



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
MAR DEL PLATA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MORTEROS
AUTOCOMPACTANTES
REFORZADOS CON FIBRAS
POLIMÉRICAS**

T R A B A J O F I N A L

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN MATERIALES

P R E S E N T A:
FRANCO IVÁN PETRUCCELLI



DIRECTOR:
DR. PABLO STEFANI
2020



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Tema: Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

Alumno: Franco Ivan Petruccelli

Legajo N°: 9357

Lugar de trabajo: Laboratorios de INTEMA-CONICET y Facultad de Ingeniería/Laboratorio de Control de Calidad, I.M.E.P.HO S.A.

Director del trabajo: Dr. Pablo Stefani

Fecha de inicio: Enero 2019

Fecha de finalización: Abril 2020

Fecha de la defensa final:

Informe final aprobado por:

Agradecimientos

En este espacio quiero agradecer al Dr. Pablo Stefani, como Director del proyecto, por su colaboración, predisposición, conocimientos y guía a lo largo todo el trabajo realizado. Además, mencionar a los distintos profesores y personal técnico de la Facultad de Ingeniería que posibilitaron mediante su ayuda desinteresada la conclusión de este trabajo de tesis: Dr. Leandro Nicolás Ludueña, Dr. Pablo Botta, Ing. Juan Belmonte, Téc. Qco. Andrés Torres Nicolini.

No quiero dejar pasar la oportunidad de recordar a mis amigos y compañeros de cursada a lo largo de todos estos años de carrera. A mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, que sin su sostén nada de esto hubiese sido posible, y a mi compañera de emociones, que con su apoyo incondicional me acompañó durante los últimos años de la carrera.

Por último, agradecer a la educación pública, gratuita y de calidad para no olvidar la importancia de un sistema educativo superior accesible para todos y todas en las posibilidades de movilidad social en Argentina, en especial para aquellos que son primera generación de universitarios en su familia.

Resumen

Se desarrollaron formulaciones de mortero autocompactante (MAC) para ser aplicadas a la producción de piezas cementicias estructurales de geometría compleja. Se entiende como MAC un mortero que llena el molde o encofrado sin necesidad de vibrarlo manteniendo su uniformidad. En las formulaciones de MAC estudiadas se utilizó ceniza volante (un desecho que se genera en plantas de energía) con el fin de reducir el contenido de cemento Portland. A su vez se evaluó el efecto de la incorporación de fibras de polipropileno sobre el comportamiento del MAC tanto en estado fresco como en estado endurecido.

En la primera etapa de este trabajo de tesis se caracterizaron los materiales de partida (cemento, arena, ceniza, aditivo superfluidificante, agua) siguiendo la normativa asociada al reglamento de estructuras de hormigón (CIRSOC 201) y otras técnicas complementarias como difracción de rayos x.

En cuanto a la obtención de las formulaciones de MAC se utilizó como base la metodología propuesta por la EFNARC (European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete), y la experiencia previa del grupo de trabajo. La misma fija una relación agua/polvo (cemento + ceniza) y permite variar tanto la fracción volumétrica de arena respecto al volumen del mortero como el contenido de superfluidificante hasta alcanzar los valores objetivo para lograr autocompactabilidad: el diámetro de extendido y el tiempo de vaciado obtenidos a partir de los ensayos de flujo de asentamiento y embudo en V, respectivamente. Ambos parámetros están directamente vinculados a las propiedades reológicas del MAC. Aplicando esta metodología se obtuvieron cuatro formulaciones de MAC con 0, 10, 20, 30% en volumen de ceniza respecto al volumen de polvo. Además se obtuvieron cuatro formulaciones adicionales de MAC de igual proporción de ceniza, pero incorporando un contenido fijo de fibras de polipropileno. Los resultados indicaron que la formulación con hasta un 10% de ceniza alcanzó un valor de resistencia a la flexión a las edades de siete y veintiocho días de curado semejante a la basada solo en cemento Portland. Cabe destacar que la incorporación de fibras no cambió la resistencia a la flexión del MAC en estado endurecido, pero se observaron evidencias de su acción positiva una vez fisuradas las probetas de ensayo. En cuanto a la resistencia a la compresión el efecto de la incorporación de ceniza y fibra no modificó significativamente los valores resistentes, pero se observó un cambio en el mecanismo de rotura asociado a la presencia de fibra. Cabe destacar que una de las formulaciones fue utilizada para llenar y copiar un dibujo complejo en un encofrado demostrando la viabilidad de este sistema. A continuación, se evaluaron algunos aspectos económicos y de implementación de una formulación elegida y se discutió el impacto ambiental de la misma.

Finalmente, se expusieron las conclusiones principales que surgieron de esta tesis, como así también los posibles trabajos futuros a realizar.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	10
1.1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. General	13
1.2.2. Específicos.....	13
2. PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍA.....	14
2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS Y MUESTREO.....	14
2.1.1. MUESTREO.....	14
2.1.2. GRANULOMETRÍA.....	15
2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS.....	16
2.1.4. HUMEDAD	19
2.2. CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO Y ADICIONES.....	19
2.2.1. DRX.....	20
2.2.2. DENSIDAD.....	21
2.2.3. GRANULOMETRÍA	22
2.3. ENSAYOS DE LA PASTA Y EL MORTERO.....	23
2.3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	23
2.3.1.1. EMBUDO EN V	23
2.3.1.2. FLUJO DE ASENTAMIENTO	24
2.3.2. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	26
2.3.2.1. PREPARACIÓN Y CURADO DE LAS PROBETAS PARA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN.....	26
2.3.2.2. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE	27
2.3.2.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	28
2.3.2.4. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	30
2.3.2.5. ESQUEMA DE ROTURA.....	31
2.4. DISEÑO DE MEZCLAS Y DOSIFICACIÓN	31
2.4.1. PROCEDIMIENTO EFNARC	31
2.4.2. PARÁMETROS Y AJUSTES UTILIZADOS	33
2.5. ARMADO DE PASTÓN DE PRUEBA	35
2.6. REALIZACIÓN DE NEGATIVO DE UNA PIEZA REAL.....	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	38
3.1.1. CEMENTO	38
3.1.1.1. DRX	41
3.1.1.2. GRANULOMETRÍA.....	46
3.1.2. AGUA	46
3.1.3. ADITIVOS	46
3.1.4. ARENA SILÍCEA DE MEDANO	47
3.1.5. CENIZA VOLANTE.....	49
3.3. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO	54
3.3.1. RELACIÓN MÍNIMA V_w/V_p PARA FLUJO CERO	54
3.3.2. DOSIFICACIONES CON POLVO 100% CEMENTO	57
3.3.2. DOSIFICACIONES CON 10% EN VOLUMEN DE CENIZA.....	59
3.3.3. DOSIFICACIONES CON 20% EN VOLUMEN DE CENIZA	62
3.3.4. DOSIFICACIONES CON 30% EN VOLUMEN DE CENIZA	64
3.3.5. COMPARACIÓN.....	66
3.3.6 FORMULACIONES ACEPTADAS BAJO CRITERIO EFNARC	70
3.3.7. AGREGADO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO	71
3.4. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO	74
3.4.1. MEDICIÓN DE DENSIDAD APARENTE	74
3.4.2 FLEXIÓN.....	75
3.4.3. COMPRESIÓN	79
3.5. REALIZACIÓN DE NEGATIVO DE UNA PIEZA REAL	82
3.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	83
3.7. ANÁLISIS DE COSTOS E IMPLEMENTACIÓN	85
4. CONCLUSIONES	88
5. TRABAJOS A FUTURO	89
6. BIBLIOGRAFÍA	90
Anexo – Fichas Técnicas.....	94

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición típica del clinker de Portland.....	38
Tabla 2: Parámetros de la celda unidad de las fases del cemento Portland ...	45
Tabla 3: Resultados del ensayo de granulometría según IRAM 1621.....	46
Tabla 4: Resultados del ensayo de granulometría para la arena silícea	47
Tabla 5: Densidad y absorción de la arena utilizada.....	49
Tabla 6: Celda unidad de las fases encontradas en la ceniza volante	52
Tabla 7: Granulometría de la ceniza volante	54
Tabla 8: Ensayo de flujo de asentamiento de Pasta 1.....	55
Tabla 9: Ensayo de flujo de asentamiento de Pasta 2	55
Tabla 10: Rangos de relaciones agua/polvo obtenidos	56
Tabla 11: Resultados de las dosificaciones con polvo 100% cemento.....	57
Tabla 12: Resultados de los ensayos en estado fresco para CCV1.....	60
Tabla 13: Resultados de la dosificación CCV2.....	62
Tabla 14: Resultados de la dosificación CCV3.....	64
Tabla 15: Dosificaciones finales.....	71
Tabla 16: Resultados de la búsqueda de MAC con agregado de fibras	73
Tabla 17: Densidad aparente en g/cm ³	74
Tabla 18: Producción de clinker y cemento en Argentina.....	84
Tabla 19: Costos de las materias primas utilizadas	86
Tabla 20: Costos calculados a partir de las dosificaciones diseñadas	86

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Huecos en una losa.....	13
<i>Figura 2.</i> Cuarteo de agregados (Norma IRAM 1509:1987).....	15
<i>Figura 3.</i> Tamizadora Zonytest.....	15
<i>Figura 4.</i> Pila de arena con demasiada humedad retenida (arriba). Pila de arena en estado saturado de superficie seca (abajo).	18
<i>Figura 5.</i> Esquema de un sistema típico de DRX.	20
<i>Figura 6.</i> Esquema de haz de rayos incidentes y difractados.	21
<i>Figura 7.</i> Embudo utilizado. Dimensiones recomendadas por EFNARC.	24
<i>Figura 8.</i> Cono utilizado, con las medidas recomendadas por EFNARC.....	25
<i>Figura 9.</i> Preparación de las probetas utilizadas para los ensayos en estado endurecido.....	27
<i>Figura 10.</i> Máquina de ensayos universales.	29
<i>Figura 11.</i> Arreglo utilizado para flexión en tres puntos.....	29
<i>Figura 12.</i> Prensa hidráulica utilizada.	31
<i>Figura 13.</i> Probeta posicionada para el ensayo a compresión.....	31
<i>Figura 14.</i> Diagrama de flujo para el diseño de las dosificaciones.	34
<i>Figura 15.</i> Encofrado junto con placa metálica ya lubricados.	37
<i>Figura 16.</i> Pieza decorativa de yeso posicionada.	37
<i>Figura 17.</i> Encofrado lleno.	37
<i>Figura 18.</i> Evolución del calor de hidratación del C ₃ S. Tomado de “Ese material llamado Hormigón”, Balzamo, 2012.	39
<i>Figura 19.</i> Variación de la resistencia en el tiempo de las diferentes fases del clinker. Tomado de “Ese material llamado Hormigón”, Balzamo, 2012.	41
<i>Figura 20.</i> Patrón de difracción obtenido para el cemento CPC40 Loma Negra y patrones de referencia.	42
<i>Figura 21.</i> Difractograma característico de la alita (C ₃ S).....	42
<i>Figura 22.</i> En azul, los picos del patrón de referencia de la belita (C ₂ S).....	43
<i>Figura 23.</i> Patrón de referencia de la celita (C ₃ A).	44
<i>Figura 24.</i> Patrón de referencia de la brownmillerita (C ₄ AF).	44
<i>Figura 25.</i> Patrón de referencia del yeso.	45
<i>Figura 26.</i> Distribución granulométrica de la arena silíceo de médano.	48
<i>Figura 27.</i> Patrón de difracción de la ceniza volante con los picos buscados y patrones de referencia aceptados.....	50
<i>Figura 28.</i> Patrón de referencia de alfa cuarzo (SiO ₂) en azul.....	51
<i>Figura 29.</i> Patrón de referencia correspondiente a la sillimanita.	52
<i>Figura 30.</i> Patrón de referencia de la zeolita Y.....	52
<i>Figura 31.</i> Determinación del parámetro βP en Pasta 1.	55
<i>Figura 32.</i> Determinación de βP en Pasta 2.	56
<i>Figura 33.</i> Diámetro de extendido de la dosificación MACo.....	59
<i>Figura 34.</i> Resultados de los ensayos en estado fresco de C ₂ y C ₃	59
<i>Figura 35.</i> Ensayos en estado fresco de CCV1.1 y CCV1.2.....	61
<i>Figura 36.</i> Ensayo de cono de la dosificación MAC10.	61

Figura 37. Ensayo de diámetro de extendido para la dosificación MAC20.	63
Figura 38. Resultados de los ensayos en estado fresco para las dosificaciones CCV2.1 y CCV2.2. <i>Dext</i> es el diámetro de extendido en cm, y embudo es el tiempo de vaciado en segundos.	63
Figura 39. Dificultad en el proceso de mezclado.	65
Figura 40. Segregación de la ceniza en el mortero durante el ensayo de embudo en V.	66
Figura 41. Ensayos en estado fresco de dosificaciones CCV3.1 y CCV3.2.	66
Figura 42. Comparación de los diámetros de extendido entre las dosificaciones con distinto contenido de ceniza, para un contenido de arena de 0.45 como fracción del volumen total de mortero.	67
Figura 43. Variación de los diámetros de extendido para un contenido de arena de 0.47 como fracción del volumen total de mortero.	68
Figura 44. Influencia del contenido de ceniza en el tiempo de vaciado para dosificaciones con contenido de arena de 0.45 como fracción del volumen total de mortero.	68
Figura 45. Ensayo de embudo en V para dosificaciones con 0.47 de arena como fracción del volumen total del mortero.	69
Figura 46. Concentración de aditivo necesaria para lograr MAC.	69
Figura 47. Diámetro de extendido relativo Γm	70
Figura 48. Velocidad de flujo relativa Rm	70
Figura 49. Influencia del agregado de fibras en los diámetros de extendido de las dosificaciones que lograron MAC.	72
Figura 50. Influencia del agregado de fibras en los tiempos de vaciado de las dosificaciones que lograron MAC.	72
Figura 51. Demanda de aditivo para las dosificaciones que lograron MAC con y sin fibras de polipropileno.	74
Figura 52. Probeta con agregado de fibra ensayada en flexión en tres puntos, luego de la rotura.	75
Figura 53. Ensayo de flexión para probetas sin agregado de fibra.	76
Figura 54. Resultados de ensayos de flexión a 7 y 28 días para dosificaciones con y sin agregado de fibras de polipropileno de 19 mm.	77
Figura 55. Dosificación MAC10F luego de la rotura.	78
Figura 56. Superficie de fractura de probeta preparada con la dosificación MAC20F.	78
Figura 57. Resistencia a la compresión (en MPa) para probetas sin agregado de fibra.	79
Figura 58. Efecto del agregado de fibras de polietileno en la resistencia a la compresión.	80
Figura 59. Probeta sin agregado de fibra.	81
Figura 60. Abarrilamiento en probeta con fibra.	81
Figura 61. Negativo de la pieza decorativa de yeso.	83
Figura 62. Matriz energética argentina durante 2018.	84
Figura 63. Estructura de costos.	85

Todo lo sólido se desvanece en el aire

Karl Marx

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material compuesto más utilizado en la industria de la construcción. Está esencialmente formado por un aglomerante cementicio (generalmente cemento Portland), agregados gruesos (piedra, canto rodado, etc.), agregados finos (polvo de trituración o arena) y el agua necesaria para promover la hidratación del aglomerante. Un hormigón normal de uso estructural se compone aproximadamente de 20% de cemento y 70% de agregados (en masa). Sus propiedades en estado fresco y endurecido pueden ser modificadas por el uso de aditivos y adiciones específicas. La industria del cemento a nivel mundial tiene un alto impacto medio ambiental, produciendo aproximadamente el 7% del dióxido de carbono total liberado a la atmósfera, además de consumir importantes cantidades de energía (4 GJ/Tn) para su producción (Mehta, 2001). Si se tiene en cuenta que la producción de cemento durante el 1º semestre de 2018 solamente en Argentina fue de aproximadamente 5900 toneladas, es evidente su impacto en el medio ambiente (Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, 2018).

En estado endurecido, la microestructura de la matriz cementicia (cemento más agua) corresponde al cemento hidratado con la presencia de pequeñas burbujas de aire (introducidas naturalmente por el proceso o intencionalmente si se utiliza un aditivo incorporador de aire) y una red de poros y capilares originados en estado fresco por el proceso de compactación, exudación y equilibrio higrométrico con el medio ambiente. El control del tamaño y segmentación de esta red de poros es de vital importancia tanto para la resistencia como para la durabilidad del material, ya que se convierte en un camino preferencial para el ingreso de agentes agresivos (sulfatos, cloruros, etc.) a su interior (Balzamo, 2012). Para obtener una red capilar segmentada se requiere una baja relación agua/cemento. Sin embargo, esto reduce drásticamente su trabajabilidad y requiere el uso de reductores de agua de bajo o alto rango (fluidificantes o superfluidificantes, respectivamente), necesarios para controlar la viscosidad y por consiguiente la trabajabilidad. Esto facilita finalmente el llenado del molde o encofrado.

La mezcla de la pasta cementicia (cemento, agua y aditivos) con arena da origen a lo que se conoce como mortero. Los morteros se dosifican según su aplicación constructiva, entre las que se destacan albañilería, revestimientos continuos, material de agarre, protección pasiva (morteros ignífugos) y productos prefabricados (piedras artificiales, adoquines, bloques de diferentes formas y tamaños). Para aplicaciones de alto desempeño, como reacondicionamientos estructurales, rehabilitación y reparación de estructuras o en la fabricación de piezas ornamentales de geometría compleja que no requieren agregados gruesos se pueden utilizar los morteros autocompactantes (MAC). De acuerdo con la EFNARC (federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y

productos químicos especializados para la construcción) el MAC es un material que puede fluir por su propio peso y llenar completamente el encofrado, incluso utilizando moldes con geometrías complejas, sin la necesidad de vibrado mecánico y manteniendo su homogeneidad (EFNARC, 2002; Kumar & Srikanth, 2008). El MAC, al igual que el hormigón autocompactante (HAC), es una tecnología avanzada emergente que ofrece ventajas generales técnicas, reduciendo el riesgo laboral y ambiental al evitar el proceso de vibrado (Dubey & Kumar, 2013; EFNARC, 2002; Khaleel & Razak, 2013; Yepes et al., 2018). En la Figura 1 se puede observar una losa de hormigón convencional con presencia de huecos debido a un vibrado ineficiente o una formulación incorrecta. Lograr las propiedades reológicas adecuadas para alcanzar la autocompactación, tanto en un mortero como en el hormigón, es la clave para reducir a un mínimo los defectos de llenado del molde o encofrados de geometría compleja.

El comportamiento reológico en estado fresco del mortero convencional (MC) responde al modelo de Bingham. Así los parámetros reológicos que caracterizan su trabajabilidad son la tensión de corte umbral, que corresponde a la tensión requerida para iniciar el flujo, y la viscosidad que describe la resistencia a fluir bajo tensión externa (Banfill, 1994). Para alcanzar la condición de autocompactabilidad se deben lograr valores muy bajos de tensión umbral sin pérdidas significativas de la viscosidad. Esto se logra con el uso de un aditivo superfluidificante, tal que el mortero pueda fluir bajo su propio peso, facilitando su colocación en encofrados de geometrías complejas. Sin embargo, en algunos casos al utilizar un exceso de superfluidificante, ocurre la separación de la pasta (cemento más agua) respecto al agregado (arena) llamado comúnmente como sangrado. En este sentido y siguiendo los conceptos de sedimentación impedida, aumentar la viscosidad, sin incrementar la tensión umbral, permite obtener un mortero capaz de fluir por su propio peso, pero más cohesivo y homogéneo (Gesoglu et al., 2008). La incorporación de adiciones como polvos finos (puzolanas, cenizas volantes, ceniza de cáscara de arroz, etc.) o de agentes mejoradores de la viscosidad (basados en polisacáridos) combinados con aditivos superfluidificantes como los policarboxilatos son algunas de las estrategias más utilizadas para lograr la condición de autocompactabilidad (Benaicha et al., 2015; DaSilva & DeBrito, 2015; Dubey & Kumar, 2013; Nepomuceno et al., 2012; Pointot et al., 2015). Las opciones disponibles en el mercado para el uso como adiciones son muy variadas. En este sentido la ceniza volante (CV), un subproducto de la industria de generación termoeléctrica, es una de las más utilizadas. Su uso permite reducir el consumo de cemento y supone una importante baja en los costes de producción, habiéndose logrado sustituir eficientemente hasta un 35% de cemento (Dubey & Kumar, 2013). Las propiedades que pueden aportar al mortero varían en función de su composición, forma de obtención y tratamientos posteriores. La gran variación en su composición, aun en productos del mismo fabricante o proveedor, hace necesaria una elevada cantidad de estudios y ensayos para determinar el porcentaje óptimo de reemplazo en el mortero (Zhao et al., 2015). Una característica importante del uso de adiciones es su aporte a la

durabilidad, ya que favorecen la segmentación de la red capilar en la matriz cementicia reduciendo la permeabilidad del mortero (Benaicha et al., 2015; Gesoglu et al., 2008).

Otro aspecto importante a considerar en el diseño de morteros es evitar, o al menos reducir, la generación de fisuras tanto en estado fresco como endurecido que afectan directamente a la durabilidad del producto. La elevada cantidad de cemento requerida para producir MAC se relaciona directamente con el calor de hidratación, y este a su vez con los defectos antes mencionados (Benaicha et al., 2015). Esto puede subsanarse con el uso de adiciones minerales, o la incorporación de fibras poliméricas en la etapa de mezclado, las cuales pueden optimizar el comportamiento en servicio y aumentar la resistencia última del material, debido a que mejoran la resistencia post-fisuramiento, llevando a patrones de fisura más estrechos y de menor espaciado entre sí (Conforti et al., 2018; Lawler et al., 2003).

Se han realizado numerosos estudios comparando distintos tipos y contenido de fibra en combinación con el uso de ceniza volante y otras adiciones minerales para determinar su efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero resultante. Pan et al. (2014) encontraron una mejora de la resistencia a la flexión en probetas de mortero reforzados con fibras de polipropileno en combinación con ceniza volante. Kumar & Srikanth (2008) compararon el comportamiento de morteros utilizando fibras de polipropileno y de vidrio. Los mismos encontraron que las dosificaciones con fibras de polipropileno alcanzaban una resistencia menor, pero mayor deformación post-fisuramiento en probetas ensayadas a flexión. A su vez, no hallaron cambios significativos en la resistencia a la compresión con ninguno de los dos tipos de fibras. Puertas et al. (2003) propusieron la comparación de morteros modificados con escorias activadas de alto horno y ceniza volante en combinación con fibras de polipropileno como refuerzo. Observaron que la presencia de fibra aumenta la resistencia a la fractura. Con respecto a las propiedades en estado fresco, Oktay et al. (2014) mostraron que un contenido del 1.5% de fibras de 12mm de largo redujo hasta un 35% la trabajabilidad del mortero y un efecto similar se produjo al duplicar el largo de la fibra.

En este contexto, obtener morteros reforzados con fibras con comportamiento autocompactante y que permitan el llenado de piezas de geometría compleja en estado fresco es un tema de interés industrial y el objetivo central de este trabajo de tesis.



Figura 1. Huecos en una losa.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general y los específicos de este proyecto se detallan a continuación.

1.2.1. General

Diseñar formulaciones para morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas para su utilización en piezas de geometría compleja.

1.2.2. Específicos

- Caracterizar materias primas (cemento, agregados y adiciones).
- Diseñar morteros cuyo comportamiento en estado fresco permita alcanzar la condición de autocompactabilidad.
- Evaluar la influencia del uso de ceniza volante (CV) en las propiedades del MAC en su estado fresco y endurecido.
- Evaluar el efecto de la incorporación de fibras poliméricas sobre el comportamiento en estado fresco y endurecido del MAC.
- Probar la capacidad de copiar geometrías complejas de la formulación diseñada con refuerzo de fibra polimérica.

2. PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los procedimientos utilizados para caracterizar las materias primas. Se detalla además el método de dosificación desarrollado, los procedimientos de los ensayos en estado fresco para comprobar autocompactabilidad, y la metodología de los ensayos en estado endurecido de las probetas de MAC producidas. Además, se especifican las normas pertinentes.

Los elementos, equipamiento e instalaciones necesarias fueron provistos en conjunto por la empresa I.M.E.P.HO y por el grupo de Materiales de Construcción Sustentables (MCS) de INTEMA.

2.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS Y MUESTREO

2.1.1. MUESTREO

Para la toma de muestras de las materias primas se tuvo en cuenta lo expuesto en la norma IRAM 1509 (1987). Como la misma indica, las muestras deben ser representativas de la naturaleza, características y condiciones de los materiales que se encuentren, en este caso, en los depósitos o acopio de la empresa.

El acopio de la empresa se encuentra en un playón de descargas al aire libre, lo que dificulta el proceso de toma de muestra, ya que resulta difícil asegurar la representatividad debido a la segregación que ocurre cuando el material está apilado. Las partículas más gruesas ruedan a la base exterior de la pila, lo que se conoce como decantación por gravedad. Además, el agua de lluvia puede ser un problema ya que provoca una decantación por lavado en las partículas de menor tamaño, entre las de mayor tamaño. Por lo tanto, la muestra debe estar formada por tres muestras parciales tomadas del tercio superior, del tercio medio y del tercio del fondo del volumen de la pila. En el caso de agregados finos (arena de médano), la capa exterior que puede haberse segregado deberá retirarse (aproximadamente 30 cm o más) y la muestra deberá tomarse del material que se encuentra debajo.

Las muestras de ensayo se obtienen por el método de cuarteo de las muestras de campo. El mismo consiste en la colocación de la muestra, en estado húmedo, sobre una superficie dura, lisa, limpia e impermeable. Se forma una pila cónica, y con el reverso de la pala se procede a aplanar la pila, hasta que tenga espesor uniforme y forma troncocónica. Luego se trazan dos diámetros perpendiculares, que deben ser de cuatro a ocho veces el espesor. De las cuatro partes así formadas, se desechan dos opuestas. Las dos restantes, se vuelven a mezclar y proceder de la misma manera, hasta que la muestra tenga el tamaño deseado. En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso antes mencionado.

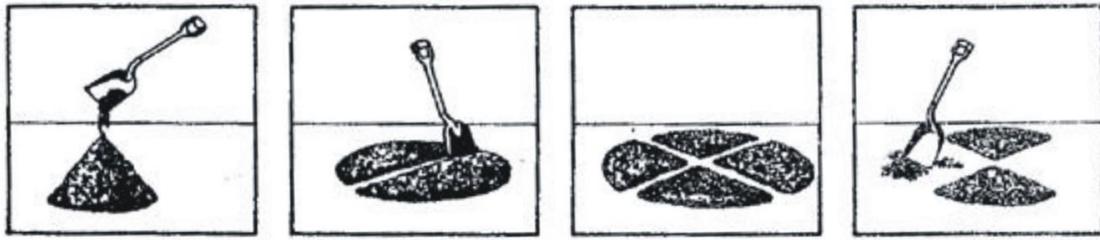


Figura 2. Cuarteo de agregados (Norma IRAM 1509:1987).

2.1.2. GRANULOMETRÍA

Los procedimientos llevados a cabo para obtener la distribución de tamaño de los agregados finos a utilizar están basados en las normas IRAM 1505 (2005) e IRAM 1627 (1997). El conocimiento de este parámetro es fundamental para la dosificación, ya que el objetivo es minimizar el volumen de vacío entre partículas. Además, una pequeña variación del módulo de finura genera grandes diferencias en la demanda de agua y, por consiguiente, en la trabajabilidad del mortero.



Figura 3. Tamizadora Zonytest.

Los tamices son marca Zonytest (Figura 3), de cuerpo de ABS y malla metálica tejida. Cumplen con las características indicadas en las normas IRAM 1501-2/NM-ISO 565:2002 e IRAM 1501-3.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

Los pasos a seguir fueron:

- Se tomó una muestra de 1000 g agregado fino en su estado húmedo.
- Se secó la muestra a masa constante, en estufa a $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ durante 24 horas. Esto se realiza para eliminar la humedad y evitar la aglomeración en los tamices.
- Se dejó enfriar las muestras para no dañar las mallas metálicas de los tamices. Se tomó el peso de la muestra seca.
- Se colocaron los tamices normalizados de forma decreciente en abertura, de arriba hacia abajo, en la maquina tamizadora marca Zonytest. La muestra se cargó por la parte superior, se aseguró la tapa con dos roscas de seguridad y se procedió a vibrar el conjunto por 10 minutos en modo intermitente.
- Se retiró el sistema de tamices. Luego se pesó el material retenido en cada uno de ellos, golpeando suavemente 25 veces el canto del tamiz para liberar todo el material atrapado en la malla metálica.

Según lo requerido por la norma IRAM 1505 (2005), los pesos obtenidos se procesaron en una hoja de cálculo de Excel, donde se expresan como:

- Peso retenido por cada tamiz.
- Peso retenido acumulado, que es la suma de los retenidos en tamices superiores.
- Peso que pasa por cada tamiz, que se obtiene como la diferencia entre el peso seco total y el retenido por el tamiz.
- Porcentaje de peso que pasa por cada tamiz, obteniéndose del resultado anterior, multiplicado por cien y dividido por el peso seco total.

Con lo anterior, se calculó el módulo de finura utilizando la siguiente expresión:

$$MF = \sum \frac{(100 - \text{pasa}_i)}{100}$$

2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS

En esta sección se detallan los procedimientos seguidos para obtener propiedades tales como la densidad y la absorción de los agregados utilizados. Para lograrlo, la norma IRAM 1520 (2002) se basa en los siguientes conceptos:

- Agregado seco a masa constante: agregado que ha sido secado a $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta masa constante.

- Agregado saturado y de superficie seca (SSS): agregado que ha colmado sus posibilidades de absorber agua y mantiene su superficie seca.
- Volumen aparente: volumen de un agregado permeable, cuando se incluye en su cálculo el correspondiente a los poros accesibles al agua.
- Volumen real: volumen de un agregado permeable, cuando se excluye en su cálculo el correspondiente a los poros accesibles al agua.
- Densidad relativa real (d_1): relación entre la masa, en el aire, del agregado, y la masa de un volumen de agua equivalente al volumen real del agregado considerado.
- Densidad relativa aparente (d_2): relación entre la masa, en el aire, del agregado, y la masa de un volumen de agua equivalente al volumen aparente del sólido considerado.
- Densidad relativa aparente del agregado en estado saturado con superficie seca (d_3): Relación entre la masa, en el aire, del agregado en estado saturado y de superficie seca, y la masa de un volumen de agua equivalente al volumen aparente del sólido considerado.
- Absorción: cantidad de agua expresada como un porcentaje, que puede ser retenida dentro de los poros del agregado, en un periodo prefijado de tiempo.

Para el cálculo de la densidad y absorción del agregado fino, se debe contar con una muestra de agregado en SSS. Los pasos para obtenerla son:

- A. Preparación de la muestra: se tomó 1 kg de agregado fino obtenido por cuarteo. Se lo colocó en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta masa constante. Luego se lo dejó en una bandeja, sumergido en agua durante 24 horas. Pasadas las 24 horas, se retiró el exceso de agua de la muestra, se la extendió sobre la misma bandeja y se la colocó ante una suave corriente de aire caliente. Se la removió con una frecuencia de 10-15 minutos para asegurar un secado uniforme. Se continuó con el mismo procedimiento hasta que se visualizó que los granos no se adherían marcadamente entre sí.
- B. Comprobación visual del contenido de humedad: se utilizó un molde troncocónico para determinar visualmente el estado saturado de superficie seca. Se llenó el molde con el agregado hasta enrasar, sin apretarlo. Luego se apisonó su superficie con 25 golpes de varilla, dejando caer la misma desde una altura aproximada de 5 mm sobre su superficie, y ajustando la posición de la caída a la nueva superficie a medida que iba descendiendo por efecto de la compactación, de modo de mantener la misma distancia inicial con el material. Luego se procedió a desmoldar y visualizar la forma resultante. Si retiene la forma del molde, quiere decir que el agregado todavía tiene humedad superficial, por lo que se debe continuar con el secado con corriente de aire caliente. Se realizaron ensayos a intervalos

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

frecuentes, hasta que se logró la forma indicada por la norma IRAM 1520, que es la de un cono con pendientes de generatriz recta (Figura 4). Si el cono se desmorona completamente, el agregado fino se ha secado más allá de su SSS, por lo que se debe agregar unos centímetros cúbicos de agua, mezclar el agregado, taparlo en un recipiente durante 30 minutos y comenzar nuevamente el proceso de secado y ensayo.



Figura 4. Pila de arena con demasiada humedad retenida (arriba). Pila de arena en estado saturado de superficie seca (abajo).

Una vez obtenido el agregado en SSS, la norma describe dos procedimientos para obtener los parámetros de densidad y absorción. En el presente trabajo se utilizó el método gravimétrico, ya que se contaban con todos los elementos necesarios en el laboratorio de I.M.E.P.HO. Los pasos a seguir fueron:

- 1) Se pesaron 500 g de muestra en SSS (m_s), se la colocó en un matraz aforado y se registró la masa del conjunto (m_1). Se lo llenó con agua a 21.6 °C hasta cerca de la marca de 500 cm³. Se agitó el matraz suavemente para eliminar las burbujas de aire y luego se lo colocó en un baño de agua mantenido a 22 °C.

- 2) Luego de aproximadamente 1 hora, se completó con agua hasta la marca de 500 cm³ y se determinó la masa del conjunto (m_2).
- 3) Se retiró el agregado fino del matraz y se lo secó en estufa a 105 °C ± 5 °C hasta masa constante. Se lo dejó enfriar a temperatura ambiente y se registró su peso (m).

Con los datos obtenidos, se calcularon los parámetros de densidad y absorción según lo detallado por la norma:

- Densidad relativa real: $d_1 = \frac{m}{d_a * (V - V_a) - (m_s - m)}$
- Densidad relativa aparente del agregado seco: $d_2 = \frac{m}{d_a (V - V_a)}$
- Densidad relativa aparente del agregado SSS: $d_3 = \frac{m_s}{d_a * (V - V_a)}$

Donde V_a es el volumen de agua incorporado al matraz, en centímetros cúbicos, y se calcula como $V_a = (m_2 - m_1 / d_a)$, siendo d_a la densidad del agua a la temperatura considerada, en gramos por centímetro cúbico.

2.1.4. HUMEDAD

La determinación del contenido de humedad es un procedimiento sencillo y rutinario en los laboratorios de control de calidad de hormigón. El mismo consistió en la toma de una muestra de agregado en estado húmedo, se pesó 1 kg y se lo colocó en estufa a 105 °C ± 5 °C hasta masa constante. Luego se retiró la muestra de la estufa, se la dejó enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso. El contenido de humedad se calculó como:

$$\%HR = ((P_h - P_s) / P_s) * 100\%$$

Donde P_h corresponde al peso del agregado en su estado húmedo y P_s es el peso seco obtenido en estufa.

Es un ensayo fundamental, ya que su resultado permite corregir el contenido de agua y la cantidad de agregado de la dosificación final.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO Y ADICIONES

2.2.1. DRX

Los rayos X son radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz visible, pero de longitud de onda mucho más corta. La unidad de medida en la región de los rayos X es el angstrom (\AA), igual a 10^{-10} m, y específicamente, los utilizados en difracción están en el rango $0.5\text{-}2.5 \text{\AA}$, mientras que la longitud de onda de la luz visible ronda los 6000\AA .

Los rayos X se producen cuando una partícula cargada eléctricamente con suficiente energía cinética es frenada rápidamente. Los electrones son las partículas habitualmente utilizadas, y la radiación proviene de un dispositivo conocido como tubo de rayos X. Todo experimento de difracción de rayos X requiere de una fuente emisora, la muestra que se investiga y un detector para recoger los rayos difractados (Figura 5).

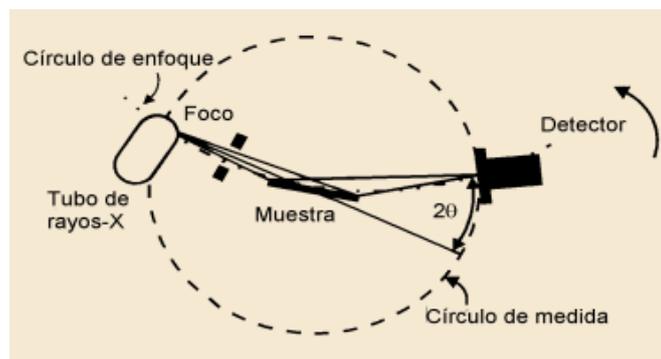


Figura 5. Esquema de un sistema típico de DRX.

Un rayo difractado puede definirse como un rayo compuesto de un gran número de rayos dispersados que se refuerzan mutuamente. La difracción es, por tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión. Los átomos dispersan la radiación incidente en todas direcciones, y en algunas direcciones los rayos dispersados estarán completamente en fase y por tanto se refuerzan mutuamente para formar rayos difractados (Figura 6).

Los rayos dispersados estarán completamente en fase si esa diferencia de fase es igual a un número entero n de longitudes de onda:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Esta relación se conoce como Ley de Bragg y es la condición necesaria que debe cumplirse para que ocurra la difracción; n se denomina orden de difracción y debe ser un número entero consistente con $\sin \theta$ menor o igual que 1.

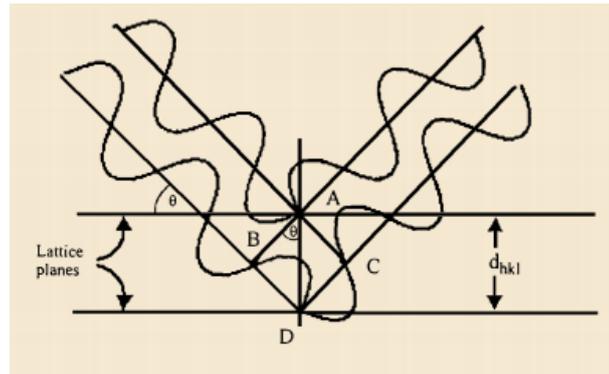


Figura 6. Esquema de haz de rayos incidentes y difractados.

Una muestra policristalina contiene una gran cantidad de pequeños cristales (de tamaño entre 10^{-7} y 10^{-4} m) que adoptan aleatoriamente todas las orientaciones posibles. Algunos planos hkl en algunos de los cristales estarán orientados, por casualidad, al ángulo de Bragg para la reflexión. Todos los planos de un espaciado d_{hkl} dado difractan al mismo ángulo 2θ respecto al haz incidente de manera que todos los rayos difractados se sitúan en un cono de semiángulo 2θ respecto al haz incidente. Para cada conjunto de planos se producirá la difracción a un ángulo de Bragg diferente dando lugar a una serie de conos de difracción.

Como cada familia de planos tiene una distancia d característica, se detectan a diferentes ángulos, por lo que los resultados serán diferentes según la estructura cristalina, pudiendo utilizar esta técnica para caracterizar las fases que componen una muestra en base a los diferentes picos de detección, que son en realidad las reflexiones de los planos de cada fase. Para una rápida identificación se utilizó el software X'Pert HighScore, que cuenta con patrones de difracción característicos de las distintas sustancias cristalinas, los cuales se compararon con los patrones obtenidos.

Para el presente trabajo se utilizó un difractómetro PANALYTICAL X'Pert PRO con monocromador de grafito, detector puntual PW 3011 cámara de gas con ventana de detección de Berilio. La radiación utilizada fue de Cu $K\alpha_1$ ($\lambda=1.5406$ Å) generada con una corriente de 40 mA a 40 kV.

2.2.2. DENSIDAD

Se utilizó el método de densidad relativa (Farías & Linares, 2018) para determinar la densidad de la ceniza volante y poder contrastarla con la que provee el fabricante. El procedimiento se basa en la comparación entre las densidades de un material desconocido con la de uno de referencia, como el agua. La condición

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

que se debe cumplir es que el material de densidad desconocida debe ser insoluble en el de referencia. Las ecuaciones a utilizar son:

$$D_x = d_x/d_l = (m_x/v_x)/(m_L/v_L)$$

Como el material es granular, no se puede llenar todo el volumen del recipiente con el sólido, por lo que para obtener masas iguales de sólido y agua se mantiene constante el volumen de sólido y se mide la masa (m_x). Para obtener la masa de agua que ocupa el mismo volumen de sólido, se coloca la masa de sólido medida en el recipiente y se lo enrasa con agua y se pesa el conjunto (m_{L+x}). La masa de agua se obtiene como la resta entre la masa del conjunto y la masa de sólido:

$$m_L = m_{L+x} - m_x$$

Luego, con la temperatura del agua de ensayo se puede conocer su densidad, por lo que con un simple despeje matemático se obtiene el volumen de líquido (v_L).

$$v_L = d_L/m_L$$

El volumen del sólido será la resta entre el volumen de referencia (conocido por ser el recipiente graduado) y el volumen de agua calculado:

$$v_x = v_{ref} - v_L$$

Con la masa y volumen de sólido, se puede finalmente conocer su densidad calculándola como:

$$d_x = m_x/v_x$$

2.2.3. GRANULOMETRÍA

La finura es una propiedad relacionada con el tamaño de partícula de cemento o adición, siendo importante su determinación ya que la hidratación comienza en la superficie de las partículas, determinando la tasa de hidratación. Además,

influye directamente en el comportamiento reológico de la pasta y en la resistencia del mortero u hormigón (Balzamo, 2012).

Se calculó el porcentaje de paso por un tamiz de malla n°200 (75 μm) basado en la Norma IRAM 1621. Para ello se pesaron 500 g de muestra, se lo colocó en el tamiz, se colocó la tapa y se lo selló con sus cierres roscados. Luego se hizo vibrar el conjunto en modo intermitente durante 10 minutos. Finalmente se pesó la muestra que no paso por el tamiz. El porcentaje se calculó de la siguiente manera:

$$P_{200} = ((P_T - P_{ret})/P_T) * 100$$

Donde P_T es el peso total de la muestra antes de tamizar, y P_{ret} es el retenido por el tamiz n°200.

2.3. ENSAYOS DE LA PASTA Y EL MORTERO

2.3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

2.3.1.1. EMBUDO EN V

Este ensayo fue desarrollado por Okamura y Ozawa (1995) en la Universidad de Tokio. Estudios experimentales pusieron de manifiesto que, en el flujo de hormigón por un embudo, al reducir la sección transversal de la salida aumentaba el riesgo de bloqueo por el contacto entre los áridos gruesos, siendo un indicativo de la necesidad de mejorar la viscosidad. El ensayo tiene como objetivo evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia a la segregación y al bloqueo, mediante la observación de la variación de la velocidad de flujo. Un análisis similar se puede aplicar al utilizarlo con morteros, con la salvedad de que no posee agregados gruesos, y lo que se produce es un aumento en la interacción entre las partículas de agregado fino. Se puede considerar como una medida indirecta de la viscosidad del mortero (Mahdikhani & Ramezani pour, 2015).

En este ensayo se mide el tiempo que tarda en vaciarse el embudo de dimensiones descritas en la Figura 7. Un menor tiempo de vaciado indica una mayor fluidez del mortero. El criterio definido por la EFNARC para la consideración de mortero autocompactante es un tiempo de entre 7 y 11 segundos.

El procedimiento es el que se detalla a continuación:

- A) Se posicionó el embudo en su base, constatando de que este lo más firme y recto posible respecto a la línea paralela del piso.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

- B) Se humedeció el interior con la tapa inferior abierta para que no se acumule agua.
- C) Se cerró la tapa y se colocó un balde debajo.
- D) Se llenó el cono cuidadosamente, sin ejercer ningún tipo de compactación.
- E) A los 10 segundos de haberlo llenado, se abrió la tapa inferior y se dejó que el mortero fluya libremente por la acción de la gravedad.
- F) Se utilizó un celular para filmar el ensayo. Luego, con el archivo de video se pudo conocer los tiempos de inicio y fin del ensayo, el cual se consideró como el momento exacto en que aparece la primera luz a través de la salida del embudo.

La duración total del ensayo no debe ser mayor a cinco minutos, debido a que la acción del superfluidificante comienza a disminuir.

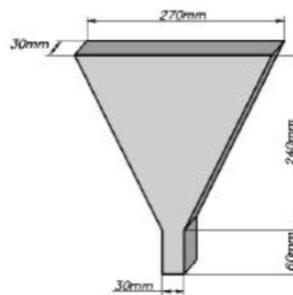


Figura 7. Embudo utilizado. Dimensiones recomendadas por EFNARC.

Para este ensayo es común la utilización del parámetro conocido como velocidad de flujo relativa (R_m) el cual se calcula como:

$$R_m = 10/t$$

Donde t es el tiempo de vaciado en segundos obtenido del ensayo.

2.3.1.2. FLUJO DE ASENTAMIENTO

El ensayo de extensión de flujo es el método más simple y el más utilizado para determinar las propiedades en estado fresco debido a la sencillez del equipo que se precisa. Está basado en el aparato y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la trabajabilidad del hormigón fresco. Este ensayo difiere del convencional en

que la muestra se coloca sin ningún tipo de compactación en un mini cono (Figura 8). Además, en este caso la altura del asentamiento no constituye una medida representativa, siendo el diámetro final de extensión (D_f) la medida fundamental que se obtiene como resultado. Este diámetro se toma como el promedio entre dos diámetros medidos perpendicularmente.

El objetivo de este ensayo fue evaluar la deformabilidad del mortero (Okamura & Ouchi, 2003). Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación, que se manifestaría por la presencia de una aureola de pasta (cemento y adiciones minerales más agua) alrededor del perímetro de la extensión del flujo.

El valor de D_f es útil para evaluar la capacidad de deformación del mortero autocompactante. Algunos autores la han relacionado con la tensión umbral de corte del hormigón, bajo la hipótesis de que éste se comporta como un fluido de Bingham (Neophytou et al., 2010).

Los pasos que se siguieron fueron:

- A) Se humedeció la placa metálica y el interior del cono.
- B) Se colocó la placa metálica en una superficie totalmente plana y estable. Se posicionó el cono en el centro de la placa y se lo sostuvo firmemente.
- C) Se llenó el cono con el mortero y enrasó con la ayuda de una cuchara de albañil.
- D) Se quitó el exceso de mortero de la base metálica, para evitar que obstruya el flujo del mismo.
- E) Se levantó el cono y se dejó que el mortero fluya libremente.
- F) Se midió el diámetro de extendido final, como el promedio entre dos diámetros perpendiculares entre sí.

Un mayor diámetro final indica una mejor capacidad para llenar moldes y encofrados bajo la acción de su propio peso. Según EFNARC, el criterio a tener en cuenta es $250 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

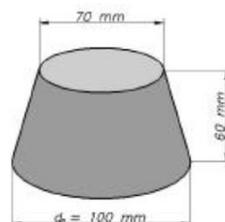


Figura 8. Cono utilizado, con las medidas recomendadas por EFNARC.

2.3.2. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

2.3.2.1. PREPARACIÓN Y CURADO DE LAS PROBETAS PARA FLEXIÓN Y COMPRESIÓN

La preparación de las probetas prismáticas de mortero se realizó basándose en la norma IRAM 1622 “Cemento Portland: Determinación de resistencias mecánicas”. En la misma se dan los lineamientos generales para la preparación de los moldes, su lubricación y engrasado para poder desmoldar las probetas, el correcto llenado de los moldes y el posterior almacenamiento y curado de las probetas. A estos procedimientos se le realizaron algunas modificaciones, teniendo en cuenta que el mortero a utilizar puede llenar los moldes por el efecto de su propio peso, sin necesidad de un proceso de vibrado o compactado. En resumen, el procedimiento fue el siguiente:

- A) Se aplicó una fina capa de desmoldante a base de aceite hidráulico en toda la superficie del molde.
- B) Se colocó la primer capa de mortero de aproximadamente 25 mm en todos los compartimientos del molde y se esperó a que el mortero fluya para que cubra el espacio disponible.
- C) Se agregó la segunda capa de mortero y se enrasó el exceso con la ayuda de una regla metálica.
- D) Se cubrió el molde con una placa de vidrio durante 20-24 horas.
- E) Se desmoldó y almacenó las probetas en recipientes plásticos con agua a temperatura ambiente (entre 15 y 24 °C).

En la Figura 9 se muestra un resumen de la metodología finalmente aplicada.





Figura 9. Preparación de las probetas utilizadas para los ensayos en estado endurecido.

2.3.2.2. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE

Con el objetivo de observar la influencia del agregado de ceniza y fibra de polipropileno en la porosidad del mortero, y a su vez, en la resistencia mecánica del mismo, se optó por seguir un procedimiento sencillo y de fácil cálculo para determinar la densidad de las probetas, utilizando el valor de la misma como medida indirecta de la porosidad.

Se eligieron las dosificaciones MACo y MAC10 para comparar el efecto del agregado de ceniza, y las dosificaciones MACoF y MAC10F para observar la influencia del agregado de fibra. Para cada una de las seis probetas de cada dosificación, se tomaron sus dimensiones con un calibre y luego se las pesó, para

de esa manera obtener su volumen y su masa respectivamente. Luego se dividió ambos valores para determinar la densidad aparente.

Este procedimiento se realizó en el momento de su desmolde y se repitió a los siete y veintiocho días, luego de dejarlas veinticuatro horas secándose a temperatura ambiente.

2.3.2.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

El procedimiento para el ensayo de resistencia a la flexión fue realizado según lo descrito en la norma IRAM 1622 “Cemento Portland: Determinación de resistencias mecánicas”. Se utilizó una prensa INSTRON EMIC 23-50 (Figura 10). Primero, se colocó el prisma en el dispositivo de flexión (Figura 11), con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplicó la carga verticalmente por los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se la incrementó uniformemente, a una velocidad de 0.5 mm/min hasta la rotura. Las mitades resultantes se conservaron para utilizarlas en el ensayo de compresión.

La resistencia a la flexión R_f en mega pascales se calculó como:

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{b^3}$$

Siendo b el lado de la sección cuadrada del prisma, en milímetros; F_f la carga aplicada en el medio del prisma en la rotura, en newtons; L la distancia entre soportes, en milímetros.

Este ensayo fue realizado a los 7 y 28 días de haber desmoldado las probetas.



Figura 10. Máquina de ensayos universales.

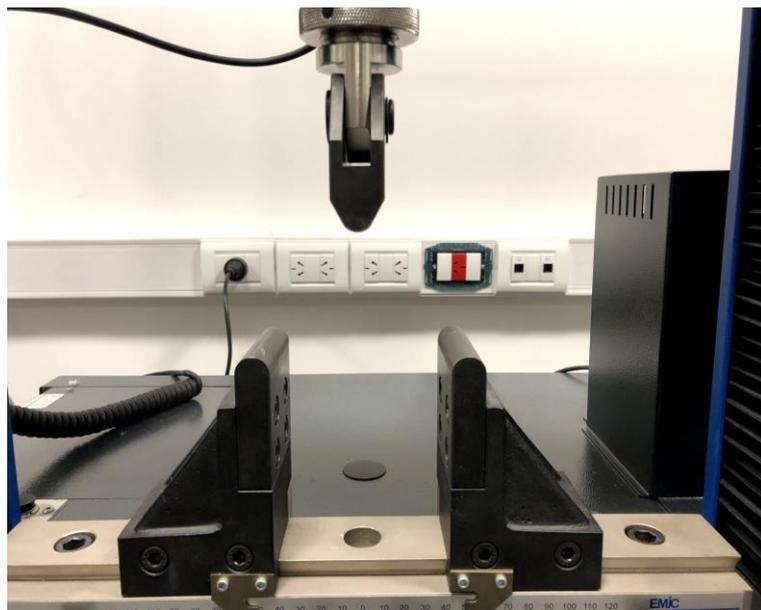


Figura 11. Arreglo utilizado para flexión en tres puntos.

2.5.2.4. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se ensayaron los semiprismas generados en el ensayo de resistencia a la flexión, basándose en el procedimiento descrito en la norma IRAM 1622. La prensa hidráulica es una MOHR & FEDERHAFF de origen alemán (Figura 12).

Se centró cada semiprisma con relación a los platos de la máquina, los cuales para el superior se utilizó una planchuela de acero de 8mm de espesor (Figura 13), y luego se procedió a aumentar la carga uniformemente, a una velocidad de 1400 N/s \pm 200 N/s hasta la rotura. Luego, se calculó la resistencia a la compresión R_c en megapascales mediante la fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Siendo F_c la carga máxima de rotura, en newtons y A la superficie de la probeta, medida a partir del promedio entre los largos de las caras en contacto con el plato auxiliar de la prensa y el ancho de la probeta, en milímetros cuadrados.

Por una cuestión del equipamiento utilizado, se les aplicó a todas las probetas una precarga de 50 kg.

Se verificó la morfología de la rotura, controlando que la ruptura no sea debido a efectos de borde provocados por las mordazas, o una descentralización de la probeta respecto al eje de compresión.



Figura 12. Prensa hidráulica utilizada.



Figura 13. Probeta posicionada para el ensayo a compresión.

2.5.2.5. ESQUEMA DE ROTURA

Por cada dosificación que cumplió los requisitos para ser denominada como autocompactante, se prepararon seis probetas de manera de ensayar tres a los siete días y las otras tres a los veintiocho días. Además, se preparó igual cantidad de probetas para las mismas dosificaciones con agregado de fibra de polipropileno, para posterior comparación de los efectos sobre la resistencia mecánica. En total se colaron, desmoldaron y rompieron cuarenta y ocho probetas, primero en flexión y luego las mitades resultantes a compresión, resultando un total de ciento cuarenta y cuatro ensayos de rotura.

2.4. DISEÑO DE MEZCLAS Y DOSIFICACIÓN

2.4.1. PROCEDIMIENTO EFNARC

Para el presente trabajo se tomó como procedimiento de diseño el definido por la EFNARC en *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete (2002)*, el cual propone un método racional para la preparación de hormigones autocompactantes (HAC). El mismo comprende los siguientes pasos:

1. Definición del contenido de aire.
2. Determinación del volumen del agregado grueso.
3. Determinación del contenido de arena.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

4. Diseño de la composición de la pasta conformado por agua y el polvo (polvo = cemento + adición).
5. Determinación de la relación agua/polvo óptima y del contenido de superfluidificante en el mortero.
6. Ensayos para determinar autocompactabilidad.

Usualmente el contenido de aire es de un 2% (en volumen), a menos que las condiciones de utilización del hormigón o mortero sean en ambientes con alta amplitud térmica o ciclos de congelamiento-deshielo. El segundo paso se desestimó, ya que el mortero no posee fase con agregados gruesos (diámetro mayor a 4 mm). El contenido de arena se puede variar entre un 40-50% del volumen total de mortero, dependiendo de las propiedades de la pasta.

Para el paso cuatro, es necesario conocer la relación agua/polvo para un flujo igual a cero conocido como parámetro β_p , el cual indica la mínima relación en volumen (V_w/V_p) para la cual la pasta (polvo más agua) comienza a fluir. Normalmente se utiliza como un parámetro de control de calidad que indica la demanda de agua del cemento o su mezcla con adiciones. Para hallarlo, se realizaron sucesivos ensayos de flujo de asentamiento (utilizando el mini cono descrito en 2.3.1.2) con relaciones V_w/V_p arbitrarias (por ejemplo: $V_w/V_p=1.1$; 1.2; 1.3; 1.4). Luego se grafica el parámetro V_w/V_p vs diámetro de flujo relativo (Γ_m), el cual se calcula como:

$$\Gamma_m = \frac{d_m}{d_0} - 1$$

Donde d_m es el promedio de dos diámetros perpendiculares obtenidos del ensayo, y d_0 es el diámetro de la base del cono igual a 100 mm. El β_p es la ordenada al origen del gráfico obtenido.

Con el valor de β_p , se puede calcular la relación V_w/V_p como 0.8-0.9 de β_p y luego, la relación agua/polvo en masa (m_w/m_p) multiplicando V_w/V_p por el cociente d_w/d_p , donde d_w y d_p son las densidades del agua y del polvo respectivamente. El superfluidificante debe ser utilizado para balancear la reología de la pasta y así lograr los valores de flujo de asentamiento y embudo en V requeridos.

Cuanto mayor sea el valor del flujo de asentamiento, mayor será la capacidad del mortero de fluir bajo su propio peso y rellenar los huecos del molde o encofrados. En el caso del embudo en V, un valor bajo indica una baja cohesión del mortero con mayor probabilidad de sangrado (separación de la pasta del

mortero). Una dosificación correcta requiere una solución que cumpla ambos parámetros.

Si estos criterios no pueden ser cumplidos, entonces la dosificación no es autocompactable. Las recomendaciones de la EFNARC en este caso sugieren probar con un superfluidificante diferente en primera instancia. Si esto no resulta, se plantea la posibilidad de agregar un nuevo aditivo modificador de la viscosidad, y como última opción un cemento diferente. En el presente trabajo, se optó por tomar como variable de ajuste la cantidad de arena y de aditivo, dejando todos los demás parámetros fijos, y utilizar las materias primas disponibles provistas por I.M.E.P.HO S.A.

2.4.2. PARÁMETROS Y AJUSTES UTILIZADOS

Se utilizó una relación agua/polvo fija para todas las dosificaciones ensayadas. Para los primeros pastones de prueba cuyo polvo se componía en su totalidad por cemento, el contenido de arena se estableció en 45% del volumen de mortero, por lo que el volumen de pasta (agua + cemento) fue de un 55% del volumen de mortero. Conociendo las densidades del cemento y la arena, se calculó sus cantidades para determinar la dosificación final.

Se procedió a ensayar el primer pastón y determinar sus características en estado fresco según lo descrito en 2.3.1. La cantidad de aditivo inicial fue la mínima recomendada por el fabricante (ver Anexo-Fichas Técnicas) de 0.5 litros por cada 100 kg de cemento. En base a los resultados, se decidió modificar primero el contenido de aditivo y luego el contenido de arena para lograr observar la influencia de ambos parámetros en el comportamiento en estado fresco del mortero y encontrar finalmente las condiciones objetivo definidas por EFNARC, las cuales son una velocidad de vaciado de entre 7 y 11 segundos en el ensayo de embudo en V y un diámetro de extendido de entre 24 cm y 26 cm en el ensayo de flujo de asentamiento.

Para las dosificaciones con reemplazo de ceniza, se utilizó inicialmente un contenido de arena diferente 47% en volumen del mortero total y se establecieron tres relaciones cemento/CV: 90/10, 80/20 y 70/30 en relación al volumen del polvo total, para así lograr encontrar una proporción óptima. Se fijó la cantidad mínima de aditivo, pero esta vez en relación a la cantidad de polvo total (suma de las cantidades de cemento más ceniza). Luego se procedió de igual manera que en el caso de las dosificaciones cuyo polvo se componía en su totalidad por cemento: se modificó cantidad de aditivo o arena dependiendo de los resultados de los ensayos de flujo de asentamiento y embudo en V (Figura 14).

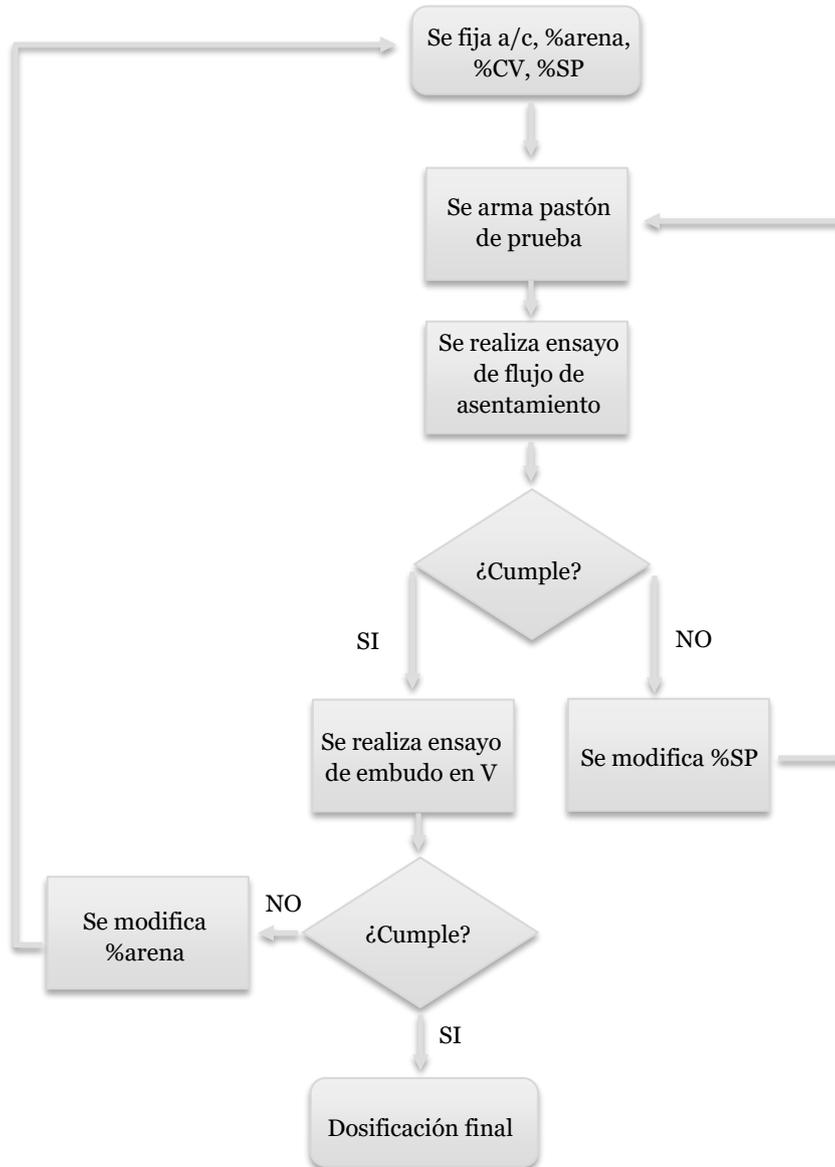


Figura 14. Diagrama de flujo para el diseño de las dosificaciones.

Para la fácil identificación de las dosificaciones utilizadas, se las designó como:

- Dosificaciones C: Son las que utilizan 100% de cemento como polvo.
- Dosificaciones CCV: Son las que utilizan un cierto porcentaje de ceniza volante como reemplazo del cemento, como fracción del volumen total de polvo.

A su vez, dentro de la categoría C se identificaron con un primer número que las diferencia en sus contenidos de arena, y un segundo número que lo hace según el contenido de aditivo superfluidificante.

En el caso de la categoría CCV, el primer número es para identificarlas por su contenido de CV, el segundo por su contenido de arena y el tercero por el de aditivo superfluidificante. Una vez lograda la condición de autocompactabilidad, se renombró dicha dosificación con la codificación MAC (mortero autocompactante) y un número que representa el contenido de CV.

El procedimiento de cálculo para cada pastón, incluida las correcciones por humedad de la arena, fueron automatizados utilizando un código escrito en el lenguaje de programación Python, el cual es un lenguaje de alto nivel, con una sintaxis característica que hace que los programas sean fácilmente legibles. Es también de tipo dinámico, tipado fuerte y soporta diversos paradigmas de programación. Cuenta con una extensa documentación, además de librerías específicas de ingeniería y es de código libre, lo que lo hace ideal para aplicaciones de este tipo. El programa pide al usuario ingresar parámetros y características de los agregados para luego devolver las dosificaciones con sus correspondientes correcciones.

Finalmente, se eligieron las dosificaciones que cumplieron los criterios de autocompactabilidad para el agregado de fibras de polipropileno de marca FIBRAS Y MALLAS de origen chino. Las mismas poseen un largo de 19 mm y la concentración elegida fue la misma que se utiliza a escala industrial en la empresa I.M.E.P.HO, de 600 g por metro cúbico de mortero. A la ya conocida nomenclatura, se agrega la letra “F” al final para identificar aquellas dosificaciones que poseen fibras de polipropileno.

2.5. ARMADO DE PASTÓN DE PRUEBA

Para el armado de los mismos, se contó con un trompo portátil InterMix de 20 litros, por lo que los cálculos y la preparación se hicieron para 5 litros de mortero. Para cada pastón de prueba, fue necesario hacer las correcciones por humedad correspondientes, siendo la medición de la misma un proceso rutinario antes de comenzar con los ensayos (ver 2.1.4). Luego se pesaron las cantidades calculadas de cemento, ceniza, arena, agua y superfluidificante y se mezclaron con la ayuda del trompo portátil hasta obtener una pasta homogénea.

En función de nuestra experiencia previa y ensayos preliminares se llevó a cabo el siguiente procedimiento de mezclado:

1. Agregar aproximadamente el 70% del agua dentro del trompo.
2. Agregar el 33% del cemento, dejar mezclar 1 minuto, y luego colocar el 33% de la arena, dejando mezclar un minuto más. Esto se hace de forma cíclica tres veces hasta utilizar todo el material.
3. Se agrega el resto del agua junto con la cantidad necesaria de superfluidificante. Se deja mezclar por 6-10 minutos más hasta lograr una pasta homogénea.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

4. Dejar descansar un minuto para que la pasta libere el aire atrapado y realizar los ensayos.

Para el pesaje de todos los elementos se utilizó una balanza de escritorio Ohaus Ranger 3000, con un error de 0.1 gramos.

Para los morteros con reemplazo de CV, primero se pesó la cantidad de cemento necesario, luego se taró la balanza y se agregó la ceniza volante. Posteriormente, se realizó un mezclado manual de los polvos con la ayuda de una espátula hasta lograr una mezcla homogénea.

En el caso de los morteros con agregado de fibra de polipropileno, la misma se incorporó y se disgregó manualmente en la arena para lograr una correcta distribución.

2.6. REALIZACIÓN DE NEGATIVO DE UNA PIEZA REAL

El objetivo fue observar la capacidad de un mortero (a seleccionar) en copiar la forma de una pieza lo más fielmente posible.

Se fabricó un encofrado de madera enchapada y se utilizó como base la placa metálica utilizada en los ensayos de diámetro de extendido, sujetando el encofrado con un par de prensas mecánicas (Figura 15). Se lubricó la placa y el encofrado y se posicionó la pieza (Figura 16). Luego se rellenó el molde evitando que quede aire atrapado (Figura 17). La superficie libre fue tapada con una placa de vidrio, al resguardo del viento y humedeciéndolo con agua periódicamente durante las primeras 24 horas. Luego se procedió a retirar las mordazas y la placa para dejar libre la masa de mortero endurecida junto con la pieza real. Finalmente, la pieza de yeso se retiró, cuidando de no romper la masa de mortero.



Figura 15. Encofrado junto con placa metálica ya lubricados.



Figura 16. Pieza decorativa de yeso posicionada.



Figura 17. Encofrado lleno.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentarán inicialmente los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de las materias primas utilizadas. Luego se presentarán y explicarán los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido de todas las dosificaciones preparadas, y en particular aquella seleccionada para la conformación del negativo de la pieza.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Se presentan los resultados para los ensayos de DRX y granulometría de los materiales cementicios y el agregado fino. Todas las materias primas utilizadas fueron provistas por I.M.E.P.HO S.A. Las fichas técnicas y hojas de datos de las materias primas y aditivos utilizados se muestran en el Anexo-Fichas Técnicas.

3.1.1. CEMENTO

Para todas las dosificaciones se utilizó un cemento Portland compuesto del tipo CPC 40 fabricado por la empresa Loma Negra. Este cemento Portland es de uso general en la construcción siempre que no existan condiciones especiales de exposición que justifiquen el uso de cemento Portland con propiedades especiales (ataque por sulfatos, utilización de agregados potencialmente reactivos en hormigones sometidos a ambientes húmedos, elementos masivos, etc.). Habitualmente se lo utiliza en obras convencionales (casas, edificios, pisos, pavimentos, etc.) y en la industria del hormigón elaborado. Su composición se basa en clinker Portland con pequeñas cantidades de sulfato de calcio y hasta un 35% de dos o más adiciones minerales.

Químicamente, el clinker de Portland está compuesto por silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (Tabla 1).

Tabla 1

Composición típica del clinker de Portland

Nombre	Fórmula	Fórmula de óxidos	% en masa	Mineral
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	30-70	Alita
Silicato bicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	10-40	Belita
Aluminato tricálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	0-15	Celita

Nombre	Fórmula	Fórmula de óxidos	% en masa	Mineral
Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	5-20	Brownmillerita

Los silicatos C₃S y C₂S son los componentes principales ya que suman alrededor del 80% de los compuestos y son los responsables del desarrollo de resistencia del cemento Portland.

El C₃S es una fase hidráulicamente activa, presenta una alta velocidad de reacción que determina la resistencia en las primeras etapas de la hidratación, la cual se caracteriza por tener cinco etapas bien definidas (Figura 18). Al comienzo se produce la disolución de una pequeña proporción del C₃S, donde se registra una rápida evolución del calor de reacción. Luego la reacción se desacelera por un efecto de difusión debido a que se forman silicatos de calcio hidratados metaestables sobre la superficie del C₃S impidiendo el contacto con el agua (etapa 2). En una tercera etapa de inactividad o periodo durmiente, el C₃S se presenta continuamente en disolución y el agua se satura de iones calcio y oxhidrilos, los cuales terminan por provocar un cambio en el silicato de calcio hidratado (SCH) llevándolo a una forma más permeable (etapa cuatro), lo que genera una nueva aceleración de la reacción que produce el fraguado de la pasta. Finalmente, la reacción vuelve a sufrir una desaceleración (etapa 5) provocada nuevamente por un efecto de difusión. Estas reacciones pueden representarse de manera aproximada mediante la Ecuación 1.

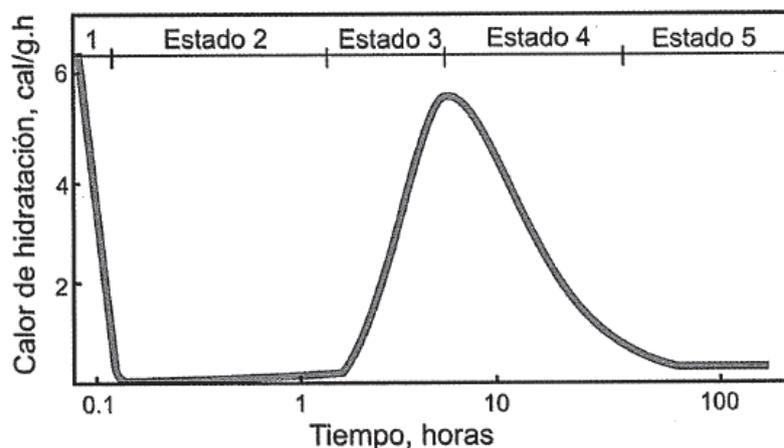


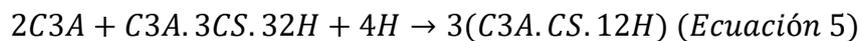
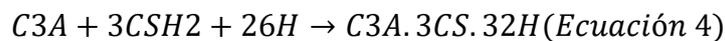
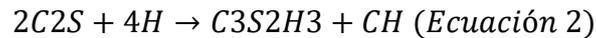
Figura 18. Evolución del calor de hidratación del C₃S. Tomado de “Ese material llamado Hormigón”, Balzamo, 2012.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

La fase belita o C₂S presenta una hidratación algo diferida por lo que actúa sobre la resistencia final (Figura 19). Su hidratación es una reacción más lenta y de menor liberación de calor que el C₃S, y puede ser representada por la Ecuación 2. Es importante aclarar que la hidratación de ambos silicatos (C₂S y C₃S) produce además hidróxido de calcio (CH).

El C₃A se encuentra en pequeñas cantidades y actúa sobre el tiempo de fragüe, ya que reacciona inmediatamente con el agua con una elevada liberación de calor, aportando resistencia a primeras horas (Ecuación 3). Para evitar el fragüe instantáneo se añade yeso, que modifica las reacciones de hidratación de este componente (Torre, 2004). En presencia de yeso, el C₃A reacciona con los iones sulfato provenientes de la disolución del yeso para formar un compuesto denominado ettringita (Ecuación 4), que precipita en forma de pequeñas agujas hexagonales sobre la superficie del C₃A, retrasando su hidratación. La ettringita solo es estable cuando hay disponibilidad suficiente de iones sulfato, de manera que cuando el yeso se consume antes de la completa hidratación del C₃A, la ettringita se descompone en monosulfoaluminato de calcio hidratado (Ecuación 5).

En el caso del C₄AF la hidratación es lenta y sigue la misma secuencia que la del C₃A. Se considera casi un subproducto de la fabricación del clinker y actúa principalmente sobre la coloración del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos, siendo muy baja su contribución a la resistencia del conjunto.



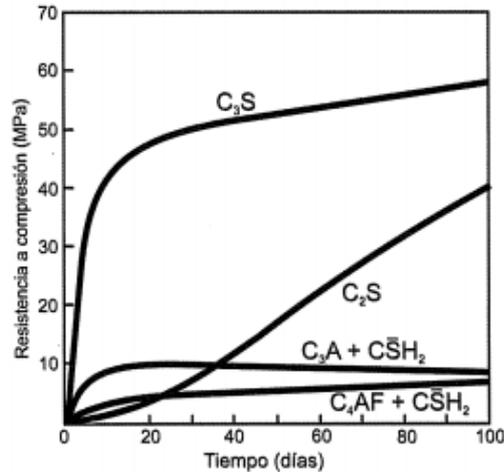


Figura 19. Variación de la resistencia en el tiempo de las diferentes fases del clinker. Tomado de “Ese material llamado Hormigón”, Balzamo, 2012.

3.1.1.1. DRX

Se tomó una muestra del cemento utilizado y se le realizó un ensayo de DRX para determinar las fases presentes. El barrido se realizó desde $2\theta=10^\circ$ hasta 70° . El patrón de difracción obtenido y los de referencia se muestran en la Figura 20. Las fases identificadas corresponden a:

- Ca_3SiO_5 - Alita (de estructura triclinica, JCPDS N° 00-031-0301), también conocida como silicato tricálcico o C₃S en su forma abreviada.
- Ca_2SiO_4 - Belita (de estructura ortorrómbica, JCPDS N° 00-024-0234), también conocida como silicato bicálcico o C₂S.
- $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ - Celita (de estructura ortorrómbica, JCPDS N° 00-032-0150), también conocida como aluminato tricálcico o C₃A.
- $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ - Brownmillerita (de estructura ortorrómbica, JCPDS N° 00-030-0226), también llamada ferroaluminato tetracálcico o C₄AF.
- $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ - Yeso (de estructura ortorrómbica, JCPDS N° 00-021-0167), conocido también como filler calcáreo.
- MgO - Oxido de magnesio (de estructura cúbica, JCPDS N° 00-045-0946).
- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Hidrocalumita (HC) (de estructura monoclinica, JCPDS N° 00-031-0245).
- $\text{Ca}_2\text{Fe}_7\text{O}_{11}$ - Óxido de hierro bicálcico (C₂FO) (de estructura monoclinica, JCPDS N° 00-36-0948).

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

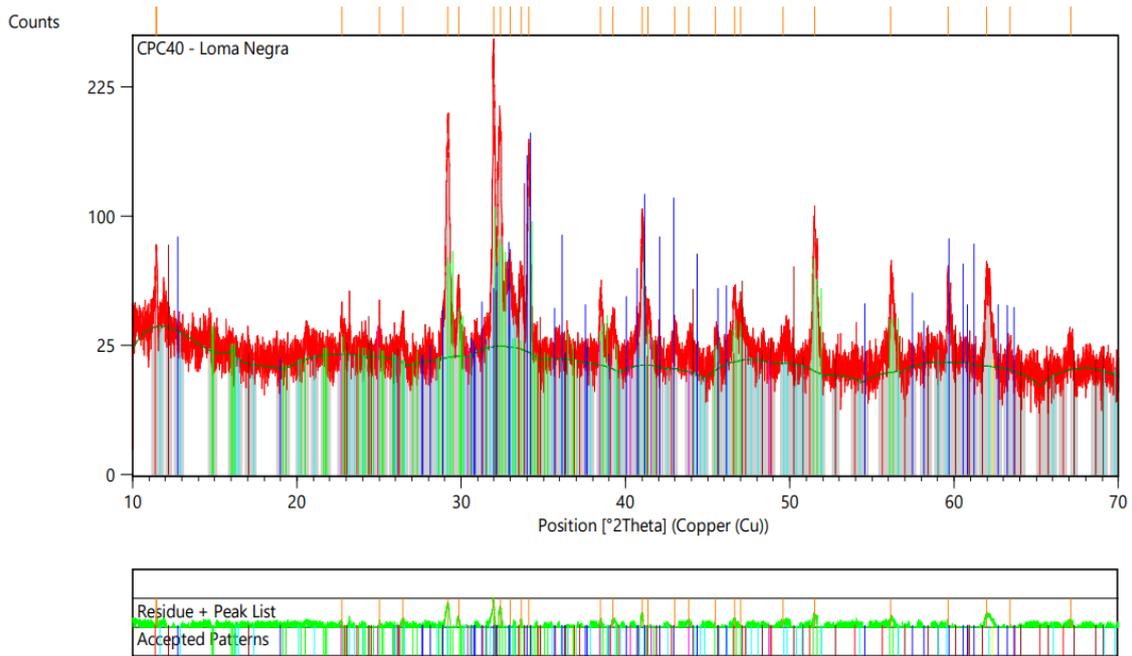


Figura 20. Patrón de difracción obtenido para el cemento CPC40 Loma Negra y patrones de referencia.

El mineral alita (C_3S) forma parte del clinker y es importante para el desarrollo de las resistencias iniciales y finales del cemento. El pico de mayor intensidad se encontró en $2\theta = 32.07$. En la Figura 21 se observa, en verde, el patrón de referencia de la alita.

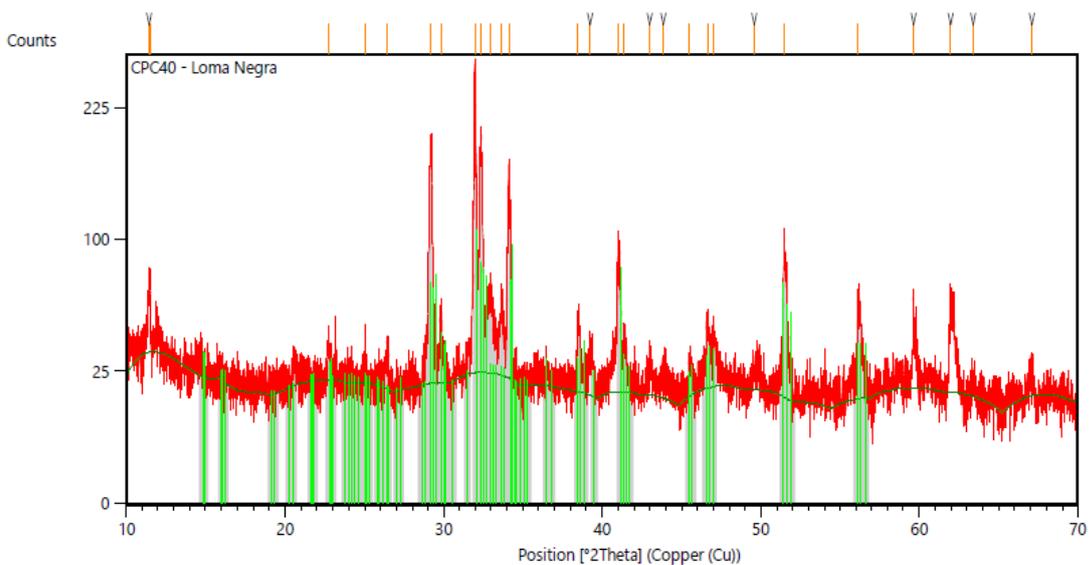


Figura 21. Difractograma característico de la alita (C_3S).

La belita (C₂S) reacciona lentamente con el agua y sus productos de hidratación aportan resistencia a largo plazo. El pico de mayor intensidad se encontró en $2\theta = 32.89$. En la Figura 22 se aprecia el difractograma de la belita.

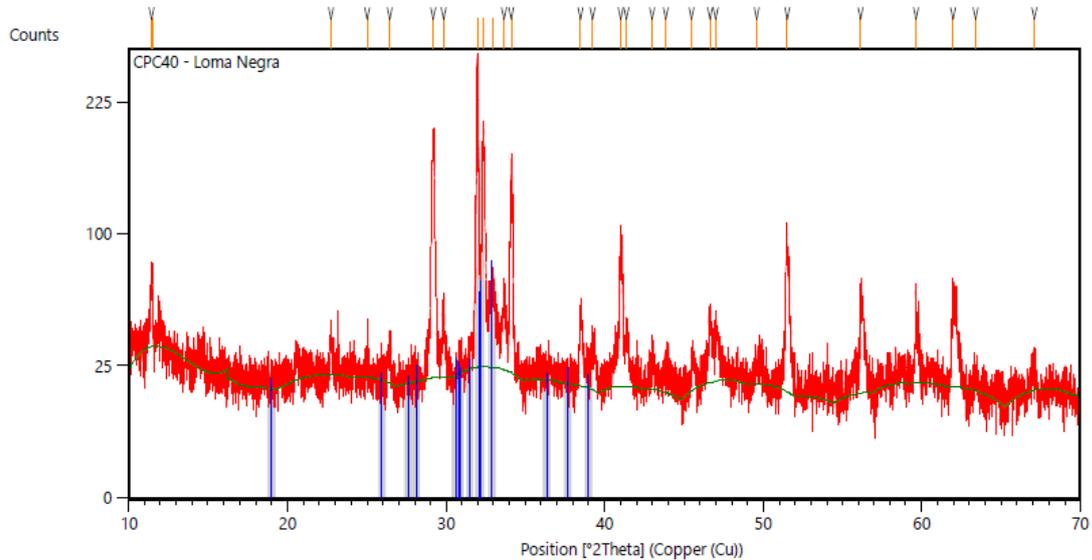


Figura 22. En azul, los picos del patrón de referencia de la belita (C₂S).

La celita (C₃A) es otro de los componentes del clinker, reacciona muy rápidamente con el agua, contribuyendo ligeramente a la resistencia temprana del cemento, aunque su principal función es la de actuar como fundente facilitando la formación de fase líquida en el horno de clinker. Esta reactividad puede ser controlada añadiendo yeso, el cual disminuye la solubilidad del aluminato. El pico de mayor intensidad se encontró en $2\theta = 33.24$. En la Figura 23 se puede observar, en celeste, el patrón de referencia de la celita.

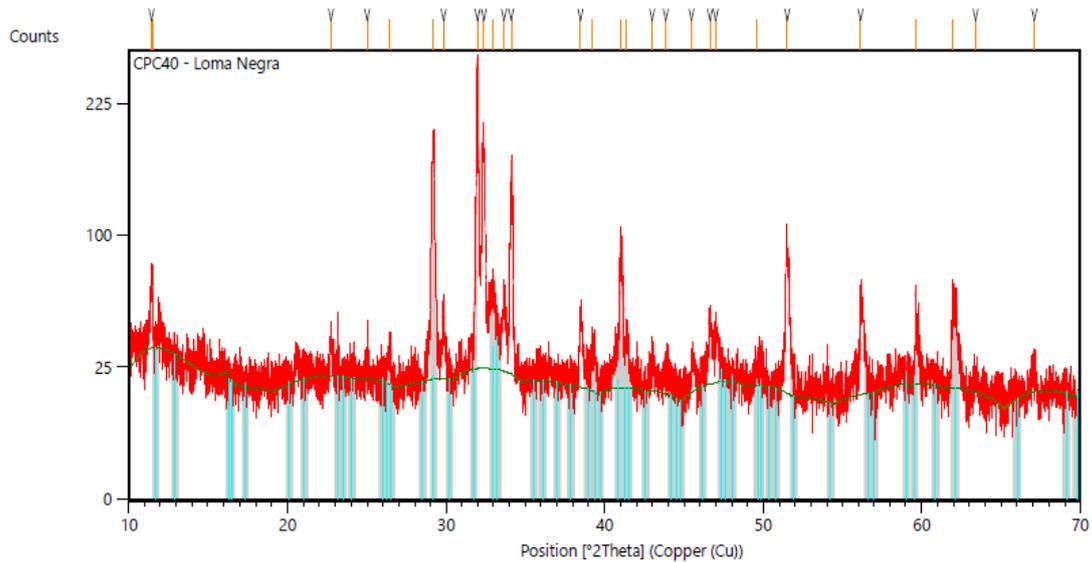


Figura 23. Patrón de referencia de la celita (C₃A).

La brownmillerita (C₄AF) también actúa como fundente en el clinker. El pico de mayor intensidad se encontró en $2\theta = 33.88$. En la Figura 24 se puede observar en purpura el patrón seleccionado para la brownmillerita.

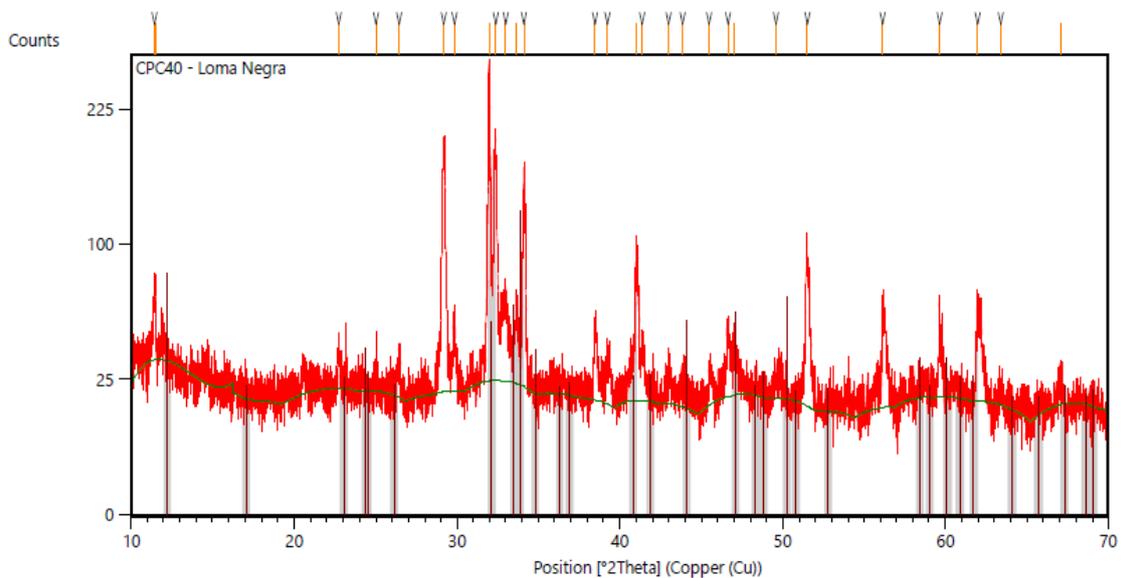


Figura 24. Patrón de referencia de la brownmillerita (C₄AF).

Además, se encontró yeso, componente característico del cemento Portland. El mismo proviene en parte de la escoria de alto horno utilizada como adición

mineral durante el proceso de fabricación (Becker, n.d.; Farías & Linares, 2018). El pico de máxima intensidad se encontró en $2\theta = 24.92$ (Figura 25).

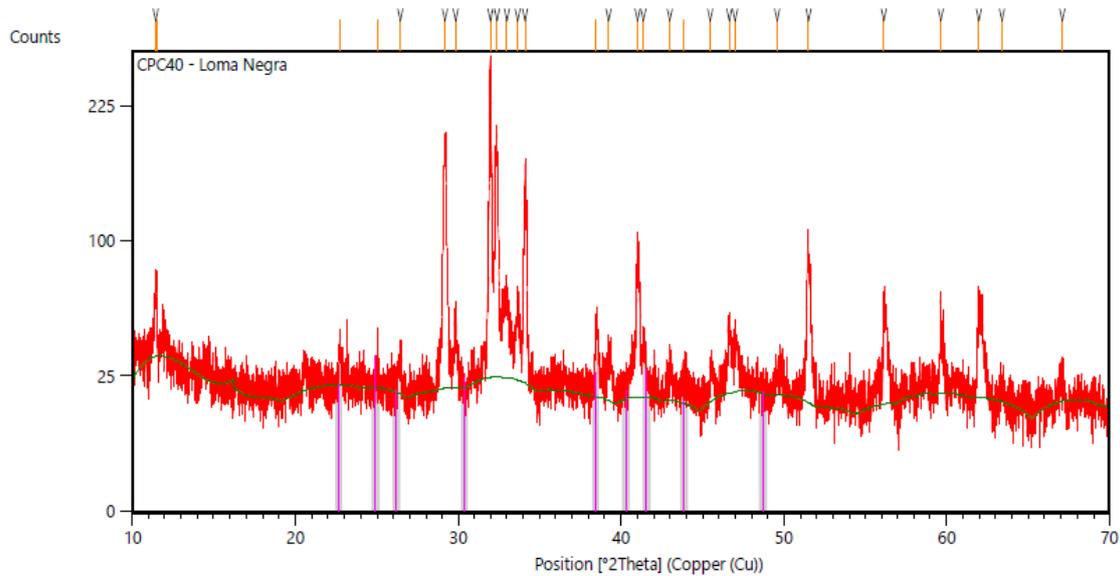


Figura 25. Patrón de referencia del yeso.

Los parámetros más relevantes de la celda unidad de cada una de las fases identificadas se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de la celda unidad de las fases del cemento Portland

	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Yeso	MgO	HC	C ₂ FO
$a(\text{Å})$	14.08	11.80	10.86	5.57	6.47	4.21	9.85	9.96
$b(\text{Å})$	14.21	11.07	10.86	14.52	6.82	4.21	5.72	3.03
$c(\text{Å})$	25.10	6.85	15.12	5.35	7.15	4.21	16.90	15.77
$\alpha(^{\circ})$	90.10	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
$\beta(^{\circ})$	90.22	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	113.33	118.00
$\gamma(^{\circ})$	120.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Vol.	4349.97	1425.59	1783.61	432.42	315.50	74.68	873.77	420.21

El volumen de la celda unidad está expresado en 10^6pm^3 .

3.1.1.2. GRANULOMETRÍA

Según lo descrito en 2.2.3, se utilizó una muestra de 500 g de cemento CPC40 Loma Negra. El procedimiento se realizó por duplicado y no se observaron variaciones significativas en el valor de porcentaje que pasa el tamiz N° 200 obtenido. En la Tabla 3 se presentan los resultados de uno de los ensayos.

Tabla 3

Resultados del ensayo de granulometría según IRAM 1621

	Peso(g)	Porcentaje
Muestra	500	100.0
Retenido en tamiz N°200	57	11.4
Pasa	439	88.6

Los requisitos exigidos por la IRAM 1621 son de un máximo de 15 g de cemento retenido por cada 100g de material inicial, por lo que el cemento CPC40 Loma Negra utilizado cumple con los requerimientos de esta norma.

3.1.2. AGUA

Para todos los ensayos se utilizó agua potable disponible en la planta elaboradora de I.M.E.P.HO. La misma cumple con los requerimientos de la Norma IRAM 1601 (1986).

3.1.3. ADITIVOS

Se utilizó un superfluidificante base acrílica modificada marca Mapei, Dynamon SR3. El mismo está indicado para los sectores del hormigón elaborado que requieran una fuerte reducción de agua, acompañado de un buen desarrollo de la resistencia mecánica a edades cortas además de un largo mantenimiento de la trabajabilidad en las diferentes clases de consistencia. Es particularmente idóneo para el diseño de hormigones y morteros autocompactantes, ya que produce una elevada fluidez sin sacrificar el desarrollo de las propiedades mecánicas requeridas. Químicamente, es una solución acuosa de acrílicos (sin formaldehído) capaz de dispersar eficazmente los gránulos de cemento y favorecer un desarrollo lento de los productos de hidratación del cemento.

Este aditivo cumple con las normas ASTM C494 (tipo G) y ASTM C1017 (tipo II).

3.1.4. ARENA SILÍCEA DE MEDANO

Para el presente trabajo se utilizó agregado fino del tipo silíceo, más específicamente arenas provenientes de médanos cercanos a la zona de Necochea, pertenecientes a la empresa Tres Plantas. Son de origen natural, no poseen un proceso de selección normalizado o tratamientos posteriores para su acondicionamiento. La clasificación dentro de la categoría de agregado fino se basa en lo expuesto en las Normas IRAM 1505 (2003) e IRAM 1627 (1997), donde se establece que será agregado fino todo aquel que pase en su totalidad el por el tamiz IRAM 4.75 mm, a excepción del polvo presente en la muestra (menor a 75 μm).

La arena fue provista por I.M.E.P.HO S.A, la cual posee un acopio a cielo abierto dentro de sus instalaciones de producción y distribución de hormigón elaborado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos descriptos en la sección 2.1.

3.1.4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Se realizó el análisis granulométrico correspondiente según lo expuesto en 2.1.2. El ensayo se realizó dos veces y no se encontraron cambios significativos en el módulo de finura obtenido. En la Tabla 4 se muestra los resultados de uno de los ensayos. La norma IRAM 1627 establece para el agregado fino rangos granulométricos que permitan obtener mezclas relativamente económicas y técnicamente satisfactorias en cuanto a requisitos de resistencia y durabilidad. Especifica que el agregado fino debe tener una granulometría continua, comprendida dentro de los límites definidos por las granulometrías A y B, correspondientes a arenas muy bien graduadas. A su vez, permite también ubicarse dentro de las curvas A y C si se trata de un hormigón de uso en construcciones de tipo corriente donde el control de calidad se realice en obra.

Tabla 4

Resultados del ensayo de granulometría para la arena silícea

Abertura(mm)	Nº tamiz	P_{ret} (g)	P_{acum} (g)	%pasa	Curva A	Curva B	Curva C
9.5	3/8	0.0	0.0	100	100	100	100
4.75	4	0.0	0.0	100	95	100	100
2.36	8	0.0	0.0	100	80	100	100

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

Abertura(mm)	N° tamiz	$P_{ret}(g)$	$P_{acum}(g)$	%pasa	Curva A	Curva B	Curva C
1.18	16	6.5	6.5	98.7	50	85	100
0.6	30	101.0	107.5	77.9	25	60	95
0.3	50	151.5	259.0	46.8	10	30	50
0.15	100	199.0	458.0	6.0	2	10	10

Las curvas A, B y C son los límites según IRAM 1627 y están expresadas en porcentaje.

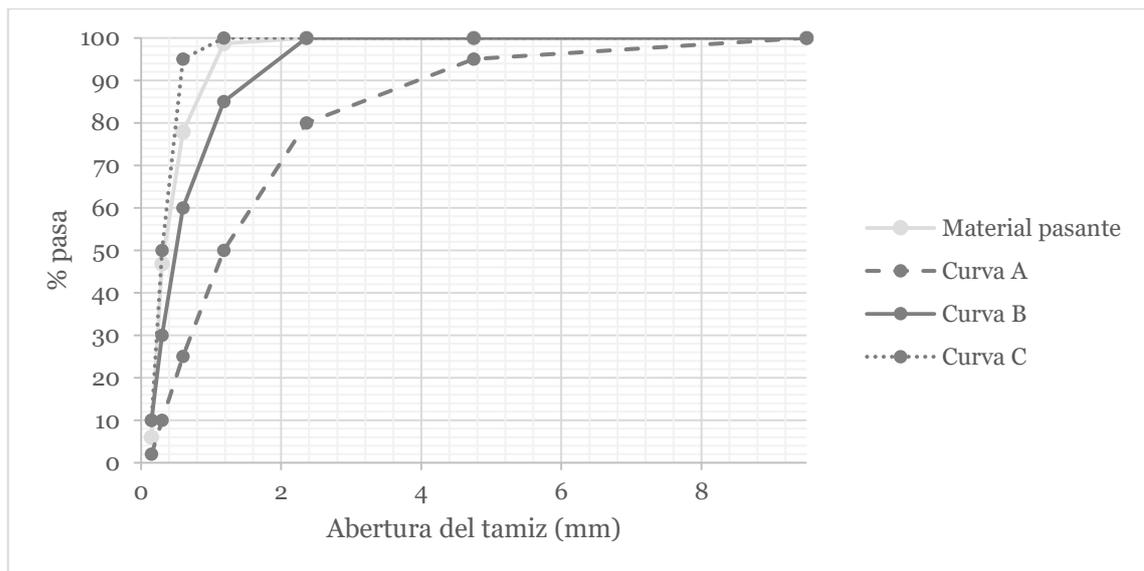


Figura 26. Distribución granulométrica de la arena sílicea de médano.

El módulo de finura (definido en 2.1.2) debe ser igual o mayor que 2.3 e igual o menor que 3.1. Otro requisito para la aceptación es que la granulometría exceda hasta el 10% absoluto los límites de la granulometría B en el conjunto de los tamices IRAM 1.18 mm, 0.6 mm y 0.3 mm. Las diez unidades porcentuales mencionadas pueden comprender a un solo tamiz o a la suma de los porcentajes que exceden los límites de más de uno de los tres tamices indicados.

Para la muestra analizada (Figura 26), el módulo de finura resultante fue de 1.7. Además, la suma de las diferencias con los tamices 1.18 mm, 0.6 mm y 0.3 mm de la curva B fue de 48.4%. Se puede concluir que la arena de la planta Tres Plantas es excesivamente fina y no cumple los criterios especificados por la norma IRAM 1627 que responde al diseño de hormigones convencionales. Sin embargo, eso no implica una restricción para su uso en morteros especiales como el autocompactante.

3.1.4.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Según la NORMA IRAM 1520 (2002) y lo expuesto en 2.1.3, se procedió a calcular las propiedades físicas. Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 5. Los valores de densidad se encuentran dentro del rango esperado para este tipo de arena (Schiopetto, 2015).

Tabla 5

Densidad y absorción de la arena utilizada

Propiedad	Valor obtenido
d_1 (g/cm ³)	2.605±0.015
d_2 (g/cm ³)	2.595±0.015
d_3 (g/cm ³)	2.600±0.020
A (%)	0.501±0.010

Los resultados y su error se calcularon en base al promedio de tres ensayos, tomando como referencia la fórmula de desviación estándar para su error.

3.1.5. CENIZA VOLANTE

Las cenizas son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas. Son obtenidas a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera. Las propiedades de estas cenizas varían ampliamente según el tipo de carbón, el residuo de cenizas, el grado de pulverización y el tipo de colectores empleados. Aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción, sus propiedades físicas y químicas presentan cierto rango de variación.

Sus propiedades son semejantes a las de las puzolanas naturales y, como ellas, su presencia en la pasta de cemento portland genera SCH equivalente al producto principal de la mezcla de cemento y agua, responsable de las propiedades resistentes y durables del mortero. Sin embargo, a diferencia del cemento Portland la ceniza volante no produce hidróxidos alcalinos y consume aquellos generados por el cemento. Esto implica que el SCH producido por la ceniza volante en el hormigón bien curado, segmenta la porosidad remanente reduciendo su permeabilidad al agua. Ambos efectos ayudan a aumentar la resistencia final y la durabilidad del mortero (Benli et al., 2017; Siddique, 2011).

Químicamente se compone de una mezcla heterogénea de una fase vítrea (de un 60 a un 90%) y otra cristalina. Ambas fases no son independientes la una de la otra, si no que la fase cristalina puede presentarse dentro de una matriz vítrea. Esta característica hace dificultosa su caracterización. Sus principales

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

componentes son SiO_2 (de un 35% a un 60%), Al_2O_3 (10% a 30%), Fe_2O_3 (4% a 20%) y CaO (1% a 35%), y según ASTM C 618, son Clase F (ceniza volante baja en calcio) si la suma de sus tres principales componentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) supera el 70%, y son Clase C si superan solo el 50%. A pesar de que no las diferencia por su contenido de óxido de calcio, las cenizas volantes de Clase C contienen por lo general alrededor de un 15% de óxido de calcio, y las de Clase F menos de un 5% (Ramme & Tharaniyl, 2013).

Para el presente estudio, se utilizó ceniza volante de la empresa Maternix, provista por I.M.E.P.HO S.A.

3.1.5.1. DRX

El patrón de difracción obtenido se muestra en la Figura 27. Las fases identificadas fueron:

- SiO_2 - Alfa Cuarzo, (de estructura hexagonal, JCPDS N° 01-089-8938).
- Al_2SiO_5 - Sillimanita (de estructura ortorrómbica, JCPDS N° 01-083-1566).
- $\text{Al}_{0.801}\text{O}_{21.6}\text{Si}_{10.197}$ - Zeolita Y (de estructura cúbica, JCPDS N° 01-088-2288)

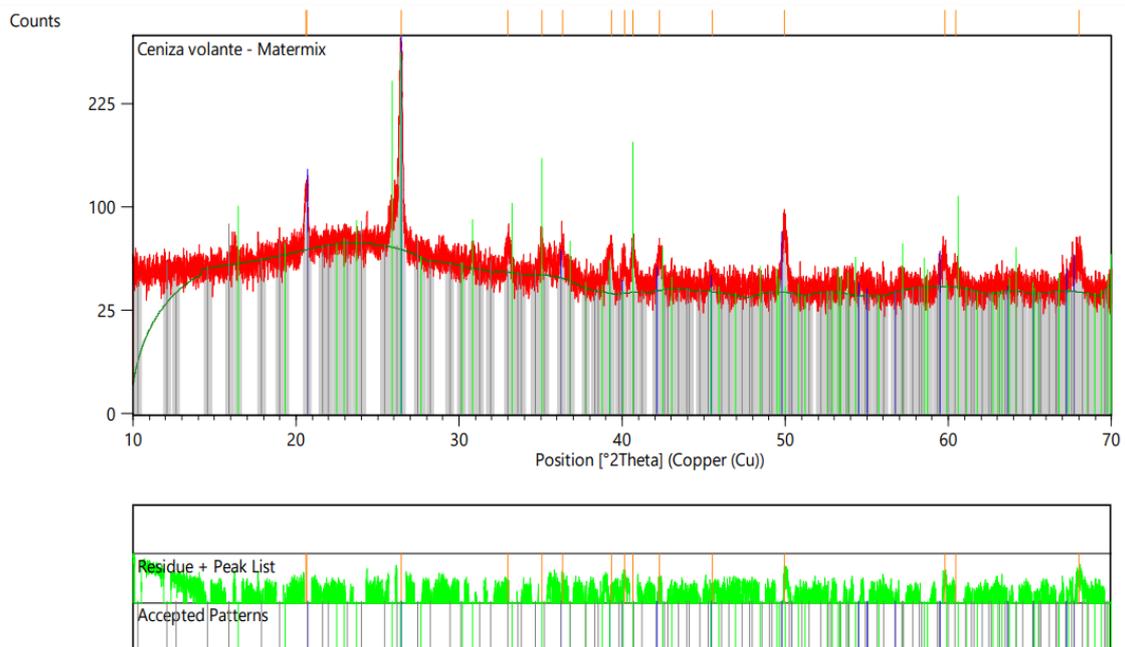


Figura 27. Patrón de difracción de la ceniza volante con los picos buscados y patrones de referencia aceptados.

El montículo ubicado entre los ángulos $2\theta = 16.5^\circ$ y $2\theta = 30.0^\circ$ sugiere la presencia de una gran cantidad de fase vítrea amorfa compuesta principalmente por aluminosilicatos (Chancey et al., 2010). Esto se debe a un rápido enfriamiento desde temperaturas muy altas. La reactividad de la ceniza está íntimamente relacionada con la condición vítrea de su estructura y con su superficie de reacción (Balzamo, 2012). No se encontró un pico correspondiente a óxido de calcio, por lo que se puede concluir que se trata de una ceniza volante base silicio del tipo F según ASTM C 618. En la Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se puede observar los patrones de referencia de las fases identificadas. En la Tabla 6 se pueden observar los parámetros más relevantes de la celda unidad de cada una de ellas.

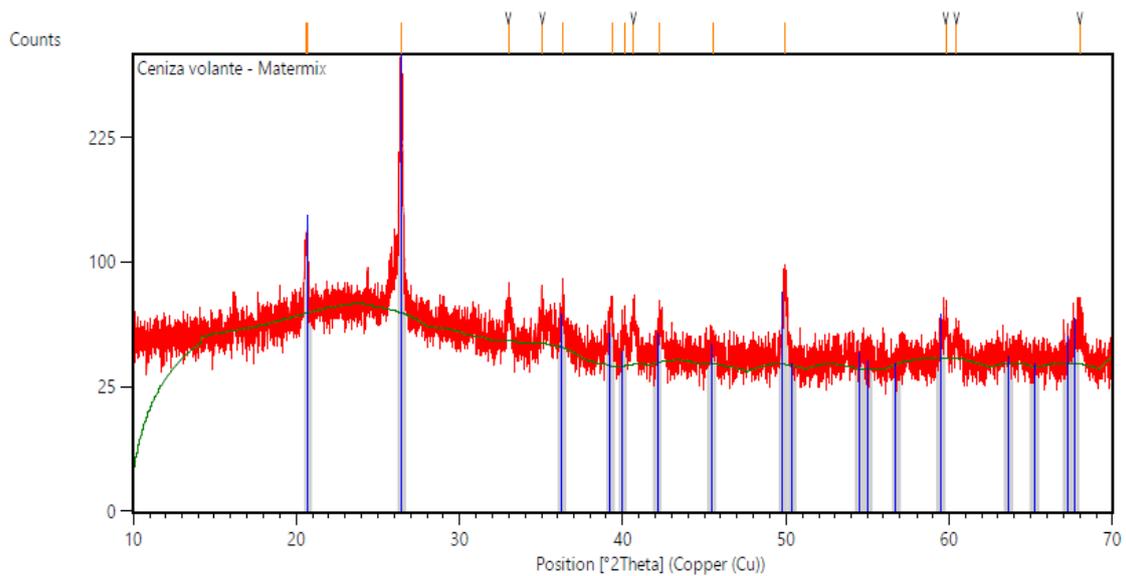


Figura 28. Patrón de referencia de alfa cuarzo (SiO₂) en azul.

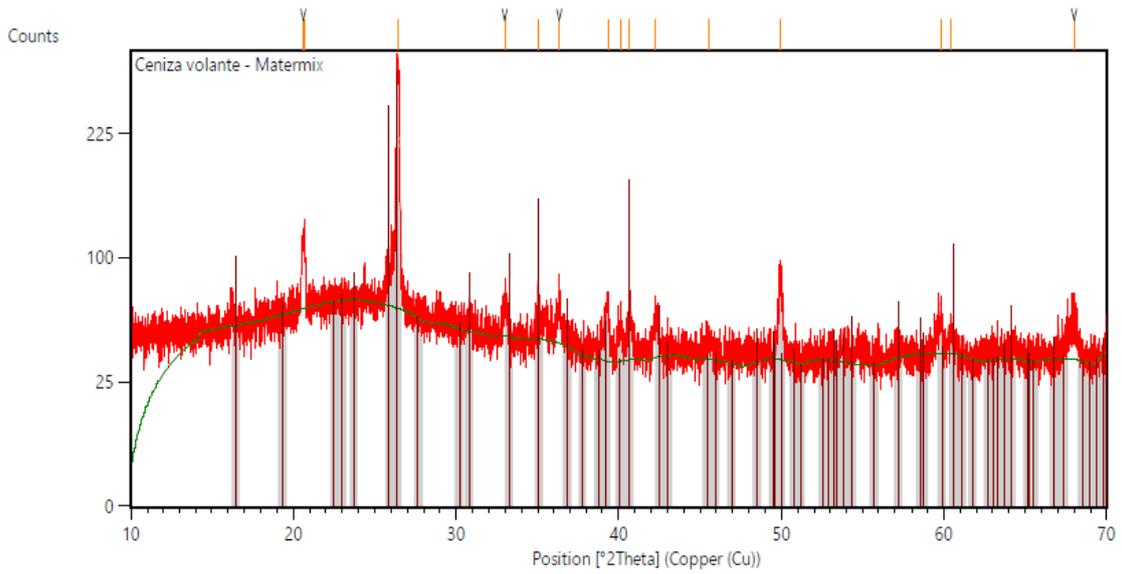


Figura 29. Patrón de referencia correspondiente a la sillimanita.

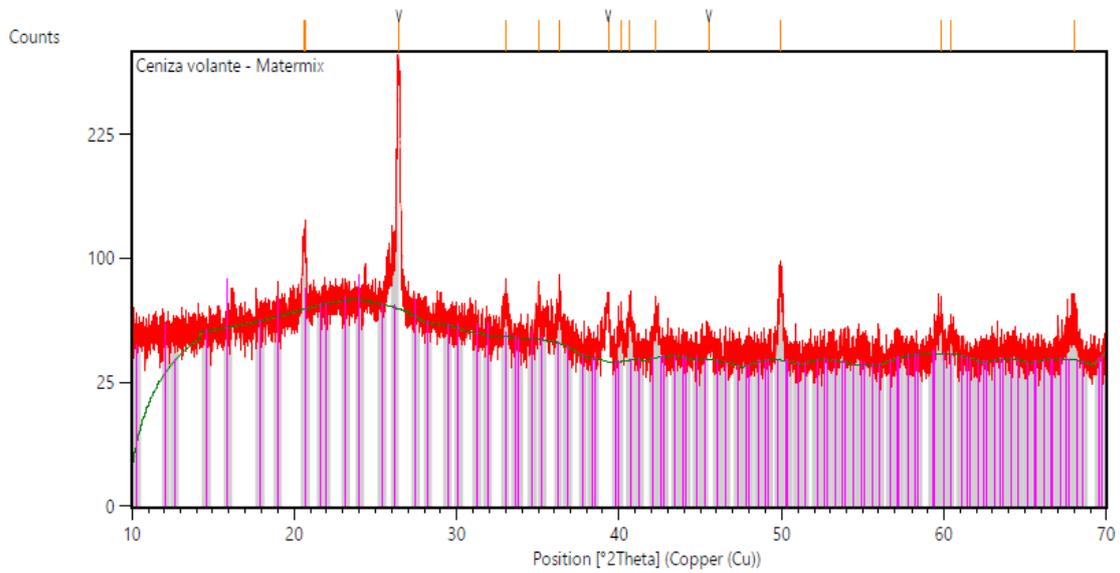


Figura 30. Patrón de referencia de la zeolita Y.

Tabla 6

Celda unidad de las fases encontradas en la ceniza volante

Parámetro	SiO ₂	Sillimanita	Zeolita Y
$a(\text{Å})$	4.95	7.50	24.27

Parámetro	SiO ₂	Sillimanita	Zeolita Y
$b(\text{Å})$	4.95	7.74	24.27
$c(\text{Å})$	5.43	5.80	24.27
$\alpha(^{\circ})$	90.00	90.00	90.00
$\beta(^{\circ})$	90.00	90.00	90.00
$\gamma(^{\circ})$	120.00	90.00	90.00
Vol.	115.23	337.02	14295.83
$I_{max}(2\theta)$	26.47	26.38	6.30

El volumen de la celda unidad esta expresado en $10^6 pm^3$.

3.1.5.2. DENSIDAD

Siguiendo el procedimiento descrito en 2.2.2, se halló la densidad de la ceniza, necesaria para los cálculos de las dosificaciones. Se realizó el ensayo por duplicado utilizando un matraz aforado de 500 ml y agua a una temperatura de 25 °C.

El valor de densidad obtenido fue de 2.25 ± 0.01 g/cm³, similar a la ficha técnica provista por el comerciante Matermix que informa una densidad de 2.28 g/cm³ (ver Anexo-Fichas Técnicas).

A pesar de la diferencia, se considera un resultado válido debido a la variación de la composición de la ceniza entre las diferentes partidas o lotes de producto. Por lo tanto, fue el valor utilizado para el cálculo de todas las dosificaciones a lo largo del presente trabajo.

3.1.5.3. GRANULOMETRÍA

Según lo descrito en 2.2.3 se calculó el porcentaje que pasa el tamiz N° 200. Este procedimiento se repitió tres veces con tres bolsones de muestra diferentes y no se encontraron diferencias significativas entre los mismos. En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en uno de los ensayos.

Tabla 7

Granulometría de la ceniza volante

	Peso (g)	Porcentaje (%)
Muestra	500.0	100.0
Retenido	71.5	14.3
Pasa	423.5	85.7

Se puede observar que el porcentaje que pasa el tamiz N° 200 es levemente menor al del cemento CPC40, por lo que en principio es de esperar una menor superficie específica y una reacción puzolánica más lenta (Halder et al., 2013).

3.3. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

A continuación, se procederá a informar los resultados de los diferentes ensayos en estado fresco expuestos en 2.3.1. En un primer momento se expondrán los resultados del ensayo para la obtención de la relación mínima V_w/V_p para que la pasta comience a fluir, y su correspondencia con la relación m_w/m_p finalmente utilizada en las dosificaciones. Luego se procederá a presentar los resultados de los ensayos de embudo en V y flujo de asentamiento para las dosificaciones C, CCV1, CCV2 y CCV3, correspondientes a un contenido de 0%, 10%, 20% y 30% respectivamente de ceniza como fracción del volumen de polvo total. Posteriormente, se hará una comparación de las dosificaciones antes mencionadas, para un mismo tipo de ensayo e igual contenido de arena, donde se podrá ver la influencia del contenido de ceniza y el aumento de la concentración de superfluidificante en los parámetros de diámetro de extendido, tiempo de vaciado y demanda de aditivo. Más adelante, se presentan en detalle la composición de las dosificaciones que lograron cumplir con los criterios de autocompactabilidad de la EFNARC. Para finalizar la sección, se expondrán los resultados para las dosificaciones aceptadas a las cuales se les agregaron fibras de polipropileno.

3.3.1. RELACIÓN MÍNIMA V_w/V_p PARA FLUJO CERO

Como se explicó en la sección 2.4.1, el parámetro β_p indica la mínima relación agua/polvo en volumen (V_w/V_p) necesaria para que la pasta (agua más polvo) comience a fluir. Se realizaron los ensayos para una pasta cuyo polvo se compone en su totalidad por cemento (Pasta 1), y otra con un 30% de reemplazo en volumen por ceniza volante (Pasta 2). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9 y la Figura 31 y Figura 32.

Tabla 8

Ensayo de flujo de asentamiento de Pasta 1

V_w/V_p	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_m (cm)	Γ_m
1.1	16.0	16.5	16.25	0.625
1.2	22.0	22.5	22.25	1.225
1.3	26.5	27.5	27.0	1.700
1.4	36.0	26.5	26.25	2.625

Tabla 9

Ensayo de flujo de asentamiento de Pasta 2

V_w/V_p	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_m (cm)	Γ_m
1.1	18.0	19.0	18.50	0.850
1.2	26.0	25.5	25.75	1.575
1.3	31.5	31.5	31.50	2.150

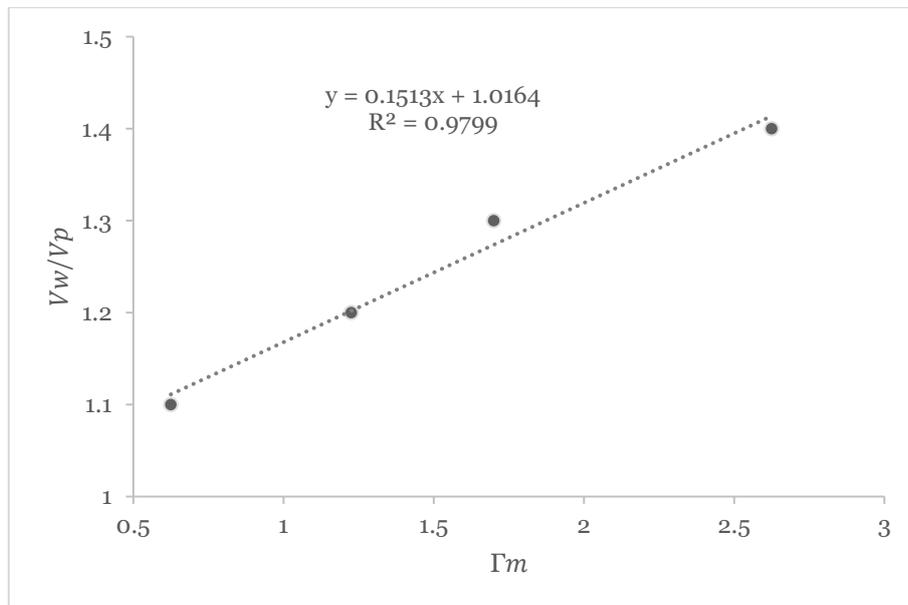


Figura 31. Determinación del parámetro β_p en Pasta 1.

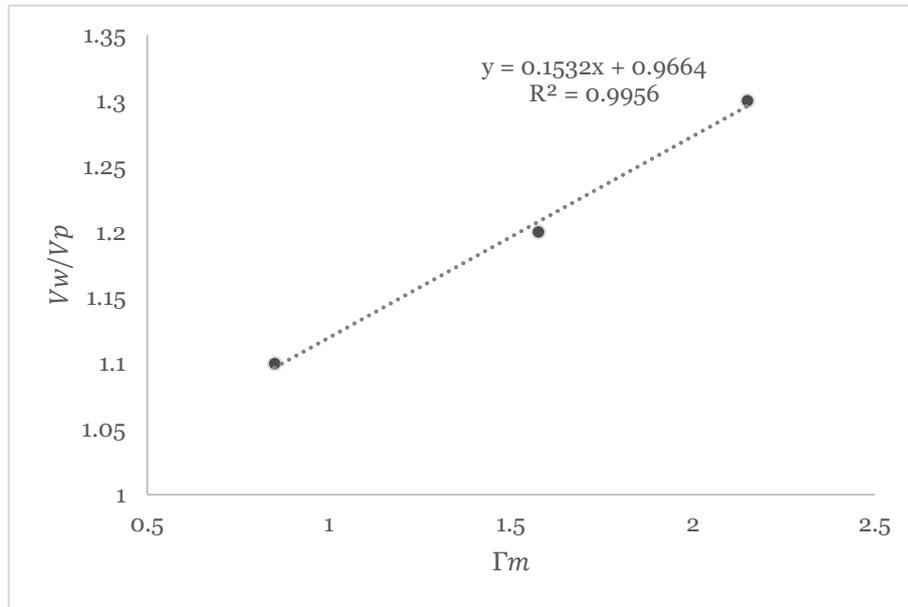


Figura 32. Determinación de β_p en Pasta 2.

El valor de β_p obtenido para la Pasta 1 y la Pasta 2 fue de 1.02 y 0.97 respectivamente. Estos resultados demostraron una menor demanda de agua por parte de la pasta con reemplazo de ceniza debido a la forma esférica de sus gránulos, coincidente con los informado en la literatura (Ossa & Jorquera, 1984). Esto es importante ya que se puede lograr igual trabajabilidad con menores relaciones agua/polvo o un menor contenido de aditivo reductor de agua (Dubey & Kumar, 2013), lo que resulta en una mejora de la resistencia en estado endurecido (Vimonsatit et al., 2015).

Al multiplicarlo por los extremos del rango 0.8-0.9 sugeridos por la EFNARC se obtuvo los valores de relación agua/polvo detallados en la Tabla 10. La relación agua/polvo en masa m_w/m_p en el límite superior para la Pasta 2 fue similar a la utilizada en bibliografía (Tuaum et al., 2018), por lo que se optó por seguir las recomendaciones de la misma y utilizar un valor de m_w/m_p de 0.33.

Tabla 10

Rangos de relaciones agua/polvo obtenidos

%CV	V_w/V_p inferior	V_w/V_p superior	m_w/m_p inferior	m_w/m_p superior
0	0.82	0.92	0.26	0.30
30	0.78	0.87	0.27	0.31

El porcentaje de ceniza está expresado como porcentaje de reemplazo en volumen del polvo total, V_w/V_p representa la relación agua/polvo en volumen y m_w/m_p representa la relación agua/polvo en masa.

3.3.2. DOSIFICACIONES CON POLVO 100% CEMENTO

En la Tabla 11 se presentan los resultados de los ensayos en estado fresco para las dosificaciones de denominación “C” cuyo polvo está formado en su totalidad por cemento, para dos dosificaciones distintas en su contenido de arena (0.45 y 0.47 como fracción del volumen total de mortero).

Tabla 11

Resultados de las dosificaciones con polvo 100% cemento

Dosificación	f_{arena}	Pastón	SP	D_f	$t_{vaciado}$	¿Cumple?
C2	0.45	C2.1	0.50	15.75	17	NO
		C2.2	0.55	17.50	14	NO
		C2.3	0.60	18.25	10	NO
		C2.4	0.63	23.50	8	NO
		C2.5	0.64	23.75	8	NO
		C2.6	0.65	25.50	5	NO
		C2.7	0.70	28.50	4	NO
C3	0.47	C3.1	0.50	14.25	19	NO
		C3.2	0.55	16.00	17	NO
		C3.3	0.60	17.50	12	NO
		C3.4	0.63	22.50	8	NO
		C3.5	0.64	23.00	8	NO
		C3.6	0.65	24.75	8	SI
		C3.7	0.70	27.25	6	NO

El contenido de arena f_{arena} está dado como fracción del volumen total de mortero, la concentración de aditivo SP en litros cada 100 kg de polvo total, el diámetro de extendido final D_f en centímetros y el tiempo de vaciado $t_{vaciado}$ en segundos.

Como se detalló en 2.3.1.1 y 2.3.1.2, el objetivo fue lograr que las dosificaciones cumplieran con un diámetro de extendido comprendido entre 24 cm y 26 cm y

un tiempo de vaciado de entre 7 segundos y 11 segundos. Siguiendo los lineamientos del procedimiento detallado en 2.4.2 se procedió a aumentar la concentración de aditivo a partir de la concentración mínima recomendada por el fabricante (0.5 litros por cada 100 kg de polvo total). El cumplimiento del diámetro de extendido para $f_{arena} = 0.45$ se logró para una concentración de aditivo de 0.65, pero no fue posible lograr el tiempo de vaciado exigido. El ensayo de embudo en V puede considerarse como una medida indirecta de la viscosidad (Mahdikhani & Ramezaniyanpour, 2015). Si el tiempo de vaciado en embudo es muy bajo (muy baja viscosidad) puede ocurrir sangrado de la pasta (separación de la misma respecto a la arena). Para aumentar este tiempo se incrementó levemente el contenido de arena a $f_{arena} = 0.47$, en base a lo informado en literatura (Hu & Wang, 2011; Khaleel & Razak, 2013). Se ha observado que un mayor contenido de arena en el mortero conduce a un aumento de los valores tensión umbral (Hu & Wang, 2011). Esto podría deberse al hecho de que cuando el contenido de arena aumenta, la capa de pasta alrededor de las partículas de arena se reduce y, por lo tanto, aumenta la fricción entre las partículas, lo que conduce a una disminución en la capacidad de flujo. Además, el aumento del contenido de arena aumenta el tiempo de flujo a través del orificio del embudo en V debido al bloqueo que sufren las partículas de arena y esto resulta del hecho de que la distancia entre las mismas es menor (Khaleel & Razak, 2013).

Para un contenido de arena de 0.47 en fracción de volumen del total de mortero, el pastón C3.6 logró cumplir ambos requerimientos simultáneamente, por lo que fue renombrado como MACo y se lo seleccionó para los ensayos en estado endurecido y ensayos con agregado de fibra de polipropileno. La Figura 33 muestra el momento de la medición del diámetro de extendido de la dosificación MACo. En particular en esta imagen no se observa sangrado en el frente de flujo, demostrando la fluidez y cohesión adecuada del mortero.

En la Figura 34 se resume los valores de diámetro de extendido (D_{ext} , en cm) y el tiempo de vaciado (embudo, en segundos) en función del contenido de aditivo superfluidificante. Para todas las pruebas realizadas con 100% cemento como polvo, se observó un comportamiento similar reportado por otros autores (Hu & Wang, 2011; Khaleel & Razak, 2013; Wibowo, 2019).



Figura 33. Diámetro de extendido de la dosificación MACO.

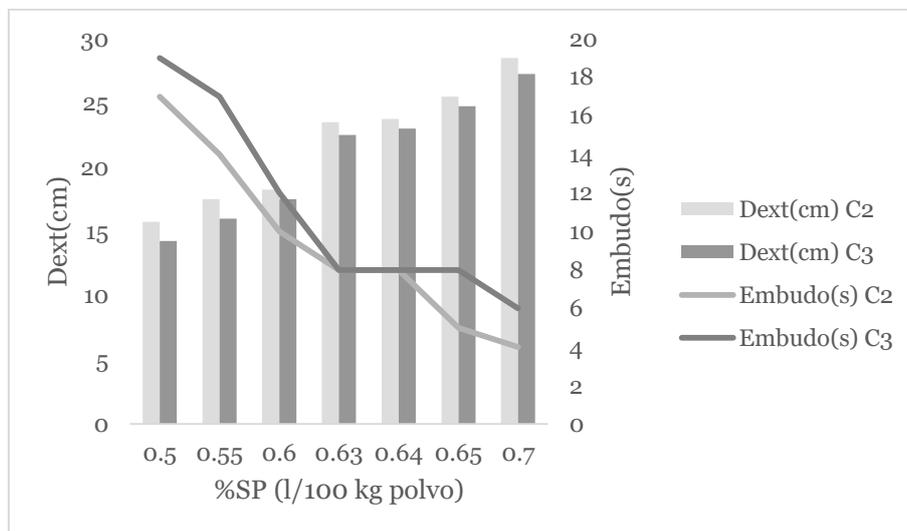


Figura 34. Resultados de los ensayos en estado fresco de C2 y C3.

3.3.2. DOSIFICACIONES CON 10% EN VOLUMEN DE CENIZA

En la Tabla 12 se presentan los resultados para la dosificación CCV1, correspondiente a un contenido de 10% de ceniza volante como porcentaje del total del volumen de polvo. Nuevamente se utilizaron dos contenidos de arena diferentes 0.45 y 0.47 (CCV1.1 y CCV1.2 respectivamente) como fracción del volumen de mortero total, y a su vez se prepararon pastones con distintas cantidades de aditivo siguiendo los lineamientos expuestos en 2.4.2.

Tabla 12

Resultados de los ensayos en estado fresco para CCV1

Dosificación	f_{arena}	Pastón	SP	D_f	$t_{vaciado}$	¿Cumple?
CCV1.1	0.45	CCV1.1.1	0.50	23.75	12	NO
		CCV1.1.2	0.55	25.00	7	SI
		CCV1.1.3	0.60	26.75	6	NO
		CCV1.1.4	0.63	29.00	4	NO
		CCV1.1.5	0.64	30.25	4	NO
		CCV1.1.6	0.65	32.25	3	NO
CCV1.2	0.47	CCV1.2.1	0.50	17.25	73	NO
		CCV1.2.2	0.55	20.75	47	NO
		CCV1.2.3	0.60	25.25	23	NO
		CCV1.2.4	0.63	28.75	13	NO
		CCV1.2.5	0.64	28.75	11	NO
		CCV1.2.6	0.65	30.00	8	NO

El contenido de arena f_{arena} está dado como fracción del volumen total de mortero, la concentración de aditivo SP en litros cada 100 kg de polvo total, el diámetro de extendido final D_f en centímetros y el tiempo de vaciado $t_{vaciado}$ en segundos.

Para un contenido de arena de 0.45 se logró la condición de autocompactabilidad para una concentración de aditivo de 0.55 litros cada 100 kg de polvo total (dosificación CCV1.1.2). Esta dosificación fue renombrada como MAC10 y fue la elegida para realizar los posteriores ensayos en estado endurecido y ensayos con agregado de fibra de polipropileno. Las sucesivas pruebas con distintos contenidos de aditivo fueron realizadas para lograr visualizar el efecto del aumento de superfluidificante sobre el diámetro de extendido (D_{ext} , en cm) y el tiempo de vaciado (embudo, en segundos). Las mismas se exponen en la Figura 35. La Figura 36 muestra el momento de la medición del diámetro de extendido de la dosificación MAC10.

Para este nivel de reemplazo de ceniza, el diámetro de extendido logrado se redujo hasta en un 27% y los tiempos del ensayo de embudo aumentaron casi siete veces cuando se aumentó el contenido de arena de 0.45 a 0.47, para una concentración de superfluidificante de 0.5 litros por cada 100 kg de polvo.

En particular para la dosificación CCV1.2 (con 0.47 de arena) no se pudo lograr los criterios de autocompactabilidad exigidos para ninguna concentración de superfluidificante, por lo que fue descartada.

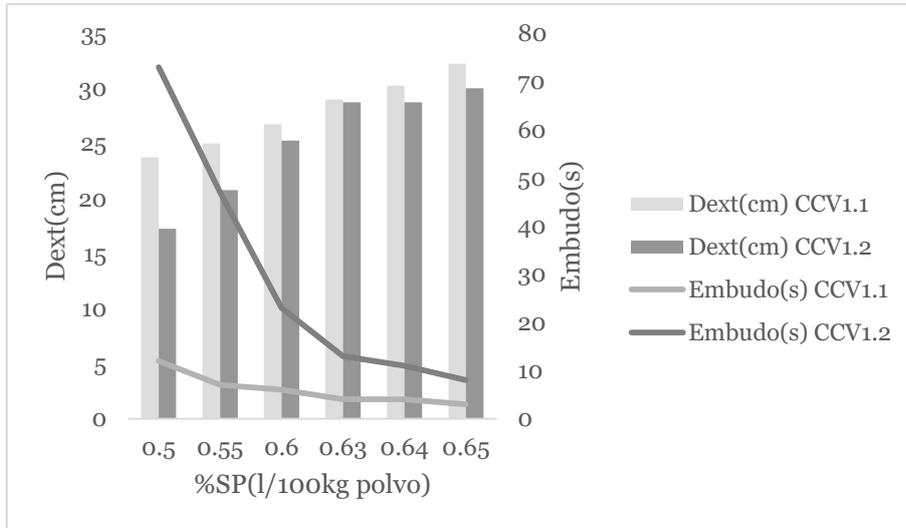


Figura 35. Ensayos en estado fresco de CCV1.1 y CCV1.2.



Figura 36. Ensayo de cono de la dosificación MAC10.

3.3.3. DOSIFICACIONES CON 20% EN VOLUMEN DE CENIZA

Los resultados para la dosificación CCV2, con un 20% de contenido de ceniza como porcentaje en volumen del polvo total se presentan, en la Tabla 13.

Tabla 13

Resultados de la dosificación CCV2

Dosificación	f_{arena}	Pastón	SP	D_f	$t_{vaciado}$	¿Cumple?
CCV2.1	0.45	CCV2.1.1	0.55	25.25	10	SI
		CCV2.1.2	0.60	27.00	9	NO
		CCV2.1.3	0.63	30.75	7	NO
		CCV2.1.4	0.64	31.50	7	NO
		CCV2.1.5	0.65	32.00	6	NO
		CCV2.1.6	0.70	33.00	4	NO
CCV2.2	0.47	CCV2.2.1	0.55	21.25	51	NO
		CCV2.2.2	0.60	22.00	37	NO
		CCV2.2.3	0.63	24.75	29	NO
		CCV2.2.4	0.64	25.75	28	NO
		CCV2.2.5	0.65	29.25	7	NO
		CCV2.2.6	0.70	30.00	7	NO

El contenido de arena f_{arena} está dado como fracción del volumen total de mortero, la concentración de aditivo SP en litros cada 100 kg de polvo total, el diámetro de extendido final D_f en centímetros y el tiempo de vaciado $t_{vaciado}$ en segundos.

Para la dosificación CCV2.1 se partió desde una concentración de aditivo de 0.55 (dosificación CCV2.1.1) ya que se tuvo en cuenta los resultados de la dosificación anterior CCV1.1, la cual había cumplido con ambos criterios usando esa concentración de aditivo. Los resultados mostraron que con CCV2.1.1 se logró autocompactabilidad (Figura 37), por lo que se renombró como MAC20 y fue la elegida para realizar los ensayos en estado endurecido y de agregado de fibra de polipropileno.

Al aumentar el contenido de arena de 0.45 a 0.47 se alcanzó el diámetro de extendido objetivo en CCV2.2.3 y CCV2.2.4 pero los tiempos de embudo aumentaron abruptamente, siguiendo la misma tendencia observada para menores porcentajes de ceniza, pero con un cambio aún más marcado (Figura 38).



Figura 37. Ensayo de diámetro de extendido para la dosificación MAC20.

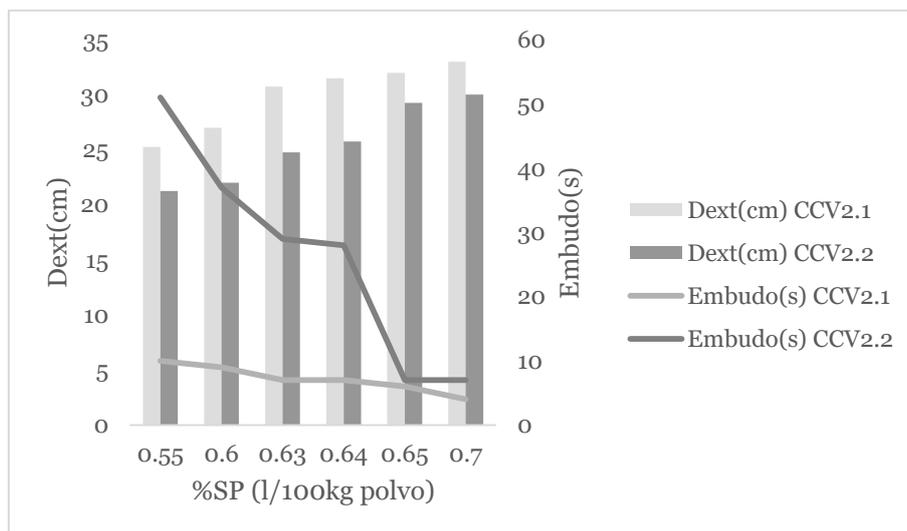


Figura 38. Resultados de los ensayos en estado fresco para las dosificaciones CCV2.1 y CCV2.2. D_{ext} es el diámetro de extendido en cm, y embudo es el tiempo de vaciado en segundos.

3.3.4. DOSIFICACIONES CON 30% EN VOLUMEN DE CENIZA

A partir de la dosificación CCV3, cuyo polvo se compone de un 30% de ceniza como porcentaje en volumen del polvo total, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados de la dosificación CCV3

Dosificación	f_{arena}	Pastón	SP	D_f	$t_{vaciado}$	¿Cumple?
CCV3.1	0.45	CCV3.1.1	0.55	27.50	11	NO
		CCV3.1.2	0.60	29.25	9	NO
		CCV3.1.3	0.63	31.25	9	NO
		CCV3.1.4	0.64	31.75	7	NO
CCV3.2	0.47	CCV3.2.1	0.63	18.00	130	NO
		CCV3.2.2	0.64	19.75	90	NO
		CCV3.2.3	0.65	23.50	84	NO
		CCV3.2.4	0.70	28.75	8	NO

El contenido de arena f_{arena} está dado como fracción del volumen total de mortero, la concentración de aditivo SP en litros cada 100 kg de polvo total, el diámetro de extendido final D_f en centímetros y el tiempo de vaciado $t_{vaciado}$ en segundos.

Con esta dosificación, lo primero que se pudo observar fue la dificultad en el proceso de mezclado antes de agregar el superfluidificante con la parte restante de agua (Figura 39). Se formaban aglomerados esféricos que, al girar el trompo, rodaban y caían sin mezclarse. Los mismos se disgregaron manualmente con la ayuda de una cuchara de albañil. Una vez agregado el superfluidificante con el agua, los aglomerados se fueron disolviendo poco a poco, aunque se tuvo que continuar con el mezclado manual. Además, al momento de finalizar el mezclado y dejar el mortero en reposo, se pudo observar la aparición de manchas y filamentos de color oscuro, los cuales se presuponen que fueron originados por una segregación de la ceniza debido a su alto contenido en el mortero (Figura 40).

Con un contenido de arena de 0.45 se pudo observar un cumplimiento en los tiempos de vaciado para las dosificaciones CCV3.1.1, CCV3.1.2 y CCV3.1.3, pero el diámetro de extendido alcanzado en cada una excedió los límites impuestos por la EFNARC.

Al incrementar el contenido de arena a 0.47, los tiempos de vaciado aumentaron exageradamente, tal como se puede observar en la Figura 41.

Utilizándose una concentración de aditivo de 0.7 litros cada 100 kg de polvo, se pudo cumplir con el requisito de tiempo de vaciado, pero se superó el límite impuesto en el diámetro de extendido (dosificación CCV3.2.4). Un riesgo de utilizar una concentración de aditivo tan alta es la saturación del mismo en la mezcla, por lo que esta dosificación fue descartada.

Ninguna de las dosificaciones planteadas cumplió con los requisitos de la EFNARC. A pesar de esto, se eligió CCV3.1.1 con motivos comparativos ya que logró cumplir con el requisito del tiempo de vaciado. La misma se renombró como MAC30 y se la utilizó en los ensayos en estado endurecido y ensayos con agregado de fibra de polipropileno.



Figura 39. Dificultad en el proceso de mezclado.



Figura 40. Segregación de la ceniza en el mortero durante el ensayo de embudo en V.

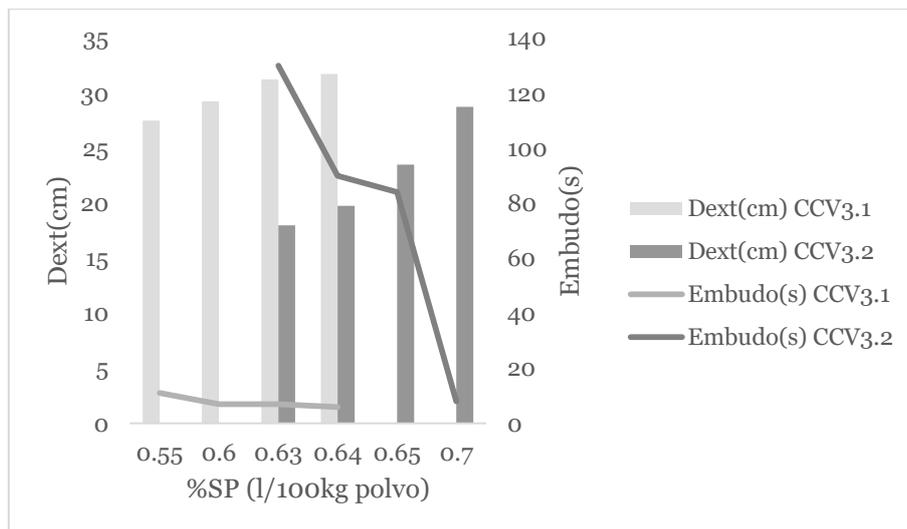


Figura 41. Ensayos en estado fresco de dosificaciones CCV3.1 y CCV3.2. D_{ext} es el diámetro de extendido en cm, y embudo es el tiempo de vaciado en segundos.

3.3.5. COMPARACIÓN

En la Figura 42 y Figura 43 se puede observar la influencia del aumento del contenido de ceniza (como reemplazo en volumen del polvo total) en el diámetro de extendido de los pastones. A mayor contenido de ceniza, el diámetro de extendido aumentó para un contenido de arena de 0.45 (como fracción del

volumen de mortero total) e igual concentración de aditivo. Esto se explica por la menor demanda de agua de la ceniza respecto al cemento debido a la forma esférica de sus partículas que reduce la fricción entre ellas (Safiddine et al., 2017; Vimonsatit et al., 2015). Para un contenido de arena de 0.47, los menores diámetros en función de la concentración de aditivo se obtuvieron con CCV3.2 (contenido de 30% de ceniza volante como porcentaje del volumen de polvo total) y los mayores con CCV1.2 (10 % de contenido de ceniza como porcentaje del volumen de polvo total).

La Figura 44 muestra que para un contenido de ceniza del 10% (CCV1.1) los tiempos de vaciado en función de la concentración de aditivo disminuyeron considerablemente respecto a la dosificación con polvo compuesto en su totalidad por cemento (C2). Al seguir incrementando el contenido de ceniza en un 20% (CCV2.1) y 30% (CCV3.1) como porcentaje del volumen total del polvo, los tiempos de vaciado volvieron a aumentar hasta prácticamente llegar a los valores de la dosificación sin ceniza. Se pudo observar entonces que un incremento mayor al 10% de contenido de ceniza como porcentaje del volumen total de polvo aumentó marcadamente los tiempos de vaciado en el ensayo de embudo en V.

Este fenómeno fue aún más apreciable cuando se incrementó la cantidad de arena de 0.45 a 0.47 (Figura 45), los tiempos de vaciado en función de la concentración de aditivo aumentaron con el incremento del contenido de ceniza. Para un contenido de 0.47 de arena como fracción del volumen de mortero total, los menores tiempos de vaciado se obtuvieron con la dosificación C3.

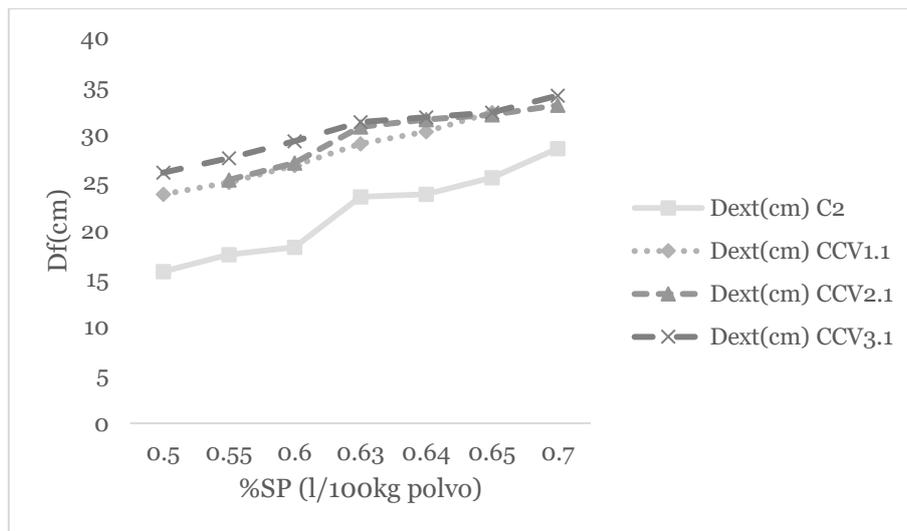


Figura 42. Comparación de los diámetros de extendido entre las dosificaciones con distinto contenido de ceniza, para un contenido de arena de 0.45 como fracción del volumen total de mortero.

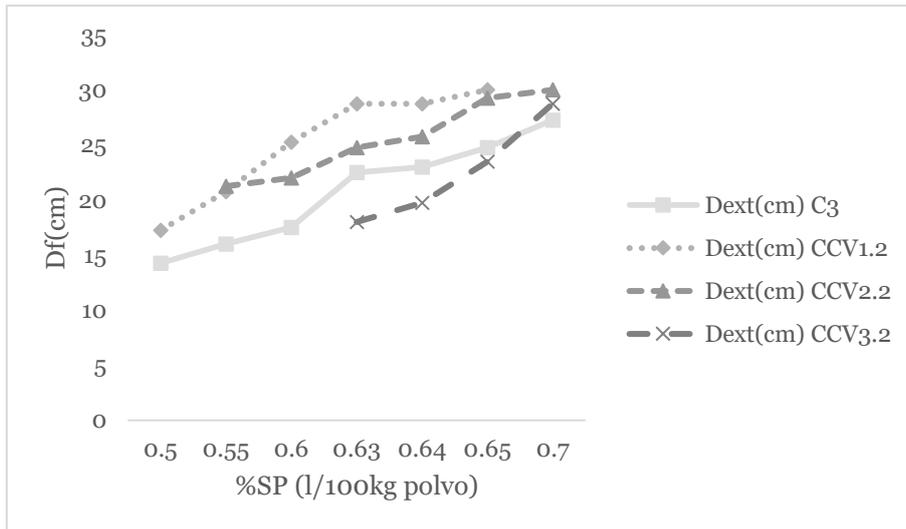


Figura 43. Variación de los diámetros de extendido para un contenido de arena de 0.47 como fracción del volumen total de mortero.

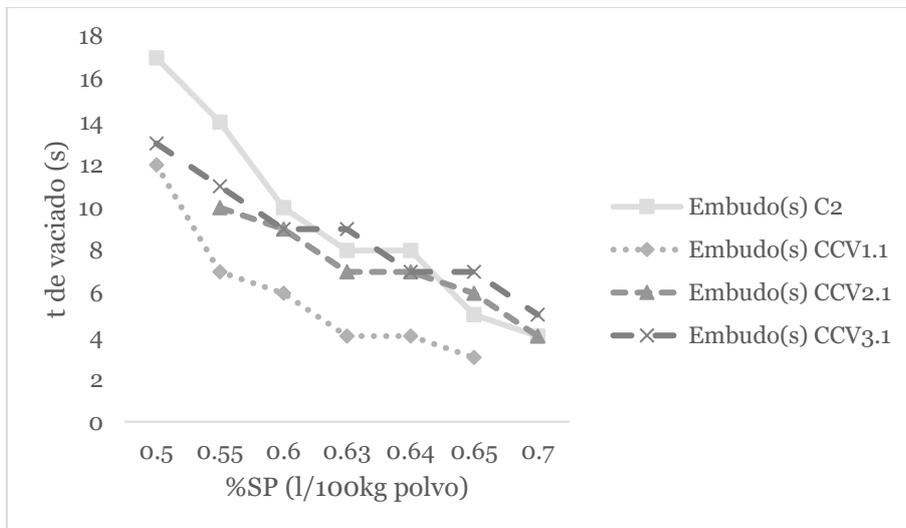


Figura 44. Influencia del contenido de ceniza en el tiempo de vaciado para dosificaciones con contenido de arena de 0.45 como fracción del volumen total de mortero.

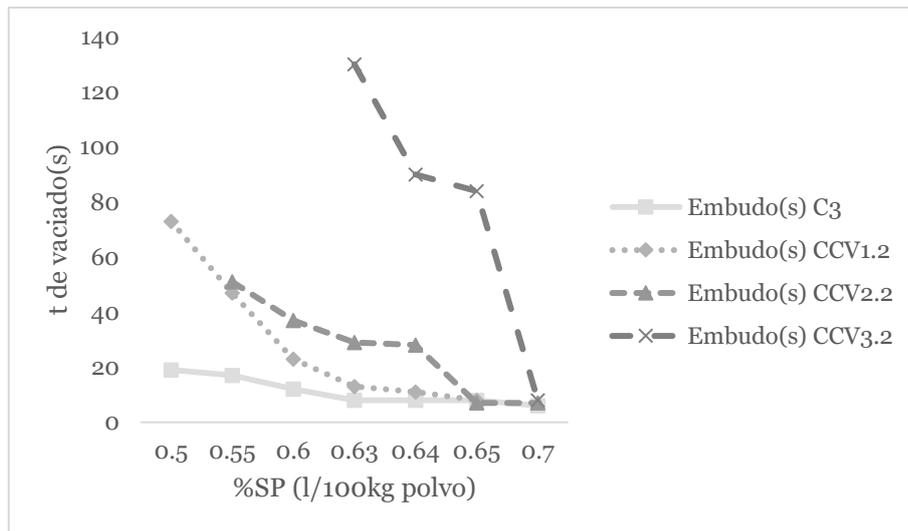


Figura 45. Ensayo de embudo en V para dosificaciones con 0.47 de arena como fracción del volumen total del mortero.

Con el aumento del contenido de ceniza de 0% (MAC₀) a 10% (MAC₁₀) se observó una considerable reducción en la cantidad de aditivo para lograr MAC (Figura 46). Luego, el sucesivo incremento del contenido de ceniza no produjo cambios en la demanda de aditivo. Para una misma concentración de aditivo y un contenido de arena de 0.45, al aumentar el contenido de ceniza el diámetro de extendido aumentó, mejorando la deformabilidad del mortero, pero el tiempo de vaciado se incrementó con respecto a la dosificación con menor reemplazo de ceniza, empeorando la habilidad de paso del MAC a través del orificio de salida del embudo en V (Benli et al., 2017).

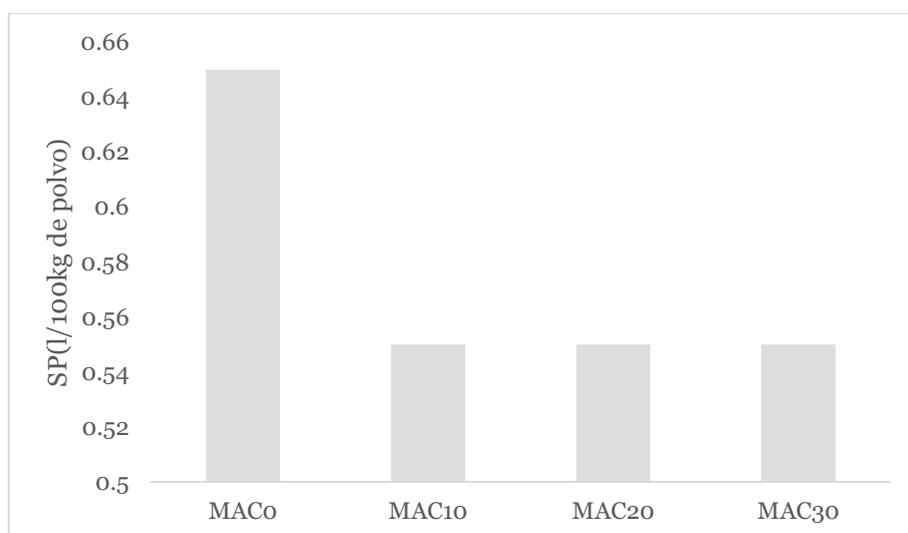


Figura 46. Concentración de aditivo necesaria para lograr MAC.

En la Figura 47 y Figura 48 se pueden observar los parámetros R_m y Γ_m (detallados en 2.3.1.1 y 2.4.1 respectivamente) de los pastones elegidos que cumplieron los requisitos de la EFNARC. Un valor alto del parámetro Γ_m indica una alta deformabilidad del mortero y un valor bajo de R_m sugiere una viscosidad más alta (Okamura & Ouchi, 2003). Se puede observar el incumplimiento de MAC30 en el parámetro Γ_m , a pesar de haber sido seleccionada en el presente trabajo para realizar los ensayos en estado endurecido y con agregado de fibras de polipropileno, con fines comparativos.

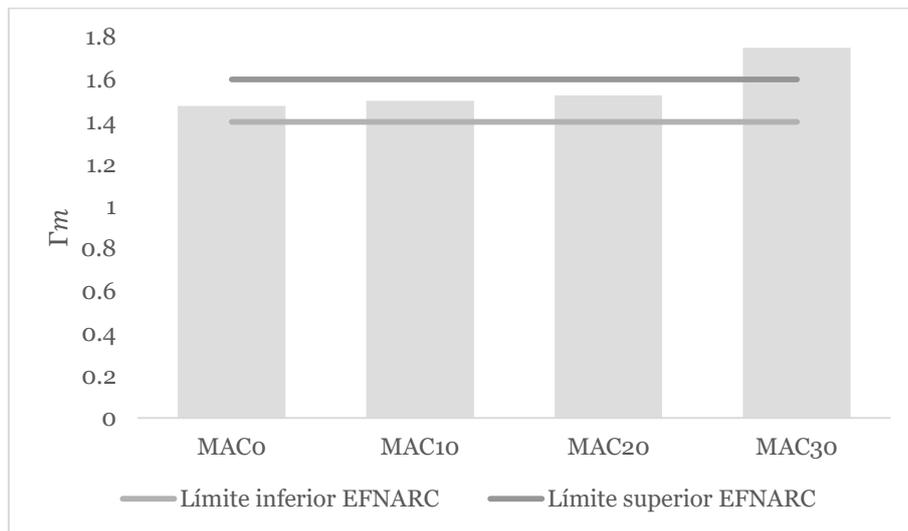


Figura 47. Diámetro de extendido relativo Γ_m .

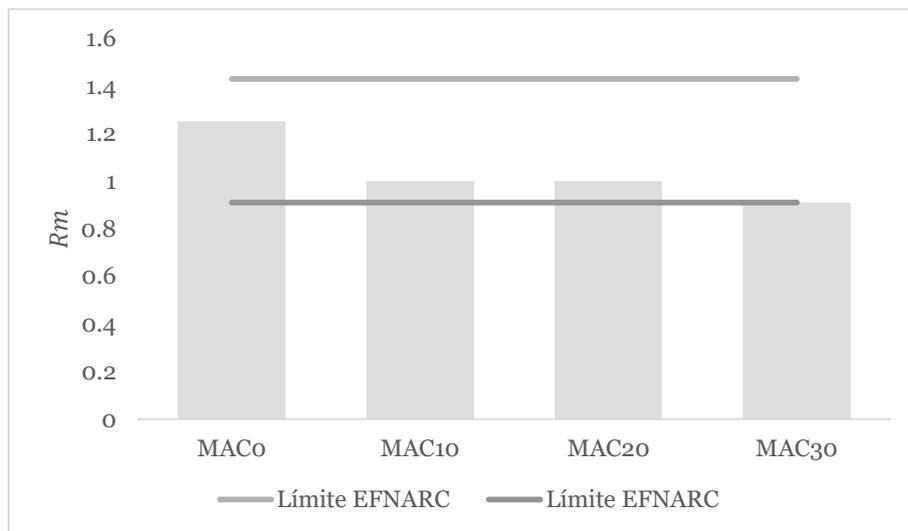


Figura 48. Velocidad de flujo relativa R_m .

3.3.6 FORMULACIONES ACEPTADAS BAJO CRITERIO EFNARC

En la Tabla 15 se presenta la composición de las dosificaciones aceptadas para los ensayos en estado endurecido y ensayos con fibra de polipropileno.

Tabla 15

Dosificaciones finales

Dosificación	m_w/m_p	f_{arena}	%CV	SP	C	CV	Agua	Arena
MAC0	0.33	0.47	0	0.65	814.0	0.0	269.0	1224
MAC10	0.33	0.45	10	0.55	770.5	61.9	274.7	1172
MAC20	0.33	0.45	20	0.55	694.8	125.7	270.8	1172
MAC30	0.33	0.45	30	0.55	616.8	191.3	266.7	1172

La relación agua/polvo (m_w/m_p) está dada como fracción en masa, el contenido de arena (f_{arena}) como fracción del volumen total del mortero, el contenido de ceniza (%CV) como porcentaje de reemplazo del volumen total de polvo, la concentración de aditivo (SP) como litros cada 100 kg de polvo total y las cantidades de cemento (C), ceniza (CV), agua y arena como kg cada 1 m³ de mortero.

Posteriormente, a cada una de ellas se le agrego 600 g/m³ de mortero de fibra de polipropileno de 19 mm de largo para los ensayos en estado fresco y endurecido, y la fabricación del negativo de la pieza real de geometría compleja. El diseño y preparación de los pastones se realizó según lo detallado en 2.4 y 2.5.

3.3.7. AGREGADO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO

A las dosificaciones que lograron cumplir con los criterios de autocompactabilidad, se les agregaron fibras de polipropileno para observar la influencia del uso de este tipo de refuerzo en la trabajabilidad del mortero (Figura 49 y Figura 50). El armado de los pastones con refuerzo de fibra se detalla en 2.5. Para denominar los pastones con refuerzo se agregó la letra “F” a la ya conocida nomenclatura.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

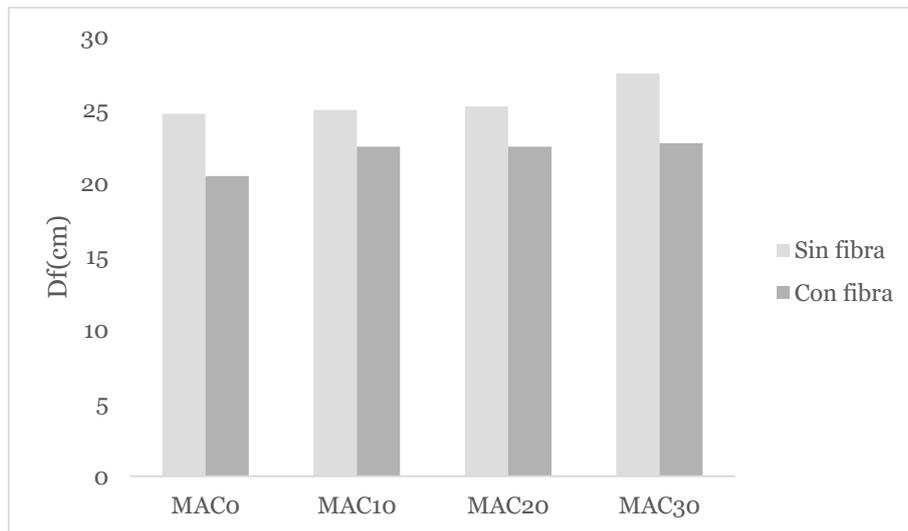


Figura 49. Influencia del agregado de fibras en los diámetros de extendido de las dosificaciones que lograron MAC.

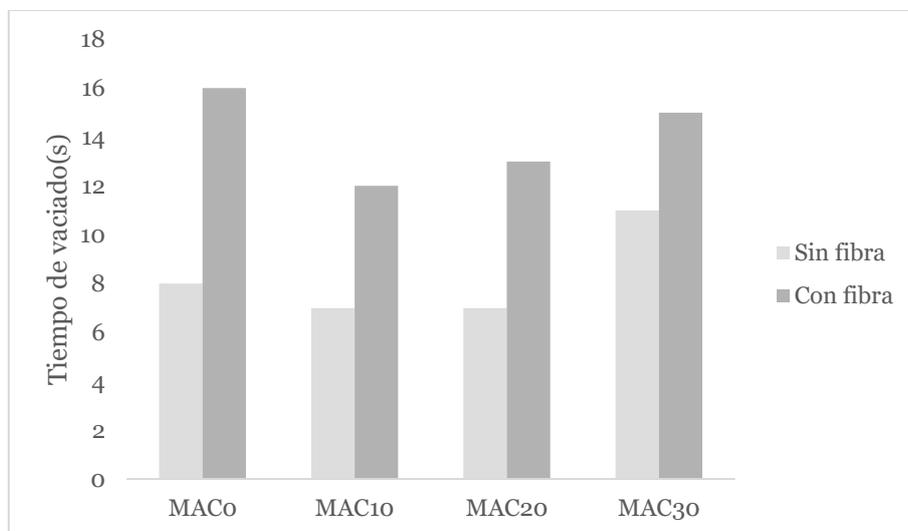


Figura 50. Influencia del agregado de fibras en los tiempos de vaciado de las dosificaciones que lograron MAC.

Como era de esperar, se pudo observar una tendencia generalizada a la disminución del diámetro de extendido debido a la pérdida de trabajabilidad provocada por las fibras de polipropileno. La dosificación que sufrió una disminución relativa mayor en su diámetro de extendido fue MAC30 con un 21%. En el caso del ensayo de embudo en V la tendencia observada fue la del aumento de los tiempos de flujo, siendo la dosificación MAC0 la que sufrió una variación más notoria, aumentando el doble. Estos resultados son semejantes a los encontrados en la literatura, los cuales detallan la disminución de trabajabilidad que provoca el agregado de fibras de polipropileno (Kumar & Srikanth, 2008).

Más tarde, se procedió modificar la concentración de aditivo superfluidificante para encontrar MAC con agregado de fibras. En la Tabla 16 se presentan los resultados de los ensayos en estado fresco.

Tabla 16

Resultados de la búsqueda de MAC con agregado de fibra

Dosificación	Pastón	SP	D_f	$t_{vaciado}$	¿Cumple?
MAC0	1	0.65	20.50	16	NO
	2	0.70	22.75	8	NO
	3	0.72	24.50	7	SI
MAC10	1	0.55	22.50	12	NO
	2	0.60	22.75	11	NO
	3	0.62	25.50	7	SI
MAC20	1	0.55	22.50	13	NO
	2	0.60	25.50	7	SI
MAC30	1	0.55	22.75	15	NO
	2	0.57	24.75	10	SI
	3	0.59	27.00	10	NO
	4	0.60	28.75	6	NO

La concentración de aditivo SP está dada en litros cada 100 kg de polvo total, el diámetro de extendido final D_f en centímetros y el tiempo de vaciado $t_{vaciado}$ en segundos.

Como consecuencia de la disminución en la trabajabilidad debido al agregado de fibras de polipropileno, la demanda de aditivo aumentó, como se puede observar en la Figura 51. Además, se necesitó de menor cantidad adicional de aditivo para lograr MAC en las dosificaciones con mayor contenido de ceniza. Las dosificaciones MAC0 y MAC10 requirieron una cantidad adicional de aditivo de 0.07 litros cada 100 kg de polvo. La dosificación MAC20 disminuyó este valor a 0.05 litros cada 100 kg de polvo, y finalmente, la dosificación MAC30 obtuvo el menor valor requiriendo una cantidad de aditivo adicional de 0.02 litros cada 100 kg de polvo.

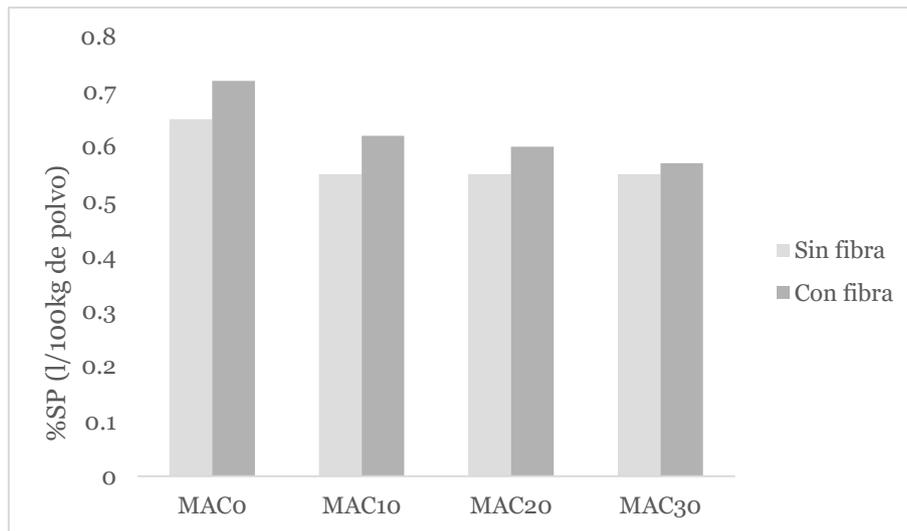


Figura 51. Demanda de aditivo para las dosificaciones que lograron MAC con y sin fibras de polipropileno.

3.4. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

3.4.1. MEDICIÓN DE DENSIDAD APARENTE

En la Tabla 17 se presentan los resultados de la medición de densidad aparente de las probetas con y sin agregado de fibra de las dosificaciones MAC0 y MAC10.

Tabla 17

Densidad aparente en g/cm³

Dosificación	Desmolde	7 días	28 días
MAC0	2.24±0.04	2.25±0.01	2.29±0.02
MAC0F	2.23±0.01	2.21±0.02	2.24±0.01
MAC10	2.28±0.01	2.29±0.01	2.30±0.01
MAC10F	2.29±0.01	2.25±0.01	2.30±0.01

Los resultados no muestran diferencias significativas en cuanto a la influencia del contenido de ceniza o del agregado de fibras de polipropileno. Esto puede deberse, en primer lugar, a los errores inherentes a la técnica de medición empleada, la cual no considera la porosidad del mortero en su estado endurecido y está sujeta a las condiciones de humedad y temperatura del medio en el cual se deja secar las probetas por 24 horas (atmosfera no controlada). Además, se deben

incluir los errores del calibre y la balanza utilizados en la medición, y un error estadístico debido a la poca cantidad de muestras relevadas. A pesar de ello, los resultados están dentro del orden esperado (Turk, 2012).

3.4.2 FLEXIÓN

Se siguieron los lineamientos expuestos en 2.3.2.3 para determinar la resistencia a la flexión de los morteros autocompactantes. Se pudo observar una falla no catastrófica de las dosificaciones con agregado de fibra, las cuales actuaron como puentes de unión entre las dos superficies de fractura, impidiendo que la probeta se separara en dos partes (Figura 52).

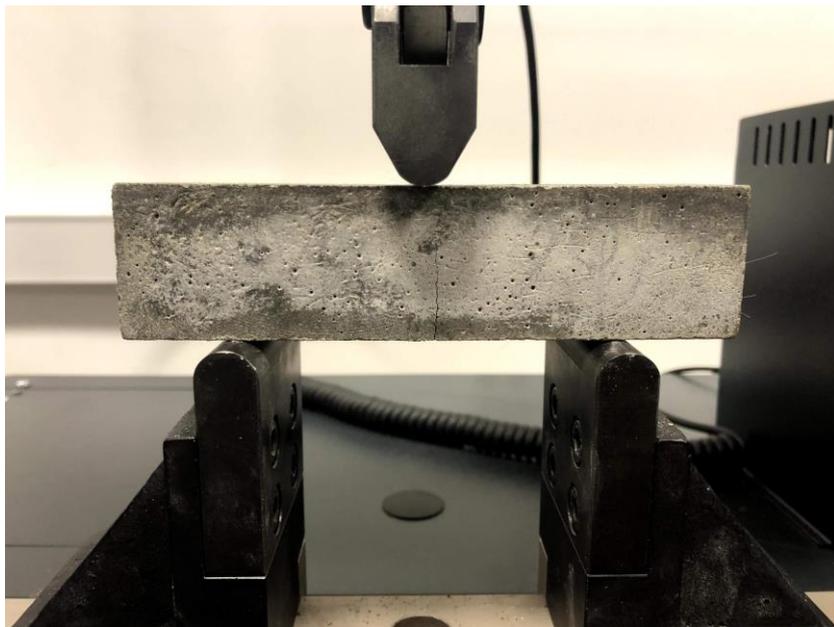


Figura 52. Probeta con agregado de fibra ensayada en flexión en tres puntos, luego de la rotura.

En la Figura 53 se presentan los resultados (en MPa) para los ensayos en flexión de las probetas sin fibra, para 7 y 28 días.

Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

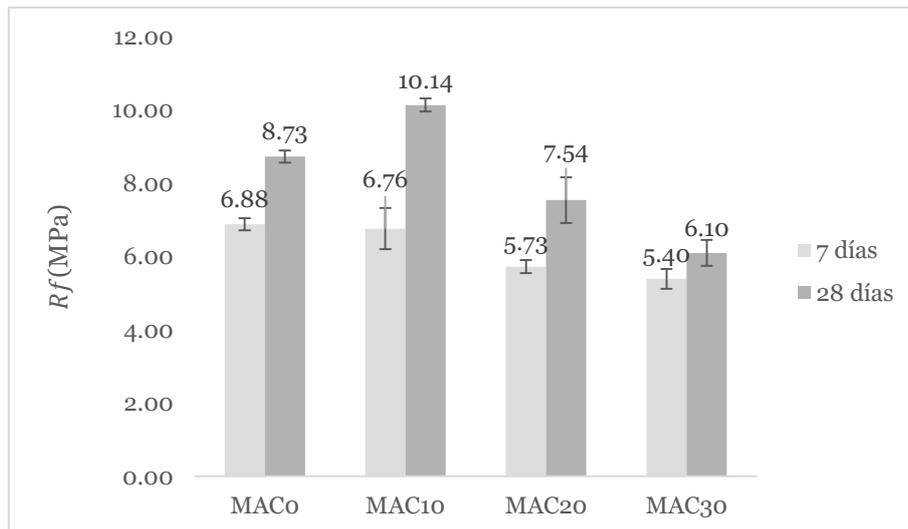
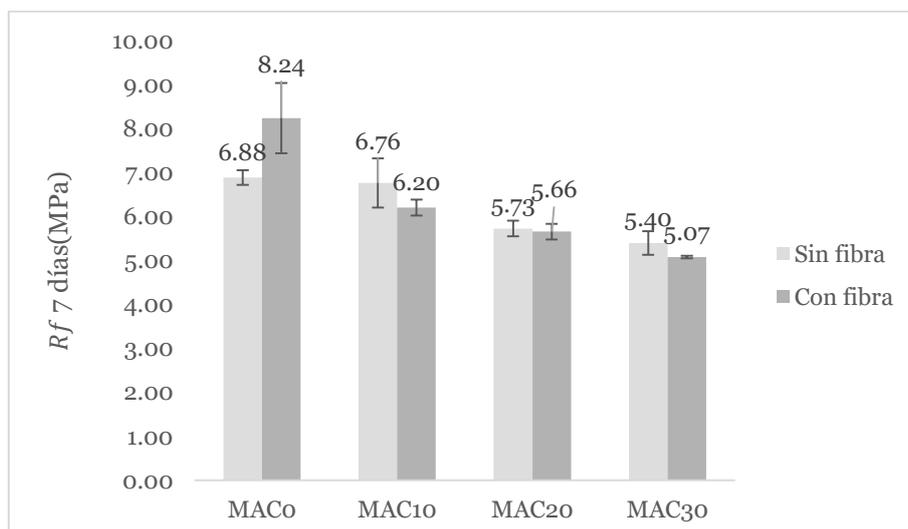


Figura 53. Ensayo de flexión para probetas sin agregado de fibra.

Para la edad de 7 días, se observó una leve disminución de la resistencia con el aumento del contenido de ceniza. Esto se podría explicar debido al menor contenido de cemento (efecto de dilución) y a que la reacción de la ceniza con el hidróxido de calcio (reacción puzolánica) es más lenta que la hidratación del cemento y por lo tanto se alcanza una menor resistencia a igual tiempo de curado (Benli et al., 2017).

En el caso de los valores a 28 días, como era de esperar resultaron mayores que los correspondientes a 7 días ya que la reacción de hidratación continuó con su avance. La disminución de la resistencia con el aumento del contenido de ceniza pudo deberse a un efecto de dilución (Turkel & Altuntas, 2009; Xu et al., 1993; Xu & Sarkar, 1994). Sin embargo, la mayor resistencia a la flexión se obtuvo con la dosificación MAC10. Esto se puede explicar debido a la reacción puzolánica de la ceniza (Felekoglu et al., 2006).



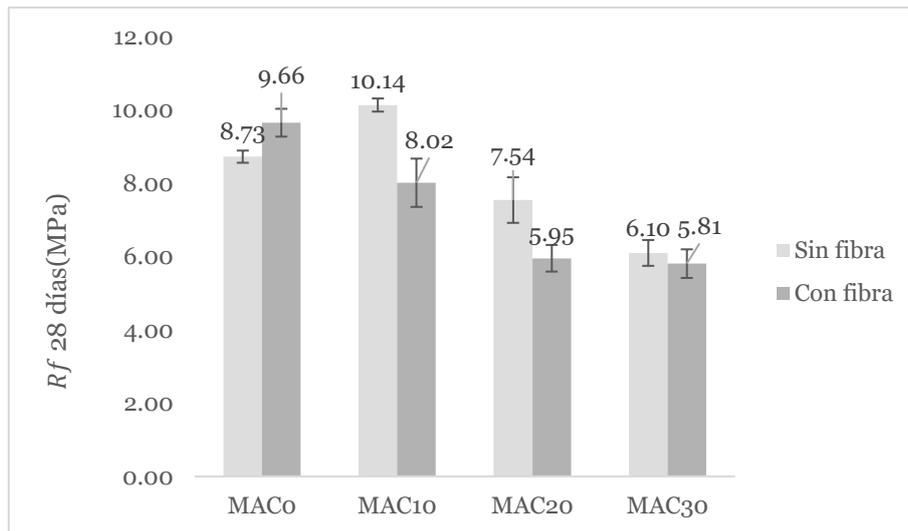


Figura 54. Resultados de ensayos de flexión a 7 y 28 días para dosificaciones con y sin agregado de fibras de polipropileno de 19 mm.

En la Figura 54 se muestra la comparación entre las dosificaciones con y sin fibra. A edades tempranas no se pudo observar cambios significativos en la resistencia debido al agregado de fibra de polipropileno, a excepción de la dosificación MAC0 donde se registró un leve aumento. A la edad de 28 días, se observó una disminución en la resistencia para las dosificaciones MAC10F y MAC20F respecto a sus correspondientes dosificaciones sin fibra, lo cual pudo deberse a defectos puntuales de la probeta originados durante el colado y preparación de la misma. En la Figura 55 y Figura 56 se muestra las superficies de fractura de las probetas de MAC10F y MAC20F respectivamente, en las cuales se puede observar macroporos debido a aire atrapado.



Figura 55. Dosificación MAC10F luego de la rotura.



Figura 56. Superficie de fractura de probeta preparada con la dosificación MAC20F.

3.4.3. COMPRESIÓN

En la Figura 57 se muestran los resultados para los ensayos de compresión. Se pudo observar un aumento en la resistencia a la edad de veintiocho días para todas las dosificaciones, y una tendencia a la disminución de la resistencia con el aumento del porcentaje de ceniza, posiblemente debido a un efecto de dilución (Turkel & Altuntas, 2009; Xu et al., 1993; Xu & Sarkar, 1994).

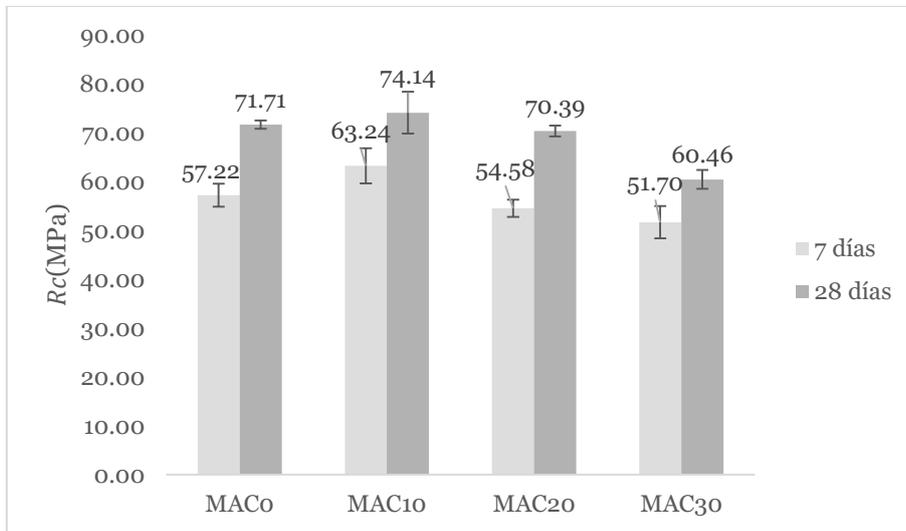
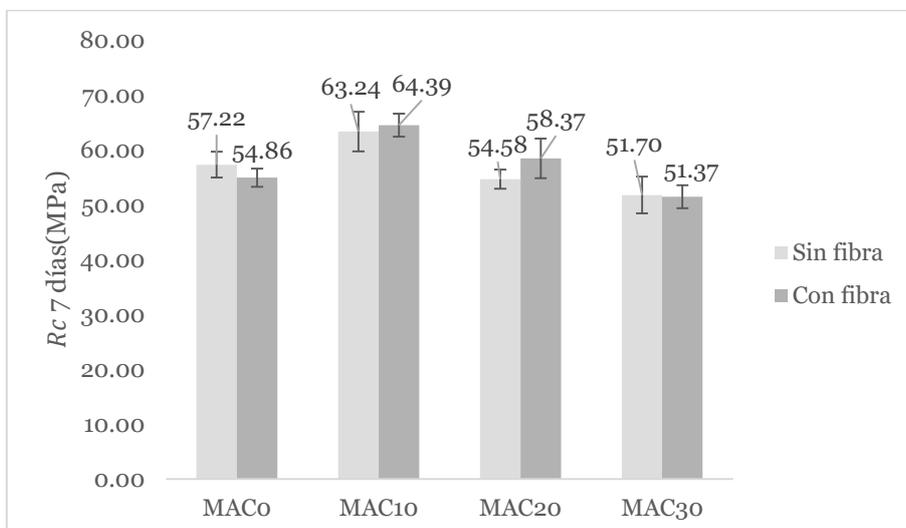


Figura 57. Resistencia a la compresión (en MPa) para probetas sin agregado de fibra.

Respecto al agregado de fibras, no se registraron cambios significativos en la resistencia a la compresión a 7 y 28 días (Figura 58).



Diseño de morteros autocompactantes reforzados con fibras poliméricas

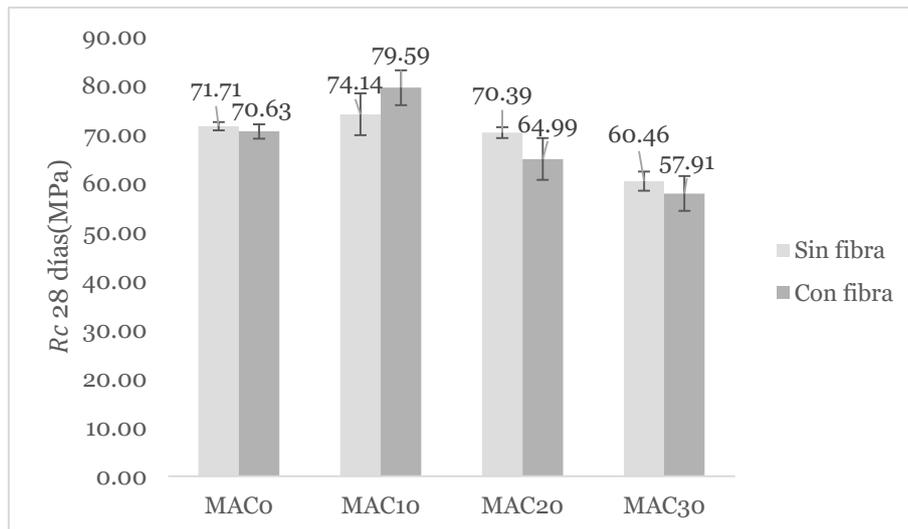


Figura 58. Efecto del agregado de fibras de polietileno en la resistencia a la compresión.

Se observó además un modo de rotura distinto entre las probetas con y sin fibra. En probetas ensayadas a compresión, la falla se produce por tensiones de tracción inducidas por la fricción con los platos de apoyo de la prensa hidráulica. Las fisuras comienzan a crecer a lo largo de la dirección de máximo esfuerzo de corte, por lo cual se produce una fisura diagonal que es similar en las cuatro caras libres si el espécimen falla correctamente. Este fue el caso de las probetas sin fibra (Figura 59). En el caso de las probetas con agregado de fibras, las mismas dificultan la propagación de las fisuras en diagonal (Lawler et al., 2003), por lo que se produce un abarrilamiento y posterior falla de la probeta (Figura 60).



Figura 59. Probeta sin agregado de fibra.



Figura 60. Abarrilamiento en probeta con fibra.

3.5. REALIZACIÓN DE NEGATIVO DE UNA PIEZA REAL

Se siguieron los lineamientos planteados en 2.6 para la realización del negativo con la dosificación MAC10F. Se eligió esta dosificación debido a que fue la que presentó las mejores propiedades en estado fresco y resistencia en estado endurecido a edades avanzadas (en flexión y en compresión). El resultado logrado fue óptimo (Figura 61), se pudo observar los detalles de la pieza decorativa con claridad, pudiendo incluso copiar los complicados relieves que la pieza poseía en la zona de los rayos solares.

Se pudo afirmar que la dosificación MAC10F es apta para fines decorativos o fabricación de piezas de geometría compleja por tres razones:

- Su gran capacidad de llenado de encofrados.
- El detalle logrado al copiar los distintos relieves de la pieza.
- No se observaron fisuras debido a la presencia de fibras de polipropileno.





Figura 61. Negativo de la pieza decorativa de yeso.

3.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

La implementación de materiales sostenibles en la sustitución del cemento Portland para la disminución de emisiones de CO₂ a la atmósfera se torna de especial importancia al momento de tomar medidas de reducción y/o compensación de estas emisiones. Desde este punto de vista, el impacto en la utilización de la ceniza volante en la industria del cemento y la construcción puede considerarse desde dos aristas. La primera, considerar que la ceniza volante es un subproducto de la industria de la generación termoeléctrica, por lo que la revalorización y reutilización de este tipo de desechos reduce la carga contaminante de las industrias que lo generan. La segunda visión el positivo impacto que genera sustituir el cemento, permitiendo reducir las enormes cantidades de emisiones perjudiciales para el ambiente que genera la producción del mismo (Mehta, 2001).

En el caso del presente trabajo, se consideró el factor de clinker como medida del impacto ambiental generado por la producción de cemento (Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, 2017). El clinker se obtiene de la calcinación de caliza y arcilla a temperaturas alrededor de los 1400 °C y es el principal componente del cemento Portland, que además contiene yeso, adiciones y rellenos para lograr los distintos tipos detallados en el reglamento CIRSOC 201. Con los datos de la producción de clinker y de cemento en un periodo de tiempo determinado (Tabla 18), se puede calcular el factor de clinker como el porcentaje de las toneladas producidas del mismo con respecto a las toneladas producidas

de cemento, el cual es deseable reducirlo al mínimo para mitigar el impacto ambiental que la producción de clinker genera.

Tabla 18

Producción de clinker y cemento en Argentina

	Producción de clinker (ton)	Producción de cemento (ton)	Factor de clinker (%)
1º semestre 2018	4516.6	5875.6	76.9

Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, 2018. Datos estadísticos.

A modo de ejemplo si se supone que se toma como referencia la dosificación MAC10 previamente desarrollada, el nuevo factor de clinker sería de un 69.2%, lo que representa una reducción de este índice de un 10%, lo que se traduciría en una reducción de la explotación de caliza y otras materias primas en canteras, y de combustibles utilizados en la fabricación del clinker.

Por otro lado, la matriz energética en Argentina se basa principalmente en la utilización de combustibles fósiles en centrales térmicas (Figura 62), por lo que la reutilización de subproductos de difícil tratamiento posterior como la ceniza volante se vuelve un tema de vital importancia para el medioambiente.

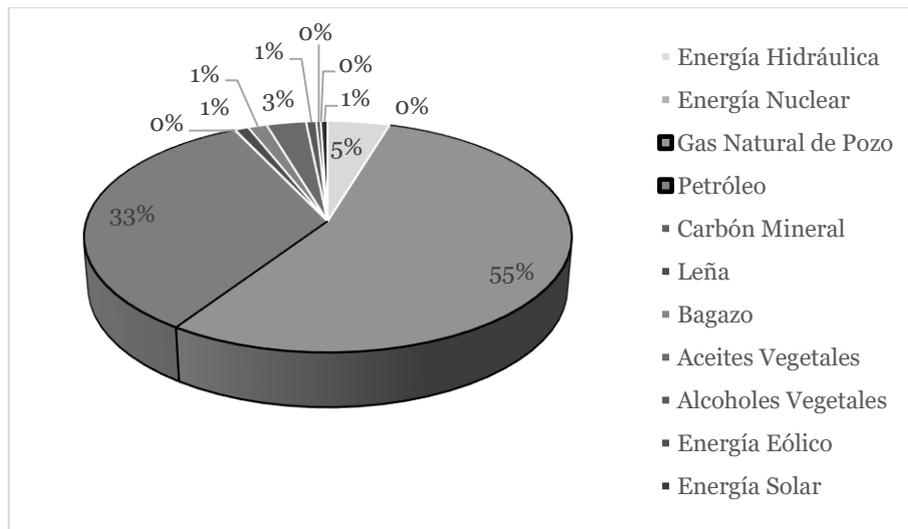


Figura 62. Matriz energética argentina durante 2018. Elaboración propia en base a datos publicados por el Ministerio de Desarrollo Productivo. <https://www.argentina.gob.ar/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>

3.7. ANÁLISIS DE COSTOS E IMPLEMENTACIÓN

Para el siguiente análisis, se tomó como referencia empresas de producción y distribución de hormigón elaborado de la localidad de Mar del Plata. En la Figura 63 se puede observar la incidencia de cada ítem en el costo final del producto.

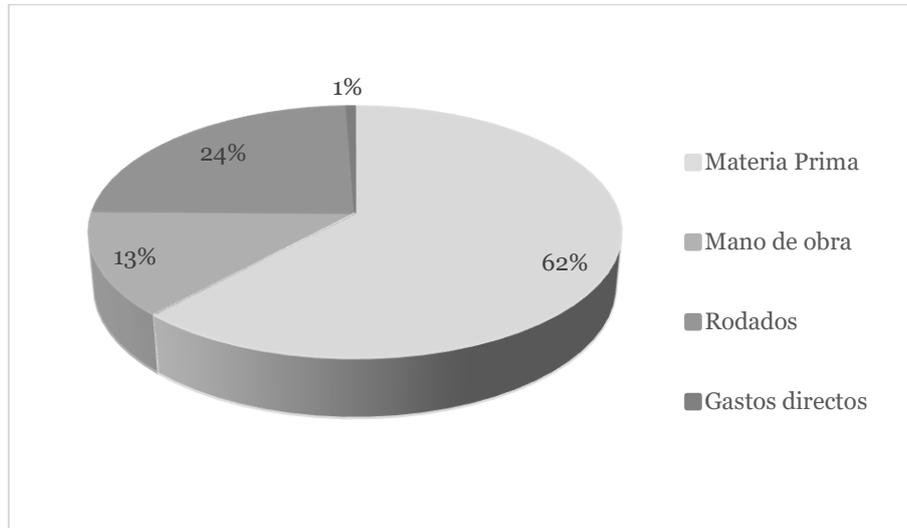


Figura 63. Estructura de costos. Elaboración propia en base a datos relevados en las empresas locales.

El costo de la materia prima puede subdividirse en el costo de producción de la misma y el costo de transporte desde el lugar de origen a la planta elaboradora de hormigón. El costo de mano de obra incluye el costo de hora-hombre con cargas sociales para el área de elaboración y entrega y el área de bombeo. El ítem rodados se puede desglosar en los costos de patentes, seguros, reparaciones y repuestos, mantenimiento, uso de combustibles y lubricantes, y la amortización de los equipos que se utilizan para transportar y/o bombear el hormigón. A su vez, los gastos directos están relacionados con costos fijos tales como luz, comunicaciones, y tasas e impuestos municipales.

Resulta evidente que la materia prima es la variable que juega el rol más preponderante a la hora de determinar el precio de mercado. En la Tabla 19 se muestran los costos unitarios de las materias primas en US\$ con el transporte a planta de acopio incluido.

Tabla 19

Costos de las materias primas utilizadas.

Materia prima	Precio unitario
Cemento CPC 40 Loma Negra	89.00US\$/ton
Arena de médano Tres Plantas	7.93US\$/ton
MAPEI Dynamon SR3	0.50US\$/litro
Ceniza Volante Matermix	51.60US\$/ton

Datos consultados directamente a las empresas distribuidoras. El costo de la ceniza volante fue tomado según los datos del trabajo de Farias-Linares, 2018.

Teniendo en cuenta la dosificación MAC₁₀, se puede calcular su costo por metro cúbico y compararla con la dosificación MAC₀ para determinar la incidencia del reemplazo de ceniza en el costo final (Tabla 20).

Tabla 20

Costos calculados a partir de las dosificaciones diseñadas

Materia prima	MAC ₀ (US\$/m ³)	MAC ₁₀ (US\$/m ³)
Cemento CPC 40 Loma Negra	72.40	68.60
Arena de médano Tres Plantas	9.70	9.30
MAPEI Dynamon SR3	2.65	2.40
Ceniza Volante Matermix	0.00	3.20
Total	84.75	83.50

Se determinó el ahorro de 1.25 US\$ por metro cúbico con la dosificación MAC₁₀. A esto se le puede sumar el costo de la fibra de 3.35Us\$/m³, resultando en un total de 86.85US\$/m³. A pesar de que la diferencia de costos no es significativa y la implementación de un sistema de almacenamiento y dosificación de ceniza volante en una planta elaboradora requiere de una inversión inicial alta en dólares (Fariás & Linares, 2018), las ventajas se presentan desde el punto de vista de la calidad del producto. El reemplazo de cemento por ceniza en un 10%

como volumen del polvo total mejoró las propiedades de trabajabilidad del mortero sin perder cohesión entre la pasta (agua más polvo) y el agregado fino (arena), lo que evita el fenómeno conocido como sangrado. Esto es de vital importancia para aplicaciones como la rehabilitación y reparación de estructuras, donde resulta necesaria la homogeneidad en las propiedades mecánicas de la zona reparada. Además, su elevada capacidad de relleno mejora la puesta en obra, facilitando el relleno de encofrados y el paso a través de armaduras, reduce costos por procedimientos de vibrado y su consecuente riesgo laboral sin modificaciones significativas en las propiedades mecánicas. Por su parte, el agregado de fibras de polipropileno contribuye a modificar el modo de rotura tanto en flexión como en compresión, ayudando al comportamiento post fisuramiento de la pieza.

4. CONCLUSIONES

Se logró caracterizar correctamente las materias primas utilizadas, mediante la implementación de técnicas basadas en el reglamento CIRSOC 201. Además, se caracterizó químicamente el cemento y la ceniza volante mediante la técnica de difracción de rayos X.

Se logró obtener cuatro formulaciones de mortero autocompactante con contenido de ceniza igual a 0, 10, 20 y 30% con respecto al volumen total del polvo. Como resultado del agregado de ceniza en sustitución por el cemento, se logró una reducción en el contenido de aditivo superfluidificante requerido para lograr MAC. A su vez, se obtuvieron cuatro formulaciones MAC adicionales con igual contenido de ceniza pero con el agregado de fibras de polipropileno.

Se realizaron ensayos de flexión y compresión en estado endurecido a siete y veintiocho días de curado. Se obtuvo resistencias similares en flexión a siete y veintiocho días para la formulación con un 10% de reemplazo de ceniza, con respecto a la dosificación basada solo en cemento Portland. El agregado de fibras no modificó significativamente las resistencias en estado endurecido, pero los modos de rotura se vieron modificados tanto en flexión (impidiendo que la probeta se separe en dos mitades) como en compresión (abarrilamiento por impedir el avance de fisuras diagonales) debido a su uso.

Por otro lado, se realizó el negativo de una pieza ornamental de yeso para verificar la capacidad del mortero autocompactante MAC10F con agregado de fibra de copiar una forma compleja. Los resultados se verificaron visualmente y fueron óptimos.

Se analizaron algunos aspectos económicos y ambientales en la utilización de la formulación MAC10, resultando en una disminución de las emisiones de CO₂ y en costos similares a la formulación sin agregado de ceniza.

5. TRABAJOS A FUTURO

Caracterizar químicamente las probetas a 7 y 28 días para determinar las fases que se generan con el reemplazo de cenizas, y así poder correlacionarlas con las propiedades en estado endurecido.

Generar dosificaciones con distinta relación agua/cemento para determinar su influencia en la demanda de aditivo y las resistencias finales.

Diseñar dosificaciones basadas en mezclas de fibras de diferentes tamaños para observar su influencia en la resistencia y los mecanismos de iniciación y propagación de fisuras.

Realizar ensayos de fractura para visualizar la influencia de las fibras de polipropileno en la velocidad de propagación de fisuras.

Evaluar el efecto del contenido de ceniza y de fibras sobre la formación de fisuras por secado durante el endurecimiento.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación de Fabricantes de Cemento Portland. (2017). *Informe de sostenibilidad*.
- Asociación de Fabricantes de Cemento Portland. (2018). *Datos estadísticos*.
- Balzamo, H. (2012). *Ese material llamado hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Banfill, P. F. G. (1994). *Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials*. 8(1), 43–50.
- Becker, E. (n.d.). *Cemento Portland Compuesto - Propiedades y recomendaciones de uso*. Loma Negra.
- Benaicha, M., Jalbaud, O., Roguiez, X., Alaoui, A. H., & Burtschell, Y. (2015). Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1181–1191. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.08.002>
- Benli, A., Karatas, M., & Bakur, Y. (2017). Durability and Strength Properties Self-Compacting Mortars with High-Calcium Fly Ash and Silica Fume. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 7(2), 647–657. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v7i2.990>
- Chancey, R. T., Stutzman, P., Juenger, M. C. G., & Fowler, D. W. (2010). Cement and Concrete Research Comprehensive phase characterization of crystalline and amorphous phases of a Class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.029>
- Conforti, A., Zerbino, R., & Plizzari, G. A. (2018). Influence of steel , glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure. *Structural Concrete*, May, 1–11. <https://doi.org/10.1002/suco.201800079>
- DaSilva, P. R., & DeBrito, J. (2015). Fresh-state Properties of Self-compacting Mortar and Concrete with Combined Use of Limestone Filler and Fly Ash. *Materials Research*, 18(October), 1097–1108.
- Dubey, R., & Kumar, P. (2013). Effect of Fly Ash on Water / Powder Ratio and Superplasticizer Dosage in Self-Compacting Mortars. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 2(1), 55–62. <https://doi.org/10.7492/IJAEC.2013.006>
- EFNARC. (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. February.
- Fariás, M. M., & Linares, M. (2018). *Diseño de Hormigones Autocompactantes Basados en Adiciones Minerales*. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Felekoglu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., & Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Research*, 36, 1719–1726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>

- Gesoglu, M., Guneyisi, E., & Ozbay, E. (2008). Properties of self-compacting concretes made with binary , ternary , and quaternary cementitious blends of fly ash , blast furnace slag , and silica fume. *Construction and Building Materials*, 23(November), 1847–1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015>
- Halder, B. K., Tandon, V., Tarquin, A., & Chintalapalle, R. V. (2013). *Influence of Coal Fly Ash on Mechanical Properties of Mortar Consisting of Total Dissolved Solids*. April.
- Hu, J., & Wang, K. (2011). Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.035>
- Khaleel, O. R., & Razak, H. A. (2013). Mix Design Method for Self Compacting Metakaolin Concrete with Different Properties of Coarse Aggregate. *Journal of Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.072>
- Kumar, P. R., & Srikanth, K. (2008). Mechanical characteristics of fiber reinforced self compacting mortars. *Asian Journal of Engineering (Building and Housing)*, 9(6), 647–657.
- Lawler, J. S., Wilhelm, T., Zampini, D., & Shah, S. P. (2003). Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 36(April), 197–208.
- Mahdikhani, M., & Ramezaniyanpour, A. A. (2015). New methods development for evaluation rheological properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 75, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.094>
- Mehta, P. K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International, October*, 61–66.
- Neophytou, M. K., Pourgouri, S., Kanellopoulos, A. D., Petrou, M. F., Ioannou, I., Georgiou, G., & Alexandrou, A. (2010). Determination of the rheological parameters of self-compacting concrete matrix using slump flow test. *Applied Rheology*, 20(February). <https://doi.org/10.3933/ApplRheol-20-62402>
- Nepomuceno, M., Oliveira, L., & Lopes, S. M. R. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 26(1), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027>
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15.
- Oktay, D., Akturk, B., & Kabay, N. (2014). *Properties of Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibers* *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma* 32 ,. January.
- Ossa, M. M., & Jorquera, H. S. (1984). Cementos con cenizas volantes. *Materiales de Construcción*, 34(193). <https://doi.org/10.3989/mc.1984.v34.i193.956>

- Pan, J., Li, F., & Zhang, X. (2014). *Effect of Polypropylene Fiber on the Properties of Cement Mortar*. 921, 1903–1907. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1903>
- Poinot, T., Bartholin, M., Govin, A., & Grosseau, P. (2015). Influence of the polysaccharide addition method on the properties of fresh mortars. *Cement and Concrete Research*, 70, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.004>
- Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(June), 2031–2036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00222-9)
- Ramme, B. W., & Tharaniyil, M. P. (2013). *Coal Combustion Products Utilization Handbook* (3rd ed.). We Energies.
- Safiddine, S., Debieb, F., Menadi, B., & Soualhi, H. (2017). Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar. *Applied Rheology*, 27(1), 12–10. <https://doi.org/10.3933/ApplRheol-27-14490>
- Schiopetto, F. (2015). *Proyecto Final Hormigones autocompactantes (HAC)*. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials and Design*, 32(3), 1501–1507. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.043>
- Torre, A. C. (2004). *Curso básico de tecnología del concreto*. Universidad Nacional de Ingeniería de Lima.
- Tuaum, A., Shitote, S., & Oyawa, W. (2018). Experimental study of self-compacting mortar incorporatinf recycled glass aggregate. *Buildings*, i. <https://doi.org/10.3390/buildings8020015>
- Turk, K. (2012). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.081>
- Turkel, S., & Altuntas, Y. (2009). The effect of limestone powder , fly ash and silica fume on the properties of self-compacting repair mortars. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 34(2), 331–343. <https://doi.org/10.1007/s12046-009-0011-3>
- Vimonsatit, V., Chindaprasirt, P., Ruangsiriyakul, S., & Sata, V. (2015). Influence of fly ash fineness on water requirement and shrinkage of blended cement mortars. *KKU Engineering Journal*, 42(4), 311–316. <https://doi.org/10.14456/kkuenj.2015.37>
- Wibowo, N. A. (2019). Designing of Flow Mortar Design Mix for Self Compacting Concrete (SCC) with FWC = 0 . 4. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 5(1), 39–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.22146/jcef.41014>
- Xu, A., & Sarkar, S. L. (1994). Microstructural development in high-volume fly-

- ash cement system. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(1), 117–136.
- Xu, A., Sarkar, S. L., & Nilsson, L. O. (1993). Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar. *Materials and Structures*, 26, 414–424.
- Yepes, J. C., Tolbón, J. I., & Rojas, N. (2018). Effect of fly ash and silica fume on rheology, compressive strength and self-compacting in cement mixtures. *DYNA (Colombia)*, 85(206), 59–68. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68960>
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral mixtures. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.050>

Anexo – Fichas Técnicas

Informe Técnico

O.T. N° 101-27895 1° PARCIAL
Página 1 de 1

Fecha de Informe: 20/04/2018

Solicitante: MATERMIX S.R.L.

Domicilio: Av. de Mayo 580 – Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Elemento

Material	Cantidad aproximada	Identificación usuario	Identificación T.H.
Ceniza Volante (C.V)	1 bolsa con 20 kg	Ceniza Volante	2322

Determinaciones requeridas

Caracterización de ceniza volante. Plan de verificaciones anuales según Norma IRAM 1654-1.
1° muestra de 3

Fecha de Recepción: 15/12/2017

Fecha de ensayo: 28/12/2017 al 18/04/2018

Metodología empleada: Normas IRAM 1654-1:2015 Mod.N°1:2016-IRAM 1668:2015

Informe

Con el objeto de realizar el control periódico de ceniza volante, el solicitante extrajo la muestra 1 de 3 anuales en lugar de origen que fue remitida a los laboratorios de INTI Construcciones UTTH para evaluar su desempeño según los requisitos de la norma IRAM 1668:2015.

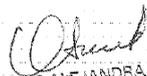
Para la muestra denominada "Patrón" se utilizó un cemento CPN 40 provisto por la UTTH. Los resultados se incluyen en la tabla siguiente.

Ensayos Físicos		Normas IRAM	Unidad	Patrón	C. V. TH2322	Requisito IRAM 1668
Densidad		1654-1:2015 Mod.N°1:2016	g/cm ³	3,11	2,28	-
Superficie Específica			m ² /kg	342	356	Mín.300
Requerimiento de agua. (R=agua muestra CV / agua muestra patrón* 100 %)			%	---	100,0	Máx. 115
Ensayos Mecánicos		Normas IRAM	Unidad	Patrón	C.V. TH2322	Requisito IRAM 1668
Resistencia a compresión	28 días	1654-1:2015 Mod.N°1:2016	MPa	51,0	49,7	-
Índice de Actividad Puzolánica (Resist. Compresión _{TH} /Resist. Compresión _{patrón}): 100%				%	---	97,5

Nota: Los valores de resistencia a la compresión informados corresponden al promedio de los valores de resistencia individuales obtenidos. El cálculo del Índice de Actividad Puzolánica se realizó con el promedio.
Los ensayos de compresión se realizaron con una prensa marca TONINDUSTRIE modelo TONI COMP III, tipo 1511-002, calibrada en noviembre del 2017. La apreciación es de 0,01 kN para compresión. La velocidad de carga está dentro del rango indicado por la norma.

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a las condiciones en las que se realizaron las mediciones y/o ensayos.

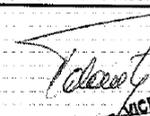
Fin del Informe

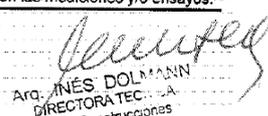

ING. ALEJANDRA BENITEZ
Coord. UT. Tecn. del Hormigón.
INTI - Construcciones

Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del INTI. Los resultados consignados se refieren exclusivamente a los elementos recibidos, el INTI y su Centro de Investigación y Desarrollo en Construcciones declinan toda responsabilidad por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

www.inti.gov.ar
consultas@inti.gov.ar
0800 444 4004
Facebook/INTI
Twitter @INTIArgentina


ING. VICENTE L. VOLANTINO
DIRECCIÓN
INTI - CONSTRUCCIONES


Arq. INÉS DOLMANN
DIRECTORA TÉCNICA
INTI - Construcciones

Sede Parque Tecnológico Miguelete
Avenida General Paz 5445
Castilla de Correo 157
B1650WAB San Martín,
Prov. de Buenos Aires, República Argentina
Teléfono (54 11) 4724 6350
E-mail construcciones@inti.gov.ar



Dynamon SR3

Superfluidificante de base acrílica modificada para hormigón elaborado, caracterizados por un largo mantenimiento de la trabajabilidad

DESCRIPCIÓN DE PRODUCTO

Dynamon SR3 es un aditivo de base acrílica modificada, específico para hormigón elaborado, perteneciente al nuevo sistema MAPEI Dynamon SR.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Gracias a su elevada trabajabilidad, los hormigones confeccionados con Dynamon SR3 resultan de fácil colocación en obra en su estado fresco y de elevadas prestaciones mecánicas en estado endurecido. Dynamon SR3 está indicado particularmente en los sectores del hormigón elaborado y donde sea necesaria una fuerte reducción de agua, acompañada por un buen desarrollo de las resistencias mecánicas en tiempos cortos combinados con un largo mantenimiento de la trabajabilidad en las diferentes clases de consistencia. Sus prestaciones lo hacen particularmente idóneo también para la realización de hormigones autocompactantes, ya que Dynamon SR3 está en poder de garantizar una elevada fluidez y al mismo tiempo no produce disminuciones significativas del desarrollo de las resistencias mecánicas del hormigón en tiempos cortos.

Los mayores campos de aplicación de Dynamon SR3 son la producción de hormigón elaborado:

- de altas prestaciones mecánicas y larga conservación de la trabajabilidad;
- de clase de resistencia R_{ck} 25-50 N/mm²;
- destinado a obras impermeables y duraderas en las clases de exposición previstas de acuerdo a la norma EN 206-1;
- autocompactante.

Dynamon SR3, en combinación con el aditivo modificador de viscosidad de la gama Viscostar o Viscofluid, permite la obtención de hormigones autocompactantes que pueden ser colocados en obra sin ninguna vibración, con una elevada velocidad de colada, gracias a las propiedades de fluidez y de resistencia a la segregación.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Dynamon SR3 es una solución acuosa de polímeros acrílicos (sin formaldehídos) capaces de dispersar eficazmente los gránulos de cemento y de favorecer un desarrollo lento de los productos de hidratación del cemento

MODO DE UTILIZACIÓN

Dynamon SR3 desarrolla la máxima acción dispersante cuando es añadido después de los otros componentes de la mezcla (cemento, áridos, minerales o filler y al menos un 80% del agua de la mezcla).

COMPATIBILIDAD CON OTROS PRODUCTOS

El aditivo Dynamon SR3 es compatible con otros productos para la producción de hormigones especiales y en particular con:

- los aditivos modificadores de viscosidad Viscostar o Viscofluid Spara la realización de hormigones autocompactantes;
- los aditivos aceleradores de endurecimiento sin cloruros de la gama Mapefast para la consecución de altas resistencias mecánicas a las edades tempranas y con climas fríos;
- aditivos aireantes de la gama Mapeair AE, para la producción de hormigones resistentes a los ciclos de congelación/deshielo;
- con el aditivo en polvo Mapeplast SF, a base de microsilice para la producción de hormigones de alta calidad; que garantizan resistencia mecánica, impermeabilidad y durabilidad;
- el agente expansivo Expancrete para la producción de hormigones de retracción compensada;
- la ceniza volante para la producción de hormigones tradicionales y autocompactantes;
- filler calizos y de otra naturaleza para la realización de hormigones autocompactantes y de cualquier tipo que necesiten tal aditivación;



Dynamon SR3

DATOS TÉCNICOS (valores característicos)	
DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO	
Consistencia:	líquido
Color:	ámbar
Densidad según ISO 758 (g/cm ³):	1.07 ± 0.02 at +20°C
Acción principal:	aumento de la trabajabilidad y/o reducción del agua de la mezcla, mantenimiento de la trabajabilidad para largos periodos
Clasificación según EN 934-2:	retardante de fraguado, superfluidificante, reductor de agua de alta eficacia, prospectos 11.1 y 11.2
Clasificación según ASTM C494:	tipo G
Clasificación según ASTM C1017:	tipo II
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%):	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de álcalis (Na ₂ O equivalente) según EN 480-12 (%):	< 2.5
ph según ISO 4316:	6.0 ± 1.0

- desencofrante de las gamas **Mapeform Eco** y **DMA** para el desmoldeado del hormigón de los encofrados;
- los curadores de la gama **Mapecure** para la protección de la rápida evaporación del agua de la mezcla de estructuras de hormigones no encofrado (pavimentaciones).

Nuestro Departamento de Asistencia Técnica está disponible para evaluar cual mezcla es la más adecuada para la fabricación de hormigones resistentes a ciclos de hielo/deshielo, dependiendo de el tipo de cemento utilizado.

CONSUMO

Dosificación en volumen:
de 0,5 a 1 litro por cada 100 kg de cemento para hormigones tradicionales. Dosis diferentes de las recomendadas deben ser previamente verificadas mediante pruebas en hormigón y bajo las recomendaciones del equipo de Asistencia Técnica MAPEI.

PRESENTACIÓN

Dynamon SR3 se suministra a granel, en tambores de 210 kg y cisternas de 1000 kg.

ALMACENAMIENTO

Dynamon SR3 se conserva 12 meses en recipientes cerrados y protegidos del hielo. La exposición directa a los rayos solares puede provocar una variación cromática, sin que esto perjudique de algún modo las características prestacionales del producto.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN Y LA APLICACIÓN EN OBRA

Dynamon SR3 no se considera peligroso de acuerdo con la normativa de clasificación de las mezclas. Se recomienda usar guantes y gafas de protección y tomar las precauciones habituales tomadas para el manejo de productos químicos. Para más información y completa sobre el uso seguro de nuestros productos por favor consulte la versión más reciente de nuestra Ficha de Seguridad.

PRODUCTO DE USO PROFESIONAL.

ADVERTENCIA

Las informaciones y prescripciones anteriores, aunque corresponden a nuestra mejor experiencia, deben considerarse, en cualquier caso, como meramente indicativas y sujetas a confirmación mediante aplicaciones prácticas. Por tanto, quien tenga intención de usar este producto, debe de asegurarse de antemano que es adecuado para la utilización prevista. En cualquier caso el usuario será totalmente responsable de cualquier consecuencia derivada de su uso.

La versión actualizada de la ficha técnica está disponible en la web www.mapei.com.ar

Las referencias relativas a este producto están disponibles bajo solicitud y en la web de Mapei www.mapei.com.ar y www.mapei.com

La reproducción de textos, fotografías e ilustraciones de esta publicación está totalmente prohibida y será perseguida por la ley

676-5-2016 (AR)



EL COMPAÑERO MUNDIAL DE LOS CONSTRUCTORES