°C de temperatura máxima.

Para controlar la misma, los días críticos tomábamos las siguientes medidas:

- Coladas durante la madrugada para evitar horarios de temperaturas pico.
- Enfriamiento del agua mediante hielo en barras de hielo.
- Cubrimiento de las bateas con lonas durante el traslado del hormigón.

Los áridos no eran posibles de ser regados, sino hubiera sido también un buen método de bajar la temperatura final de la mezcla. Por el lado del cemento, tal como lo menciono en capítulos anteriores, el mismo llegaba desde Campana con una temperatura acorde y controlada.

Contenido de Aire:

Siempre que se emplee un hormigón con aire intencionalmente incorporado debe controlarse rigurosamente el tenor del mismo mediante el ensayo indicado en la norma IRAM 1562, ya que variaciones pequeñas en la dosis del aditivo, en la fluidez de la mezcla, en el contenido de fino o en la temperatura del hormigón fresco pueden generar diferencias importantes en la cantidad incorporada, y los valores excesivos se pueden traducir en pérdidas sensibles de la resistencia a la compresión obtenida. La tolerancia que manejamos en Holcim es del 2% respecto al valor objetivo.

Tal como he mencionado en el capítulo correspondiente, el hormigón vial que desarrollamos contó con aire intencionalmente incorporado. Por esta razón, y las anteriormente expuestas, es que el ensayo indicado por la norma IRAM 1562 fue llevado a cabo todos los días de coladas y a por lo menos dos o tres camiones; respetando y excediendo así la frecuencia estipulada por el plan de calidad, una muestra cada 200 m³.

El ensayo del contenido de aire se realiza mediante un equipo denominado Washington, tal como el que se observa en la Figura 5.14.



Figura 5.14. Equipo de medición de aire Washington

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

El ensayo consta de los siguientes pasos, los cuales se puede ver referenciados en la Figura 5.15.

- 1- Se llena en tres capas, consolidando a tope el hormigón, de modo de normalizarlo, un recipiente de volumen conocido (~8 litros).
- 2- Se coloca y sella la tapa.
- 3- Se agrega agua de modo de llenar completamente el espacio entre el hormigón y tapa, hasta que salga agua por el rubinete opuesto.
- 4- Se presuriza la cámara de aire, regulando hasta alcanzar la presión inicial P_o .
- 5- Se cierran los rubinetes.
- 6- Se ponen en comunicación la cámara de presión con el recipiente, bajando de P_o a P_f . La caída de presión en la cámara de aire $P_o - P_f$ es mayor cuanto mayor es el contenido de aire (fase compresible).



Figura 5.15. Paso a paso del ensayo de medición de aire

Cabe mencionar que la incorporación intencional de aire puede tener sus efectos positivos, tal como la mejora de durabilidad del hormigón especialmente frente a ciclos de congelación y deshielo, la trabajabilidad o aumento de volumen entregado (+5% aproximadamente), pero también puede tener sus efectos negativos como son la pérdida de resistencia mecánica.

En nuestro caso, elegimos incorporar aire por su gran aporte a la trabajabilidad del hormigón. Tal como he mencionado en capítulos anteriores, el hormigón vial desarrollado, por sus requerimientos técnicos, era tan “duro” que había viajes que era prácticamente imposible descargarlo de los camiones batea, ni siquiera haciendo el chofer maniobras de movimientos bruscos con la batea inclinada en su ángulo máximo.

Fue el aire intencionalmente incorporado el que nos permitió darle al hormigón la trabajabilidad necesaria, no solo para poder ser correctamente descargado, sino también para poder ser correctamente trabajado y terminado.

Esto se debe a que las pequeñas esperas de aire intencionalmente incorporado, lubrican a las partículas vecinas, aumentando la movilidad del hormigón fresco, y debido a las fuerzas de atracción que generan, aumentan la cohesión de la mezcla.

Densidad (PUV):

La única forma de conocer exactamente cuánto hormigón estamos vendiendo en volumen, es conociendo la densidad (peso unitario) del hormigón fresco, medida según IRAM 1562.

La densidad o peso unitario del hormigón fresco se mide sencillamente (IRAM 1562), llenando y consolidando a tope, de modo normalizado, un recipiente de volumen conocido, el mismo que se observa en la Figura 63. El equipo de medición Washington, no solo permite y se utiliza para medir el aire incorporado del hormigón, sino que al contar con un recipiente de volumen conocido, también permite medir la densidad, tal como se observa en la Figura 5.16.

$$D = (M_{R+C} - M_R) / V_R$$

D = densidad o peso unitario del hormigón fresco (kg/m³)

M_{R+C} = masa del recipiente lleno de hormigón fresco (kg)

M_R = masa del recipiente vacío (kg)

V_R = volumen del recipiente (m³)

$$V_R = (M_{R+A} - M_R) / \delta_A$$

M_{R+A} = masa del recipiente lleno de agua (kg)

δ_A = densidad del agua (kg/m³)

Figura 5.16. Calculo para medición de la densidad del hormigón

El ensayo de la densidad, fue llevado a cabo con la misma frecuencia que la medición de aire, no solo porque la norma y nuestro plan de calidad lo estipulen así (20 m3), sino sobre todo porque ambos ensayos son complementarios y no se requiere de mayores esfuerzos para medir la densidad si se va a realizar la medición de aire.

5.1.3.2 Ensayos al hormigón en estado endurecido

De las muchas propiedades del hormigón que conciernen a ingenieros y arquitectos, la más importante es la resistencia. Esta es definida como la capacidad máxima de carga que un elemento de la estructura (o probeta de ensayo) es capaz de soportar antes de fallar.

Los ensayos básicos que se aplican al hormigón son:

- Compresión
- Tracción

- Flexo tracción

El ensayo de resistencia a la compresión es el más común de todos los ensayos al hormigón endurecido, por su facilidad de ejecución, dado a que muchas de las características deseables del hormigón se relacionan con su resistencia a la compresión, y principalmente porque la resistencia a la compresión es uno de los parámetros más importantes en el diseño estructural de cualquier obra civil que utilice el hormigón como elemento portante de cargas.

Para la obtención de este parámetro, el laboratorio de hormigones, siguiendo la norma IRAM 1546, realiza probetas en obra, una serie de cuatro de ellas cada 100 m³ de cada tipo de hormigón vendido; de estas cuatro, dos para ser ensayadas a la edad de 7 días, lo que no permitirá realizar una estimación muy aproximada de la edad que las otras dos probetas alcanzaran a la edad de 28 días, edad de diseño propuesta por norma.

La confección de las probetas se debe realizar con una muestra representativa de hormigón que cumpla las características expuestas por la IRAM 1541. Con esta muestra, uniforme, representativa, y correctamente tomada, se realiza el confeccionado de las probetas (cilindros de 150 x 300 mm). Las mismas se llenan en tres capas, realizando 25 golpes a la masa de hormigón con una varilla de tamaño y peso normalizado, tal como se observa en la Figura 5.17; se le suman además, unos golpes en el exterior de la probeta con un martillo de goma o madera, esto para eliminar el aire incorporado por el varillado y facilitar la compactación de la misma. Cabe mencionar que para el moldeo de las probetas correspondientes al hormigón vial, no se utilizó varilla para moldear, sino que se utilizaron vibradores a explosión, esto por la "dureza" del hormigón, antes expuesta. El mismo con las varillas normalizadas, no alcanzaba a ser correctamente compactado.

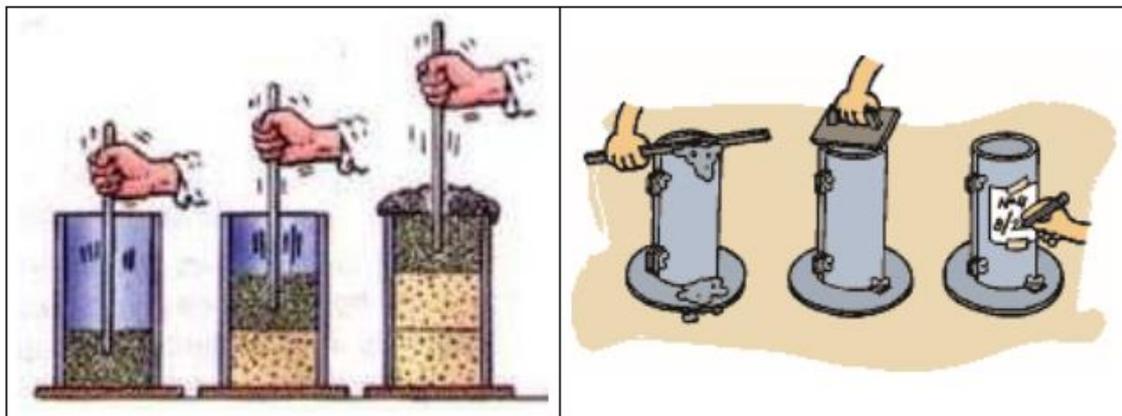


Figura 5.17. Metodología de compactación y terminación de probetas

Estas, una vez realizadas y correctamente referenciadas, deben ser expuestas a condiciones de humedad y temperatura controlada. Como Holcim moldea en obra y deja las probetas durante 24 hs en la misma (para simular sus condiciones), para controlar mejor la temperatura y asegurar un 100 % de humedad, las probetas son dejadas a la sombra, con una bolsa de plástico que recubra individualmente a cada una protegiéndola del viento y sol, y en el caso de hormigones de alto contenido de cemento como ha sido el hormigón vial desarrollado en este informe, las probetas son sumergidas en bacias de agua, tal como se observa en la Figura 5.18.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba



Figura 5.18. Bachas con probetas sumergidas en agua.

El agua es un material con una muy buena inercia térmica, es decir capaz de mantener una temperatura controlada y moderada más allá de los picos de temperatura externa. Esta es la razón por la que la utilizamos como medio de control de las condiciones de exposición de probetas de hormigones críticos.

Es muy importante entender y tener en cuenta la criticidad de un correcto curado de las probetas durante sus primeras 48 hs; debemos asegurar una humedad relativa mayor al 95 % y una temperatura ambiente de entre 15 y 27 °C para hormigones de resistencia moderada, y para aquellos de alta resistencia (>40 MPa), una temperatura de entre 20 y 26 °C.

Una vez transcurridas las 24 +/- 8 hs, el equipo de laboratorio recoge todas las probetas realizadas el día anterior y son llevadas al laboratorio, allí son desmoldadas e identificadas en forma indeleble sin alterar su superficie. Inmediatamente después de ser desmoldadas e identificadas, las mismas son almacenadas en la cámara húmeda de curado, la cual posee humedad (>95%) y temperatura (23 +/- 2 °C) controladas, hasta el momento en que son ensayadas a las edades respectivas a cada caso.

El ensayo de compresión es realizado mediante una prensa propia con calibración externa y certificación del OAA (Organismo de Acreditación Argentino). La misma es una prensa de automática de alta tecnología como la que se puede ver en la Figura 5.19, con todos los dispositivos de seguridad exigidos por la compañía; solo basta con colocar la probeta centrada y con los cabezales de ensayo, lo demás lo hará la máquina.



Figura 5.19. Prensa de ensayo de resistencia a la compresión

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

El principio del ensayo es el que se observa en la Figura 5.20.

$$\text{Resistencia a compresión} = f'c = F_{\max}/A$$

F_{\max} = máxima carga soportada (N)

A = sección transversal sobre la que se aplica la carga (mm²). Se usa el promedio de 3 Ø

Comúnmente expresada en: **N/mm² = MPa**

(ó también en kgf/cm² o psi)



Figura 5.20. Principio físico del ensayo de compresión

La calidad de la prensa de ensayo es importante, en particular su rigidez, especialmente para hormigones de alta resistencia. Si la prensa es poco rígida acumula mucha energía elástica que se revierte explosivamente sobre la probeta, tan pronto como esta comienza a ceder. Por esta razón, la prensa que poseemos en el laboratorio, es una prensa con marco rígido de cuatro columnas (recomendado) y una capacidad última de carga de 3000 kg, es decir la misma es capaz de romper hormigones de 300 MPa de resistencia; por seguridad y mantenimiento, está totalmente sobre dimensionada para su uso (roturas máximas iguales a 55 MPa).

Todos los datos obtenidos de estos ensayos, así como las características y descripciones de cada probeta, fueron y son documentados en una planilla, la cual fui encargado de mantener y alimentar durante mi tiempo como pasante. Tal como se puede observar en la Figura 5.21, la misma contiene la fecha de elaboración del hormigón, dirección de la obra, tipo de hormigón, asentamiento, fecha de ensayo, resistencia obtenida, entre otras.

CLIENTE	DIRECCION	REMIT	TIPC	CODIGO	PTA	Asent	FECH	DE EN	Eda	RESIS	OBSERVACIONES
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3651	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	1	28-11-18	05-12-18	7	37,3	
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3651	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	1	28-11-18	05-12-18	7	35,7	
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3653	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	0	28-11-18	05-12-18	7	33,4	
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3653	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	0	28-11-18	05-12-18	7	36,4	
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3658	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	2	28-11-18	05-12-18	7	31,7	DENSIDAD
JOSE J CHEDIACK SA	PAVIMENTO CON TERI	3658	H35-38	H350K08P4NNM	KHP5	2	28-11-18	05-12-18	7	31,3	DENSIDAD

Figura 5.21. Planilla de registro de ensayos de probetas

Aunque el ensayo a compresión es el más simple, difundido y repetitivo, el módulo de rotura a flexión (MRF) es el parámetro empleado en el diseño estructural del pavimento, y en general, los pliegos imponen un valor medio de esta variable para la aceptación de los pavimentos de hormigón. El caso del pavimento realizado por el cliente Chediack no fue la excepción, por lo que para este hormigón, no solo moldeamos probetas cilíndricas, sino que también realizamos el moldeo de vigas prismáticas tal como se observan en la Figura 5.22.



Figura 5.22. Probeta prismática para ensayo de resistencia a la flexión

Para el moldeo de las mismas al pie de obra, seguimos las recomendaciones de la norma IRAM 1680, moldeando las mismas en una capa y compactándolas, al igual que las probetas cilíndricas, con vibrador a explosión, mientras que para el ensayo, seguimos la aplicación de la IRAM 1547. Cabe aclarar que en el laboratorio de hormigones no poseemos prensa para ensayo de flexión, por lo que las mismas eran ensayadas en el laboratorio del CDI de la empresa.

Tal como he mencionado, mi rol dentro del área de calidad, ha sido llevar adelante el plan de calidad de la compañía, asegurando la calidad y performance de los productos. Además de la realización de los ensayos antes descriptos, carga de datos, mantenimiento de planillas, etc, también he realizado una tarea, podría decir rutinaria, de información del estado de resultado de resistencias de los hormigones, a gran cantidad de clientes, especialmente aquellos asociados a la obra pública, como fue Chediack. Esto no solo me enseñó a realizar análisis e informes rápidos y concretos, sino también a tratar con nuestros clientes, teniendo visibilidad dentro del rubro, estrechando vínculos y conociendo profesionales y futuros colegas.

6. CONCLUSIONES

Dentro de todo lo vivido y aprendido durante la experiencia laboral desarrollada como pasante de calidad en la empresa Holcim, y particularmente durante la realización del presente informe técnico, muchas han sido las conclusiones a las que he llegado, no solo técnicas, sino también personales. Por esto, para no confundir las mismas y poder diferenciar lo técnico de lo personal, tratando de ser lo más conciso y acotado posible, expondré mis conclusiones en los siguientes apartados.

6.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS

- Los pavimentos de hormigón son estructuras viales con excelentes ventajas técnicas y económicas. Dado el material por el que están elaborados, poseen una elevada durabilidad y menores requisitos de mantenimiento, constituyen una opción eficiente y sostenible, y sobre todo, permiten obtener una solución de alta calidad y seguridad.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

- El hormigón es un material de gran versatilidad y nobleza. Estas características lo posicionan como el material más “consumido” a nivel mundial luego del agua; más de 5000 millones de metros cúbicos anuales.
- Diseñar un hormigón, especialmente aquellos que requieren de características técnicas desafiantes, es un proceso que requiere de gran conocimiento técnico y experiencia.
- La tecnología del hormigón, es una ciencia realmente amplia y en constante evolución y desarrollo. Hace unos meses (Mayo de 2020) se ha publicado la nueva norma IRAM 1666 de hormigón elaborado, incluyendo grandes actualizaciones, novedades y mejoras.
- El gran desarrollo tecnológico de los aditivos químicos en los últimos tiempos, ha sido el responsable del gran crecimiento y desarrollo de la industria y tecnología del hormigón; siendo hoy en día posible realizar hormigones con infinidad de características y diversas performances.
- Elaborar hormigón sin un sistema de calidad que supervise todo el proceso, no debiera considerarse elaborar hormigón; desde el control de las materias primas, su puesta en obra, hasta los ensayos en estado endurecido, son requisitos indispensables e irremplazables para lograr un producto de calidad y acorde a las exigencias de normas y obra.
- Fueron bastantes los problemas a los que nos enfrentamos como equipo durante la ejecución de la obra mencionada en el presente informe técnico, así también fueron las ideas, investigaciones, pruebas, errores y al final soluciones, las que surgieron del trabajo. Es por esto, que en la siguiente tabla, expondré a modo de resumen y conclusión técnica, los principales problemas y las soluciones que les brindamos.

Desarrollo de Hormigones para pavimentos con Tecnología de Alto Rendimiento en la Circunvalación de la Ciudad de Córdoba

PROBLEMAS	SOLUCIONES
Contenido unitario de cemento [kg/m ³] utilizado en la licitación del proyecto muy bajo e irreal.	La solución a ambos problemas se dio en conjunto. Al realizar los primeros ensayos y observar que el CUC de licitación no alcanzaba las resistencias requeridas, ni así tampoco las subsiguientes pruebas elevando el mismo, se optó por reemplazar el CPF40 por el CPC50. El mayor desempeño de este cemento, nos permitió llevar adelante un plan de optimización de fórmula para poder alcanzar el CUC de diseño original. Esto nos llevó a la realización de más de 18 pastones de prueba, previos y durante ejecución de obra.
CPF40 (cemento más barato y rentable por su producción en Cba) incapaz de alcanzar las resistencias requeridas de proyecto con los contenidos de cemento necesarios para que el mismo fuera rentable.	
Dificultad para contar con el stock de materias primas necesario para llevar a cabo los grandes volúmenes diarios de producción, requeridos por la obra.	El obrador del cliente J. Chediak contaba con un gran espacio físico, lo que permitió, para el caso de los áridos y arena, generar grandes stocks de materiales. En el caso del cemento, pudimos solucionar el problema utilizando camiones tolva como "silos" de almacenamiento; ni bien se vaciaba un silo de la planta, la tolva descargaba y se le permitía volver a Campana Bs As para volver a cargar.
Dificultad de descarga del hormigón de las bateas por el bajo asentamiento y fluidez del mismo.	Las distancias entre planta y obra fueron variando a lo largo del proyecto, también las temperaturas; esto nos obligó a ir jugando con distintas combinaciones de aditivos para adaptar el producto a cada requerimiento. Dos tipos de incorporadores de aire y dos tipos de plastificantes de mediano rango, fueron los encargados de mantener el asentamiento requerido y permitir a la masa de hormigón, deslizarse por la batea durante el momento de descarga.
Altas temperaturas en la masa de hormigón debido al caluroso clima Cordobés durante los meses de obra.	Las elevadas temperaturas ambiente generaban que todos los materiales constituyentes del hormigón, al ingresar a la mezcladora, aportaran un elevado calor a la masa, especialmente los áridos, quienes ocupan el mayor porcentaje del volumen de la mezcla (80%). Para mitigar este problema, utilizamos durante los días más calurosos, barras de hielo para enfriar el agua de amasado del hormigón; priorizando además, que las coladas fueran llevadas a cabo durante las primeras horas de la madrugada donde las temperaturas ambiente aún no eran cálidas.

Figura 6.1. Tabla resumen Problemas/Soluciones

6.2 CONCLUSIONES PERSONALES

- Haber sido testigo en primera persona del proceso de construcción y desarrollo, de la que fue una de las obras viales más importantes del país, fue un gran privilegio y enorme crecimiento profesional para mí. Además de una gran confirmación de futura profesión de Ingeniero Civil.
- Trabajar en una multinacional ha sido una experiencia tan rica como compleja, con sus pros y contras. Aprender a cumplir y realizar protocolos para cada actividad realizada, seguir estrictas normas de higiene y seguridad, reportar todo lo que se hace, entregar resultados en tiempo y forma, lidiar con una marcada jerarquía de roles, entre muchas otras cuestiones que pudiera nombrar. Sin duda ha sido una de las experiencias profesionales más enriquecedoras que he tenido.
- Haber sido testigo de la importancia del hormigón en el desarrollo de la infraestructura de nuestra ciudad, me ha dado un gran compromiso y dedicación para poner todo mi potencial y empeño en que el mismo sea realizado con la mayor calidad posible; formará parte de las bases y futuro de nuestra ciudad y quienes vengan después de nosotros.

7. BIBLIOGRAFIA

- Página web de Caminos de la Sierras.
- Página web de la Dirección Provincial de Vialidad.
- Holcim RMX, 2020. Procedimientos del Plan de Calidad.
- ICPA, 2014. Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón.
- CIRSOC 201-2005
- IRAM, 2020. Norma IRAM 1666-2.
- DNV, 1998. Pliegos de la Dirección Nacional de Vialidad.
- Mark Snyder, 2019. Documentos de curso del ICPA sobre “Aplicación de Tecnologías de Alto Rendimiento para Pavimentos de Hormigón”.
- Roberto Torrent, 2020. Documentos de cursos de la AATH sobre “Propiedades del Hormigón en estado Fresco y Endurecido”.