

Hormigones sostenibles obtenidos por redosificación de hormigón fresco residual



UNMDP - Facultad de Ingeniería - Departamento de Ingeniería en Materiales

Autor: Iván Gastón Manchenkor

DNI: 39.966.367; Legajo: 11.434

Mail de contacto: manchenkorivan@gmail.com

Director: Dr. Pablo Stefani

Codirectora: Ing. Ana Paula Bertone

Proyecto final para obtener el grado de

INGENIERO EN MATERIALES

Mar del Plata, 17 de diciembre de 2024



RINFI es desarrollado por 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/).

Hormigones sostenibles obtenidos por redosificación de hormigón fresco residual



UNMDP - Facultad de Ingeniería - Departamento de Ingeniería en Materiales

Autor: Iván Gastón Manchenkor

DNI: 39.966.367; Legajo: 11.434

Mail de contacto: manchenkorivan@gmail.com

Director: Dr. Pablo Stefani

Codirectora: Ing. Ana Paula Bertone

Proyecto final para obtener el grado de

INGENIERO EN MATERIALES

Mar del Plata, 17 de diciembre de 2024

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Mar del Plata, por brindarme la oportunidad de formarme tanto en lo académico como en lo personal. Agradezco también a mis compañeros de facultad, muchos de los cuales hoy son amigos invaluable que, de una u otra forma, contribuyeron a que llegue a este momento.

Al Dr. Pablo Stefani, director de este proyecto, por haber tenido la iniciativa de desarrollarlo y haberme brindado la oportunidad de llevarlo a cabo. En un momento en que no tenía un proyecto definido, él se encargó de encontrar la mejor opción para mí. Su constante disponibilidad para aclarar dudas y su aporte desde su experiencia han sido fundamentales en el desarrollo de esta tesis.

A la empresa DHASA, por considerar y aportar todo lo necesario para realizar el proyecto. Y en especial a la codirectora del proyecto, Ing. Ana Paula Bertone, por haber aceptado el desafío de buscar nuevas alternativas en conjunto con un estudiante, sin estar obligada a hacerlo. Agradezco su disposición para escuchar, darme consejos y ayudarme en todo momento, desde explicarme los aspectos más básicos del hormigón hasta profundizar en los más complejos. Agradezco también a David, Leandro y Maximiliano, del laboratorio de DHASA, quienes me enseñaron y asistieron en el día a día, ayudándome siempre con cualquier duda que surgiera.

Finalmente, en especial a mis padres, a quienes les debo todo. Sin su apoyo constante, no habría podido llegar hasta aquí. Este título en gran parte les pertenece a ellos.

Resumen

En este trabajo se diseñó un protocolo para la reutilización del hormigón fresco residual que retorna a la planta de elaboración. El objetivo principal fue incorporarlo en nuevas mezclas de concreto, minimizando el impacto ambiental asociado a su disposición final y reduciendo los costos de producción. En este estudio se utilizó un hormigón (base) con resistencia a la compresión característica de 30 MPa (H-30), por ser la formulación más empleada en la zona. Se evaluó el desempeño de este hormigón al sustituir en 10%, 20% y 30% en peso con hormigón fresco residual. Para ello, se analizaron las propiedades relevantes de los agregados y de los materiales de partida utilizados en el diseño. Sobre la formulación base se determinaron propiedades en estado fresco, tales como densidad, contenido de aire, asentamiento y tiempo de fraguado. En particular, se estudió la variación del asentamiento en el tiempo, simulando en laboratorio las condiciones de transporte a obra y el eventual retorno a planta. Asimismo, se evaluaron las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones que incorporan el residuo. La inclusión del hormigón fresco residual no generó cambios significativos en la resistencia a la compresión de los hormigones sostenibles. Finalmente, el análisis económico evidenció un ahorro considerable en los costos de producción, consolidando este método como una alternativa sostenible y viable para la industria.

Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	4
Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas.....	10
Nomenclatura.....	12
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. General.....	18
1.2.2. Específicos.....	18
1.3. Estructura de la tesis.....	18
Capítulo 2. Materiales y métodos.....	20
2.1. Materiales.....	20
2.1.1. Agregados naturales.....	20
2.1.2. Otros materiales componentes.....	20
2.1.2.1. Cemento Portland Compuesto (CPC 40).....	20
2.1.2.2. Aditivos reductores de agua y aditivo superfluidificante.....	21
2.1.2.3. Agua de amasado.....	21
2.2. Métodos de ensayos de agregados.....	21
2.2.1. Método de cuarteo.....	21
2.2.2. Análisis granulométrico.....	22
2.2.3. Cálculo de absorción y densidad de los agregados.....	23
2.2.3.1. Agregado fino.....	23
2.2.3.2. Agregado grueso.....	24
2.3. Métodos de ensayos para el hormigón en estado fresco.....	25
2.3.1. Determinación del peso por unidad de volumen (PUV).....	25

2.3.2. Método para determinar el contenido de aire total en el hormigón fresco.....	26
2.3.3. Determinación de tiempos de fraguado del hormigón.....	27
2.3.4. Medición del asentamiento mediante el cono de Abrams.....	29
2.3.5. Preparación y caracterización de pastones.....	29
2.4. Métodos de ensayos para el hormigón en estado endurecido.....	30
2.4.1. Confección de probetas y curado.....	30
2.4.2. Resistencia a la compresión de probetas normalizadas.....	32
2.5. Análisis estadístico ANOVA.....	32
Capítulo 3. Caracterización de materiales de partida.....	33
3.1. Granulometría de los agregados.....	33
3.2. Densidad y absorción.....	36
Capítulo 4. Hormigones sostenibles.....	37
4.1. Propuesta de protocolo de reciclado.....	37
4.2. Estudio de la formulación base.....	39
4.2.1. Propiedades del hormigón en estado fresco.....	42
4.2.2. Propiedades del hormigón en estado endurecido.....	47
4.3. Estudio sobre el reciclado de hormigón.....	48
4.3.1. Propiedades del hormigón reciclado en estado fresco.....	48
4.3.2. Propiedades del hormigón reciclado en estado endurecido.....	49
Capítulo 5. Evaluación económica.....	53
Conclusiones.....	55
1. Conclusiones generales.....	55
2. Estudios futuros.....	56
Referencias Bibliográficas.....	57
Anexo.....	64
1.1. Planilla de reciclado.....	64
1.2. Fichas técnicas.....	67

1.2.1. Cemento Portland.....	67
1.2.2. Plastificante y aditivo reductor de agua.....	71
1.2.3 Aditivo superplastificante.....	74
1.3. Ensayos de agua fueron realizados según Norma IRAM 1601.....	76

Índice de Figuras

Figura 1.1. Diagrama de flujo de los cuatro métodos de reciclado del hormigón en estado fresco.....	15
Figura 2.1. Acopio de agregados: a) Arena de trituración 0/6 C; b) Arena fina; y c) Piedra cuarcítica 6-20.....	20
Figura 2.2. Método de cuarteo.....	22
Figura 2.3. Tamices normalizados.....	22
Figura 2.4. Agregado fino: a) Condición saturada; y b) Condición SSS.....	23
Figura 2.5. Agregado grueso: a) Cesta + agregados; b) Cesta sumergida en agua; y c) Pesaje de los agregados sumergidos.....	25
Figura 2.6. Recipiente con hormigón para determinar el PUV.....	26
Figura 2.7. Aparato de Washington.....	27
Figura 2.8. Probetas obtenidas del ensayo de tiempos de fragüe.....	28
Figura 2.9. Medida de asentamiento con cono de Abrams.....	29
Figura 2.10. Moldes de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.....	30
Figura 2.11. Moldes listos cubiertos con plástico.....	31
Figura 2.12. Curado de probetas.....	31
Figura 2.13. Compresión probetas: a) Máquina de ensayos “CONTROLS”; y b) Colocación de probeta para compresión.....	32
Figura 3.1. Granulometría de todos los agregados.....	33
Figura 3.2. Granulometría de la mezcla de finos.....	35
Figura 3.3. Granulometría de AGN.....	35
Figura 4.2. Granulometría del agregado total.....	42
Figura 4.3. Curvas de fragüe.....	44
Figura 4.4. Asentamiento vs. t. para la formulación base.....	45
Figura 4.5. Asentamiento vs. t. con adición de N150.....	46

Figura 4.6. Curva de maduración - Formulación base.....	47
Figura 4.7. Curva maduración para los distintos porcentajes en peso de reciclado.....	50
Figura 4.8 Tipo de rotura de probetas.....	51
Figura 4.9. Tipo de rotura probetas recicladas: a) Tipo 5 - 10%; b) Tipo 4 - 20%; y c) Tipo 4 - 30%.....	52

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Granulometría de los agregados.....	34
Tabla 3.2. Propiedades de los agregados naturales.....	36
Tabla 4.1. Dosificación en kg por m ³ de hormigón. Los agregados se encuentran en estado saturado superficie seca.....	39
Tabla 4.2. Contribución de cada agregado a agregado total.....	40
Tabla 4.3. Análisis granulométrico.....	41
Tabla 4.4. Propiedades de los pastones con la formulación base.....	43
Tabla 4.5. Propiedades del hormigón con distintos porcentajes en peso de reciclado.....	48
Tabla 4.6. Resistencia mecánica del hormigón con la formulación base y reciclado.....	49
Tabla 5.1. Evaluación económica de la formulación base.....	53
Tabla 5.2. Costo total y ganancia por m ³ utilizando hormigón reciclado.....	54
Tabla 1A. Modelo base de planilla para obtener hormigón reciclado.....	65

Nomenclatura

PUV: peso por unidad de volumen del hormigón

MF: módulo de finura

TM: tamaño máximo nominal

AF: arena fina

ATC: arena de trituración 0-6 cuarcítica

AGN: agregado grueso 6-20 cuarcítico

a/c: razón agua/cemento (en peso)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El hormigón es el material estructural más utilizado en la industria de la construcción debido a su durabilidad, rigidez, resistencia a la compresión y su versatilidad para adquirir diferentes formas. En el año 2023, la producción mundial de cemento y hormigón fueron de 4140 y 27000 millones de toneladas, respectivamente (USGS, 2024). Este crecimiento del consumo de cemento y hormigón a escala global se debe en particular a países emergentes como China (USGS, 2024).

El hormigón convencional contiene aproximadamente un 12% de cemento y 78% de agregados en masa. Posee una matriz cementicia que está compuesta de la mezcla de cemento Portland y agua que puede incluir algún tipo de aditivo (Corbu et al., 2023). Inmediatamente después de incorporar el agua a la mezcla, comienza el proceso de hidratación del cemento. En estado fresco, el hormigón se comporta como un fluido de Bingham hasta alcanzar el fragüe donde comienza a comportarse como un sólido rígido (estado endurecido). A medida que continua la reacción de hidratación se rigidiza y su resistencia aumenta. En estado endurecido, la matriz está compuesta por los productos de hidratación del cemento (silicato de calcio hidratado e hidróxido de calcio como principales componentes) con la presencia de una red de poros y capilares originados durante el proceso de compactación, exudación y equilibrio higrométrico con el medio ambiente (Zhuguo, 2022). Esta red capilar es muy importante en cuanto a la durabilidad y resistencia del hormigón. A mayor volumen de red capilar, más baja resistencia y mayor permeabilidad lo que facilita el ingreso de sustancias nocivas que dañan el hormigón como por ejemplo cloruros, sulfatos, etc. (Ammar et al., 2024). Las propiedades del hormigón dependen en gran medida de sus componentes y de las proporciones entre ellos, destacándose la razón agua/cemento (a/c) como la más significativa. En estado fresco, el hormigón debe poder llenar y compactarse sin perder cohesividad (sin segregación de los agregados gruesos), evitando así una disminución en su homogeneidad. En estado endurecido, la resistencia a la compresión es la propiedad fundamental no solo por su importancia inherente, sino también porque influye en otras características y la resistencia al desgaste (Di maio et al., 1999; Ortiz, 2021).

Uno de los problemas principales asociados al hormigón es que su producción genera un impacto negativo sobre el medio ambiente. Según un informe publicado por *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) en 2022, la mayoría de las emisiones en el sector de la construcción son emisiones de gases de CO₂ (IPCC, 2022). La producción de cemento es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO₂, lo que se traduce en la emisión de entre 0,8 y 1,2 toneladas de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento fabricado (GCCA, 2023; Schust et al., 2022). Además, la extracción de agregados naturales, que incluye arenas y grava, representa la mayor parte de los sólidos inorgánicos extraídos del planeta, siendo el 46% de estos utilizados en combinación con cemento Portland (USGS, 2021; Garside, 2021). Es muy importante además resaltar que los costos de extracción y producción de estos recursos desafortunadamente está subvalorado dado que no consideran el impacto ambiental asociado (Schust et al., 2022).

Dentro de este panorama, la eliminación de residuos de hormigón fresco también merece atención debido a su gran cantidad y naturaleza no biodegradable. Aproximadamente el 2% de la producción mundial de hormigón, equivalente a 540 millones de toneladas anuales, regresa a las plantas de producción como sobrante y, en la mayoría de los casos, se descarta como desecho (Bassani et al., 2019; Ulubeyli et al., 2016; Schust et al., 2022). Este retorno genera un problema significativo, ya que el método tradicional de eliminación, que consiste en depositar estos residuos en vertederos, tiene severas implicancias ambientales. El contenido alcalino, como el hidróxido de calcio derivado de la hidratación del cemento, puede causar quemaduras en la piel y contaminar aguas subterráneas. Asimismo, la presencia de metales pesados, como el cromo y el estroncio, provenientes de aditivos químicos, representa una grave amenaza para los ecosistemas (Prahallada, 2011). Por lo tanto, identificar las principales causas generadoras de residuos de hormigón es fundamental. Entre estas se encuentran: (i) pedidos excesivos, (ii) pérdidas durante el transporte, (iii) residuos generados en la instalación, (iv) deficiencias en la mano de obra y (v) cambios en el diseño (Luangcharoenrat et al., 2019).

En este contexto, es evidente la importancia de lograr una mayor sostenibilidad en la industria del hormigón, reciclando sus principales residuos dado su alto volumen de producción (Orhon, 2012; MIT, 2023).

En una revisión realizada por Wang et al. (2018), se identificaron cuatro métodos principales para el reciclaje del hormigón fresco residual (*Figura 1.1*). Estos métodos buscan aprovechar tanto los componentes cementicios como los agregados presentes en el material.

Uno de los métodos más comunes consiste en descargar el hormigón fresco sobre el suelo, donde se deja asentar y endurecer. Posteriormente, se tritura para obtener partículas clasificadas como agregados gruesos y finos reciclados. Estos agregados se emplean principalmente en proyectos viales, donde contribuyen a mejorar la durabilidad de las estructuras y reducen la necesidad de materiales vírgenes (Titi et al., 2024).

Otro método aplicado al hormigón fresco residual consiste en separar sus componentes mediante equipos de sedimentación. Este proceso permite recuperar los agregados para ser reutilizados en nuevas formulaciones, mientras que el lodo resultante se deshidrata y compacta en tortas. Estas tortas, una vez endurecidas, se trituran y muelen para obtener polvo cementicio que puede ser empleado en la fabricación de elementos prefabricados no estructurales, como bloques y ladrillos. Estos productos, moldeados mediante vibrocompresión, alcanzan densidades y resistencias comparables a las de los materiales fabricados con agregados vírgenes (Merino et al., 2023).

Un enfoque más eficiente y menos costoso consiste en reciclar el hormigón fresco mediante el uso de polímeros superabsorbentes no tóxicos. Este aditivo transforma el excedente en un material granular que puede utilizarse como agregado en nuevas mezclas. Este método, además de ser seguro, mantiene el desempeño estructural del concreto y representa una solución viable para minimizar el desperdicio (Ferrari, 2014, Schust et al., 2022).

Una alternativa particularmente interesante consiste en reincorporar directamente el hormigón fresco devuelto a planta en nuevas mezclas. En este caso, el hormigón actúa como material cementicio parcialmente hidratado, acelerando el fraguado y el endurecimiento de las mezclas recién producidas. Este método, además de reducir significativamente el desperdicio, presenta un

bajo costo económico y alta viabilidad operativa (Wang et al., 2018; Ferriz et al., 2014). Sin embargo, su implementación requiere del diseño de un adecuado protocolo de control.

En este contexto el grupo de Materiales Sostenibles de INTEMA propuso a la empresa Durmientes de Hormigón Argentinos S.A. (DHA S.A.), desarrollar este trabajo de tesis con el fin de definir un protocolo de redosificación de hormigón fresco residual, un enfoque que no solo reduce el desperdicio, sino que optimiza recursos al integrarlo en nuevas dosificaciones sostenibles.

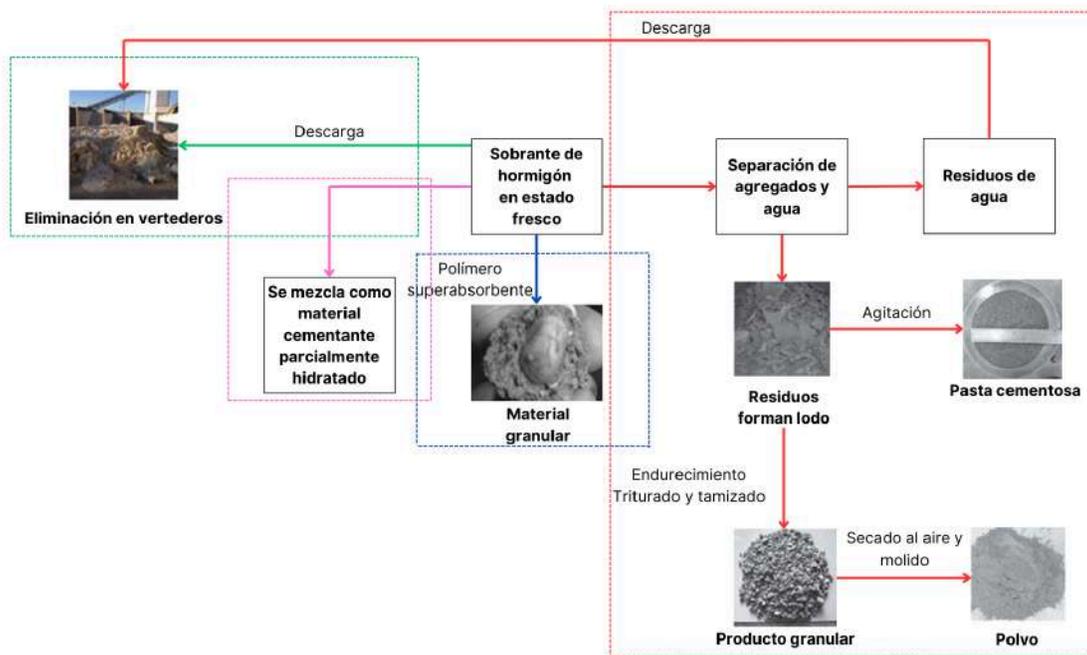


Figura 1.1. Diagrama de flujo de los cuatro métodos de reciclado del hormigón

1.2. Objetivos

1.2.1. General

- ❖ Diseñar hormigones sostenibles por medio del reciclado de hormigón fresco residual

1.2.2. Específicos

- ❖ Caracterizar los materiales de partida para la formulación de hormigón
- ❖ Diseñar y caracterizar en estado fresco y endurecido una formulación de hormigón base
- ❖ Evaluar la variación de las propiedades en estado fresco en el tiempo del hormigón base
- ❖ Obtener hormigones sostenibles que incluya en su formulación el material residual
- ❖ Estimar los costos de producción de los hormigones sostenibles obtenidos

1.3. Estructura de la tesis

El presente trabajo se encuentra organizado en distintos capítulos, dedicados cada uno de ellos a un tema en particular, según se describe a continuación:

Este capítulo aborda la temática del reciclaje de residuos de hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, destacando especialmente los obtenidos a partir de la redosificación del hormigón fresco, y señala además los objetivos propuestos.

La parte central de esta tesis se enfoca en el procedimiento experimental y los resultados obtenidos, abarcando los ensayos realizados en estado fresco y endurecido del hormigón. En el

Capítulo 2, se detallan las metodologías empleadas para evaluar las propiedades tanto de la formulación base como las del hormigón reciclado con diferentes porcentajes en peso.

El Capítulo 3 se centra en la caracterización de los agregados utilizados, incluyendo granulometrías, densidad y absorción. Posteriormente, en el Capítulo 4, se muestran los resultados de las metodologías descritas en los capítulos anteriores. Además, se presenta una propuesta para el reciclado de hormigón, que incluye la simulación de condiciones reales de obra para optimizar y llevar a cabo el proceso de reciclado.

En el Capítulo 5, se lleva a cabo una evaluación económica del proyecto, determinando la rentabilidad y los costos asociados para producir un metro cúbico de hormigón reciclado.

Finalmente, se presentan las Conclusiones más importantes que surgieron de estos ensayos, y se sugieren posibles estudios futuros para aún fomentar más el reciclado de hormigón.

Además, se presentan de manera detallada las Referencias Bibliográficas citadas durante el desarrollo del trabajo. Y también, está el Anexo con las correspondientes fichas técnicas de los componentes usados y planillas utilizadas para realizar todo el proyecto de tesis.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Agregados naturales

Se utilizó arena fina (AF) (Cantera Tres Plantas, Necochea) y arena de trituración 0/6 C (ATC) (Cantera Yaraví, Batán) y piedra cuarcítica 6-20 (AGN) (Cantera Yaraví, Batán).

En la *Figura 2.1* se muestran imágenes de los acopios de cada agregado usados en este trabajo. Los materiales son una muestra representativa de los acopios generales que se encuentran en la empresa DHASA destinados a la producción de hormigón.



Figura 2.1. Acopio de agregados: *a)* Arena de trituración 0/6 C; *b)* Arena fina; y *c)* Piedra cuarcítica 6-20.

2.1.2. Otros materiales componentes

2.1.2.1. Cemento Portland Compuesto (CPC 40)

Para la elaboración de los hormigones se empleó Cemento Portland Compuesto (CPC 40, Cementos Avellaneda) que cumple los requisitos de la norma IRAM 50001 - 2000.

2.1.2.2. Aditivos reductores de agua y aditivo superfluidificante

También se utilizaron aditivos reductores de agua de medio rango (Mapeplast N11, Mapei Argentina) y aditivos superfluidificantes (Mapefluid N150/152). Todos ellos cumplen los requisitos con la norma IRAM 1663:2002.

2.1.2.3. Agua de amasado

Se utilizó en todos los casos el agua de perforación que cumple con los requisitos de la norma IRAM 1601:2012 (*Ver Anexo 1.4*).

2.2. Métodos de ensayos de agregados

2.2.1. Método de cuarteo

Se utilizó el método de cuarteo definido por la norma IRAM 1509:2006 para obtener las muestras para los ensayos realizados sobre los agregados.

El método consiste en depositar la muestra de agregado sobre una superficie dura y limpia, donde no sea posible la incorporación de materias extrañas ni pérdida de material. Con el total del material se forma una pila de forma cónica y con una pala se toma el material, para formar otra pila de igual forma, dejándolo caer de cada palada sobre el vértice del cono que se va formando. Esto se repite tres veces. Luego, con el reverso de la pala, se aplana cuidadosamente la pila hasta lograr un espesor uniforme. Una vez realizado, se divide la muestra en cuatro cuartos, trazando dos diámetros perpendiculares. De las cuatro partes (cuartos) así formados, se desechan dos opuestos, cuidando que el agregado de un cuarto no se mezcle con el del cuarto vecino, y que al desechar los dos cuartos opuestos se elimine también el polvo correspondiente. El material de los dos cuartos restantes es nuevamente mezclado y partido en la forma indicada anteriormente, hasta que la muestra tenga el tamaño deseado, como se observa en la *Figura 2.2*.



Figura 2.2. Método de cuarteo

2.2.2. Análisis granulométrico

Se determinó la distribución de los tamaños de los agregados según procedimiento descrito en la norma IRAM 1505:2005. Se extrae una cantidad de aproximadamente 1.5 kg por el método de cuarteo, el que se hace pasar por una serie de tamices normalizados que van de un tamaño decreciente de abertura (*Figura 2.3*). Los tamices utilizados son 3'', 2'', 1 y 1/2'', 1'', 3/4'', 1/2'', 3/8'', N.º 4, N.º 8, N.º 16, N.º 30, N.º 50 y N.º 100.



Figura 2.3. Tamices normalizados

Para cada tamiz, se registra el peso y de esa manera se calcula el porcentaje retenido y se calcula el pasante acumulado en función del tamaño del tamiz. Con los datos obtenidos se realiza una curva granulométrica y se determina el módulo de finura (MF) a partir de la suma de los porcentajes retenidos acumulados considerando la serie de tamaño de apertura de Tyler (Norma

IRAM 1505:2003) dividido por 100 y el tamaño máximo nominal (TM) definido como la abertura del tamiz más pequeño que sigue al tamaño máximo absoluto del árido, siempre que por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa del árido.

2.2.3. Cálculo de absorción y densidad de los agregados

Se define como porcentaje absorción al porcentaje de humedad del agregado en estado saturado superficie seca. En esta condición ideal, los poros internos del agregado se encuentran saturados de agua, mientras que la superficie de las partículas está seca. Los ensayos de absorción y densidad se realizan en forma separada para agregados finos y gruesos. Se considera agregado fino a aquellos que pasan por el tamiz IRAM 4 con una abertura de 4.75 mm, mientras que los gruesos son retenidos. Para obtener la densidad y absorción del agregado fino se basó en la norma IRAM 1520:2002 y para el agregado grueso es la IRAM 1533:2002.

2.2.3.1. Agregado fino

Se toma una muestra de aproximadamente 500 g por el método de cuarteo (*ver procedimiento en sección 2.2.1*) y se sumerge en agua durante 24 horas. Luego se seca con una corriente de aire caliente hasta obtener la condición saturado superficie seca (SSS). Esto resulta en la formación de una pila cónica con generatriz recta, similar a una pila de arena, una vez que se retira el molde troncocónico, como se ilustra en la *Figura 2.4*.



Figura 2.4. Agregado fino: a) Condición saturada; y b) Condición SSS

Los pasos a seguir una vez que obtenemos el estado SSS:

1. Se pesan (50 ± 10) g y se registra m_s .
2. Se coloca la muestra en el matraz aforado y se pesa el conjunto para obtener m_1 .
3. Se llena de agua a una temperatura (20 ± 2)°C hasta la marca del aforo (500 cm^3) y se remueve periódicamente durante una hora para eliminar el aire retenido.
4. Se completa hasta el aforo con agua y se pesa el conjunto dando el valor de m_2 .
5. Se retira todo el material del matraz, se lleva al horno por 24 horas y se registra m .

Se determinó la densidad relativa aparente saturado y superficie seca SSS (ρ_{rel}^{SSS}) y el porcentaje de absorción.

$$\rho_{rel}^{SSS} = \frac{m_s}{\left(500 \text{ cm}^3 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{agua}}\right) \rho_{agua}} \quad (2.1)$$

$$Abs [\%] = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (2.2)$$

2.2.3.2. Agregado grueso

Los áridos se lavan para eliminar el polvo adherido y se dejan en reposo en agua durante 24 horas. Después de este tiempo, se realiza un secado superficial con un paño absorbente hasta alcanzar el estado de saturado superficie seca (SSS), caracterizado por la presencia de humedad sin agua libre en la superficie. En este estado, se pesan los áridos, y el valor se registra como m_s . Luego, se pesa el material sumergido en agua, utilizando una cesta de alambre para obtener el valor m_a (Figura 2.5). A continuación, se secan los áridos hasta alcanzar peso constante, y se realiza el último pesado en estado seco, registrando este valor como m_m .

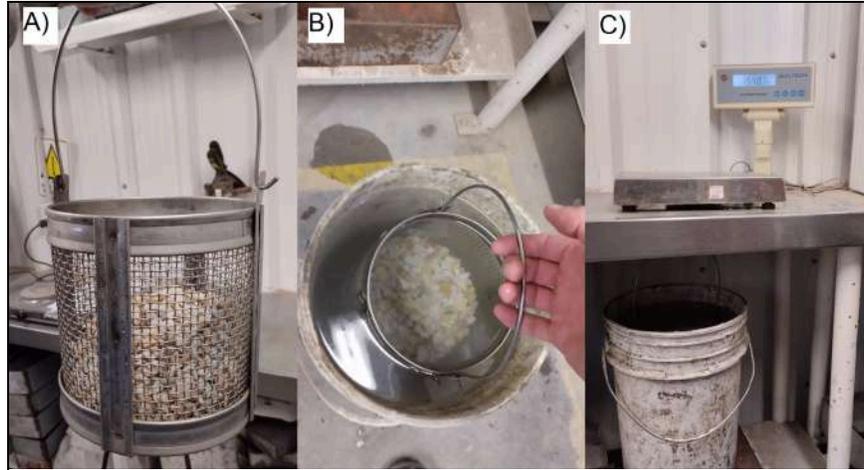


Figura 2.5. Agregado grueso: a) Cesta + agregados; b) Cesta sumergida en agua; y c) Pesaje de los agregados sumergidos

$$\rho_{rel}^{SSS} = \frac{ms}{ms - ma} \quad (2.3)$$

donde:

ms: masa en condición SSS
ma: masa sumergida en agua

$$Abs [\%] = \frac{ms - m}{m} \times 100 \quad (2.4)$$

2.3. Métodos de ensayos para el hormigón en estado fresco

2.3.1. Determinación del peso por unidad de volumen (PUV)

La determinación del peso unitario del hormigón se basa en la norma IRAM 1562:2012. En primer lugar, se utiliza un recipiente cilíndrico vacío de peso conocido. Luego, se introduce en el mismo la muestra de hormigón en tres capas, compactando cada una mediante 25 golpes uniformemente distribuidos sobre la superficie. Además, se golpea el molde con un martillo de goma para eliminar la posible presencia de aire y asegurar una mezcla uniforme. Finalmente, se enrasa la superficie con una varilla mediante movimientos de vaivén y se pesa el conjunto. A

continuación, en la *Figura 2.6* se observa el recipiente con hormigón enrasado y pesado en la balanza.



Figura 2.6. Recipiente con hormigón para determinar el PUV

Se determina el peso unitario del hormigón:

$$P = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (2.5)$$

donde:

m_1 : Peso del hormigón con el recipiente

m_2 : Peso del recipiente

V: Volumen del recipiente

2.3.2. Método para determinar el contenido de aire total en el hormigón fresco

Se parte del hormigón enrasado que se obtuvo en el procedimiento de la *sección 2.3.1* y luego mediante el aparato de Washington se registra el contenido de aire como se observa en la *Figura 2.7*.



Figura 2.7. *Aparato de Washington*

En primer lugar, se abren las válvulas de conexión y de purga situadas en la tapa, luego se coloca la tapa y se ajustan los tornillos de presión, de manera suave y alternada, hasta lograr un cierre hermético. Posteriormente, se cierran las válvulas de conexión y de purga, y se conecta la bomba de aire o inflador en la válvula de admisión para inyectar aire gradualmente hasta que el manómetro indique una presión inicial de 100 KPa (1 kg/cm²), evitando que la aguja alcance el índice máximo del manómetro. A continuación, se abre progresivamente la válvula de conexión de aire principal para que el aire a presión penetre en el recipiente que contiene la muestra. El porcentaje de aire contenido en la muestra se lee directamente en el dial del manómetro y se registra al 0,5 %. Luego, se abre gradualmente la válvula de purga para expulsar el aire a presión, operando con suavidad para evitar que el agua acumulada en la superficie de la muestra penetre en la cámara de la tapa y arrastre partículas de cemento o agregados finos que puedan dañar la válvula de conexión o alterar su funcionamiento.

2.3.3. Determinación de tiempos de fraguado del hormigón

El proceso de fraguado ocurre cuando el hormigón pasa de comportarse como un líquido (estado fresco) a comportarse como un sólido (estado endurecido). El tiempo de fraguado limita la trabajabilidad del hormigón, de manera que conocerlo permite manipular y colocar el material de forma efectiva antes que ocurra. Según el procedimiento de la norma IRAM 1662:1995, se define el tiempo de fraguado inicial como el tiempo en que la mezcla alcanza una resistencia a la

penetración de 3,4 MPa, y el fin del de fragüe cuando alcanza una resistencia a la penetración de 27,4 MPa. Para medir la penetración, se obtiene una muestra de mortero mediante el tamizado del hormigón recién mezclado, utilizando un tamiz IRAM de 4,75 mm. El mortero se coloca en un recipiente y se almacena a la temperatura ambiente especificada. A intervalos regulares, se mide la resistencia a la penetración del mortero utilizando agujas estándar con áreas de contacto de 645, 484, 323, 215, 161, 129, 65, 21 y 16 mm². Luego, se elabora una gráfica que relaciona la resistencia a la penetración con el tiempo transcurrido, a partir de la que se determinan los tiempos de fraguado inicial y final. La resistencia a la penetración, expresada en MPa, se calcula dividiendo la fuerza necesaria para producir la penetración (en Newtons) por el área de la cara inferior de la aguja (en mm²). Finalmente, se genera la curva correspondiente al proceso:

$$\text{Log}_{(rp)} = a_0 + a_1(\log t) \quad (2.6)$$

donde:

rp: resistencia a la penetración

t: tiempo transcurrido

a₀ y a₁: coeficientes determinados por el método de cuadrados mínimos

A continuación, se observa en la *Figura 2.8* las probetas obtenidas con las distintas áreas de contacto de cada aguja:



Figura 2.8. *Probetas obtenidas del ensayo de tiempos de fragüe*

2.3.4. Medición del asentamiento mediante el cono de Abrams

El asentamiento del hormigón es una medida de su consistencia y trabajabilidad en estado fresco, que indica su capacidad para fluir y adaptarse a la forma de un molde sin perder homogeneidad. Este asentamiento se determina siguiendo las especificaciones de la norma IRAM 1536:2020. Primero, se humedece ligeramente el cono y su base con agua. Luego, se llena el cono con hormigón hasta aproximadamente un tercio de su volumen y se compacta con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente, evitando golpear la base de apoyo. A continuación, se llena el cono hasta dos tercios de su volumen y se compacta nuevamente con 25 golpes, asegurando que la varilla penetre un máximo de 3 cm en la capa anterior. Finalmente, se llena el cono hasta el borde con otros 25 golpes y se enrasa la superficie con la varilla. Una vez preparado, se levanta el molde de manera vertical y continua, y luego se coloca invertido junto al hormigón para registrar la altura del asentamiento, como se observa en la *Figura 2.9*.



Figura 2.9. Medida de asentamiento con cono de Abrams

2.3.5. Preparación y caracterización de pastones

Para cada dosificación de pastón de formulación base y de reciclado se midió previamente el contenido de humedad de los agregados el mismo día de su preparación. La dosificación luego se corrige considerando la humedad determinada de modo tal de mantener el mismo contenido de agua total si los agregados estuviesen a estado saturado superficie seca. Se utilizaron los agregados y aditivos mencionados en la *sección 2.1* para preparar cada pastón. Primero, se

humedeció el interior del trompo para evitar que los materiales se adhieran a sus paredes. Luego, se incorporaron los agregados en el siguiente orden: primero el AGN, luego el AF y, a continuación, el ATC (el orden entre las arenas no afecta el resultado). Posteriormente, se añadió el cemento, seguido del aditivo N11 y, finalmente, el agua. Los componentes fueron mezclados en un trompo que gira a una velocidad constante de 25 rpm el tiempo estipulado. Una vez realizado el pastón se miden las propiedades en estado fresco (asentamiento, PUV y contenido de aire) y posteriormente, en estado endurecido (resistencia a la compresión).

2.4. Métodos de ensayos para el hormigón en estado endurecido

2.4.1. Confección de probetas y curado

Se preparan y curan las probetas según procedimientos descritos en la norma IRAM 1524:2004. Antes de moldear las probetas, se aplica una delgada película de aceite mineral en los moldes y sus bases, como se observa en la *Figura 2.10*. La superficie de apoyo de los moldes debe ser rígida, horizontal y libre de vibraciones que puedan alterar la estructura de las probetas durante su confección y fraguado. Se pueden confeccionar probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, como de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (en este proyecto se utilizaron las primeras).



Figura 2.10. *Moldes de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura*

Se comienza llenando la mitad del molde con la muestra, compactando esta capa con 25 golpes distribuidos uniformemente con una varilla de 10 mm de diámetro, sin golpear la base de apoyo. Luego, se golpea 3 o 4 veces el molde con un martillo de goma para cerrar las oquedades dejadas

por la compactación anterior. A continuación, se llena el molde con más hormigón, dejando que sobrepase ligeramente para que, al compactar con 25 golpes más, se pueda eliminar el exceso. La varilla debe penetrar 3 cm en la capa anterior. Una vez compactado, se golpea nuevamente 3 o 4 veces y se enrasan las caras de la probeta utilizando la varilla de compactación para eliminar el material sobrante del molde. Una vez acondicionada y nivelada, la cara de moldeo se cubre con plásticos, *Figura 2.11*, para evitar la pérdida de agua de mezclado y se dejan reposar 24 hs evitando perturbaciones y movimientos, para luego trasladarlas al laboratorio.



Figura 2.11. *Moldes listos cubiertos con plástico*

Luego de 24 h se desmoldan y se identifican con el nombre de obra, número de probeta, tipo de resistencia característica y la fecha del día. Posteriormente, se ubican en la pileta de curado, como se observa en la *Figura 2.12*, donde permanecen la cantidad de días necesarios para su ensayo de compresión.



Figura 2.12. *Curado de probetas*

2.4.2. Resistencia a la compresión de probetas normalizadas

Se determinó la resistencia a la compresión según procedimiento de la norma IRAM 1546:1992. Como primer paso se registran las medidas de las probetas (diámetro y altura) y se colocan entre dos cabezales que contienen elastómeros de dureza shore 70. Luego se verifica que la superficie de apoyo de la prensa esté limpia y se coloca el conjunto de probeta y apoyos para que se aplique la carga de forma constante hasta la rotura de la muestra. En el proyecto se utilizó una máquina de ensayo “CONTROLS, Modelo Pilot, Italia” la que se observa en la *Figura 2.13*. Por último, se obtiene la carga máxima alcanzada, la curva y tipo de rotura.



Figura 2.13. *Compresión probetas: a) Máquina de ensayos “CONTROLS”; y b) Colocación de probeta para compresión*

2.5. Análisis estadístico ANOVA

La evaluación estadística de los resultados de resistencia a la compresión se realizó mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y se determinó si hay diferencias significativas entre valores por el método de Tukey, con un intervalo de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). El análisis se llevó a cabo utilizando el software OriginPro 8.5.

Capítulo 3

Caracterización de materiales de partida

3.1. Granulometría de los agregados

La granulometría tiene una influencia determinante en las propiedades de la mezcla de agregados. Una distribución adecuada puede minimizar los vacíos en la mezcla, reduciendo así la cantidad de cemento y agua necesarios, lo que contribuye a una mayor sostenibilidad en la construcción (Zhao et al., 2017).

En función de la cantidad de material que pasa a través de la abertura de los distintos tamices, se obtuvo la curva granulométrica de cada agregado, como se observa en la *Figura 3.1*.

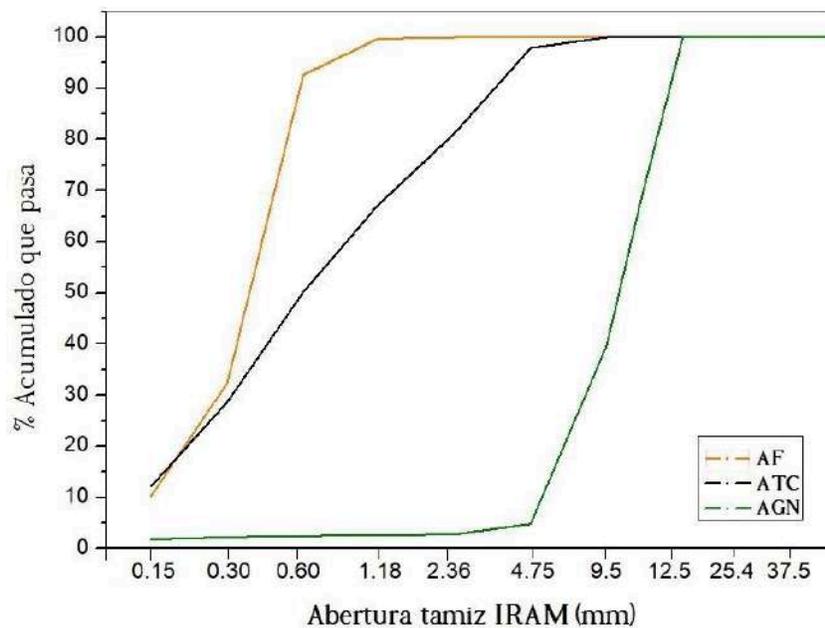


Figura 3.1. Granulometría de todos los agregados

Las curvas granulométricas mostradas en la *Figura 3.1* se elaboraron a partir de los datos de la *Tabla 3.1*, que indican el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz. Además, se incluyen el MF y el TM de cada agregado.

Tabla 3.1. Granulometría de los agregados

	AF	ATC	Mezcla de finos	AGN
	MF: 1.65	MF: 2.63	MF: 2.14	MF: 6.74
	TM (mm): 2.38	TM (mm): 9.50		TM (mm): 19.00
Tamiz	% Pasa acumulado	% Pasa acumulado	% Pasa acumulado	% Pasa acumulado
3''	100.0	100.0	100.0	100.0
2''	100.0	100.0	100.0	100.0
1 1/2''	100.0	100.0	100.0	100.0
1''	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4''	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2''	100.0	100.0	100.0	69.7
3/8''	100.0	100.0	100.0	39.7
Nº 4	100.0	97.9	99.0	4.9
Nº 8	100.0	81.3	90.6	2.8
Nº 16	99.7	67.1	83.4	2.6
Nº 30	92.7	50.2	71.4	2.5
Nº 50	32.4	28.7	30.5	2.3
Nº 100	10.3	12.2	11.2	1.8

Las curvas granulométricas de los agregados, tanto finos como gruesos, deben cumplir con ciertos requisitos para asegurar un rendimiento óptimo en su aplicación. El reglamento CIRSOC 201 establece, como referencia, la parábola de Fuller y define las curvas límite. En las *Figuras 3.2 y 3.3* se presentan las granulometrías de la mezcla de agregados finos y del agregado grueso, respectivamente.

Las curvas límites varían según el tipo de agregado y se ajustan a normas específicas del reglamento. Para el AGN, las curvas límite corresponden a CIRSOC 201-05, *sección 3.2.4.2*, mientras que para la mezcla de finos, las especificaciones se encuentran en la *sección 3.2.3.2* del mismo reglamento. En las curvas granulométricas, la curva B (representada en verde) indica la distribución de máxima compacidad, mientras que las curvas A (en azul) y C (en violeta)

representan los límites mínimo y máximo del porcentaje de material que debe pasar por cada tamiz.

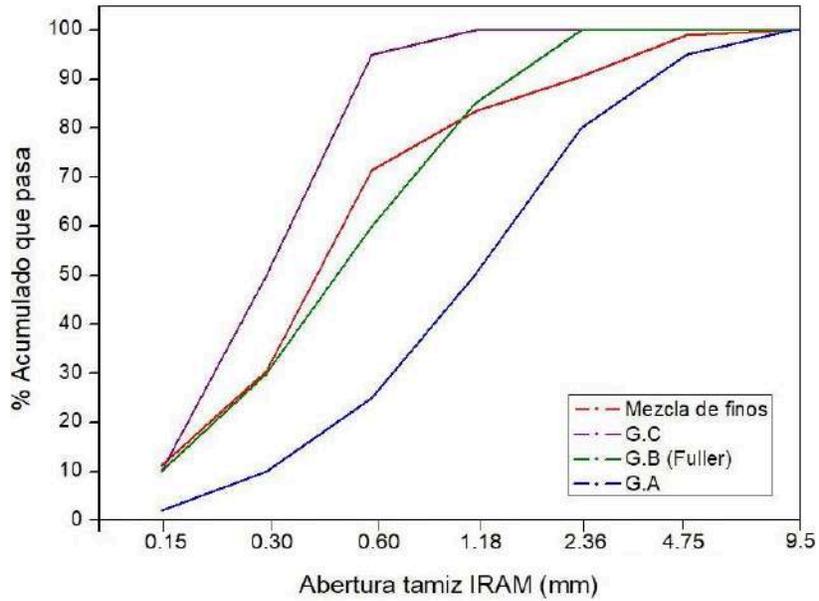


Figura 3.2. Granulometría de la mezcla de finos

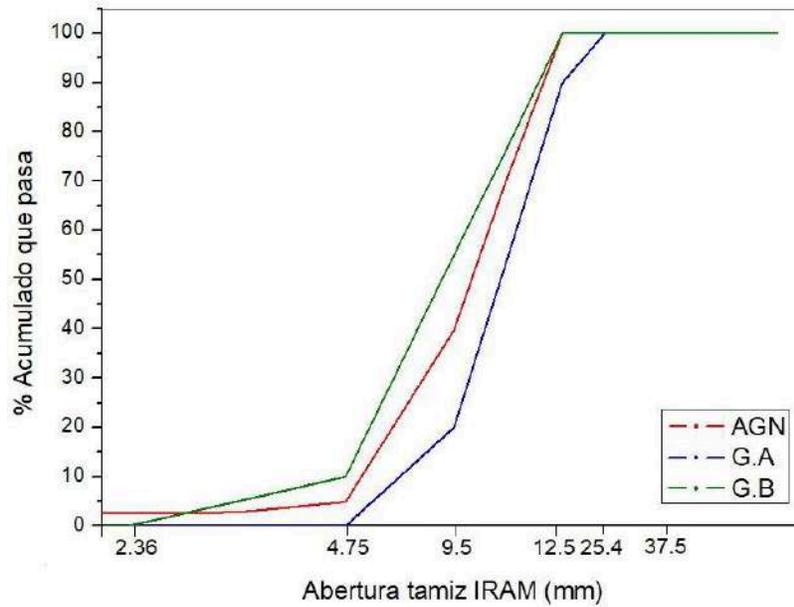


Figura 3.3. Granulometría de AGN

Al comparar las distribuciones granulométricas, se identifica que ambas están entre los límites máximos y mínimos establecidos. Se recomienda que la curva del agregado sea lo más cercana

posible a la curva de Fuller, ya que esto logra una distribución de partículas que minimiza los vacíos entre los granos, contribuyendo a la compactación máxima y mejorando las propiedades del hormigón (Palacio, 2017).

Se utilizó una proporción de mezcla de agregados finos con 50% AF y 50% ATC. Esta proporción permite obtener un agregado fino con un MF que cumple con lo requerido por el reglamento CIRSOC 201. En cuanto a los agregados gruesos, se empleó únicamente el AGN, lo que representa el 100% de este componente en la mezcla.

3.2. Densidad y absorción

En la *Tabla 3.2* se presentan los valores de % de absorción y densidad en estado superficie seca obtenidos para cada agregado. Recordemos que el % de absorción de cada agregado es el % de humedad en estado saturado superficie seca. Es importante dado que es un estado de referencia en el diseño de una formulación de hormigón.

Tabla 3.2. Propiedades de los agregados naturales

Propiedades	AF	ATC	AGN
$\rho_{rel.ap. SSS}$ (kg/l)	2.67 ± 0.05	2.43 ± 0.02	2.45 ± 0.01
Absorción (%)	0.90 ± 0.02	1.41 ± 0.03	1.97 ± 0.07

Los valores obtenidos en este estudio concuerdan con los trabajos previamente informados en estudios anteriores en los que se utilizaron los mismos agregados cuarcíticos y arenas silíceas de la región (Schust et al., 2021; Fernández, 2022).

Capítulo 4

Hormigones sostenibles

4.1. Propuesta de protocolo de reciclado

El diagrama de flujo presentado en la *Figura 4.1* ilustra el proceso que se propone detallando las etapas clave del proyecto.

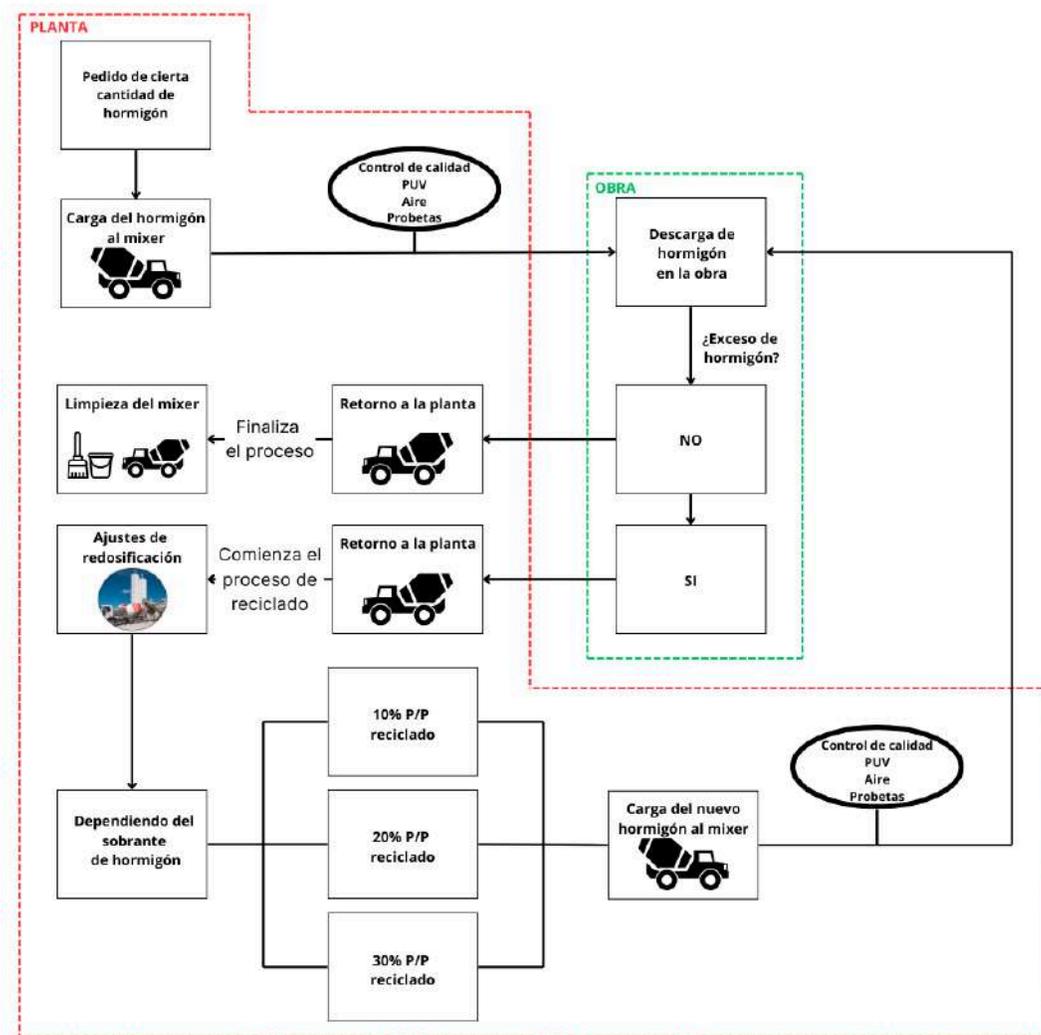


Figura 4.1. Diagrama de flujo del proceso de hormigones sostenibles obtenidos por redosificación de hormigón fresco residual

En escala laboratorio se intentó reproducir las mismas condiciones que se describen en el esquema previo. Se solicita una cierta cantidad de hormigón en planta, donde se realizan los

ajustes necesarios para dosificar la formulación base elegida. Posteriormente, el mixer se carga con hormigón y, antes de ser enviado a la obra, se llevan a cabo ensayos de calidad que consisten en asentamiento, PUV, contenido de aire y probetas en el laboratorio de la empresa. Una vez descargado el hormigón en la obra, se evalúa si la cantidad entregada fue suficiente o si quedó un excedente significativo. Si el sobrante es mínimo, el camión procede a la limpieza del mismo en planta, donde el agua utilizada y sobrante, se vuelca en una pileta decantadora y lo obtenido de allí, se reutiliza para posteriores lavados. De lo contrario, el mixer regresa a la planta, donde se realizan los ajustes de redosificación para reciclar el hormigón en estado fresco sustituyendo en diferentes proporciones (por ejemplo 10%, 20% o 30%, en peso), según la cantidad sobrante. Una vez obtenida la formulación con hormigón reciclado en estado fresco, se llevan a cabo los ensayos correspondientes en el laboratorio antes de destinarlo nuevamente a la obra.

Como se justifica más adelante, la propuesta toma en cuenta el tiempo total de traslado del mixer, desde la planta hasta la obra y de regreso, estimado en 2 horas. Este intervalo es fundamental, ya que durante el trayecto de ida y vuelta, el hormigón pierde trabajabilidad y no debe fraguar porque generaría un grave daño al equipamiento (Hoang et al., 2016). Por lo tanto, la etapa limitante en la propuesta es el tiempo de fragüe por lo que hallarlo es de suma importancia.

En esta tesis se realizaron los ensayos correspondientes, desde la dosificación de la formulación base hasta la incorporación del hormigón excedente en nuevas mezclas de concreto a escala de laboratorio. Las condiciones controladas a este nivel permiten lograr una alta precisión en la dosificación, además de garantizar un curado óptimo. Esto facilita obtener resultados consistentes y estudiar el comportamiento del hormigón en un entorno estable. Sin embargo, en una obra, los factores ambientales como la temperatura, la humedad y las condiciones de curado suelen variar, lo que puede afectar la trabajabilidad y las propiedades finales del hormigón. Asimismo, el equipo de mezclado y transporte en obra difiere considerablemente del equipo de laboratorio, lo que genera variaciones en la mezcla y en la calidad del material aplicado, ya que la manipulación y el volumen de material son mucho mayores. Por lo tanto, la transición a escala obra requeriría de ajustes para mantener la uniformidad y confiabilidad del hormigón frente a estas condiciones menos controladas. Esta tesis es el paso inicial para luego escalar este protocolo en planta.

Basándose en este esquema de propuesta, se realiza un análisis de la formulación base y de su proceso de reciclado, evaluando su comportamiento en términos de propiedades mecánicas y trabajabilidad. Además, se investiga los efectos de la incorporación de hormigón reciclado en diferentes porcentajes en peso, analizando su impacto en la calidad y desempeño del material final.

4.2. Estudio de la formulación base

Para el análisis, se utilizó una formulación H30 (resistencia característica a la compresión de 30 MPa. a los 28 días) que es la más empleada por la empresa. Según el reglamento CIRSOC 201, en la *sección 5.2.2.5*, en la *Tabla 5.5*, los valores requeridos para H30 deben tener una resistencia de 38,5 MPa. Además, se seleccionó un asentamiento objetivo definido por la empresa DHASA de 11 cm acorde a sus procesos habituales de fabricación. Como requisito de durabilidad a cumplir se eligió el tipo de exposición “M1 y A3” según el reglamento CIRSOC 201 en la *sección 2.2.4*, donde el hormigón estará expuesto a climas cálidos y húmedos, y en contacto con aire saturado de sales a más de 1 km de la línea de marea alta. En la *Tabla 4.1* se muestra la dosificación correspondiente a la formulación base para cada pastón de 30 litros y con una relación en peso a/c de 0.50.

Tabla 4.1. Dosificación en kg por m³ de hormigón. Los agregados se encuentran en estado saturado superficie seca

Componente	Peso para 1 m ³ de hormigón (kg)	Densidad (kg/dm ³)	Volumen sólido (dm ³)	Peso SSS por m ³ de hormigón (kg)
Agua	183	1.00	183	183
Cemento	365	3.15	116	365
Arena de trituración 0/6 C	383	2.43	158	389
Arena natural silícea	383	2.67	144	387
Piedra 6/20 C.	976	2.45	398	995
Aditivo N11	2.2	1.18	1.9	2.2
SUMA			1000	2320

Como se observa en esta dosificación, la cantidad del aditivo N11 se calculó en un 0.6% en peso respecto a la cantidad utilizada de cemento, teniendo en cuenta la ficha técnica del fabricante.

En la *Tabla 4.2* se muestran los porcentajes de contribución de los agregados al agregado total.

Tabla 4.2. *Contribución de cada agregado a agregado total*

% Agregado grueso	AGN	56.02
% Agregado fino	AF	21.99
	ATC	21.99

Para obtener la curva granulométrica del agregado total, se consideró el porcentaje en peso de cada tipo de agregado en la mezcla y el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 4.3*.

Tabla 4.3. Análisis granulométrico

Tamiz	AF	ATC	AGN	Mezcla de finos	Grueso	Agregado total	Porcentaje máximo que pasa (Curvas límites IRAM 1627 - Tabla 6)		
	% Pasa acumulado						G.A	G.B	G.C
3''	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100
2''	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100
1 1/2''	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100
1''	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100
3/4''	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	94	97	100
1/2''	100.0	100.0	69.66	100.0	69.66	83.01	70	77	93
3/8''	100.0	100.0	39.69	100.0	39.69	66.23	55	65	86
Nº 4	100.0	97.9	4.88	98.97	4.88	46.28	41	46	72
Nº 8	100.0	81.3	2.81	90.63	2.81	41.45	32	43	58
Nº 16	99.7	67.1	2.64	83.42	2.64	38.18	22	36	44
Nº 30	92.7	50.2	2.53	71.42	2.53	32.84	11	24	28
Nº 50	32.4	28.7	2.29	30.53	2.29	14.72	4	10	15
Nº 100	10.3	12.2	1.82	11.23	1.82	5.96	1	2	4

Al igual que en la *sección 3.1*, donde se obtuvieron las curvas granulométricas individuales para cada agregado, se generó la curva correspondiente al agregado total utilizando los datos de la *Tabla 4.3*, como se muestra en la *Figura 4.2*.

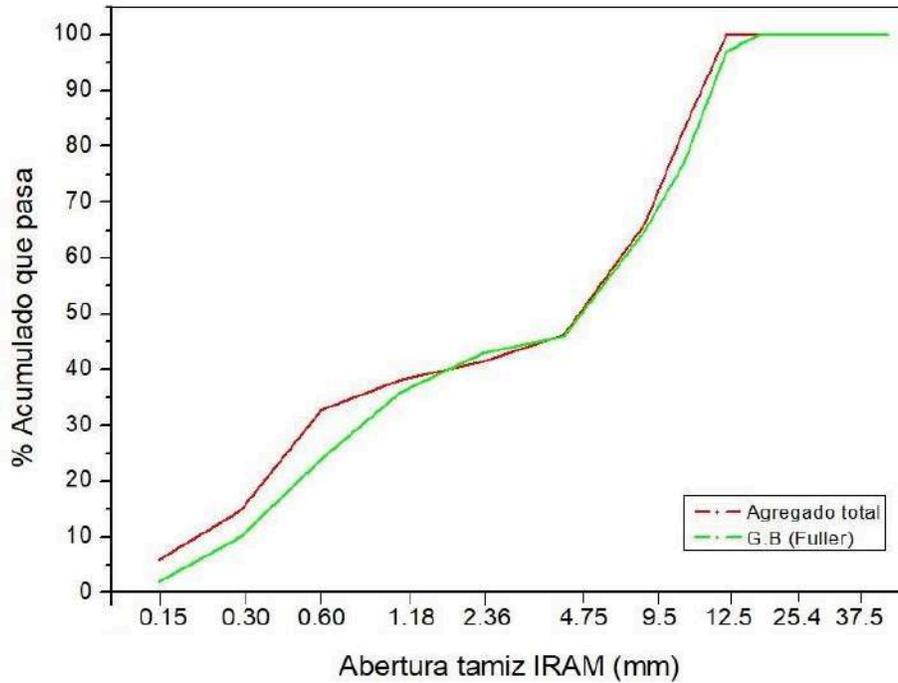


Figura 4.2. Granulometría del agregado total

Al observar la figura, la curva granulométrica del agregado total cumple con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201. Además, tiene una tendencia similar a la curva de Fuller, lo que adopta una máxima compacidad mejorando las propiedades del hormigón.

4.2.1. Propiedades del hormigón en estado fresco

Las propiedades del hormigón en estado fresco se determinaron en diferentes momentos, específicamente a tiempo cero y en función del tiempo. En primer lugar, se realizaron cuatro pastones para obtener valores promedio de propiedades, como el contenido de aire y el PUV_{Exp} , cuyos resultados se muestran en la *Tabla 4.4*.

Tabla 4.4. *Propiedades de los pastones con la formulación base*

Propiedades	H30 - Formulación base
Contenido de aire (%)	3.5 ± 0.1
PUV _{Exp.} (kg/m ³)	2301 ± 10
PUV _{Teórico} (kg/m ³)	2320

La calidad del hormigón depende tanto de la correcta gestión del contenido de aire, que influye en la resistencia y durabilidad del material, como de la medición precisa del PUV y asentamiento, esenciales para asegurar su trabajabilidad y reducir defectos como grietas o segregación (Salinas et al., 2023). Inicialmente, se observa que el contenido de aire es relativamente normal en comparación con otros hormigones H30 que hay en trabajos de investigación (Fernández, 2022; Bertone, 2024). Respecto al valor obtenido de PUV_{Exp.}, es muy cercano al valor del PUV_{Teórico} que corresponde a la suma de todos los componentes para un m³ de hormigón (ver *Tabla 4.1*).

Como se mencionó previamente en la sección de la propuesta, la etapa limitante es el tiempo de fragüe, ya que está directamente relacionado con la trabajabilidad del hormigón, una de sus propiedades fundamentales. La trabajabilidad afecta significativamente su manejo, colocación y compactación, aspectos clave para garantizar la calidad final del material. Las reacciones de hidratación del cemento, esenciales para el desarrollo de las propiedades mecánicas y estructurales del hormigón, son altamente dependientes de la temperatura (activadas térmicamente). Estas reacciones pueden acelerarse o ralentizarse según las condiciones térmicas del entorno (IOSR, 2016). Por lo tanto, es importante realizar un análisis en las estaciones más extremas, invierno y verano, para evaluar el comportamiento del hormigón en escenarios climáticos severos y garantizar su desempeño en condiciones reales de uso.

En verano el tiempo de fraguado inicial es de 5,45 horas y el final de 8,15 horas. En contraste, durante el invierno, el tiempo de fraguado inicial fue de 8,49 horas y el final de 11,50 horas. Estos valores se ilustran en la *Figura 4.3*.

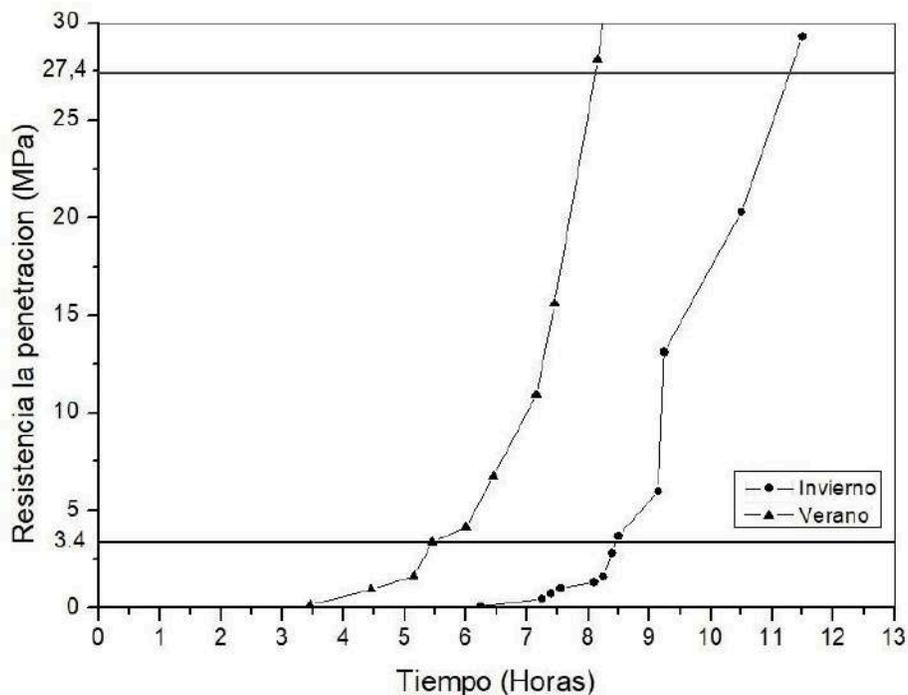


Figura 4.3. Curvas de fragüe

Cabe destacar que los valores registrados durante el verano presentaron tiempos menores respecto al invierno debido a la aceleración de las reacciones de hidratación por las altas temperaturas. De este modo, se evidencia que, incluso en verano, se requieren 5,45 horas para alcanzar el fraguado inicial. Al considerar los tiempos de fragüe obtenidos y la logística habitual de la empresa, se estableció un tiempo de dos horas, mencionado anteriormente, que abarca tanto el trayecto de ida como el de retorno a la planta, sabiendo que durante este lapso el hormigón no alcanza el fragüe (aspecto fundamental, ya que para el reciclado del hormigón no debe fraguar).

A medida que pasa el tiempo, la pérdida de trabajabilidad del hormigón es mayor y se explica por la hidratación continua del cemento, la evaporación del agua y la absorción por los áridos. Estos procesos reducen la cantidad de agua libre en la mezcla, afectando su capacidad lubricante y, en consecuencia, disminuyendo la fluidez del hormigón fresco. Este efecto es inevitable, pero puede mitigarse con el uso de aditivos o el agregado de agua (Nocun-Wczelik et al., 2007; Sičáková et al., 2018). La incorporación de aditivo superfluidificante mejora el asentamiento, lo

que se traduce en una mayor trabajabilidad del hormigón manteniendo el mismo contenido de agua (Fuentes et al., 2020).

De esta manera, debido al cambio de las propiedades en estado fresco del hormigón durante su traslado, es esencial medir la variación del asentamiento en el tiempo. El ensayo consistió en preparar el pastón y mezclarlo durante un tiempo determinado para homogeneizar la mezcla de agregados. El proceso de mezclado se realizó intentando replicar los tiempos y número de revoluciones del camión mixer. Dado que el trompo utilizado tiene una mayor velocidad de rotación, se optó por hacerlo en intervalos. Se estimó una duración de una hora para el trayecto hacia la obra, durante el que se realizaron mediciones de asentamiento cada 25 minutos, simulando las condiciones de agitación del camión. En cada medición, la mezcla fue agitada a máxima velocidad (25 rpm) durante 20 segundos, seguida de un descanso de 4 minutos, repitiendo este ciclo hasta completar el intervalo de 25 minutos. Se realizaron mediciones de asentamiento en intervalos definidos para evaluar la pérdida de asentamiento a lo largo del tiempo. A continuación, en la *Figura 4.4.* se observa el promedio del asentamiento en el tiempo de cuatro pastones.

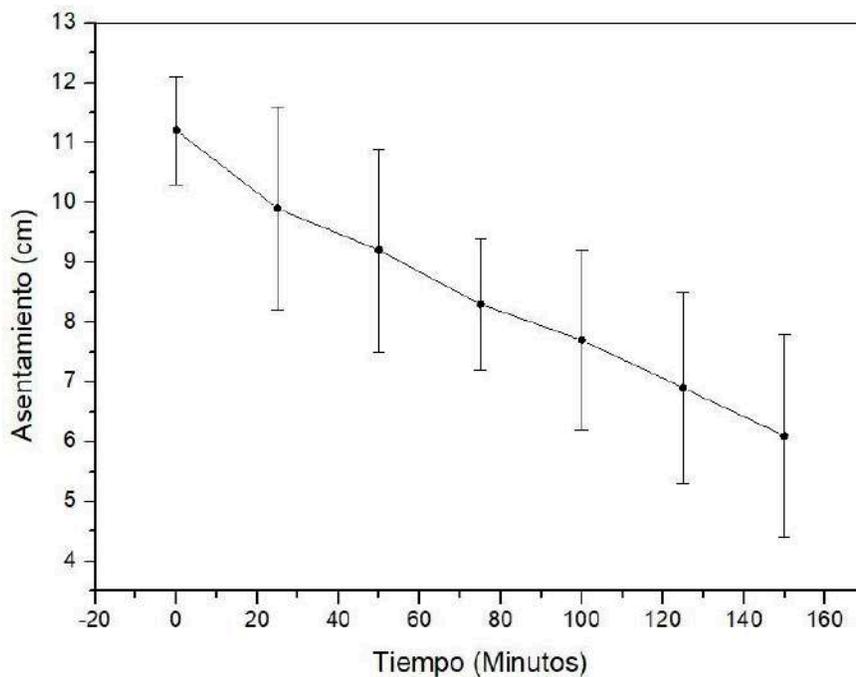


Figura 4.4. Asentamiento vs. t , para la formulación base

Generalmente, en obra se utiliza un superfluidificante para aumentar su trabajabilidad a la hora del proceso de colocación del hormigón. Teniendo en cuenta esto, se midió el asentamiento de la misma manera que se mencionó anteriormente, con la diferencia de que, en esta ocasión, se evaluó cada 15 minutos y se añadió el aditivo N150 después de una hora de mezclado decidiendo que ese es el tiempo en el que el hormigón es utilizado en la obra. Una vez incorporado el aditivo, se midió el asentamiento, el que alcanzó un valor objetivo de 16 cm. Al igual que al principio, se continuó midiendo el asentamiento cada 15 minutos durante una hora adicional, lo que resultó en un tiempo total de dos horas. Este comportamiento se puede observar en la *Figura 4.5* como resultado de un promedio de seis pastones.

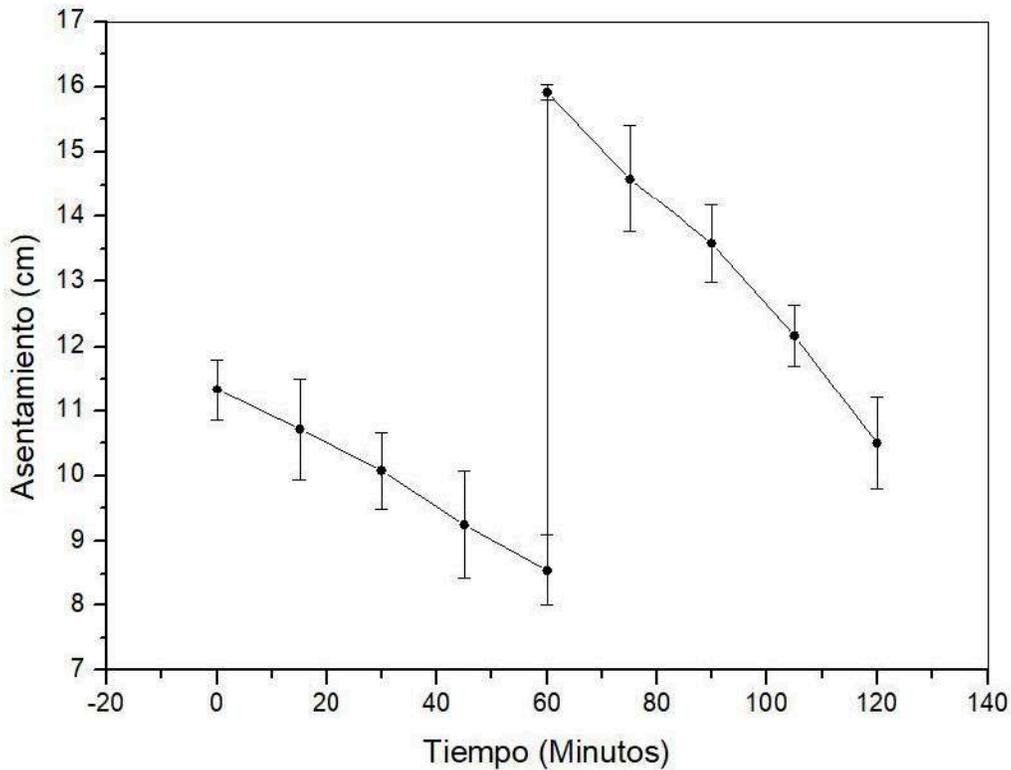


Figura 4.5. Asentamiento vs. *t.* con adición de N150

Como era de esperarse, a medida que pasó el tiempo, el asentamiento fue disminuyendo debido a las causas mencionadas anteriormente. Sin embargo, se observó un mayor asentamiento al cabo

de una hora con la adición del aditivo superfluidificante, lo que sugiere que este aditivo contribuyó a una mejor trabajabilidad en el corto plazo.

4.2.2. Propiedades del hormigón en estado endurecido

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión a través de ensayos en probetas a diferentes edades: 3, 7, 14 y 28 días. A continuación, en la *Figura 4.6* se observa la curva de maduración (resistencia a la compresión en función de la edad) compuesta por 79 probetas a distintas edades.

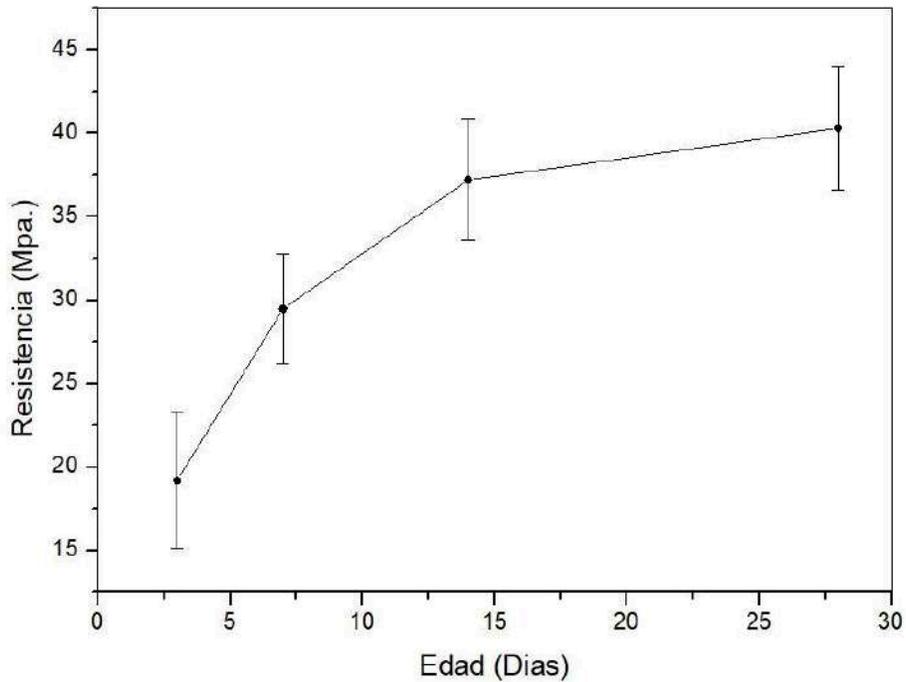


Figura 4.6. Curva de maduración - Formulación base

Como era de esperar, a medida que aumenta la edad del hormigón, aumenta la resistencia a la compresión del mismo (Wang et al., 2023). Esto se debe al proceso de hidratación que continúa en el tiempo, reforzando la estructura interna y reduciendo la porosidad, lo que mejora la capacidad del hormigón para soportar cargas (Hewlett et al., 2019).

4.3. Estudio sobre el reciclado de hormigón

Basándose en la propuesta, se elaboraron nuevas formulaciones de hormigón en las que se sustituyó un 10%, 20% y 30% en peso con hormigón fresco retornado a la planta (luego de dos horas). Se simuló el hormigón que retorna a la planta como la formulación base con el agregado de superfluidificante y se reprodujo las condiciones de retorno que tiene el camión mixer.

Una vez realizado el reciclado del hormigón, se evaluó el asentamiento, el PUV y el contenido de aire. Finalmente, se prepararon 54 probetas para ensayar el hormigón reciclado en su estado endurecido. Todos los datos obtenidos de los pastones de hormigón reciclado se registraron en una planilla, la que sirvió como guía a lo largo del trabajo (ver Anexo 1.2, Tabla 1A).

4.3.1. Propiedades del hormigón reciclado en estado fresco

En la siguiente *Tabla 4.5*, se observan las propiedades en estado fresco que posee el hormigón una vez que fue reciclado en distintos porcentajes en peso.

Tabla 4.5. Propiedades del hormigón con distintos porcentajes en peso de reciclado

Propiedades	0% P/P	10% P/P	20% P/P	30% P/P
Contenido de aire (%)	3.5 ± 0.1	2.90 ± 0.02	3.00 ± 0.03	3.00 ± 0.05
PUV _{Exp.} (kg/m ³)	2301 ± 10	2311 ± 6	2308 ± 1	2309 ± 1
Asentamiento (cm)	11.0 ± 1.1	12.0 ± 1.4	12.5 ± 0.7	11.0 ± 0.6

El hormigón reciclado presentó propiedades similares al hormigón sin reciclar, lo cual indica que, bajo ciertas condiciones, el reciclado no afecta significativamente el comportamiento del material en estado fresco. Es importante destacar que no se realizó ninguna modificación en la formulación base del hormigón. El hormigón fresco reutilizado puede conservar características comparables al original siempre que se eviten problemas como la segregación o pérdidas significativas de humedad durante el manejo y transporte.

El contenido de aire se mantuvo estable en todos los casos, asimismo los valores obtenidos para el PUV fueron consistentes entre los diferentes porcentajes en peso de reciclado.

4.3.2. Propiedades del hormigón reciclado en estado endurecido

De igual manera que para la formulación base, se obtuvieron los valores de resistencia a la compresión a distintas edades y a distintos porcentajes en peso de reciclado, como se observa en la *Tabla 4.6*. Luego, en la *Figura 4.7* se obtuvo la curva de maduración de los tres porcentajes en peso de reciclado.

Tabla 4.6. Resistencia mecánica del hormigón con la formulación base y reciclado

% de reciclado	Edad (días)	Resistencia (MPa.)
0	7	29.52 ± 3.39 a
10	7	31.78 ± 4.48 ab
20	7	33.57 ± 1.67 ab
30	7	33.26 ± 1.45 ab
0	14	37.23 ± 3.60 bce
10	14	36.10 ± 2.93 bce
20	14	35.33 ± 2.65 bce
30	14	38.39 ± 3.12 bcde
0	28	40.27 ± 3.73 cde
10	28	42.74 ± 1.69 de
20	28	41.41 ± 0.95 e
30	28	41.04 ± 1.63 e

Los valores promedio en la misma columna seguidos por letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$) según la prueba de Tukey.

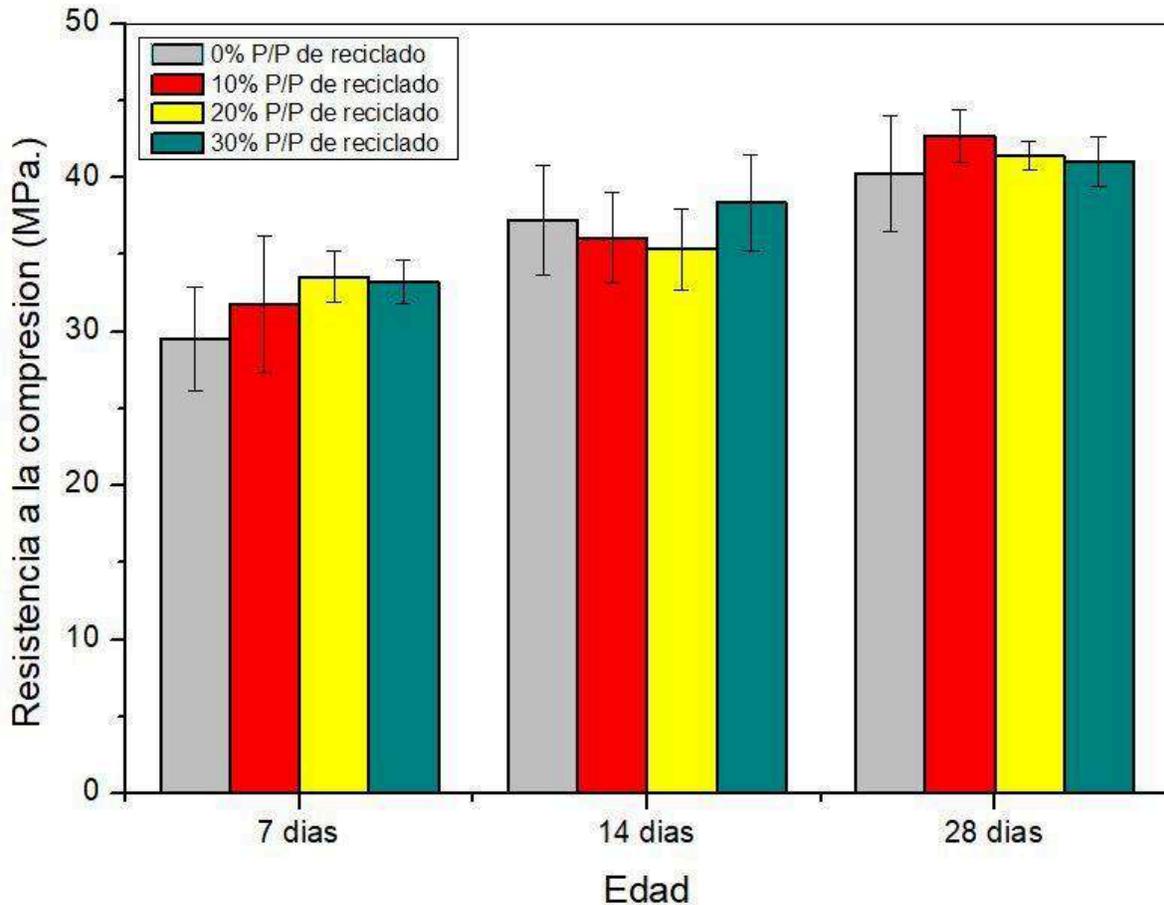


Figura 4.7. Curva maduración para los distintos porcentajes en peso de reciclado

En la tabla vemos hormigones con distintos grados de sustitución con su correspondiente resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días. En primer lugar, interesantemente se observa que a la edad de 7 días no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) para los distintos porcentajes de reciclado. De la misma manera, para la edad de 28 días los resultados no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellos. Como era de esperar, entre los hormigones con edades de 7 y 28 días las resistencias son significativamente diferentes, debido esencialmente al avance de la reacción de hidratación, reducción de la porosidad y a la mejora de la resistencia a la compresión como se ha informado en la literatura (Fuentes et al., 2020).

Para la edad de 14 días no hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los distintos porcentajes de reciclado, incluso se observa que en gran medida son coincidentes, es decir, no tienen

diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto a edades menores y mayores debido a que es una edad intermedia.

Respecto a los resultados obtenidos, es importante destacar que se evidencia que el reciclado del hormigón en distintos porcentajes en peso no afectó a la resistencia a la compresión del mismo. Por lo tanto, el hormigón cumple con la resistencia característica mencionada anteriormente dado que los valores promedios son superiores al valor característico y cercanos al valor medio.

Durante los ensayos de compresión, además de registrar el incremento en la resistencia, se observaron distintos patrones de rotura en las probetas, los que variaron según la calidad del hormigón. Estos patrones reflejaron la manera en que el material respondió a los esfuerzos aplicados, lo que proporciona información sobre su comportamiento estructural. A continuación, en la *Figura 4.8* se observan los tipos de roturas de las probetas.

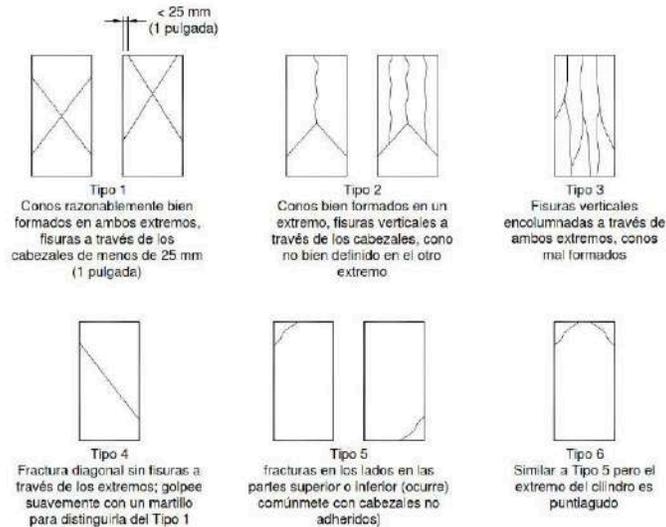


Figura 4.8 Tipo de rotura de probetas

En promedio, la gran mayoría de las probetas rompió en “Tipo 5” que describe fracturas en los lados de la parte superior o inferior y que ocurre comúnmente con cabezales no adheridos. Luego, hubo otro patrón que ocurrió en menor medida y fue el “Tipo 4” que describe una fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos de la probeta. A continuación, en la *Figura 4.9* se ejemplifican estos dos casos y se pueden ver las superficies de fracturas.



Figura 4.9. Tipo de rotura probetas recicladas: a) Tipo 5 - 10%; b) Tipo 4 - 20%; y c) Tipo 4 - 30%

La falla del hormigón depende principalmente de tres factores: la resistencia de la pasta cementicia, la resistencia de los agregados y la resistencia de la zona de transición interfacial (ITZ) entre ambos. La resistencia del agregado afecta la capacidad del hormigón para soportar cargas, mientras que la ITZ tiende a ser el punto más débil donde se inician las fallas. Los agregados de alta resistencia mejoran la adherencia con la pasta, mientras que agregados más débiles o reciclados tienden a debilitar esta interfaz, provocando fallas prematuras (Loannides et al., 2006).

Como se observa en las *Figuras 4.9 B y C*, hay presencia de agujeros o poros provocados por la presencia de aire atrapado en la probeta. Estos vacíos pueden actuar como puntos de concentración de tensión, lo que disminuye la resistencia general del material. Adicionalmente, algunos de los agregados en las probetas fallaron, lo que indica que su resistencia no era suficiente para soportar las tensiones aplicadas. Esto contribuyó a la formación de fisuras en la ITZ, que, combinada con los poros presentes, facilitó la fractura prematura. Al aplicar carga, estas fisuras y fallas en los agregados afectaron significativamente la integridad estructural de la probeta (Xu Y. et al., 2024).

Capítulo 5

Evaluación económica

El reciclado de hormigón, no solo reduce la demanda de recursos naturales, sino que también minimiza los desechos generados en proyectos de construcción y demolición. Sin embargo, para que sea viable, es fundamental realizar una evaluación económica que contemple una serie de costos que están relacionados con su producción como a su transporte, entre otros. En la siguiente *Tabla 5.1* se detallan los componentes que forman parte del costo total de la formulación base para obtener un metro cúbico de hormigón y su precio en dólares (cabe destacar que para los agregados y cemento, el costo ya incluye el servicio de flete).

Tabla 5.1. Evaluación económica de la formulación base

Componente	Precio unitario (USD)	Peso para 1 m ³ de hormigón (kg)	Costo (USD)
Arena fina	0.0118	383	4.53
Arena de trituración 0/6 C.	0.0117	383	4.48
Cemento CPC 40	0.13	365	45.85
Combustible*	6.94	1	6.94
Mano de obra	10.61	1	10.61
Mapefluid N150	1.64	2.92	4.80
Mapeplast N11	1.46	2.2	3.22
Piedra 6-20 C.	0.0177	976	17.25
TOTAL			97.67

*6 litros de combustible por m³.

Es decir, para producir un metro cúbico de hormigón con la formulación base se requieren 97.67 USD. A continuación, analizaremos cuánto se ahorra al utilizar un cierto porcentaje en peso de material reciclado, específicamente el 10%, 20% y 30%. En la *Tabla 5.2* se muestra la ganancia obtenida por m³ con cada uno de estos porcentajes y el costo total.

Tabla 5.2. Costo total y ganancia por m³ utilizando hormigón reciclado

% de reciclado	Costo total (USD)	Ganancia por m³ (USD)
10	87.91	9.77
20	78.14	19.53
30	68.37	29.30

El costo total disminuye progresivamente conforme se incrementa el porcentaje de reciclado, siendo más alto para el 10% y más bajo para el 30%. Esto indica que, al aumentar el porcentaje de material reciclado en la mezcla, se logra una reducción en el costo total de preparación para una obra, lo que puede traducirse en mayores márgenes de ganancia.

Conclusiones

Este trabajo de tesis permitió diseñar hormigones sostenibles mediante la reutilización de hormigón fresco residual. Los ensayos se realizaron tanto en la formulación base como en el hormigón reciclado, los que estaban compuestos por agregados naturales (AF, ATC y AGN) utilizados en nuestra ciudad. Los resultados obtenidos permitieron definir en qué medida la redosificación de hormigón en estado fresco residual afecta a las propiedades de la mezcla como a las mecánicas.

A continuación, se enumeran las conclusiones generales y se sugieren posibles lineamientos para estudios futuros.

1. Conclusiones generales

Se diseñó un protocolo para la obtención de hormigones sostenibles mediante la redosificación de hormigón fresco residual que retorna a la planta de elaboración. Se caracterizaron los materiales de partida, se seleccionó una formulación base y se evaluaron sus propiedades en estado fresco y endurecido. También se analizó la variación con el tiempo de algunas propiedades en estado fresco, como el tiempo de fraguado, que confirmó que el hormigón no fragua durante el trayecto de ida y vuelta a la planta. Se observó una pérdida de trabajabilidad en el asentamiento con el paso del tiempo. Además, se evaluó el efecto de incorporar un aditivo superfluidificante a la formulación simulando lo que se realiza en un proceso habitual en obra.

Se comprobó que, al sustituir diferentes cantidades de material reciclado en la formulación base, no hubo cambios significativos en la trabajabilidad en estado fresco ni en las resistencias a la compresión en estado endurecido a distintas edades, cumpliéndose con la resistencia característica especificada en el proyecto. Por último, el análisis económico mostró que la redosificación de hormigón fresco residual permite una reducción progresiva de costos, alcanzando un ahorro de hasta USD 29.30 por metro cúbico para una proporción de 30% de material reciclado, lo que se traduce en un proyecto económicamente viable y sostenible a largo plazo.

2. Estudios futuros

A partir de los estudios realizados en este trabajo de tesis, surge que es posible obtener hormigones sostenibles mediante la redosificación del hormigón fresco residual. Sin embargo, es necesario realizar nuevos estudios para obtener nuevos resultados cambiando algunas propiedades del hormigón:

- Cambiar la redosificación en otras clases de hormigones, como H-21, H-40 o H-50, para evaluar si el comportamiento mecánico y durabilidad se mantienen o mejoran.
- Experimentar con otros tipos de agregados, como piedra granítica, para comparar cómo afectan las propiedades del hormigón redosificado. Y también, el tipo de piedra ya sea 6-12, 10-30 o mezcla de ambas.
- Evaluar el impacto ambiental del uso de hormigón redosificado, en comparación con hormigón tradicional, utilizando análisis de ciclo de vida y huella de carbono, para verificar su viabilidad como alternativa sostenible.

Referencias Bibliográficas

Ammar MA, Chegenizadeh A, Budihardjo MA, Nikraz H. The effects of crystalline admixtures on concrete permeability and compressive strength: A review. *Buildings*. **2024**; 14(9):3000. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/buildings14093000>

Bassani M, Diaz Garcia JC, Meloni F, Volpatti G, Zampini D. Recycled coarse aggregates from pelletized unused concrete for a more sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production*. **2019**; 219:424–432.

Bertone GM. Diseño de hormigones de rápida habilitación para bacheo urbano [Trabajo Final de Graduación en Ingeniería en Materiales]. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata; **2022**. Disponible en: <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/798>

Corbu O, Puskas A, Dragomir M-L, Har N, Toma I-O. Eco-Innovative Concrete for Infrastructure Obtained with Alternative Aggregates and a Supplementary Cementitious Material (SCM). *Coatings*. **2023**; 13:1710. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/coatings13101710>

Di Maio AA, Giaccio G, Zerbino R. High-Performance concrete: Relationship between strength and other physical properties related with service life. *Revista L'industria Italiana del Cemento*. **1999**; (747):766–775.

Edwards B. Sustainable architecture: European directives and building design. Oxford: Architectural Press; **1999**.

EUR-Lex. **2018**. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1537873850842&uri=COM:2018:656:FIN>

Fernández Shepherd L. Uso de residuos plásticos para el desarrollo de hormigones sostenibles [Trabajo Final de Graduación en Ingeniería en Materiales]. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata; **2022**. Disponible en: <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/681>

Férriz-Papi JA. Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Revista de Materiales de Construcción*. **2014**; 64(313).

Ferrari G, Miyamoto M, Ferrari A. New sustainable technology for recycling returned concrete. *Const Build Mater*. **2014**; 67:353–359.

Fuentes C, Guerrero R, Guillén D, Aguilar J, Mendoza A, Corcuera J. Trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto para diferentes relaciones agua/cemento. **2020**.

Garside M. Industrial sand and gravel production worldwide from 2008 to 2020. *Statista*. **2021**. Disponible: <https://www.statista.com/statistics/728756/industrial-sandand-gravel-production-worldwide/>

Global Cement and Concrete Association (**GCCA**). Global Cement and Concrete Sustainability Report. London: GCCA; **2023**.

Hewlett P, Liska M. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier; **2019**.

Hoang ND, Pham AD. Estimating Concrete Workability Based on Slump Test with Least Squares Support Vector Regression. Institute of Research and Development, Faculty of Civil Engineering, Duy Tan University. **2016**.

IOSR. Effects of Temperature on Cement Hydration and Its Influence on Concrete Strength. *IOSR J Mech Civ Eng*. **2016**;13(6):17–31. Disponible en: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue6/Version-1/D1306011731.pdf>

IPCC. Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change-Technical Summary. Cambridge University Press: New York, NY, USA; **2022**.

Luangcharoenrat C, Intrachooto S, Peansupap V, Sutthinarakorn W. Factors influencing construction waste generation in building construction: Thailand's perspective. Sustainability. **2019**;11(13):3638.

Loannides, A.M., & Mills, J.C. (2006). Effect of Larger Sized Coarse Aggregates on Mechanical Properties of Portland Cement Concrete Pavements and Structures; Ohio Department of Transportation Office of Research and Development: Columbus, OH, USA.**2006**.

Merino-Lechuga AM, González-Caro Á, Fernández-Ledesma E, Jiménez JR, Fernández-Rodríguez JM, Suescum-Morales D. Accelerated Carbonation of Vibro-Compacted Porous Concrete for Eco-Friendly Precast Elements. Materials. **2023**;16(8):2995.

MIT Concrete Sustainability Hub. Concrete: The most widely used material in the world - and one of the most impactful. **2023**. Disponible en: <https://cshub.mit.edu>

Nocun-Wczelik W, Trybalska B. Effect of admixtures on the rate of hydration and microstructure of cement paste. Cement Wapno Beton. **2007**;6, 284–9.

Orhon, A.V.; Altin, M. Beton yapıların karbon ayak izi. In Proceedings of the National Conference on Sustainable Building Design, Bornova, Turkey, **2012**; 12–13.

Ortiz, J. A., de la Fuente, A., Mena Sebastia, F., Segura, I., y Aguado, A. Steel-fibre- reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications. Construction and Building Materials, **2017**;156, 230–241. <https://doi.org/hbmj>

Ortiz, J. A. Influencia de las condiciones ambientales en el comportamiento del hormigón en estado fresco y endurecido [Tesis Doctoral]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; **2021**. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93475/03Jaol03de15.pdf>

Palacio, O., Chávez, A., y Velásquez, Y. Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. *Revista Tecnura*; **2017**,21(53).

Prahallada, MC, Prakash, KB. Características de resistencia y trabajabilidad del hormigón reforzado con fibras plásticas de desecho producido a partir de agregados reciclados. *Int. J. Eng. Res. Appl.*; **2011**, 1, 1791–1802.

Priano, C., Señas, L., Moro, J. y Marfil, S. Agregados reciclados pretratados para uso en hormigón. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*; **2016**,36, 77–86.

Salinas Villegas EX, Vélez Niacato AM, Espín Lagos SM, Freire Romero DR. Hormigón fresco y su incidencia en sus propiedades físicas y mecánicas: Fresh concrete and its impact on its physical and mechanical properties. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*. **2023**. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/373037703_Hormigon_fresco_y_su_incidencia_en_sus_propiedades_fisicas_y_mecanicas_Fresh_concrete_and_its_impact_on_its_physical_and_mechanical_properties.

Schust, C., Ramos, M., y Stefani, P. Reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adición pelletizante. *Revista Hormigón*; **2022**,61, 72-87.

Sičáková A, Urbán K, Kováč M. Slump Loss of Concrete Based on RCA and Prepared by Specific Mixing Approach. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. **2018**; 62(4):1015–20.

Tam, V. W. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*; **2008**, 52(5), 821–828.

Tang, W., Khavarian, M., Yousefi, A., y Cui, H. Properties of self-compacting concrete with recycled concrete aggregates. En R. Siddique (Ed.), *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*; **2020**, (219–248). Disponible.: <https://doi.org/hbmb>

Titi, H. H., Sooman, M., and Tabatabai, H. Characterization of Recycled Aggregates in Existing Pavement Base Layers. *ASTM International. Geotech. Test. J.*; **2024**,47(1):22–44. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220268>

Ulubeyli, S., Kazaz, A. y Arslana, A. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. *Procedia Engineering Journal*; **2016**, 172, 1190-1197.

United States Geological Survey. Sand and Gravel Statistics and Information; **2021**. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/construction-sand-and-gravel-statistics-and-information>.

United States Geological Survey. Cement Statistics and Information; **2024**. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>.

U.S. Geological Survey (USGS), Cement statistics and information, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>.

Wang, Weina et al. The Time Variation Law of Concrete Compressive Strength: A Review. *Appl. Sci.* **2023**;13(8):4947 Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/4947>

Wang, R. y Zhang. Y. X.. Recycling fresh concrete waste: A review. *Structural Concrete Journal*; **2018**, 19, 1939-1955. <https://doi.org/10.1002/suco.201800057>.

Xu Y, Yuan Q, De Schutter G, Xiang G, Hu C, Chen L. Mechanism of concrete damage under the coupled action of freeze-thaw cycle and low-stress impact fatigue load: From pore structure to energy dissipation. *Construction and Building Materials*. **2024**; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824021226>

Zhao X, Zhang H, Liu J, et al. Influence of particle size distribution on the properties of concrete. *Cement Concr Res.*; **2017**, 101, 82–89.

Zhuguo Li. Rheological model of fresh concrete considering granular characteristics.

Composite:Engineering;

2022.

Disponibile:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836822005236>

Anexo

1.1. Planilla de reciclado

A continuación, en la *Tabla 1A* se representa la planilla que se utilizó para tener todas las propiedades e información necesarias para implementar el reciclado en 10, 20 o 30% en peso.

Tabla 1A. Modelo base de planilla para obtener hormigón reciclado

HORMIGON LABORATORIO					
FECHA:		HORA:		PASTON N°	
INTERESADO:		Ivan Gaston Manchenkor			
PRODUCTOR:		DHASA			
OBJETIVO:					
RELACION a/c:					
CEMENTO MARCA:					
Ph AF 1:	gr	Ps AF 1:	gr	Volumen en lt.	
Ph AF 2:	gr	Ps AF 2:	gr		
Ph AG 1:	gr	Ps AG 1:	gr	Volumen m3	
Ph AG 2:	gr	Ps AG 2:	gr		
PASTON DE PRUEBA					
N°	MATERIALES		HUMEDAD [%]	ABS. [%]	PESO MATERIALES
					Volumen(Lts)
1	AGUA		-----	-----	kg.
2	CEMENTO:		-----	-----	kg.
3	AF 1:	Arena 0/6 C			kg.
4	AF 2:	Arena Fina			kg.
5	AG 1:				kg.
6	AG 2:	Piedra cuarcitica 6/20			kg.
7	ADITIVO 1:				g.
8	ADITIVO 2:	Mapeplast N11			g.
9	ADITIVO 3:				g.
10	ADITIVO 4:				g.
11	AIRE				
% DE AIRE MEDIDO:			ASPECTO:		
TEMPERATURA AMBIENTE (al comienzo):			VOLUMEN DE RECIPIENTE WASHINGTON: 7039,5 cm ³		
TEMPERATURA AMBIENTE (al final):			PESO MUESTRA+MOLDE:	PESO MOLDE: 3,9 Kg	
EVOLUCION DE ASENTAMIENTO					
HORA DE TOMA DE ASENTAMIENTO	TIEMPO DE MEZCLADO	ASENTAMIENTO	TEMPERATURA DE HORMIGON (°C)	OBSERVACIONES	
				Asentamiento formulacion base	
				Asentamiento a los 15 minutos	
				Asentamiento a los 30 minutos	
				Asentamiento a los 45 minutos	
				Asentamiento a los 60 minutos s/super.	
				Asentamiento a los 60 minutos c/super.	
				Cantidad N150: g.	
				Asentamiento a los 15 minutos	
				Asentamiento a los 30 minutos	
				Asentamiento a los 45 minutos	
				Asentamiento a los 60 minutos	
				Asentamiento de reciclado	

1.2. Fichas técnicas

1.2.1. Cemento Portland



DEFINICIÓN

El cemento pórtland compuesto CPC 40, desarrollado por Cementos Avellaneda, es obtenido por la molienda de clinker portland, rocas calcáreas de alta pureza, puzolanas artificiales, pequeñas cantidades de yeso y aditivos mejoradores de la calidad, y se halla destinado a aquellas aplicaciones en las que no es necesario un requisito especial.

PROPIEDADES

En el cuadro adjunto se indican las propiedades del cemento pórtland compuesto Avellaneda en bolsa.

REQUISITOS FÍSICOS	UNIDAD	IRAM 50000		Avellaneda CPC40 B	
		Mínimo	Máximo		
Finura (retenido sobre tamiz 75 μ m)	%		15	1,5	
Finura (por permeametría Blaine)	m ² /kg	250	-	420	
Tiempo de fraguado inicial	Minutos	60	-	170	
Resistencia a compresión	2 días	MPa	10	-	20
	28 días	MPa	40	60	45,5
Requerimiento de agua	%	-	64	49	
Contracción por secado	%	-	0,15	0,06	
Expansión en autoclave	%	-	0,8	0,01	
REQUISITOS QUÍMICOS					
Residuo insoluble	%	-	35	9	
Óxido de magnesio (MgO)	%	-	-	1	
Pérdida por calcinación	%	-	14,5	10,6	
Anhidrido sulfúrico (SO ₃)	%	-	3,5	2,5	
Cloruros (Cl ⁻)	%	-	0,10	< 0,10	
Sulfuros (S ²⁻)	%	-	0,50	< 0,10	

Valores objetivos correspondientes a este producto.

De la comparación, surge que las propiedades del cemento compuesto Avellaneda cumplen ampliamente los requisitos indicados en la norma IRAM 50000, para la categoría 40 (figura 1). Se destaca, por su importancia, la resistencia a compresión, que a la edad de 2 días, supera en promedio al 100% del requisito normativo. Este hecho se extiende a los 28 días, superando su media, en un 15% al límite normativo.

Centro de Atención al Cliente
0800-333-2363
atencionalcliente@cavellaneda.com.ar

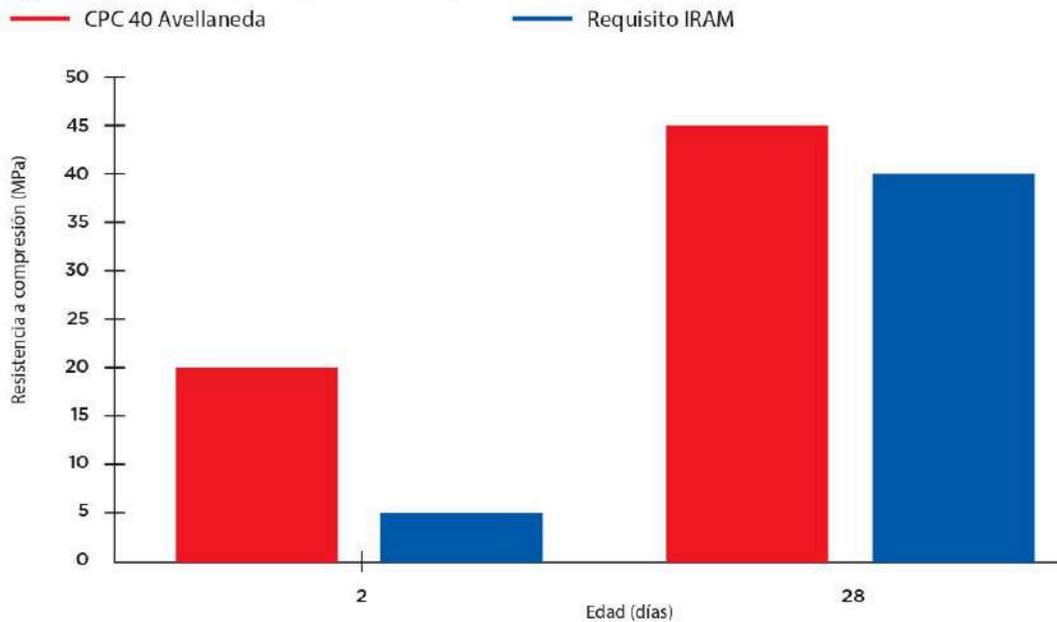
www.cementosavellaneda.com.ar

CEMENTO AVELLANEDA COMPUESTO (BOLSA) OLAVARRÍA

Cemento Pórtland Compuesto CPC40



Figura 1. Resistencia a compresión del mortero IRAM 1622



Por su bajo contenido de aluminato tricálcico ($C3A < 8\%$), el cemento compuesto Avellaneda podría considerarse moderadamente resistente a los sulfatos.

USOS

El cemento portland compuesto se emplea en todo tipo de obra que no requiera de un cemento especial, a saber:

- Hormigón elaborado
- Estructuras de hormigón armado, pretensado y postesado
- Pavimentos, pistas de aeropuertos y puentes
- Canales y alcantarillas
- Bloques y elementos premoldeados
- Trabajos de albañilería
- Suelo-cemento

Por su excelente trabajabilidad, su rápida evolución resistente y su elevada resistencia final, se recomienda especialmente en:

- Hormigones de alta resistencia
- Estructuras elaboradas con encofrados deslizantes
- Hormigones autocompactantes (HAC).

Centro de Atención al Cliente
0800-333-2363
atencionalcliente@cavellaneda.com.ar

www.cementosavellaneda.com.ar

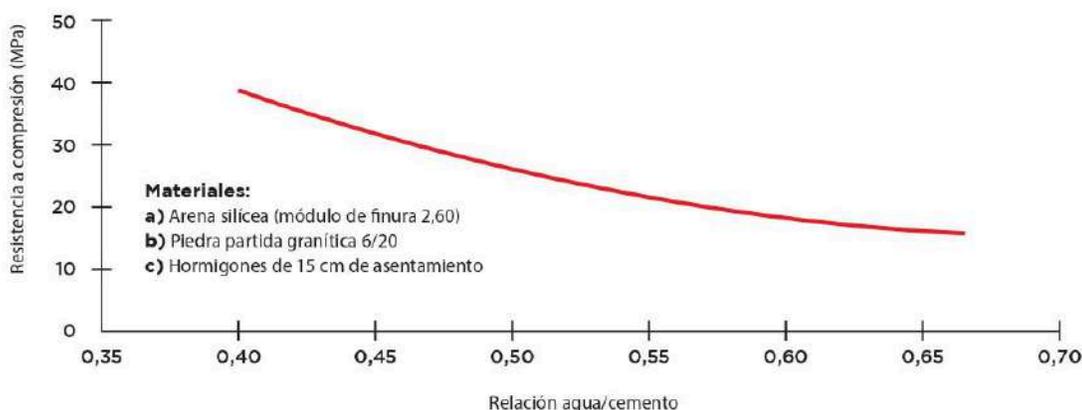
RECOMENDACIONES

A efectos de lograr morteros y hormigones con adecuada resistencia, durabilidad y estabilidad volumétrica, se recomienda respetar estrictamente todas las especificaciones indicadas en el CIRSOC 201, empleando:

a) Emplear materiales de buena calidad. Emplear agregados bien graduados, limpios e inocuos. Evitar el uso de agregados de forma lajosa y arenas muy finas, ya que incrementan la demanda de agua de las mezclas, con lo cual se reduce la resistencia e impermeabilidad del mortero u hormigón y se incrementa el riesgo de fisuración.

b) Dosifique racionalmente, basado en el conocimiento de las características de los materiales componentes y el diseño de las mezclas en base a la relación agua/cemento (figura 2). **En el caso de estar expuesto a un medio agresivo como sulfatos o cloruros, se debe elaborar un hormigón H30 o superior según las condiciones del medio (Relaciones a/c menores a 0,45).**

Figura 2. Resistencia a compresión del hormigón a 28 días (valores orientativos)



c) Métodos de elaboración, colocación y compactación adecuados. El asentamiento del hormigón deberá ser compatible con el método de compactación utilizado en obra. Se recomienda emplear la menor cantidad posible de agua y evitar el uso de mezclas muy fluidas (con exceso de agua) ya que esto disminuye la resistencia e impermeabilidad del material y aumenta el riesgo de fisuración por contracción.

d) Un buen método de curado, cumpliendo los plazos mínimos indicados en el CIRSOC 201, especialmente durante las primeras edades y en períodos de altas temperaturas y baja humedad relativa ambiente. Se recomienda almacenar las bolsas (papel Kraft) de cemento, en locales bajo techo y protegidas contra la acción de la intemperie y de la humedad.

e) Use siempre elementos de protección para manipular el producto: se recomienda evitar el contacto del producto con la piel o su inhalación, empleando los elementos de protección personal adecuados (guantes, anteojos de seguridad, etc.). Si el producto entra en contacto con los ojos, enjuague con abundante agua y

CEMENTO AVELLANEDA COMPUESTO (BOLSA) OLAVARRÍA

Cemento Pórtland Compuesto CPC40



consulte a su médico.

Centro Nacional de Toxicología del Hospital Posadas: 0-800-333-0160.

f) Almacenamiento: Se recomienda almacenar las bolsas (papel Kraft) de cemento bajo techo sobre tarima de madera (pallet) y protegidas contra la acción de la intemperie y de la humedad, alejándolas de las paredes (30 cm mínimo).

VENTAJAS

Por su **elevada resistencia mecánica**, los hormigones elaborados con cemento compuesto Avellaneda CPC40 posibilitan, entre otras cosas:

- **Incrementar la seguridad**, si se mantiene la dosificación
- **Lograr una mayor durabilidad**, al reducir la porosidad de la pasta.
- **Reducir el costo**, si se reduce el contenido de cemento

Mejora, frente al normal, la plasticidad de morteros y hormigones facilitando los trabajos de obra.

Por su adecuada composición, el cemento compuesto Avellaneda CPC40 permite elaborar mezclas **más amigables con el medio ambiente**, en virtud de las posibilidades de este cemento desde el punto de vista de la sostenibilidad (menor cantidad de emisiones de CO₂ al ambiente, menor uso de combustibles fósiles, mayor extensión de la vida útil de los recursos no renovables)

Cementos Avellaneda S. A., además, ha certificado todos sus procesos de fabricación y control de proceso, bajo norma ISO 9001.

Es un producto certificado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

PRESENTACION

El cemento portland compuesto Avellaneda CPC40 se comercializa en bolsas de 50 kg.

Centro de Atención al Cliente
0800-333-2363
atencionalcliente@cavellaneda.com.ar

www.cementosavellaneda.com.ar

1.2.2. Plastificante y aditivo reductor de agua



MAPEI

Mapeplast N11

Plastificante y aditivo reductor de agua para hormigón con baja pérdida de trabajabilidad

DESCRIPCIÓN

Mapeplast N11 es un aditivo líquido plastificante y reductor para el hormigón elaborado.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Mapeplast N11 es especialmente adecuado para todas aquellas aplicaciones en las que se necesita una moderada velocidad de hidratación del cemento o un tiempo de transporte largo. Los principales campos de aplicación son:

- hormigón elaborado (especialmente en climas calidos);
- hormigón bombeable;
- hormigón para vertidos masivo.
- hormigón resistente al agua.

Algunos ejemplos de aplicación

Junto al efecto plastificante, Mapeplast N11 presenta una ligera acción retardante sobre la hidratación del cemento gracias a la combinación de estos dos efectos y por lo tanto especialmente indicado para:

- hormigón premezclado de calidad para estructuras con una resistencia a la compresión superior a 20 MPa;
- hormigón premezclado para estructuras estancas (con una relación agua/cemento no superior a 0,55): plantas depuradoras, embalses, canales, túneles, etc;

- hormigón para vertidos masivos donde hay que reducir los grados térmicos derivados del desarrollo del calor de hidratación del cemento: diques, pilares, plateas, etc.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Mapeplast N11 es una solución acuosa de productos activos capaces de dispersar las partículas de cemento.

Cualquiera que sea el objetivo a conseguir (aumento de las prestaciones, aumento de la consistencia, reducción de la dosificación de cemento) es posible controlar estas propiedades variando la dosificación entre 0,2% y 1% respecto el peso del cemento: a mayor dosis, mayor efecto. También el mantenimiento de la consistencia aumenta con la dosis del aditivo.

MODO DE APLICACIÓN

Es preferible añadir Mapeplast N11 en la planta de hormigón después de haber introducido los demás componentes (agua, cemento, áridos y adiciones). La acción del aditivo es más eficaz cuanto más se pospone el momento de la mezcla. La acción de Mapeplast N11 es máxima si las partículas de cemento y los áridos ya están mojados con agua, y es mínima si el aditivo se introduce sobre sólidos secos que absorben una parte (sobre todo si los áridos son porosos) y reducen parcialmente su eficacia.



DATOS TÉCNICOS (valores característicos)

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO

Consistencia:	líquido
Color:	oscuro
Densidad de acuerdo con ISO 758 (g/cm ³):	1,18 ± 0,03 a +20°C
Acción principal:	reducción del agua y/o aumento de la trabajabilidad
pH:	8,5 ± 2,0

Una buena norma es la empezar a añadir el aditivo, con un dosificador automático, cuando ya se ha introducido al menos la mitad del agua de la mezcla prevista.

Compatibilidad con otros productos

El aditivo **Mapeplast N11** es compatible con otros productos para la producción de hormigones especiales y especialmente:

- **Mapeair AE** incorporador de aire para producir hormigones resistente a ciclos hielo-deshielo;
- cenizas volantes para la producción de cemento con puzolana artificial;
- agentes desmoldante de la línea **Mapeform** para la liberación de encofrados de hormigón;
- productos de la línea **Mapecure** como emulsiones de curado para proteger pisos y estructuras de hormigón de la evaporación rápida del agua.

DOSIFICACIÓN

Dosificación en peso:

de 0,2 a 1 l por cada 100 kg de cemento. Diferentes dosis de los sugeridos deben ser probados previamente a través de ensayos de hormigón, además de consultar al departamento de Asistencia Técnica de MAPEI.

PRESENTACIÓN

Mapeplast N11 se encuentra disponible en tambores de 240 kg, contenedores de 1000 kg y a granel bajo pedido.

ALMACENAMIENTO

Mapeplast N11 puede ser almacenado en su envase cerrado y protegido de las heladas durante 12 meses.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN Y LA PUESTA EN OBRA

Mapeplast N11 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.

**Mapeplast
N11**

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.

766-2-2016 (AR)



EL COMPAÑERO MUNDIAL DE LOS CONSTRUCTORES



1.2.3 Aditivo superplastificante



DESCRIPCIÓN

Mapefluid N150 es un aditivo superplastificante líquido y reductor de agua de alto rango para hormigón de calidad (con reducción de permeabilidad, durable, de alta resistencia).

CAMPOS DE APLICACIÓN

Debido a la mejora de la trabajabilidad (clase de consistencia S4 y S5 según la norma EN 206-1) obtenida en la mezcla de hormigón con

Mapefluid N150 se logran características de alto rendimiento en estado endurecido.

Mapefluid N150 es adecuado para todas las aplicaciones que requieren trabajabilidad y reducción de agua de baja.

Las principales áreas de aplicación son:

- hormigón premezclado (especialmente en climas fríos);
- hormigón bombeado;
- hormigón masivo.

Algunos ejemplos de aplicación

Además de su efecto plastificante, **Mapefluid N150** tiene una ligera acción retardante sobre la hidratación del cemento y por lo tanto es particularmente adecuado para:

- hormigón de calidad premezclado para estructuras con R_{ck} superior a 25 MPa;
- hormigón premezclado para estructuras en armado y pretensado de hormigón armado expuesto a agentes agresivos: vigas, columnas, puentes cubiertas y viaductos;
- hormigón premezclado para estructuras estancas: plantas depuradoras, embalses, canales, túneles, etc.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Mapefluid N150 es una solución acuosa de polímeros activos capaces de dispersar partículas de cemento. La mezcla se puede ajustar para obtener los resultados requeridos (aumento de la resistencia, mejora de trabajabilidad, reducción de cemento) mediante la variación de la dosis entre 0,5% y 1,5% en peso de cemento: cuanto mayor es la dosis, mayor será el efecto.

MODO DE APLICACIÓN

Es preferible añadir **Mapefluid N150** en el mezclador después de todos los otros ingredientes (agua, cemento, agregados). La acción de la mezcla es más eficaz cuando se añade más tarde.

COMPATIBILIDAD CON OTROS PRODUCTOS

Mapefluid N150 es compatible con otros productos para la producción de hormigón especial, y sobre todo con:

- **Mapeair AE**, agentes incorporadores de aire para la producción de hormigón resistente a los ciclos de hielo-deshielo;
- **Mapeplast SF**, mezcla de polvo de micro-sílice para producir hormigón de alta calidad con resistencia, durabilidad e impermeabilidad;
- **Expaccrete**, agente expansivo para producir contracción compensada de hormigón;
- cenizas volantes para la producción de cemento con puzolana artificial;
- Agentes desencofrantes de la línea **Mapeform** para la liberación de encofrados de hormigón;
- Compuestos de curado de la línea **Mapecure**



Mapefluid N150

DATOS TÉCNICOS (valores característicos)

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO

Consistencia:	líquido
Color:	marrón
Densidad de acuerdo con ISO 753 (g/cm ³):	1,17 ± 0,03 a +20°C
Acción principal:	reducción de agua y/o mejora de la trabajabilidad
pH	8,5 ± 2
Clasificación de acuerdo a la norma EN 934-2:	alta gama, reductor de agua, superplastificante, las tablas 3.1 y 3.2
Clasificación de acuerdo con ASTM C464:	tipo F
Clasificación de acuerdo con ASTM C1017:	tipo I

para prevenir excesivamente la rápida evaporación del agua de la mezcla del hormigón (suelo).

DOSIFICACIÓN

Dosificación en volumen:

La dosis es de 0,5 a 1,5 l por cada 100 kg de dosis cemento.

Diferentes dosis de la sugerida debe ser probada previamente a través de ensayos de hormigón, además de consultar al departamento de asistencia técnica de MAPEI.

PRESENTACIÓN

Mapefluid N150 se encuentra disponible en tambores de 220 kg, contenedores de 1000 kg y a granel bajo pedido.

ALMACENAMIENTO

Mapefluid N150 puede ser almacenado en su envase cerrado durante 12 meses; proteger de las heladas.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREPARACIÓN Y LA PUESTA EN OBRA

Mapefluid N150 no es considerado como peligroso de acuerdo con la normativa vigente en cuanto a la clasificación de las mezclas. Se recomienda el uso de guantes

y gafas de protección y que tome las precauciones habituales para el manejo de productos químicos. Para más información y completa sobre el uso seguro de nuestro producto por favor consulte la versión más reciente de nuestra Ficha de Seguridad.

PRODUCTO PARA 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

6372-2-2016 (AR)



EL COMPAÑERO MUNDIAL DE LOS CONSTRUCTORES

1.3. Ensayos de agua fueron realizados según Norma IRAM 1601

Informe N° 44658
O.T. N° 415/23

INTERESADO : DURMIENTES DE HORMIGON ARGENTINOS SA
OBRA : Obrador Ruta 2 km 393

PLANILLA N° 5 AGUA DE MEZCLADO PARA MORTEROS Y HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND

N°LAB.ITH : 4735/23
Identificación de procedencia : Agua de Planta
Extraída de : No declara
Extraída por : Interesado
Recibida en fecha : 03/02/23

RESULTADOS

I. ANALISIS QUIMICOS

	Resultados	Límites Mínimos	Límites Máximos	
- Materia orgánica, en O ₂ consumido ...	0,18 mg/dm ³	--	3,0	mg/dm ³
- Residuo sólido ...	1840 mg/dm ³	--	5000	mg/dm ³
- Sulfatos, en ión SO ₄ ⁼ ...	21 mg/dm ³	--	2000	mg/dm ³
- Cloruros, en ión Cl ⁻ ...	97 mg/dm ³	--	1000	mg/dm ³
- Hierro (cualitativo) ...	Negativo ---	--	--	--
- pH ...	8.0 ---	4,0	--	--

II. ENSAYOS FISICO-MECANICOS

Muestra de agua	Tiempos de fraguado Vicat (IRAM 1619)		Resistencia a la compresión en mortero normal (IRAM 1622) (MPa)
	Inicial	Final	7 días
Patrón agua destilada	1 hs 55 min	2 hs 45 min	42,2
Agua N°LAB.ITH 4735/23	2 hs 05 min	3 hs 00 min	42,7

NOTAS:

- 1) Los ensayos fueron realizados según norma IRAM 1601, Tercera Edición 2012-08-01.
- 2) La muestra de agua de mezclado N°LAB.ITH 4735/23, identificada como "Agua de Planta", resulta **apta** para ser utilizada como agua de mezclado y curado en hormigones de cemento portland, como así también en hormigón pretensado, según la mencionada Norma.