

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Facultad Regional Paraná

Proyecto Final:

**Estudio del comportamiento del Hormigón
elaborado con incorporación de residuos de lavado
de camiones motohormigoneros.**

Alumnos:

Brown Moia Tomas

De Lisa Juan Pablo

Puig Clarisa

Schubert Irina

Directores de Proyecto:

Mg. Ing. Gustavo Bolla

Mg. Ing. Sato Rodolfo

Docente guía:

Ing. Juan Agustín Lescano

Índice

Introducción	2
Estado actual de conocimiento sobre el tema.....	3
Objetivos de la investigación.....	5
Caracterización de los materiales	6
Agregado Grueso.....	7
-Canto Rodado 10-20:	8
-Canto Rodado 10-30:	8
Agregado fino	11
-Arena Fina:	12
-Arena Gruesa:	13
Material Reciclado.....	16
Cemento.....	23
Superfluidificante Sikament 90 E	26
Tabla de resumen.....	28
Dosificación de la mezcla	29
Ejecución de pastones	40
Ensayos de rotura	45
Ensayo de compresión simple.....	46
Ensayo de tracción por compresión diametral	47
Ensayo de flexión	49
Evaluación de resultados	52
Compresión simple.....	52
Tracción por compresión diametral.....	53
Flexión	54
Resumen de los resultados obtenidos.	55
Evaluación económica.....	57
Conclusiones	60
Bibliografía	62
Referencias	63

Introducción

El presente Proyecto Final forma parte del Proyecto de Investigación y Desarrollo (PID): *Hormigones para pavimentos con reutilización de materiales recuperados del lavado de camiones motohormigoneros*, para el cual se ha estudiado la generación de nuevos materiales para obras civiles utilizando los residuos de la construcción y demolición (RCD).

Particularmente la investigación está orientada a la reutilización de materiales provenientes de la elaboración a escala industrial del hormigón de cemento portland.

Uno de los principales residuos que se generan en la producción del hormigón son los materiales sobrantes de las diferentes coladas elaboradas, las cuales en general tienen un determinado margen de mayoración en el volumen.

Posteriormente se produce el lavado y descarga de los camiones motohormigoneros, y su deposición varía en función de las diversas empresas elaboradoras.

En algunos casos se depositan en acopios sin tratamiento posterior, y en otros se tratan en piletas de lavado y decantación, para posteriormente mediante un proceso de tamizado previo, acopiarse en lugares específicamente acondicionados.

Actualmente estos materiales se utilizan para hormigones de limpieza de cámaras para desagües, conductos y rellenos de densidad controlada para bases y sub-bases de pavimentos.

El propósito de esta investigación fue dosificar hormigones estructurales para pavimentos con la incorporación de estos materiales residuales.

En primera instancia se realizó una caracterización del residuo proveniente de los mixers, para luego ser incorporados a nuevos hormigones, logrando con ello una utilización del material residual y una reducción del consumo de materiales nuevos en la mezcla.

Se realizaron tres dosificaciones con diferentes porcentajes de material reciclado, tomando como base el Método de Dosificación Racional desarrollado por el Instituto de Cemento Portland Argentino (ICPA). También se elaboró un hormigón testigo con materiales comerciales de la misma procedencia que los residuos utilizados a los efectos de comparar los resultados obtenidos.

El presente proyecto contempló el análisis de éstos hormigones diseñados en laboratorio, mediante la determinación de sus propiedades físico-mecánicas, para posteriormente ser incorporados en tramos experimentales, los cuales serán auscultados durante un periodo determinado de librado al tránsito. Esta investigación está prevista en el período 2020-2021.

Del análisis de los resultados obtenidos se realizaron conclusiones respecto a su comportamiento mecánico a compresión simple, tracción indirecta y flexión. Finalmente se efectuaron consideraciones económicas respecto a su utilización en las vías de comunicación.

Estado actual de conocimiento sobre el tema

El hormigón es un material durable de construcción que también puede ser recuperado y reutilizado.

Se estima que, en el mundo, se fabrican alrededor de 25 billones de toneladas de hormigón cada año.

Esto representa más de 1,7 billones de cargas de camiones anuales, o cerca de 6,4 millones de cargas diarias, o más de 3,8 toneladas por persona en el mundo cada año.

En el mundo, la cantidad de hormigón utilizado en construcción dobla la cantidad del resto de materiales utilizados incluyendo madera, acero, plástico, y aluminio.

Cerca de 1.300 millones de toneladas de desechos son generadas en Europa cada año, de las cuales el 40% corresponden a residuos de construcción y demolición (RCD).

Los Estados Unidos producen cerca de 325 millones de toneladas de RCD y Japón unos 77 millones.

Dado que China e India están produciendo y consumiendo más del 50% del hormigón en el mundo, su generación de desechos también será significativa a medida que su desarrollo avanza.

Muchos países tienen esquemas de reciclaje para RCD y se alcanzan altos niveles de recuperación en países como Holanda, Japón, Bélgica y Alemania.

En algunos países el hormigón de desecho usualmente se destina a vertederos municipales. Actualmente, los diferentes métodos de cálculo y la disponibilidad de información dificultan la comparación entre países.

El hormigón recuperado a partir de RCD puede ser triturado y reutilizado como agregado. Su uso más común es como subbase vial. También puede ser utilizado como componente de nuevos hormigones.

En Europa, las políticas de residuos están encaminadas a la recuperación de desechos.

El vertimiento de basuras está siendo cada vez más desalentado y algunos países han prohibido el vertimiento de RCD en rellenos sanitarios.

La Unión Europea también persigue una estrategia del uso sostenible de los recursos naturales.

La introducción, en 2004, de los estándares europeos para agregados que se enfoca sobre la idoneidad para el uso, y no en la fuente, abre el camino para el crecimiento del uso de agregados sostenibles.

En el Reino Unido se han implementado tarifas e impuestos sobre el vertimiento de desechos para incentivar la utilización de agregados reciclados e incluye ayudas económicas para proyectos de infraestructuras de reciclaje y para la investigación de la reducción de

barreras de regulación otros estudios por medio del programa WRAP (Programa de Acción Contra Desperdicios de Recursos).

En Dinamarca, los impuestos sobre la disposición de desechos han impulsado el reciclaje.

En Suiza, se utilizan diferentes porcentajes de RCD para la construcción de sub-bases y bases estabilizadas para pavimentos de alto rendimiento.

Japón tiene leyes robustas en desarrollo sostenible y hay un fuerte interés en limitar el vertimiento de desechos, reutilizar y reciclar materiales. En 2009, La Ley sobre el Reciclaje de Materiales de Construcción entró en vigencia, esta ley exige la separación obligatoria de los RCD y la reutilización/reciclaje del hormigon, el asfalto y la madera.

Las devoluciones de hormigon (hormigon fresco, húmedo, devuelto a la planta de premezclado como exceso) también pueden ser recicladas exitosamente, siendo éste material el que va ser utilizado en la presente investigación.

Existen instalaciones de recuperación en muchos sitios de producción en el mundo desarrollado. Más de 125 millones de toneladas son generadas cada año.

En la Argentina, se estima que entre un 8 y un 10% de la producción de hormigón elaborado es devuelto a las plantas hormigoneras y puede ser reutilizado. Considerando que en aquí se elabora anualmente alrededor de 5,6 millones de m3 de hormigon, nos da un desperdicio anual de 560.000 m3 aproximadamente.

En el Graficio 1 se observa la produccion anual de hormigon de las empresas asociadas a la Asociación Argetina del Hormigón Elaborado (AAHE) entre los años 2014 y 2018 .^[1]

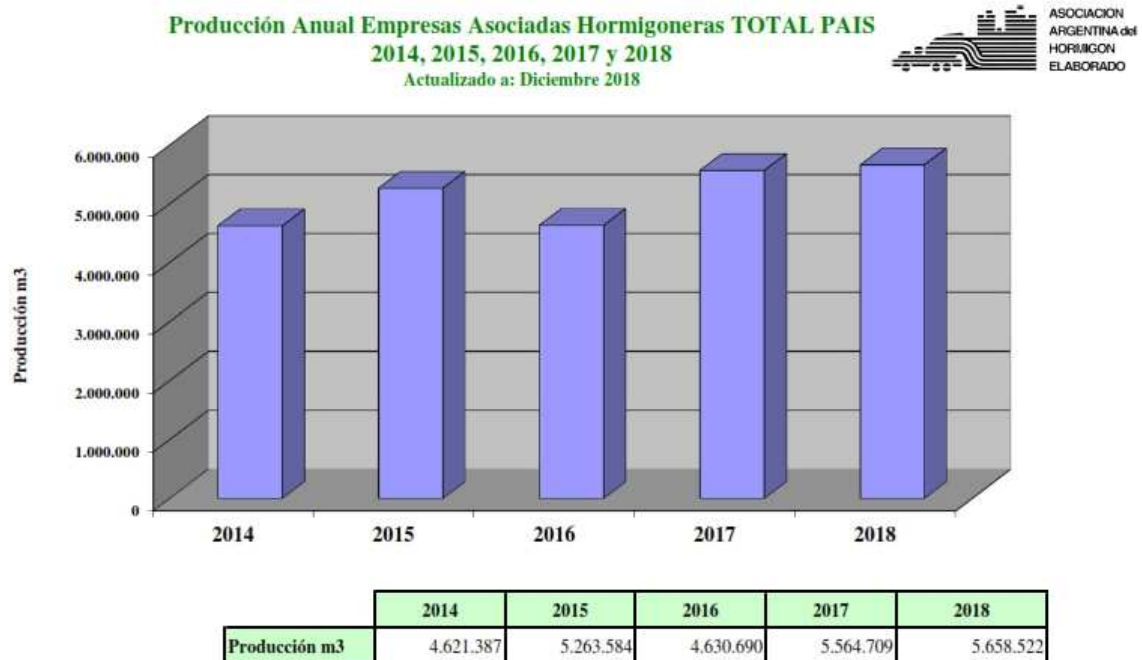


Gráfico 1: Estadísticas de la Producción de Hormigón Elaborado 2014 al 2018 (Socios AAHE)

Objetivos de la investigación

El presente proyecto tiene como objetivo general aportar soluciones sustentables, para el aprovechamiento de ciertos residuos RCD (Residuos de la Construcción y Demolición), en este caso el material obtenido del lavado de los camiones motohormigoneros de una empresa local elaboradora de hormigón.

Mejorar las prácticas de ahorro de materias primas e insumos, con el propósito de tener consumos mínimos y así obtener un beneficio ambiental y económico a través de la aplicación de la producción más limpia de hormigones.

Como objetivos específicos se consideran los siguientes puntos:

- Realizar un análisis de la bibliografía disponible.
- Realizar la caracterización del material reciclado, y de los demás materiales componentes comerciales del hormigón, lográndola mediante ensayos de: granulometría por vía seca y por vía húmeda (según corresponda en cada caso), densidad, humedad y absorción.
- Estudiar distintas dosificaciones experimentales utilizando un 30%, 45% y 60% de material reciclado respecto del total de agregados, comparándolas con un hormigón patrón elaborado con materiales comerciales de idéntica procedencia que los materiales reciclados.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes hormigones, mediante ensayos resistencia a compresión, flexión, tracción indirecta, elaborado con los materiales descriptos en el objetivo general.
- Analizar los potenciales usos del hormigón generado, como elemento estructural, en obras de pavimentación.

En el presente proyecto se siguieron los lineamientos del Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201-05.^[2]

Caracterización de los materiales

A continuación, se detallan las diferentes determinaciones realizadas a cada uno de los materiales componentes de los hormigones diseñados para definir sus características y su aptitud para conformar parte de las dosificaciones. Los materiales componentes fueron los siguientes:

- **Cemento** (aglomerante): CPC 40 (Cemento portland compuesto San Martín con adición de filler calcáreo/escoria IRAM 50.000 IRAM 50.003)
- **Arena** (agregado fino): areneras de la ciudad de Paraná, que extraen del río Paraná.
- **Canto Rodado 10-20** (Agregado Grueso): río Uruguay, costa este de la Provincia de Entre Ríos
- **Canto Rodado 10-30** (Agregado Grueso): río Uruguay, costa este de la Provincia de Entre Ríos
- **Material Reciclado** recuperado de lavado de camiones motohormigoneros de la empresa Demartín Hnos.
- **Aditivo Sika 90E** (Aditivo superfluidificante)
- **Agua** (proveniente de red)

Agregado Grueso

Se define como tal a la porción de agregado de origen pétreo que según análisis granulométrico no pasa a través del tamiz normalizado IRAM N°4. En otras palabras, son aquellos granos de tamaño mayor a 4,75mm. Este análisis granulométrico tiene el objetivo de clasificar la composición del agregado en función del tamaño de sus partículas, y se rige bajo la norma IRAM N°1505¹.

En nuestro caso, el agregado grueso utilizado fue del tipo canto rodado. Esta piedra presenta la particularidad física de tener una superficie lisa y redondeada, producto de la erosión natural que sufrió durante el transporte hasta llegar a su lugar de depósito. Su origen es ígneo, y su composición principal es el Silicio. Se hallan en la superficie terrestre, más precisamente en ríos y lechos, generalmente junto a arcillas, limos y arenas. Es un material resistente, con grandes propiedades térmicas y acústicas, y que además se adhiere con facilidad al cemento, razones por la cual su uso es muy popular en la elaboración de hormigones.

Para este trabajo se utilizaron piedras provenientes de la costa del Rio Uruguay, en tamaños “10-20” y “10-30” (como se puede observar en las imágenes 1 y 2) según designación comercial. Los resultados de los análisis granulométricos se detallan a continuación (Tabla 1 y 2):



Imagen 1: Canto rodado 10-20



Imagen 2: Canto rodado 10-30

¹ Norma IRAM 1505:2005-Agregados. Análisis granulométrico.

-Canto Rodado 10-20:

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulado [%]	Retenido acumulado [%]
2 ^{1/2} "	0,00	0,00	0,00	5372,30	5372,30	100,00	100,00	0,00
2"	0,00	0,00	0,00	5372,30	5372,30	100,00	100,00	0,00
1 ^{1/2} "	0,00	0,00	0,00	5372,30	5372,30	100,00	100,00	0,00
1"	0,00	0,00	0,00	5372,30	5372,30	100,00	100,00	0,00
3/4"	455,20	8,47	8,47	4917,10	4917,10	91,53	91,53	8,47
1/2"	1889,90	35,18	43,65	3027,20	3027,20	56,35	56,35	43,65
3/8"	900,80	16,77	60,42	2126,40	2126,40	39,58	39,58	60,42
N° 4	1542,20	28,71	89,13	584,20	584,20	10,87	10,87	89,13
N° 8	508,10	9,46	98,58	76,10	76,10	1,42	1,42	98,58
N° 16	76,10	1,42	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	5372,3	100,00						
Peso total [gr]=	5372,3							

Tabla 1: Granulometría canto rodado 10-20

-Canto Rodado 10-30:

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulado [%]	Retenido acumulado [%]
2 ^{1/2} "	0,00	0,00	0,00	5509,00	5509,00	100,00	100,00	0,00
2"	0,00	0,00	0,00	5509,00	5509,00	100,00	100,00	0,00
1 ^{1/2} "	0,00	0,00	0,00	5509,00	5509,00	100,00	100,00	0,00
1"	1882,00	34,16	34,16	3627,00	3627,00	65,84	65,84	34,16
3/4"	2511,40	45,59	79,75	1115,60	1115,60	20,25	20,25	79,75
1/2"	752,00	13,65	93,40	363,60	363,60	6,60	6,60	93,40
3/8"	172,20	3,13	96,53	191,40	191,40	3,47	3,47	96,53
N° 4	150,20	2,73	99,25	41,20	41,20	0,75	0,75	99,25
N° 8	17,40	0,32	99,57	23,80	23,80	0,43	0,43	99,57
N° 16	23,80	0,43	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	5509,0	100,00						
Peso total [gr]=	5509,0							

Tabla 2: Granulometría canto rodado 10-30

Al graficar el material pasante (en porcentaje) en función de los tamices normalizados, obtuvimos una curva que caracteriza al mismo (gráfico 2 y 3), y es sumamente importante ya que nos permite observar cómo se sitúa entre un par de curvas límites establecidas de acuerdo a la norma IRAM 1505 (que están en función del tamaño máximo), y a su vez obtener parámetros de gran relevancia que se utilizarán a la hora de determinar el dosaje del hormigón final, como lo es el módulo de fineza. Este módulo nos da una idea aproximada sobre el

tamaño promedio de los granos del agregado, y se obtiene dividiendo la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados de los tamices sobre cien.

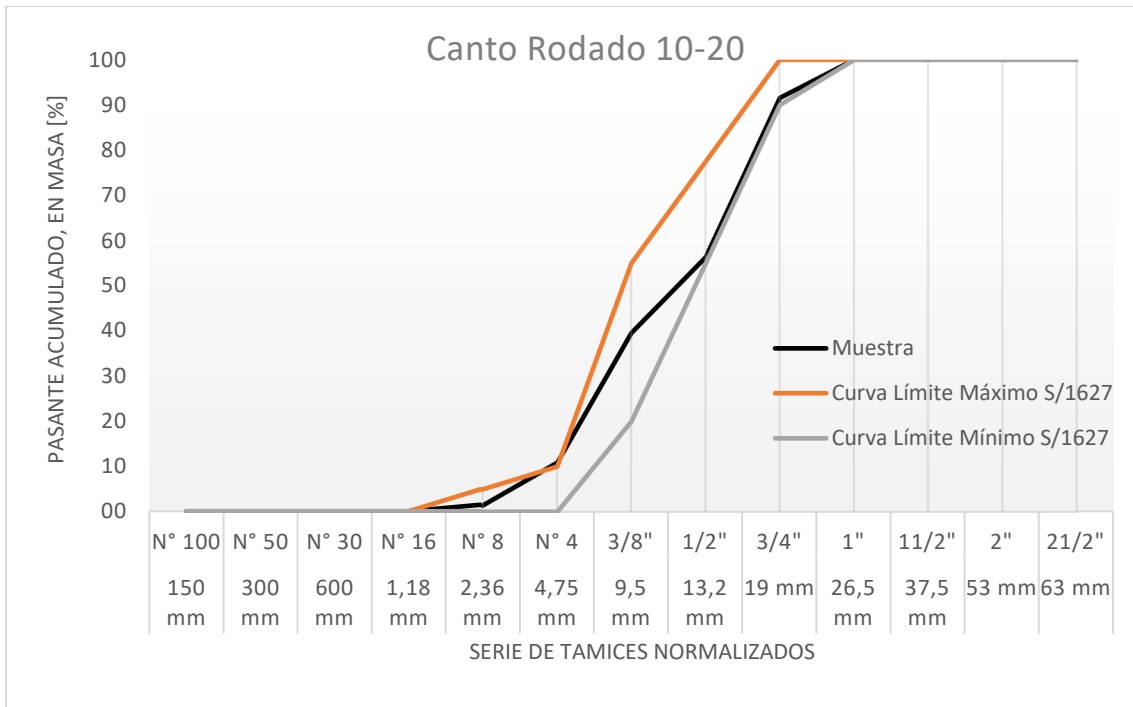


Gráfico 2: Curva granulométrica de canto rodado 10-20

-Módulo de fineza: 6.57

-Tamaño máximo: 19 mm

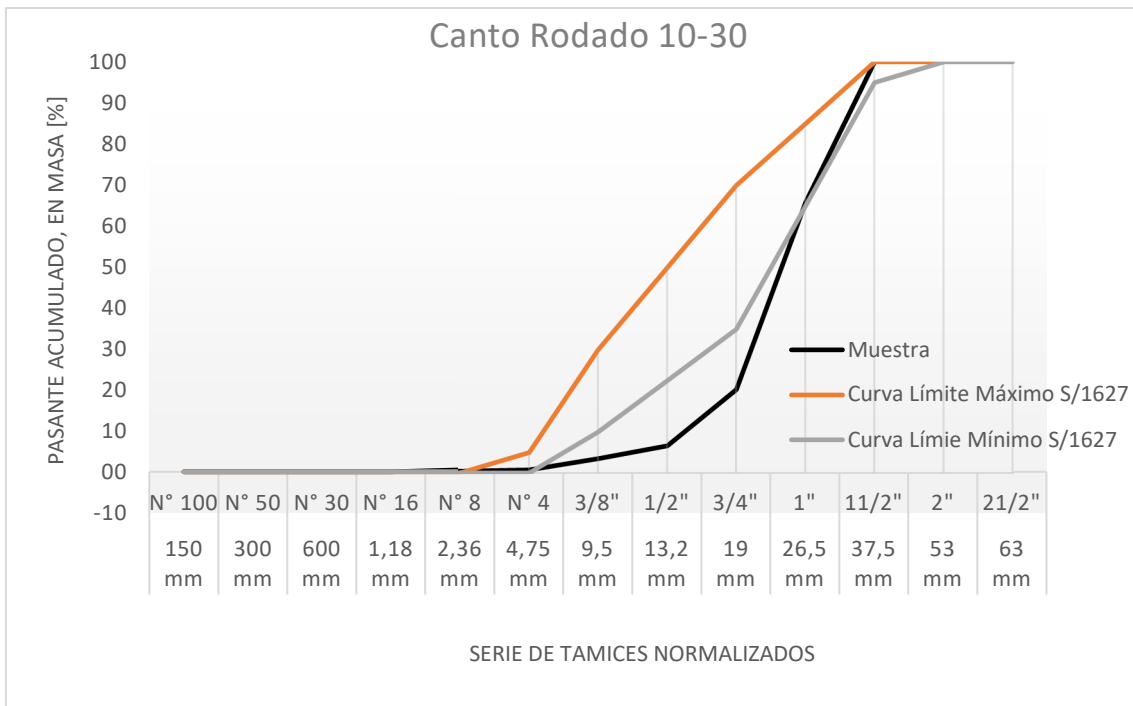


Gráfico 3: Curva granulométrica de canto rodado 10-30

-Módulo de fineza: 7.75

-Tamaño máximo: 37.5 mm

En nuestro país, se encuentra vigente la norma IRAM 1531², la cual nos indica las condiciones que debe cumplir el agregado grueso para formar parte de un hormigón, la cual se tomó como referencia.

Este agregado fue sometido a una serie de ensayos para determinar sus condiciones y características físicas, las cuales son de gran incidencia en la elaboración del hormigón.

Se optó por realizar los ensayos que se indican en la norma IRAM 1533³, entre los cuales se destacan el de Absorción y de Densidad (cuyo procedimiento se observa en la imagen 3), entre otros. Los resultados obtenidos son los que se observan en la Tabla 3.

MATERIAL: CANTO RODADO COMERCIAL 10-20			
Psss (grs) =	3000	gr	Densidad = 2,598 grs/cm³
Vol (cm ³) =	1154,9	cm ³	
CALCULO DE ABSORCION			
Ps =	2948,8	gr	Absorción = 1,74 %
Pss (grs) =	3000	gr	
MATERIAL: CANTO RODADO COMERCIAL 10-30			
Psss (grs) =	3000,3	gr	Densidad = 2,599 grs/cm³
Vol (cm ³) =	1154,5	cm ³	
CALCULO DE ABSORCION			
Ps =	2964,4	gr	Absorción = 1,21 %
Pss (grs) =	3000,3	gr	

Tabla 3: resultados de ensayo de absorción y densidad de canto rodado



Imagen 3: Balanza hidrostática para determinar la densidad del canto rodado

² Norma IRAM 1531:1994 – Agregado Grueso para Hormigón de Cemento. Requisitos y Métodos de ensayo.

³ Norma IRAM 1533:2002 – Agregados Gruesos. Método de Laboratorio para la determinación de la Densidad Relativa Real, de la Densidad Relativa Aparente y la Absorción del Agua.

Agregado fino

El agregado fino utilizado fue un “agregado natural”. Es un material mineral, sólido inerte que se obtienen de yacimientos naturales (areneros y graveras) y que se usan tras haber sufrido un lavado y una clasificación, es decir, se usan después de haber sufrido únicamente una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las especificaciones exigidas. Se usa para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante adición con aglomerantes hidráulicos o ligantes bituminosos. En nuestro caso se trató de arena sustraída del río Paraná.

Se define como arena a aquella porción de material que su tamaño está comprendido entre 4 mm y 0.063 mm. El análisis granulométrico de la arena tiene por objeto determinar las cantidades en que están presentes partículas de ciertos tamaños en el material. La distribución de los tamaños de las partículas se realiza mediante el empleo de mallas de aberturas cuadradas normalizadas, por la Norma IRAM N° 1505, de los tamaños siguientes: 3/8”, y números de Tamices 4, 8, 16, 30, 50 y 100 respectivamente.

Para este trabajo se utilizaron dos tipos de arenas, una fina y otra gruesa (imágenes 4 y 5) según designación comercial. Los resultados de los análisis granulométricos se detallan a continuación en las tablas 4 y 5 y los gráficos correspondientes (4 y 5):



Imagen 4: Preparación de arena fina para ser posteriormente ensayada.

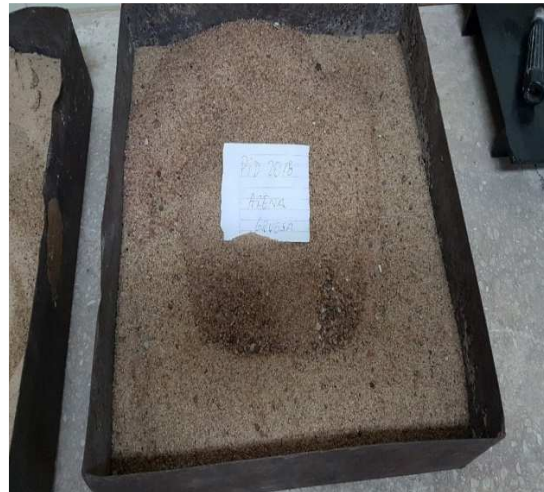


Imagen 5: Preparación de arena gruesa para ser posteriormente ensayada

-Arena Fina:

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulad o [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulad o [%]	Retenido acumulad o [%]
3/8"	8.40	0.34	0.34	2491.6	2491.6	99.66	99.66	0.34
N° 4	5.70	0.23	0.56	2485.90	2485.90	99.44	99.44	0.56
N° 8	17.80	0.71	1.28	2468.10	2468.10	98.72	98.72	1.28
N° 16	34.70	1.39	2.66	2433.40	2433.40	97.34	97.34	2.66
N° 30	62.30	2.49	5.16	2371.10	2371.10	94.84	94.84	5.16
N° 50	1338.90	53.56	58.71	1032.20	1032.20	41.29	41.29	58.71
N° 100	906.00	36.24	94.95	126.20	126.20	5.05	5.05	94.95
Pasa y retiene 200	126.2	5.05	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	2373.8	100.00						
Peso total [gr]=	2500.0							

Tabla 4: Granulometría de arena fina

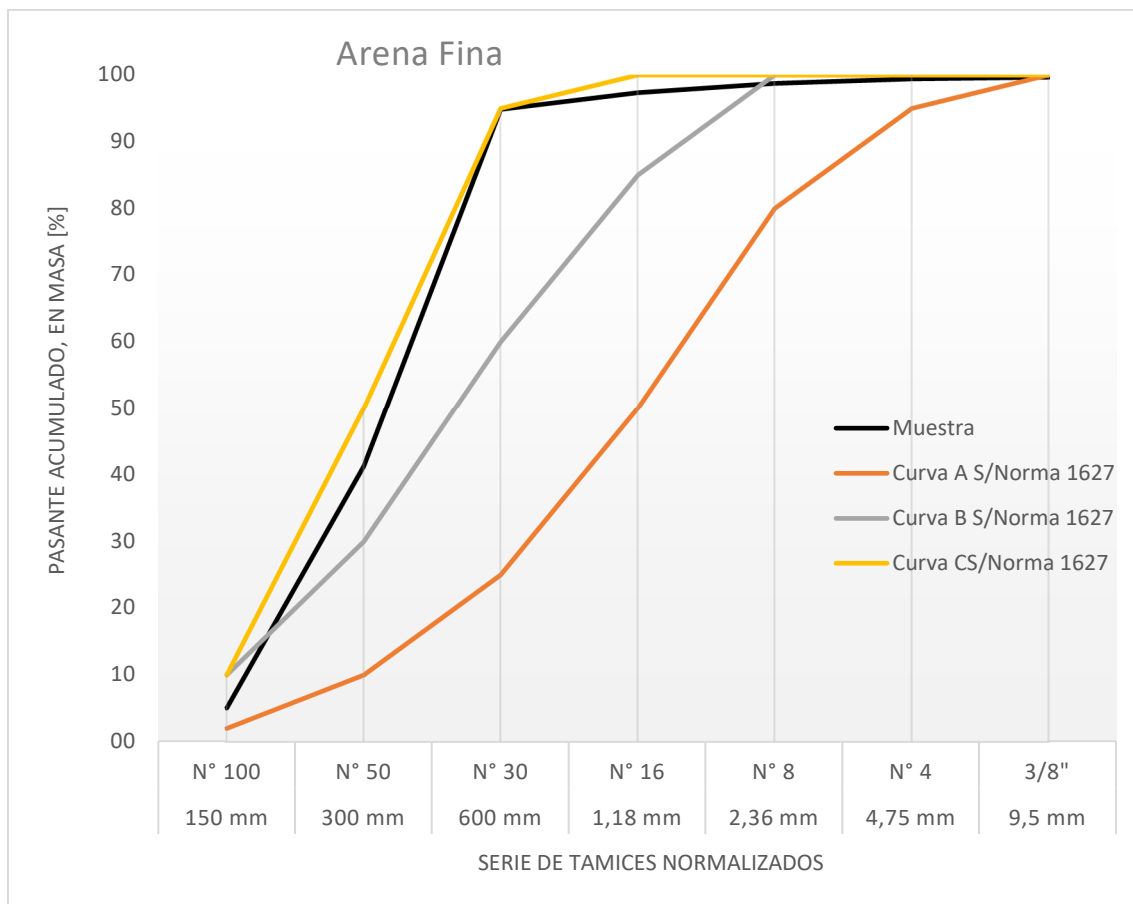


Gráfico 4: Curva granulométrica de arena fina

-Módulo de fineza: 1.64

-Tamaño máximo: 9.5 mm

-Arena Gruesa:

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulado [%]	Retenido acumulado [%]
3/8"	0.00	0.00	0.00	2500.0	2500.0	100.00	100.00	0.00
N° 4	12.50	0.50	0.50	2487.50	2487.50	99.50	99.50	0.50
N° 8	56.60	2.26	2.76	2430.90	2430.90	97.24	97.24	2.76
N° 16	285.90	11.44	14.20	2145.00	2145.00	85.80	85.80	14.20
N° 30	1870.60	74.82	89.02	274.40	274.40	10.98	10.98	89.02
N° 50	251.80	10.07	99.10	22.60	22.60	0.90	0.90	99.10
N° 100	12.70	0.51	99.60	9.90	9.90	0.40	0.40	99.60
Retenido y pasa 200	9.9	0.40	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	2490.1	100.00						
Peso total [gr]=	2500.0							

Tabla 5: Granulometría de arena gruesa

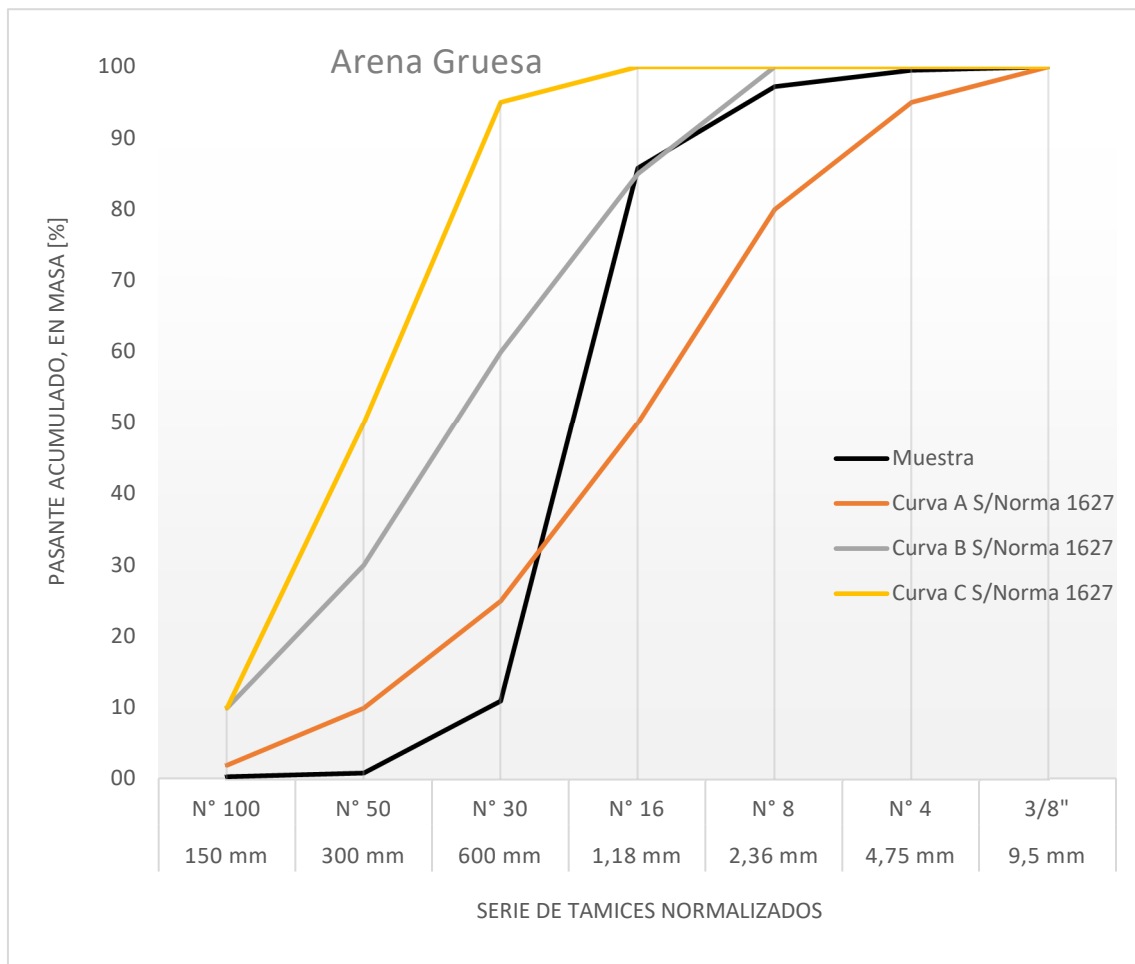


Gráfico 5: Curva granulométrica de arena gruesa

-Módulo de fineza: 3.05

-Tamaño máximo: 4.75 mm

En nuestro país, se encuentra vigente la norma IRAM N°1520⁴, la cual nos indica las condiciones que debe cumplir el agregado fino para formar parte de un hormigón, la cual se tomó como referencia.

Este agregado fue sometido a una serie de ensayos para determinar sus condiciones y características físicas, las cuales son de gran incidencia en la elaboración del hormigón.

Se optó por realizar los ensayos que se indican en la norma IRAM anteriormente mencionada, entre los cuales se destacan el de Absorción y de Densidad saturada superficie seca (imágenes 6 y 7), entre otros. Los resultados obtenidos se observan en las tablas 6 y 7.

MATERIAL: ARENA FINA			
Psss (grs) =	500	Densidad	
Vol1 (cm3) =	200	2,646	grs/cm3
Vol2 (cm3) =	389		
Vol resultante =	189		
CALCULO DE ABSORCION			
Ps =	498,4 gr	Absorción =	
Pss (grs) =	500 gr	0,32 %	

Tabla 6: Resultados de ensayo de densidad y absorción de arena fina

En el caso de la absorción de la arena gruesa, se realizaron dos ensayos y se hizo un promedio con los valores obtenidos.

MATERIAL: ARENA GRUESA			
Psss (grs) =	500	Densidad	
Vol1 (cm3) =	200	2,660	grs/cm3
Vol2 (cm3) =	388		
Vol resultante =	188		
CALCULO DE ABSORCION			
Ps =	1157,1 gr	Absorción 1	
Pss (grs) =	1160,8 gr	0,32 %	
Ps =	498,2 gr	Absorción 2	
Pss (grs) =	500 gr	0,36 %	
PROMEDIO DE ABSORCIÓN		0,341 %	

Tabla 7: Resultados de ensayo de densidad y absorción de arena gruesa

⁴ Norma IRAM 1520:2002 – Agregados Finos. Métodos de Laboratorio para la determinación de la Densidad Relativa Real, de la Densidad Relativa Aparente y de la absorción de agua.



Imagen 6: Arena fina llevada a la condición de saturada superficie seca.



Imagen 7: Arena gruesa llevada a condición de saturado superficie seca.

Para la determinación de la densidad de estos materiales se utilizó el volumenómetro, instrumento que permite determinar el volumen del árido previamente pesado (imagen 8).



Imagen 8: Volumenómetro utilizado para determinar la densidad de la arena.

Material Reciclado

La empresa Demartin Hnos. es la planta elaboradora de donde provino el material utilizado para la presente investigación.

El material reciclado es obtenido del lavado de los camiones motohormigoneros, los cuales vuelven a la planta con un sobrante (de hormigón) luego de la descarga en los diferentes destinos donde se lo provee. Se estima que la cantidad sobrante es aproximadamente un 10% de la cantidad solicitada.

El proceso que se realiza al mismo es el siguiente:

- 1- El camión motohormigonero que vuelve con material a la planta de hormigón de origen, es lavado y vaciado en unas piletas de decantación diseñadas para tal fin (imagen 9).
- 2- Periódicamente se limpian las piletas y se extrae el material decantado, de ahí se coloca para su secado en un primer acopio (imagen 10).
- 3- A medida que se seca, se traslada a un nuevo acopio donde se tamiza (imagen 11) a través de un malla de sección 15 cm x 25 cm, una vez realizado esto, se coloca en su acopio final, el cual está protegido para evitar que se arruine por lluvias (imagen 12).



Imagen 9: Piletas de decantación del material proveniente del lavado de los camiones.



Imagen 10: Acopio del material sacado de las piletas de decantación



Imagen 11: Tamizado primario del material reciclado



Imagen 12: Sector semicubierto – Acopio Final

Como resultado se obtiene un material de granulometría heterogénea, compuesto principalmente por material fino (pasante tamiz N°4) de color blanco y alta capacidad de absorber humedad

Para obtener muestras que fueran suficientemente representativas, se procedió a realizar el mezclado del material, y posteriormente su cuarteo (imagen 13).



Imagen 13: Obtención de muestras mediante cuarteo.

Es importante tener en cuenta que, dada la naturaleza del material, fue necesario realizar tanto la granulometría por vía seca (tabla 8, gráfico 6), como así también por vía húmeda (tabla 9, gráfico 7) dado el alto porcentaje de material pasante por tamiz N° 100.

Granulometría: Vía Seca

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulado [%]	Retenido acumulado [%]
2 1/2"	0.0	0.00	0.00	5000.00	5000.00	100.00	100.00	0.00
2"	0.0	0.00	0.00	5000.00	5000.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2"	76.0	1.52	1.52	4924.00	4924.00	98.48	98.48	1.52
1"	319.4	6.39	7.91	4604.60	4604.60	92.09	92.09	7.91
3/4"	287.5	5.75	13.66	4317.10	4317.10	86.34	86.34	13.66
1/2"	530.2	10.60	24.26	3786.90	3786.90	75.74	75.74	24.26
3/8"	322.8	6.46	30.72	3464.10	3464.10	69.28	69.28	30.72
N° 4	564.7	11.29	42.01	2899.40	2899.40	57.99	57.99	42.01
N° 8	339.6	6.79	48.80	2559.80	2559.80	51.20	51.20	48.80
N° 16	326.2	6.52	55.33	2233.60	2233.60	44.67	44.67	55.33
N° 30	785.9	15.72	71.05	1447.70	1447.70	28.95	28.95	71.05
N° 50	769.7	15.39	86.44	678.00	678.00	13.56	13.56	86.44
N° 100	384.0	7.68	94.12	294.00	294.00	5.88	5.88	94.12
Retenido y pasa 200	294.0	5.88	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	4706.0	100.00						
Peso total [gr]=	5000.0							

Tabla 8: Granulometría vía seca de material reciclado

A continuación, se presenta el material pasante acumulado en función de los tamices normalizados.

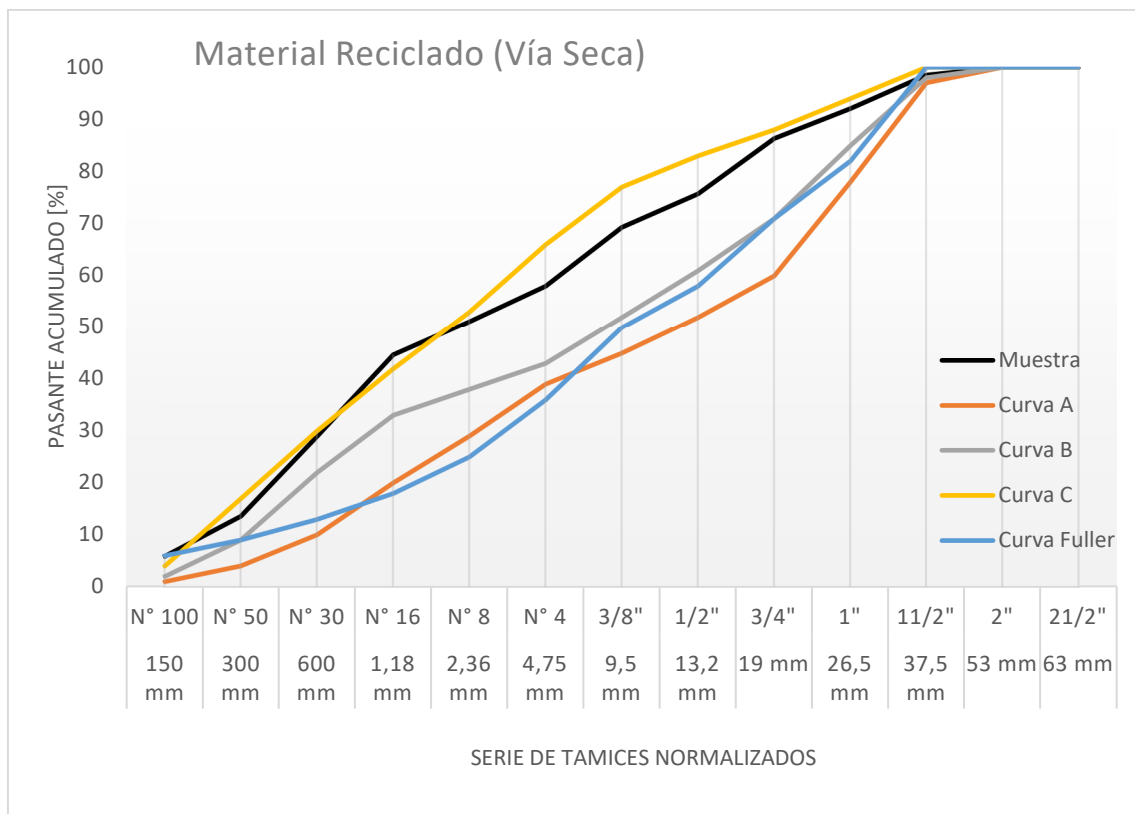


Gráfico 6: Curva granulométrica para ensayo vía seca

Granulometría: Vía Húmeda

Tamiz	Retenido [gr]	Retenido [%]	Retenido Acumulado [%]	Pasante [gr]	Pasante acum [gr]	Pasante parcial respecto al total [%]	Pasante Acumulado [%]	Retenido acumulado [%]
2 1/2"	0.00	0.00	0.00	5000.00	5000.00	100.00	100.00	0.00
2"	0.00	0.00	0.00	5000.00	5000.00	100.00	100.00	0.00
1 1/2"	76.00	1.52	1.52	4924.00	4924.00	98.48	98.48	1.52
1"	291.50	5.83	7.35	4632.50	4632.50	92.65	92.65	7.35
3/4"	391.90	7.84	15.19	4240.60	4240.60	84.81	84.81	15.19
1/2"	623.80	12.48	27.66	3616.80	3616.80	72.34	72.34	27.66
3/8"	266.10	5.32	32.99	3350.70	3350.70	67.01	67.01	32.99
N° 4	542.10	10.84	43.83	2808.60	2808.60	56.17	56.17	43.83
N° 8	378.20	7.56	51.39	2430.40	2430.40	48.61	48.61	51.39
N° 16	252.30	5.05	56.44	2178.10	2178.10	43.56	43.56	56.44
N° 30	608.00	12.16	68.60	1570.10	1570.10	31.40	31.40	68.60
N° 50	701.10	14.02	82.62	869.00	869.00	17.38	17.38	82.62
N° 100	337.40	6.75	89.37	531.60	531.60	10.63	10.63	89.37
N 200	61.10	1.22	90.59	470.50	470.50	9.41	9.41	90.59
Pasa 200	470.5	9.41	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	4529.5	100.00						
Peso total [gr]=	5000.0							

Tabla 9: Granulometría vía húmeda de material reciclado

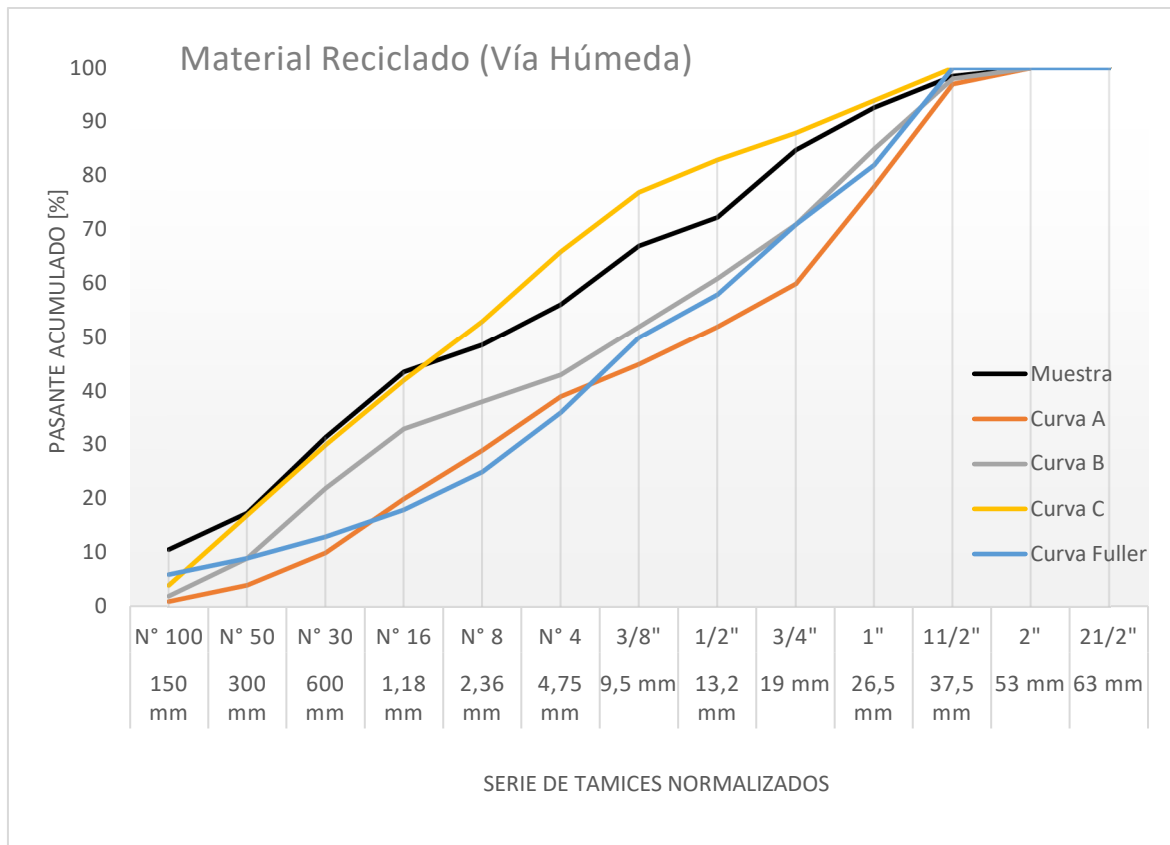


Gráfico 7: Curva granulométrica para ensayo vía húmeda

De lo presentado previamente podemos observar lo que ya fue mencionado respecto a las características del material, es decir, es un material compuesto por una gran cantidad de finos. Entendiendo que los mismos son aquellos que pasan el tamiz número 4, que para este caso representan más del 50% de la mezcla.

También es importante destacar que el porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 en los ensayos por vía seca y vía húmeda (imagen 15) fue de 5.88 y 9.41 respectivamente, entendiendo que en el primero, el material más fino queda adherido a las partículas de mayor tamaño. Esta característica fundamentalmente es la que hace que el material tenga una elevada absorción de humedad.

Teniendo en cuenta que es muy difícil llevar el material a la condición de saturado y superficie seca, es que se decidió analizar por separado las absorciones de la fracción gruesa (retenido tamiz N°4) y fina del material reciclado (pasante tamiz N°4).

Los ensayos realizados sobre la fracción fina fueron 3 (tablas 10, 11 y 12), determinando de tal manera las densidades (imagen 14) y las absorciones, obteniendo finalmente el valor buscado mediante un promedio de estas.

MATERIAL: RECICLADO FINO								
Prueba Número 1			Prueba Número 2			Prueba Número 3		
Psss (grs) =	500		Psss (grs) =	500		Psss (grs) =	500	
Vol1 (cm3) =	400		Vol1 (cm3) =	400		Vol1 (cm3) =	400	
Vol2 (cm3) =	611		Vol2 (cm3) =	615		Vol2 (cm3) =	615	
Vol resultante =	211		Vol resultante =	215		Vol resultante =	215	
Densidad =	2.37	gr/cm3	Densidad =	2.33	gr/cm3	Densidad =	2.33	gr/cm3
CALCULO DE ABSORCION								
Ps =	655.4	gr	Ps =	441.9	gr	Ps =	443.4	gr
Pss (grs) =	713.3	gr	Pss (grs) =	500	gr	Pss (grs) =	500	gr
Absorción =	8.83	%	Absorción =	13.15	%	Absorción =	12.76	%
Peso seco (gr) =	448.11							
Densidad seca (gr/cm3) =	2.08							
Prom Abs fino (%) =	11.58							

Tabla 10: Densidad y absorción de fracción fina del material reciclado

MATERIAL: RECICLADO GRUESO								
Prueba Número 1			Prueba Número 2			Prueba Número 3		
Psss (grs) =	2900		Psss (grs) =	3896.1		Psss (grs) =	4229.9	
Vol (m3) =	1260.6		Vol (m3) =	1539.6		Vol (m3) =	1685	
Densidad =	2.300	gr/cm3	Densidad =	2.531	gr/cm3	Densidad =	2.510	gr/cm3
CALCULO DE ABSORCION								
Psss =	1694	gr	Ps =	1880.4	gr	Pss =	4229.9	gr
Ps =	1632	gr	Ps =	1824	gr	Ps =	4058.4	gr
Absorción =	3.80	%	Absorción =	3.09	%	Absorción =	4.23	%
Ps=	2797.61	gr	Ps=	3758.54	gr	Ps=	4080.55	gr
Densidad seca=	2.22	gr/cm3	Densidad seca=	2.44	gr/cm3	Densidad seca=	2.42	gr/cm3
Prom pss (gr)=	3675.33							
Prom Abs grueso (%) =	3.66							
Densidad seca =	2.33							

Tabla 11: Densidad y absorción de fracción gruesa del material reciclado

Valores para la composición total de la muestra	
Absorción reciclado completo(%)=	8.17
Dens. Sec. Total [gr/cm ³]=	2.19

Tabla 12: Resultados del ensayo de densidad del cemento



Imagen 14: Volumenómetro utilizado para determinar la densidad de la porción fina del material reciclado



Imagen 15: Granulometría por vía húmeda del material reciclado

Cemento

Los aglomerantes hidráulicos, son sustancias ligantes que, en combinación con una fase acuosa, son capaces de unir fragmentos de materiales sólidos dando por resultados un material compuesto. El cemento portland es el ligante más utilizado en la construcción y cumple un rol importante en el comportamiento, la calidad y la durabilidad del hormigón.

Este aglomerante hidráulico artificial, resistente al agua, es obtenido mediante un proceso industrial y se presenta como un polvo fino, de color gris verdoso, suelto al tacto, y que en contacto con agua forma una pasta que fragua y endurece debido a las reacciones químicas y procesos de hidratación. Los compuestos cementantes generados en el proceso de hidratación contribuyen a unir los agregados y dan por resultado un material compuesto, el hormigón.

El cemento es un material esencial para el desarrollo de la sociedad ya que, como componente principal del hormigón, está presente en la mayoría de las obras de arquitectura e ingeniería. Con la tendencia creciente de la población mundial será necesario producir más cemento para satisfacer la demanda de infraestructura y vivienda que se genera. La producción de cemento insume recursos no renovables y a su vez es responsable de generar gases que acentúan el efecto invernadero. Las emisiones de CO₂ de la producción de cemento

representan en la actualidad alrededor del 5% de las emisiones antropogénicas globales (IEA y WBCSD,2009). Con los pronósticos de crecimiento y modernización existentes, es un desafío lograr que esta tendencia pueda ser sustentada económica, ambiental y socialmente en el tiempo. Es por esto que surge la necesidad de producir cemento de forma sustentable. La industria cementera, pionera en este camino de transición, realiza constantemente cambios en su producción e incorpora nuevas tecnologías para revertir esta situación.

La Norma IRAM 50000 define como cemento al conglomerante hidráulico obtenido como producto en una fábrica de cemento, que contiene al Clinker portland como constituyente necesario. Es un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Esta definición amplia permite incorporar el concepto de sustentabilidad al usar materiales alternativos para obtener el Clinker.

Se define como Clinker de cemento portland al producto que se obtiene por cocción hasta fusión parcial (clinkerización), de mezclas constituidas principalmente por materiales calizos y arcillosos preparadas artificialmente y convenientemente dosificadas.

Para controlar el fraguado se añade sulfato de calcio en pequeñas cantidades a los demás componentes del cemento durante su fabricación. El sulfato de calcio puede ser yeso, una mezcla de este con hemihidrato, o anhídrido. El sulfato de calcio puede ser natural u obtenerse como subproducto de procesos industriales.

Para mejorar la fabricación o las propiedades del cemento, se podrán utilizar aditivos en cantidad que no exceda el 2% en masa del cemento. Los aditivos utilizados no deben promover la corrosión de las armaduras ni perjudicar las propiedades de los morteros y hormigones con el preparado. ^[3]

Como bien menciona la bibliografía citada previamente, las nuevas tecnologías orientadas a la construcción apuntan generar un desarrollo sustentable, y es dentro de este marco, donde se ubica la presente investigación, ya que se busca reutilizar material que, de otra forma, sería desechado, afectando negativamente al medioambiente.

El cemento utilizado fue cemento San Martín CPC 40, del cual se necesitó determinar la densidad para calcular las dosificaciones (tabla 12), mediante el uso de un volumenómetro de Le Chatelier (imagen 17). Las características comerciales se indican a continuación:

DEFINICIÓN:

Conglomerante hidráulico que contiene al clinker portland como constituyente necesario, pequeñas cantidades de sulfato de calcio, con hasta un 35 % de dos o más adiciones minerales. Es un material inorgánico finamente dividido que, una vez endurecido, conserva su

resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

PROPIEDADES:

Cumple los requerimientos de resistencia de la categoría 40, es decir, se asegura la obtención de más de 40 MPa (408 kg/cm²) en las condiciones descritas en la norma IRAM 50.000. [4]



MATERIAL: CEMENTO CPC40 SAN MARTIN	
Peso muestra =	64 grs
Vol inicial =	0.8 cm ³
Vol final =	21.18 cm ³
Densidad =	3.140 grs/cm³

Imagen 16: Presentación comercial del cemento

Tabla 12: Resultados de ensayo de densidad del cemento



Imagen 17: Volumenómetro de Le Chatelier. Determinación del peso específico del cemento.

Superfluidificante Sikament 90 E

Aditivo polifuncional para hormigón, especialmente apto para hormigón elaborado, pues permite ser usado como plastificante o superfluidificante con solo variar la dosificación. Sikament® 90 E es recomendado en hormigones de pavimentos, construcciones industriales y estructuras en general, hormigón premoldeado y en hormigones bombeados ya que permite obtener elevada fluidez sin aumentar la relación agua/ cemento.

Su uso es recomendable en general:

- Donde se exige un hormigón de calidad
- Donde es necesario facilitar la trabajabilidad
- Donde se requieran hormigones fluidos, ya que no produce ni segregación ni exudación.
- Donde se requiera dejar un hormigón a la vista.
- Donde las formas a hormigonar son complicadas.
- Donde el hormigón debe ser transportado a largas distancias sin perder la trabajabilidad.

Ventajas:

En el hormigón fresco:

Mejora la trabajabilidad del hormigón facilitando así la colocación y compactación de las mezclas.

Disminuye la exudación del agua y evita la segregación de los materiales con lo que se consigue una mejor terminación.

Rango de asentamiento ideal entre 60 – 150 mm.

Trabajabilidad extendida durante 60 minutos.

Permite una reducción considerable del contenido de agua del 6% al 20%

No provoca incorporación de aire.

En hormigón endurecido:

Se obtiene un importante incremento de resistencias mecánicas a compresión manteniendo constante la trabajabilidad y el contenido de cemento.

Mejora la compacidad y durabilidad del hormigón.

Mayor módulo de elasticidad y menos retracción por secado. ^[5]

El mismo fue utilizado como superfluidificante en los pastones en una cantidad de 0.8% del peso de cemento, para mantener la relación agua cemento en la dosificación y darle mayor trabajabilidad al hormigón. Y como dato adicional se determinó su densidad que es de 1.18 [Kg/L]

Tabla de resumen

Se presenta a continuación la tabla que contiene las características de todos los materiales determinadas mediante los ensayos previamente descritos:

Tipo de agregado	Densidad SSS [gr/cm ³]	Absorción [%]	Módulo de fineza	Peso seco compactado [gr/cm ³]	Tamaño Máximo	% Pasa tamiz 100	% Retenido tamiz 100	Densidades secas
Canto Rodado 10-20 (CR 10-20)	2.598	1.74	6.57	1.768	26,5 mm			2.55
Canto Rodado 10-30 (CR 10-30)	2.599	1.21	7.75	1.675	26,5 mm			2.57
Arena fina comercial (Arf. C)	2.646	0.34	1.64			5.05	94.95	2.64
Arena gruesa comercial (Arg. C)	2.660	0.32	3.05			0.40	99.60	2.65
Agregado residual parte fina (Agr. R. F.)	2.348	10.99	2.46			10.63	89.37	2.19
Agregado residual parte gruesa (Agr. R. G) *	2.521	3.66	6.88		37,5 mm			

Tabla 13: Resumen de valores característicos de los materiales

Dosificación de la mezcla

El método de dosificación adoptado fue el propuesto por el ICPA.^[6]

Luego de ensayados los materiales y determinadas sus características (como granulometría, peso específico, absorción, etc.), se procedió con la dosificación de la mezcla. En las tablas 14, 15 y 16 se indican los porcentajes de participación adoptados de cada material teniendo en cuenta las curvas límites que especifica el método (A, B, C, y Fuller). En los gráficos 8, 9 y 10 se grafican las curvas granulométricas resultantes para las distintas proporciones del material reciclado en los pastones (60 %, 45% y 30%).

Tamiz IRAM 1501	Tamiz ASTM	arena fina		arena gruesa		CR 10-20		CR 10-30		Reciclado		Mezcla total
		% de participacion	0	% de participacion	15	% de participacion	15	% de participacion	10	% de participacion	60	
		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		
63 mm	2 ^{1/2"}	100,00	0,00	100,00	15,00	100,00	15,00	100,00	10,00	100,00	60,00	100,00
53 mm	2"	100,00	0,00	100,00	15,00	100,00	15,00	100,00	10,00	100,00	60,00	100,00
37,5 mm	1 ^{1/2"}	100,00	0,00	100,00	15,00	100,00	15,00	100,00	10,00	98,48	59,09	99,09
26,5 mm	1"	100,00	0,00	100,00	15,00	100,00	15,00	65,84	6,58	92,65	55,59	92,17
19 mm	3/4"	100,00	0,00	100,00	15,00	91,53	13,73	20,25	2,03	84,81	50,89	81,64
13,2 mm	1/2"	100,00	0,00	100,00	15,00	56,35	8,45	6,60	0,66	72,34	43,40	67,51
9,5 mm	3/8"	99,66	0,00	100,00	15,00	39,58	5,94	3,47	0,35	67,01	40,21	61,49
4,75 mm	N° 4	99,44	0,00	99,50	14,93	10,87	1,63	0,75	0,07	56,17	33,70	50,33
2,36 mm	N° 8	98,72	0,00	97,24	14,59	1,42	0,21	0,43	0,04	48,61	29,16	44,01
1,18 mm	N° 16	97,34	0,00	85,80	12,87	0,00	0,00	0,00	0,00	43,56	26,14	39,01
600 μm	N° 30	94,84	0,00	10,98	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	31,40	18,84	20,49
300 μm	N° 50	41,29	0,00	0,90	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	17,38	10,43	10,56
150 μm	N° 100	5,05	0,00	0,40	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	10,63	6,38	6,44
Módulo de Finura		1,64		3,05		6,57		7,75		4,42		4,87

Tabla 14: Porcentaje de participación de los materiales en pastón con 60% de material reciclado

Tamiz IRAM 1501	Tamiz ASTM	arena fina		arena gruesa		CR 10-20		CR 10-30		Reciclado		Mezcla total
		% de participacion	0	% de participacion	20	% de participacion	20	% de participacion	15	% de participacion	45	
		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		
63 mm	2 ^{1/2} "	100,00	0,00	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	45,00	100,00
53 mm	2"	100,00	0,00	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	15,00	100,00	45,00	100,00
37,5 mm	1 ^{1/2} "	100,00	0,00	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	15,00	98,48	44,32	99,32
26,5 mm	1"	100,00	0,00	100,00	20,00	100,00	20,00	65,84	9,88	92,65	41,69	91,57
19 mm	3/4"	100,00	0,00	100,00	20,00	91,53	18,31	20,25	3,04	84,81	38,17	79,51
13,2 mm	1/2"	100,00	0,00	100,00	20,00	56,35	11,27	6,60	0,99	72,34	32,55	64,81
9,5 mm	3/8"	99,66	0,00	100,00	20,00	39,58	7,92	3,47	0,52	67,01	30,16	58,59
4,75 mm	N° 4	99,44	0,00	99,50	19,90	10,87	2,17	0,75	0,11	56,17	25,28	47,46
2,36 mm	N° 8	98,72	0,00	97,24	19,45	1,42	0,28	0,43	0,06	48,61	21,87	41,67
1,18 mm	N° 16	97,34	0,00	85,80	17,16	0,00	0,00	0,00	0,00	43,56	19,60	36,76
600 μm	N° 30	94,84	0,00	10,98	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	31,40	14,13	16,33
300 μm	N° 50	41,29	0,00	0,90	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	17,38	7,82	8,00
150 μm	N° 100	5,05	0,00	0,40	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	10,63	4,78	4,86
Módulo de Finura		1,64		3,05		6,57		7,75		4,42		5,07

Tabla 15: Porcentaje de participación de los materiales en pastón con 45% de material reciclado

Tamiz IRAM 1501	Tamiz ASTM	arena fina		arena gruesa		CR 10-20		CR 10-30		Reciclado		Mezcla total
		% de participacion	0	% de participacion	25	% de participacion	25	% de participacion	20	% de participacion	30	
		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		Granulometria		
63 mm	2 ^{1/2} "	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	30,00	100,00
53 mm	2"	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	20,00	100,00	30,00	100,00
37,5 mm	1 ^{1/2} "	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	20,00	98,48	29,54	99,54
26,5 mm	1"	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	65,84	13,17	92,65	27,80	90,96
19 mm	3/4"	100,00	0,00	100,00	25,00	91,53	22,88	20,25	4,05	84,81	25,44	77,38
13,2 mm	1/2"	100,00	0,00	100,00	25,00	56,35	14,09	6,60	1,32	72,34	21,70	62,11
9,5 mm	3/8"	99,66	0,00	100,00	25,00	39,58	9,90	3,47	0,69	67,01	20,10	55,69
4,75 mm	N° 4	99,44	0,00	99,50	24,88	10,87	2,72	0,75	0,15	56,17	16,85	44,59
2,36 mm	N° 8	98,72	0,00	97,24	24,31	1,42	0,35	0,43	0,09	48,61	14,58	39,33
1,18 mm	N° 16	97,34	0,00	85,80	21,45	0,00	0,00	0,00	0,00	43,56	13,07	34,52
600 µm	N° 30	94,84	0,00	10,98	2,74	0,00	0,00	0,00	0,00	31,40	9,42	12,16
300 µm	N° 50	41,29	0,00	0,90	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	17,38	5,21	5,44
150 µm	N° 100	5,05	0,00	0,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	10,63	3,19	3,29
Módulo de Finura		1,64		3,05		6,57		7,75		4,42		5,28

Tabla 16: Porcentaje de participación de los materiales en pastón con 30% de material reciclado

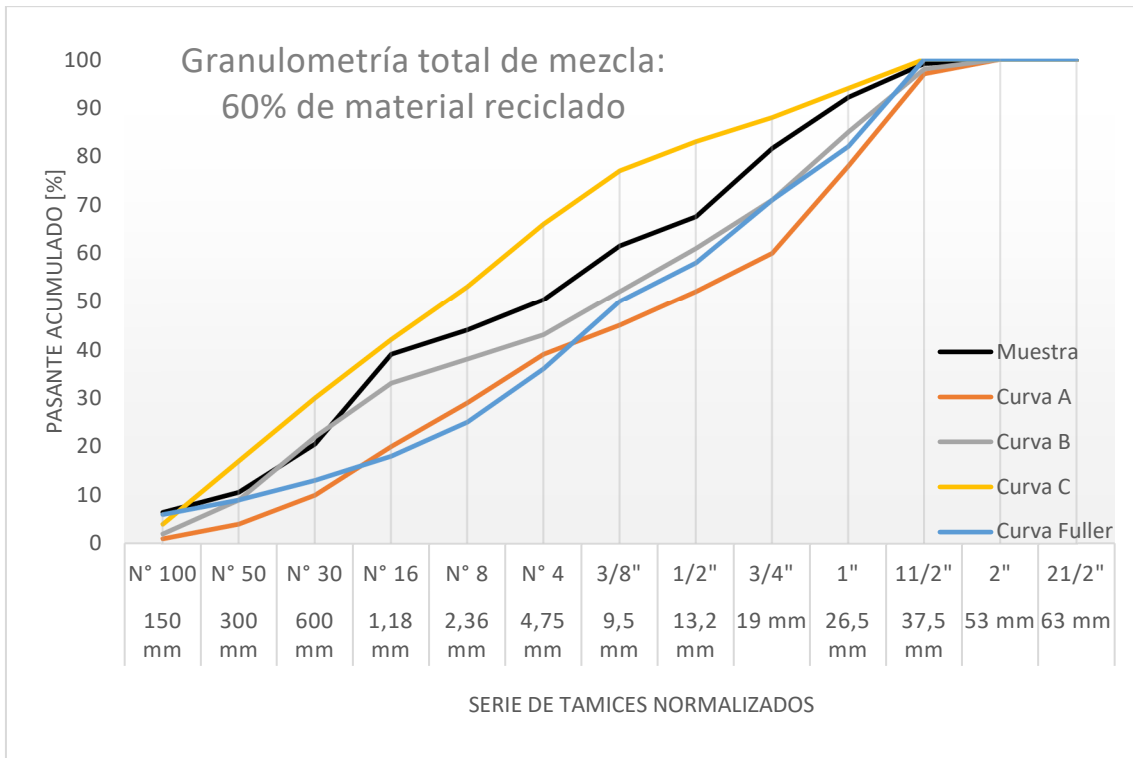


Gráfico 8: Curva granulométrica para la mezcla total con 60% de material reciclado

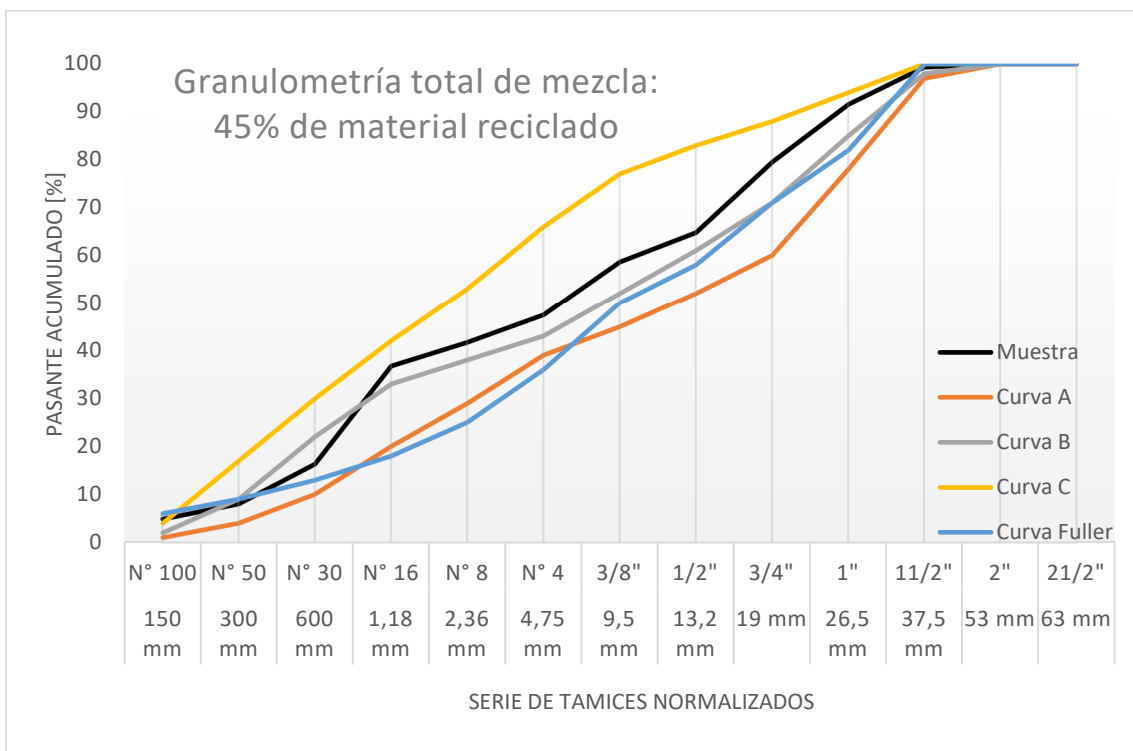


Gráfico 9: Curva granulométrica para la mezcla total con 45% de material reciclado

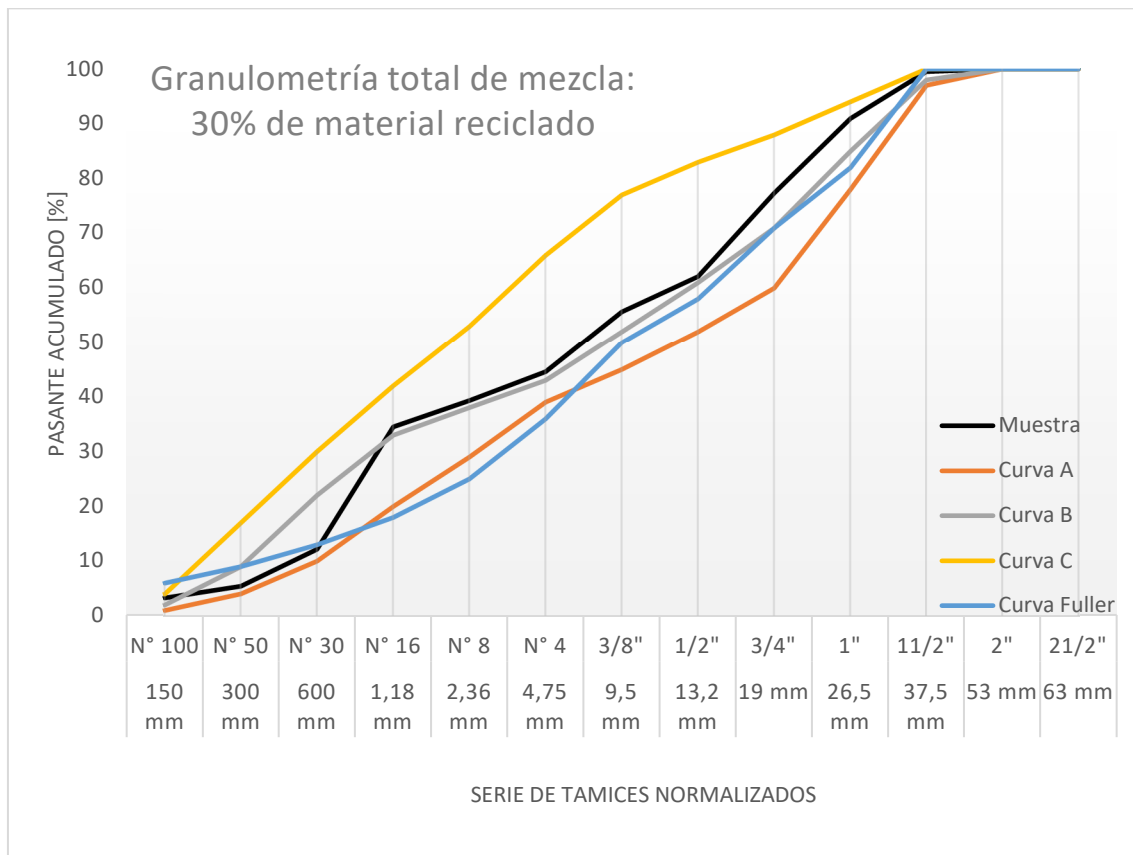


Gráfico 10: Curva granulométrica para la mezcla total con 30% de material reciclado

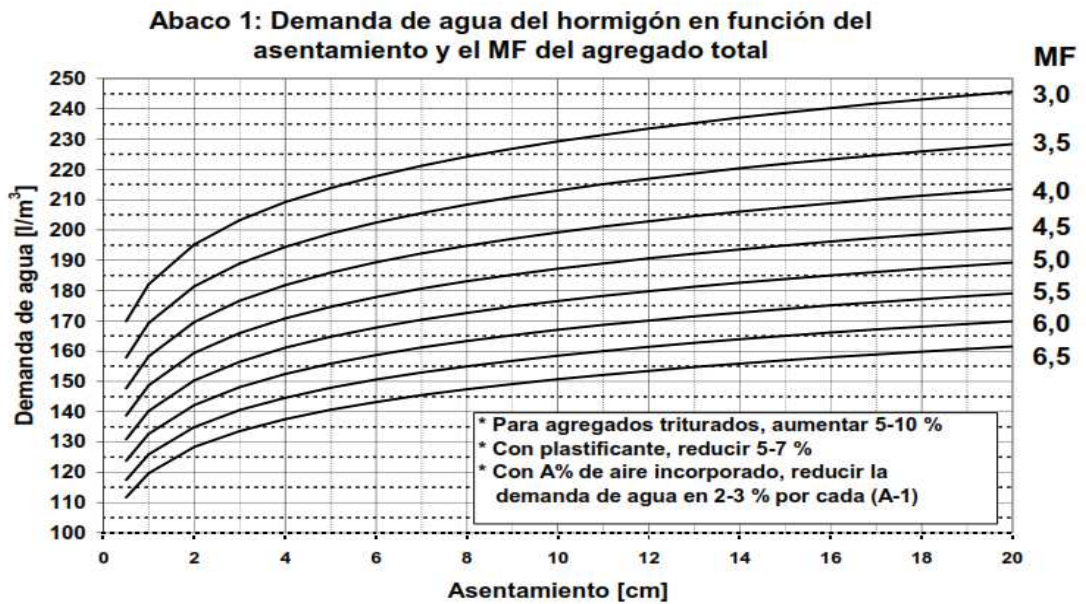
Luego de esto se explican a continuación los pasos a seguir por el método, y posteriormente los valores adoptados.

- 1) Se adopta una relación Agua-Cemento de acuerdo con las condiciones a las que estará expuesto el hormigón.
- 2) Se adopta el valor que tendrá el asentamiento, que en conjunto con el módulo de fineza de la muestra servirán para determinar la demanda de agua.

Asentamiento: Se adopta un asentamiento en centímetros teniendo en cuenta la consistencia que tendrá el hormigón. El mismo se mide mediante el ensayo del cono de Abrams, que se realiza llenando el cono en 3 capas, al finalizar el llenado de cada capa se realizan 25 golpes con una barra estandarizada, luego de la última capa se enrasa, se retira el cono lentamente en sentido vertical, se coloca al lado y se mide la variación de altura del cono de cemento en relación al cono metálico, como se ve en la imagen 23.

Módulo de fineza: El mismo se obtiene de la granulometría total de la mezcla.

Determinados los valores previos, se obtiene la demanda de agua del ábaco 1:



Ábaco 1: Demanda de agua en función del asentamiento y del módulo de fineza (Método ICPA)

- 3) El paso siguiente consiste en determinar nuevamente la relación agua-cemento, pero esta vez con la utilización de un ábaco propuesto por el método, y para utilizarlo es necesario determinar los siguientes parámetros:

a) Resistencia especificada para el hormigón R_e . La misma se determina de acuerdo a la utilización que se le dará al mismo, teniendo en cuenta los esfuerzos y otras condiciones a las que estará sometido.

b) Resistencia de diseño R_d . Para determinarla, se utiliza la siguiente fórmula:

$$R_e = R_d + S \cdot \alpha$$

Donde,

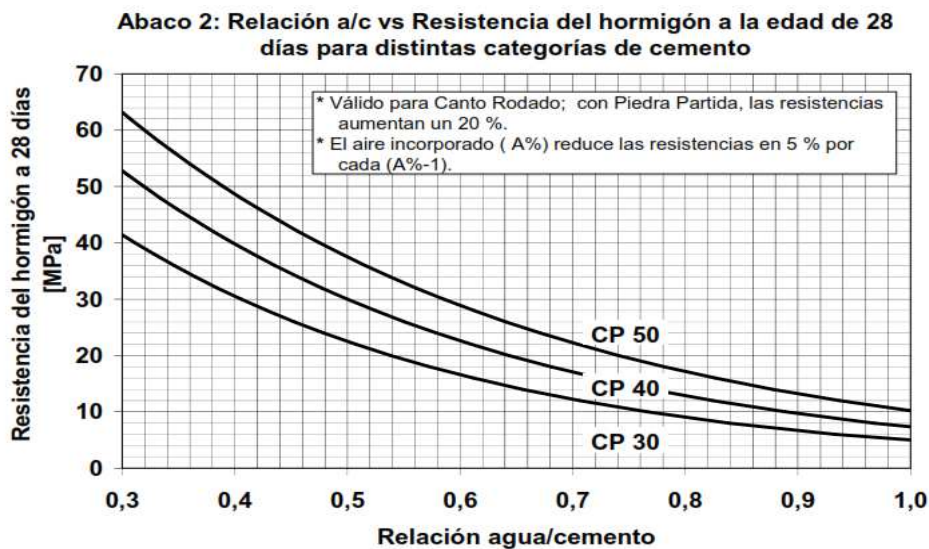
R_d : Resistencia de diseño

R_e : Resistencia especificada

S : Desviación estándar

α : Variable que depende del control de calidad

Obtenidas ambas resistencias, se obtiene la relación agua-cemento del ábaco 2:



Ábaco 2: Relación agua cemento para las distintas resistencias de diseño y tipos de cemento (Método ICPA)

Así, tendremos 2 relaciones agua cemento, la calculada en el paso 1 y la calculada en el paso 2, de estas, debemos adoptar la menor.

- 4) El paso siguiente consiste en determinar la cantidad de materiales que componen el m^3 de hormigón. Para ello debemos tener en cuenta que ya contamos con la cantidad de agua (que fue obtenida en el paso 2).

Volumen de agua: en el paso 2) obtuvimos la cantidad de agua que será necesaria en kilos, teniendo en cuenta que la densidad del agua es $1000 [Kg/m^3]$, dividiendo el peso por ese valor, obtenemos el volumen de agua necesario.

Volumen de cemento: se obtiene directamente de la relación agua-cemento.

Volumen de agregados: se obtiene de restar a $1m^3$ la suma de los volúmenes de cemento y agua obtenidos anteriormente. El volumen de cada agregado en particular se obtiene de multiplicar el volumen de agregados por el porcentaje de participación en la mezcla.

- 5) El paso final consiste en determinar el volumen de cada probeta sobre las cuales se realizarán los ensayos. De esta forma, teniendo en cuenta la cantidad de probetas, se calcula la cantidad en peso de cada material que deberá utilizarse para las mismas.

Es importante destacar que para los agregados se obtuvieron las densidades en condición de saturado superficie seca, pero al momento de hacer la dosificación de los pastones se llevó dichos valores a densidad seca. Para poder de esta manera, aplicar el método del ICPA.

A continuación, se ejemplifican los pasos explicados anteriormente con los valores adoptados para el primer pastón realizado en la presente investigación (correspondiente a 60% de material reciclado incorporado).

Paso 1:

Las condiciones de exposición adoptadas en nuestro caso fueron de “Estructuras expuestas al aire, a la intemperie, clima lluvioso o semiárido. Sólo por excepción temperaturas < 0°” para las cuales, el valor límite es de 0.53. Por cuestiones prácticas decidimos adoptar 0.45.

Paso 2:

Adoptamos una consistencia de hormigón plástico, y se obtuvo que el asentamiento debe ser de 5 [cm] ($\pm 1,50$ [cm]).

El módulo de fineza de nuestra mezcla fue 4,87. Con estos valores entramos al ábaco (gráfico 11):

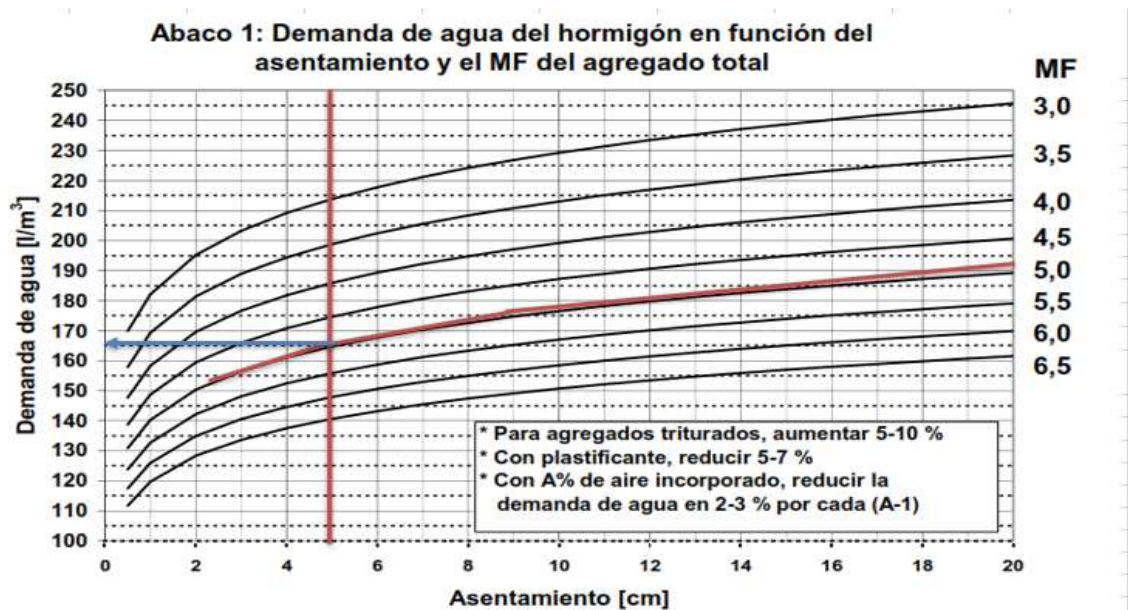


Gráfico 11: Ábaco 1 para elaboración de pastón con 60% de material reciclado

De esta manera, determinamos que la demanda de agua que fue de 166 [L/m³].

Paso 3:

- Cemento utilizado: CPC 40
- Resistencia de diseño: $R_d = 25$ [MPa]
- $\alpha = 1.34$

Este valor indica que hay una probabilidad de 1 en 100 de que el promedio de cada tres valores consecutivos (media móvil) sea inferior a la resistencia especificada.

- Desviación estándar: $S= 4$

Este valor corresponde a una probabilidad similar de que los ensayos individuales sean menores que la resistencia especificada menos 3,5 [Mpa].

- Resistencia específica: $Re= 25 + 1.33 \times 4 = 30.32$ [MPa]

- Con estos valores entramos al ábaco 2 (gráfico 12)

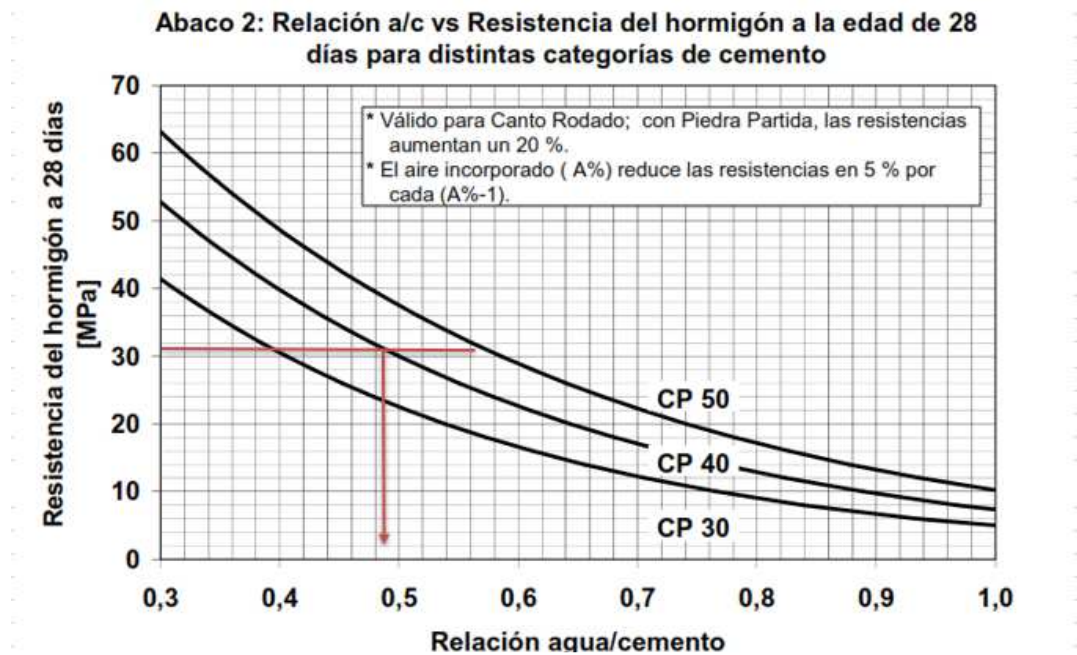


Gráfico 12: Ábaco 2 para elaboración de pastón con 60% de material reciclado

Así, la relación agua cemento obtenida fue de: 0.485

Como la que se determinó en el paso 1 fue menor adoptamos la primera.

Paso 4:

Componente	Peso para 1m ³ de hormigón [Kg]	Densidad Seca [Kg/m ³]	Volumen Sólido [m ³]
Agua	166.0	1000.00	0.166
Cemento	369	2987.50	0.124
CR 10-30	182	2567.69	0.071
CR 10-20	272	2553.29	0.107
Reciclado	934	2190.02	0.426
Arena Fina	0	2637.04	0.000
Arena Gruesa	282	2650.55	0.107
Aire		10.00	
Aditivo			
Sumas	2206	16596.09	1.000

Tabla 17: Cálculo de volúmenes de agregados

Para la obtención del volumen de agregados se realizó la siguiente operación:

$$Vol\ agregados = 1 - (0.166 + 0.125) = 0.71$$

Mientras que el volumen de cada agregado se obtuvo multiplicando cada valor de % en la mezcla por 0.71, como se observa en la tabla 18:

	% en la mezcla	Vol [m3]
Agregados finos		
Arena Fina=	0.000	0.000
Arena Gruesa=	0.150	0.107
Agregados gruesos		
CR 10-20=	0.150	0.107
CR 10-30=	0.100	0.071
Material reciclado		
Reciclado=	0.600	0.426

Tabla 18: Determinación de los volúmenes de materiales intervinientes para el volumen necesario para la ejecución del pastón

Paso 5:

Teniendo en cuenta que las probetas utilizadas fueron de 15 [cm] de diámetro y 30 [cm] de largo, y que la cantidad elaborada por pastón fue de 4 (por cuestiones de capacidad de maquinaria disponible) más un 30% de desperdicios, el volumen total obtenido fue: 0.028 [m³]. Así, conociendo las densidades de cada material, se calculó el peso de estos en la tabla 19:

Componente	Volumen para pastón [m3]	Peso para pastón (4 probetas) [Kg]
Agua	0,00458	4,58
Cemento	0,00340	10,17
CR 10-30	0,00196	5,03
CR 10-20	0,00294	7,50
Reciclado	0,01175	25,74
Arena Fina	0,00000	0,00
Arena Gruesa	0,00294	7,79
Aire		
Aditivo		
Sumas	0,02757	60,80

Tabla 19: Peso de materiales para la ejecución de un pastón

Ejecución de pastones

De acuerdo con el método adoptado, el proceso para la ejecución de los pastones fue el siguiente:

-Determinación de la humedad:

Este método nos exigió utilizar las densidades secas de los materiales intervinientes, por lo tanto, a la hora de la preparación de los materiales para la realización del hormigón, el primer paso a realizar fue el cálculo de sus humedades en ese instante. La misma se determinó extrayendo una muestra de material directo del acopio y pesándola, valor que nos indicó su peso húmedo. Lo siguiente a esto fue colocarla en un recipiente y exponerla al secado mediante la incorporación de calor. Al cabo de un cierto tiempo, y verificando que el material expulsó toda su humedad, se lo sometió a una nueva pesada en la cual se determinó su peso seco. La relación entre el peso seco y húmedo de la muestra ensayada nos determinó su porcentaje de humedad en ese momento. Este dato fue de gran importancia ya que, como era necesario usar las densidades secas, toda humedad que tuvieran los materiales se transforma en un exceso de agua no contemplado en la mezcla, lo que modificaría la cantidad calculada para el pastón.

-Pesado de los materiales:

Los mismos fueron pesados mediante balanzas electrónicas para obtener las cantidades exactas de cada material calculadas en la dosificación (imágenes 18, 19, 20 y 21). Una vez pesados se los dejó en recipientes separados para facilitar el manipuleo.



Imagen 18: Pesado de la arena gruesa para determinar posteriormente su humedad

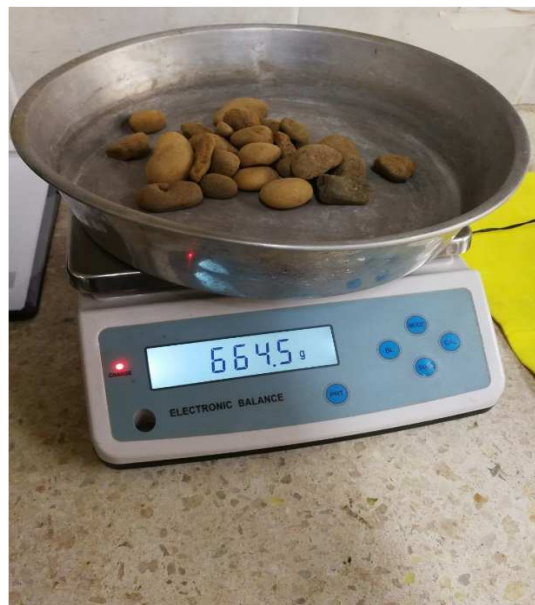


Imagen 19: Pesado del canto rodado para determinar posteriormente su humedad



Imagen 20: Pesado de material reciclado



Imagen 21: Materiales luego de ser pesados y separados en bandejas.

-Preparación de los moldes:

Los moldes a utilizar fueron de tipo metálicos, de forma cilíndrica de 15cm de diámetro y 30cm de alto para las probetas que se ensayaron a compresión simple y a tracción por compresión diametral, mientras que los de flexión fueron prismáticos de 75cm de longitud por 15cm x 15cm de sección transversal. Los mismos se limpiaron con agua para remover toda posible suciedad, y luego se secaron y engrasaron para facilitar la tarea de desmolde una vez endurecido el hormigón (imagen 22).



Imagen 22: Se ajustan los moldes de las probetas antes de llenarlas con el pastón de hormigón.

- Ejecución de los pastones:

Previo a la colocación de los materiales en la máquina, se humedeció la misma para que el tambor de ésta no le quite humedad a los materiales. Como primer paso optamos por colocar el material reciclado en la maquina junto con el canto rodado 10-30 los cuales se mezclaron conjuntamente durante unos segundos para homogenizar la mezcla. Luego de esto se procedió a incorporar una cierta cantidad de agua y nuevamente al mezclado hasta que ambos materiales se humedezcan superficialmente. Posteriormente se agregó el canto rodado 10-20 y finalmente se incorporaron la arena gruesa y el cemento en partes iguales. El agua restante se fue agregando lentamente y de manera constante para obtener una distribución pareja de la humedad en la mezcla durante el amasado. Cabe aclarar que el aditivo (Sikament 90E) fue siempre mezclado previamente en el agua total de amasado, para garantizar que se distribuya de forma pareja en la mezcla.

Ya con todos los materiales dentro de la máquina, se mezcló durante unos 6 minutos, tiempo que permite actuar al aditivo para cumplir su función. Luego del mezclado se volcó el hormigón y se realizó un ensayo de asentamiento con el cono de Abrams (imagen 23), a modo de verificar que el asentamiento de la masa de hormigón es igual al elegido para la dosificación (en nuestro caso 5cm con una tolerancia de 1,5cm). En los casos en los que el valor obtenido fue inferior al preestablecido, se procedió a agregar agua al pastón, colocarlo nuevamente en la máquina, y volver a medir el asentamiento luego de un cierto tiempo de mezclado, el cual debía ser suficiente para que el agua llegue a mezclarse con todos los materiales, y no tan extenso como para que la mezcla comience a fraguar.



Imagen 23: Ensayo de asentamiento del cono de Abrams

-Preparación de las probetas:

Verificado el asentamiento, se procedió al llenado de los moldes. Estos se completaban por capas y compactando mediante varillado (imagen 24). Al final los moldes se enrasaron con varilla o con la ayuda de una regla metálica, para dotar a la probeta de una superficie libre lo más plana posible. Los moldes llenos con hormigón fresco se guardaron en el laboratorio en un lugar al resguardo del sol, del calor, y de posibles golpes y vibraciones durante un día completo (imágenes 25 y 26). Pasado este día, se desmoldaron las probetas y se las colocó en un tanque con agua durante un periodo de 28 días para su curado final (imagen 27), para luego ser ensayadas. Cabe aclarar que todo el procedimiento anteriormente descrito se basa en la Norma IRAM 1534⁵.



Imagen 24: Varillado y llenado de moldes

⁵ IRAM 1534 (“Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y tracción por compresión diametral”)

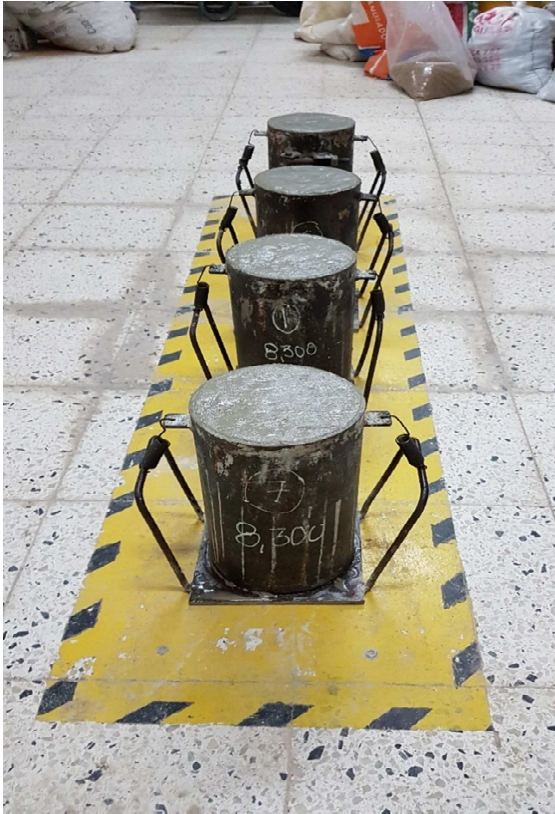


Imagen 25: Probetas cilíndricas en estado fresco



Imagen 26: Probetas prismáticas en estado fresco



Imagen 27: Curado de probetas cilíndricas y prismáticas

Ensayos de rotura

Todas las probetas fueron curadas en cámara húmeda y ensayadas a los 28 días de su elaboración.

Los ensayos realizados fueron de compresión simple f'_{cm} , de tracción por compresión diametral f_{ct} y de flexión f_{ctf} , todos ellos realizados con una prensa AMSLER (imágenes 28 y 29).

Equipamiento utilizado

Las máquinas empleadas para la realización de ensayos de tracción de barras son del tipo denominado "universal" por adaptarse a experiencias de compresión, flexión, corte e inclusive torsión en algunos de sus modelos.

La máquina Amsler, de accionamiento hidráulico, está constituido por los siguientes conjuntos principales:

- Bomba de aceite con inyección regulada
- Prensa hidráulica
- Dinamómetro registrador de cargas y diagrama.

La variante fundamental entre una máquina universal de ensayo y una prensa hidráulica radica en dispositivo para registrar las cargas aplicadas y las deformaciones del material. [7]



Imagen 28: Dinamómetro registrador de cargas



Imagen 29: Prensa AMSLER preparada para realizar el ensayo de compresión simple

Ensayo de compresión simple

Para la realización de este ensayo se siguieron los pasos indicados en la norma IRAM 1546⁶.

Este ensayo se realiza colocando la probeta cilíndrica en la prensa, la cual ejerce presión sobre una de las caras planas de la misma hasta que es alcanzada la tensión de rotura.

Éste es uno de los ensayos más importantes realizados sobre las probetas de hormigón, ya que la principal característica de este material compuesto (dependiendo de su uso) suele ser su resistencia a la compresión.

La falla de la probeta se da en un plano inclinado a 45° (imagen 30), debido a las tensiones principales de tracción, como se puede observar en la imagen a continuación.

Es importante tener en cuenta que al momento de realizar el ensayo las probetas se coloquen alineadas con la prensa (para que la carga se aplique lo más centrada posible con respecto al eje de la probeta), y que el encabezado de estas sea de neopreno según indica la norma mencionada.

$$f'_{cm} = \frac{P}{A}$$

Siendo:

f'_{cm} : Resistencia a compresión simple

P: Fuerza de compresión al momento de rotura de la probeta

A: Área transversal de la probeta

⁶ Norma IRAM 1546: 2004 "Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión."



Imagen 30: Probeta luego de realizado el ensayo de compresión simple.

Ensayo de tracción por compresión diametral

Para la realización de este ensayo se siguieron los pasos indicados en la norma IRAM 1658 ⁷

La resistencia a la tracción por compresión diametral se determina sobre una probeta cilíndrica apoyada sobre una generatriz y cargada en la opuesta. En general, la resistencia a tracción obtenida por este ensayo es algo mayor que la axial, dado que la fisuración debe comenzar en el interior de la probeta (imagen 31). Este es el ensayo utilizado con más frecuencia para evaluarla, dado que resulta muy simple y se utilizan las mismas probetas que se moldean para evaluar la resistencia a compresión del hormigón. Se puede plantear aproximadamente, la siguiente relación ^[8]:

$$f_{ct} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{F}{A}}$$

Siendo:

- f_{ct} : Resistencia a tracción

⁷ Norma IRAM 1658: 1995 "Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral"

- F: Fuerza al momento de la rotura aplicada por la máquina
- A: Sección transversal de la probeta

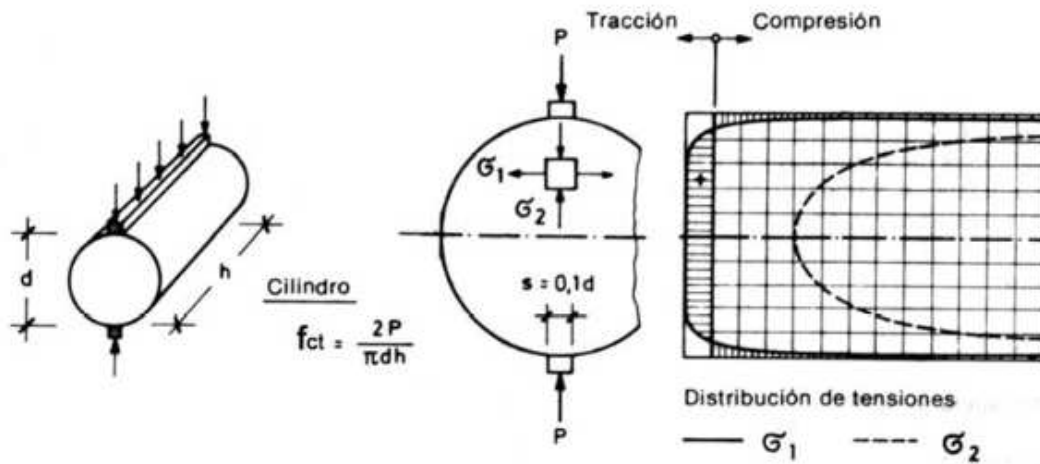


Imagen 31: esquema de cargas para ensayo de tracción por compresión diametral

El esquema descrito previamente, se puede observar en la imagen 32:



Imagen 32: Probeta colocada en la prensa para ser ensayada a tracción por compresión diametral

La rotura de la probeta mediante este ensayo se observa en la imagen 33.



Imagen 33: Probeta luego de ser ensaya a tracción por compresión diametral

Este es un ensayo que se considera “indirecto” ya que la tensión que resiste el hormigón a tracción se determina mediante la aplicación de un esfuerzo de compresión diametral.

Ensayo de flexión

Para la realización de este ensayo se siguieron los pasos indicados en la norma IRAM 1547⁸.

Se determina rompiendo por flexión una probeta tipo viga, depende de las dimensiones de la probeta (viga), y de la ubicación de las cargas (se la usa principalmente para pavimentos de hormigón). En general, se ensaya una viga de 15 x 15 cm con largo 75 cm, con cargas concentradas en los tercios (imagen 34, 35 y 36), la resistencia a tracción se obtiene partiendo de la hipótesis de una repartición lineal de tensiones. La máxima tensión se produce sólo en las fibras más alejadas del eje neutro, las que se descargan en las adyacentes que colaboran.

⁸ Norma IRAM 1547: 1992 “Ensayo de tracción por flexión”

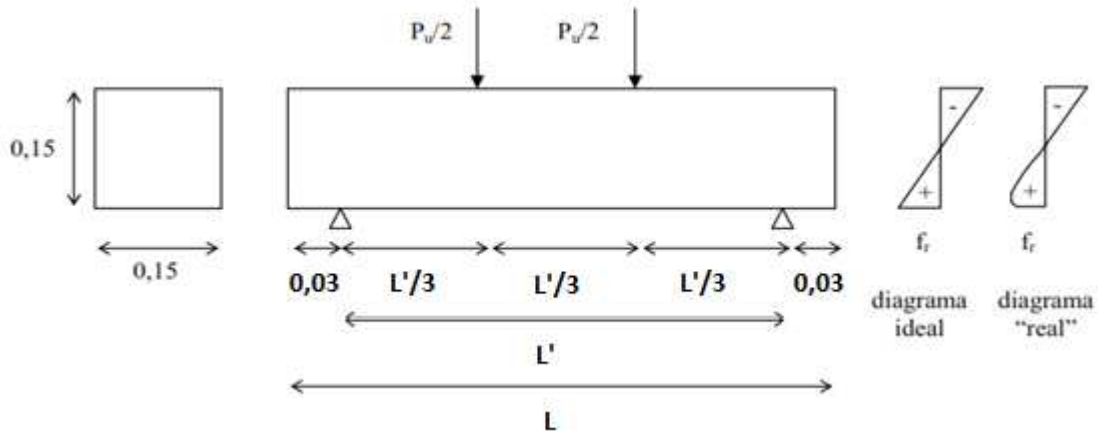


Imagen 34: esquema de cargas y tensiones en la sección prismática

Con este ensayo podemos obtener la resistencia a flexotracción del hormigón f_{ctf} mediante la siguiente expresión:

$$f_{ctf} = \frac{M_r}{W}$$

donde,

f_{ctf} = Resistencia a flexotracción del hormigón,

W = Módulo resistente de la sección transversal $= \frac{b \cdot h^2}{6}$,

M_r = momento de rotura de la probeta $= \frac{PL}{6}$

P = carga de rotura [8]



Imagen 35: Probeta prismática durante el ensayo de flexión



Imagen 36: Rotura de probeta por ensayo de flexión

Evaluación de resultados

Para realizar la evaluación de los resultados, fue necesario elaborar pastones de un hormigón patrón, dosificado con la misma metodología descrita anteriormente y utilizando los mismos agregados de origen comercial a excepción del material reciclado y un asentamiento promedio de 5 centímetros. Este último se dosificó de igual manera a lo anteriormente descrito y en él se utilizaron los mismos agregados, a excepción del material reciclado. De igual forma el dosaje y las cantidades se obtuvieron para una resistencia de diseño de 25 Mpa. A continuación se muestran los resultados obtenidos de los diferentes ensayos:

Compresión simple

En la tabla 20 y en el gráfico 13, se muestran las resistencias características y medias obtenidas en función de los resultados de los ensayos de compresión simple realizados sobre las probetas del hormigón patrón y con los distintos porcentajes de material reciclado

Tipo de hormigón	f'_{cm} [MPa]	f'_c [MPa]	Coefficiente de variación CV %	% de variación de f'_{cm} de los hormigones reciclados respecto al patrón	% de variación de f'_c de los hormigones reciclados respecto al patrón
Hormigón patrón	32	26,7	7,98	-	-
Hormigón reciclado 30%	17,25	16,4	8,09	-46,09	-38,58
Hormigón reciclado 45%	16,25	15,28	9,95	-49,22	-42,77
Hormigón reciclado 60%	17,45	17,08	3,40	-45,47	-36,03

Tabla 20: Resultados de ensayos a compresión simple

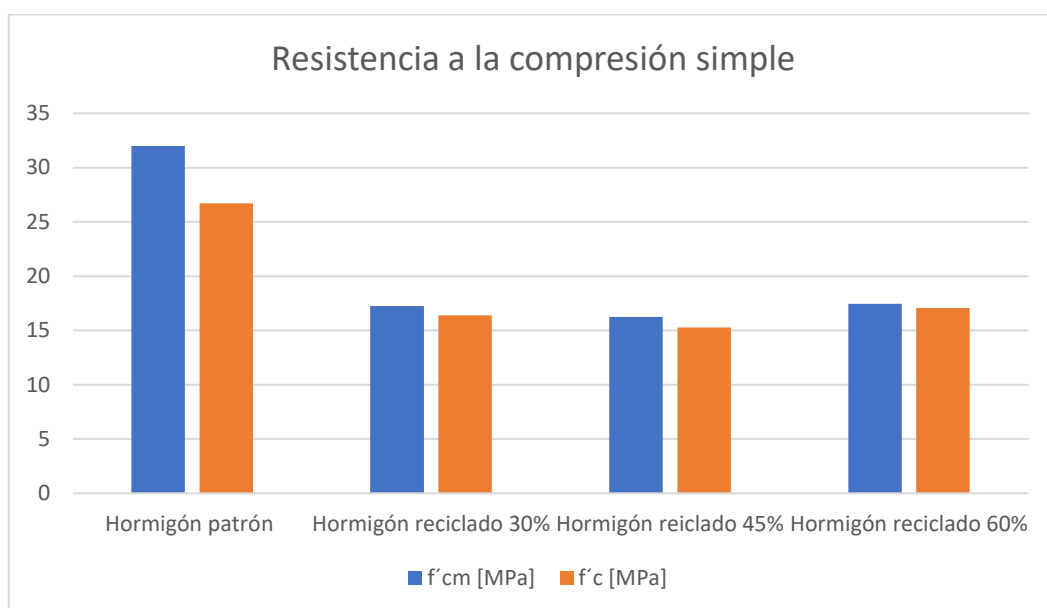


Gráfico 13: Resultados de ensayos a compresión simple

Se observa que los resultados de los hormigones con material reciclado, no reflejan la resistencia de cálculo (H-25). Solamente para el hormigón con 60% de material reciclado la resistencia se asemeja a la de un hormigón H-17. Las demás dosificaciones se encuentran por debajo de ese valor.

Tracción por compresión diametral

En la tabla 21 y gráfico 14 se indican los valores medios de tracción por compresión diametral (f_{ct}) obtenidos por el ensayo y aplicando las fórmulas (I) y (II) definidas en la bibliografía según: Leonhardt Fritz y Mönning Eduard “Estructuras de hormigón armado Tomo I”.

$$f_{ct}(I) = 0,15 \cdot (f'_{cm} \cdot 11,8)^{\frac{1}{2}}$$

$$f_{ct}(II) = 0,06 \cdot (f'_{cm} \cdot 11,8)^{\frac{2}{3}}$$

Los resultados se expresan en MPa.^[9]

Las expresiones 1 y 2 consideran un intervalo de variación de $\pm 25\%$. Se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro de ese entorno, siendo las variaciones más marcadas para porcentajes con mayor cantidad de áridos reciclados.

Respecto a los valores obtenidos en el ensayo para el hormigón con 45% de material reciclado se observan los mayores porcentajes de disminución de la resistencia respecto del hormigón patrón.

Tipo de hormigón	f_{ct} [MPa]	Coefficiente de variación CV %	% de variación de f_{ct} de los hormigones reciclados respecto al patrón	f_{ct} (I) [MPa]	% de variación de f_{ct} de los hormigones reciclados respecto a f_{ct} (I)	f_{ct} (II) [MPa]	% de variación de f_{ct} de los hormigones reciclados respecto a f_{ct} (II)
Hormigón patrón	3,2	6,90		2,91	9,97	3,13	2,24
Hormigón reciclado 30%	1,98	1,77	-38,12	2,14	-7,48	2,07	-4,35
Hormigón reciclado 45%	1,68	4,02	-47,50	2,07	-18,84	1,99	-15,58
Hormigón reciclado 60%	1,76	7,76	-45,00	2,15	-18,14	2,09	-15,79

Tabla 21: Resultados de ensayos de tracción por compresión diametral

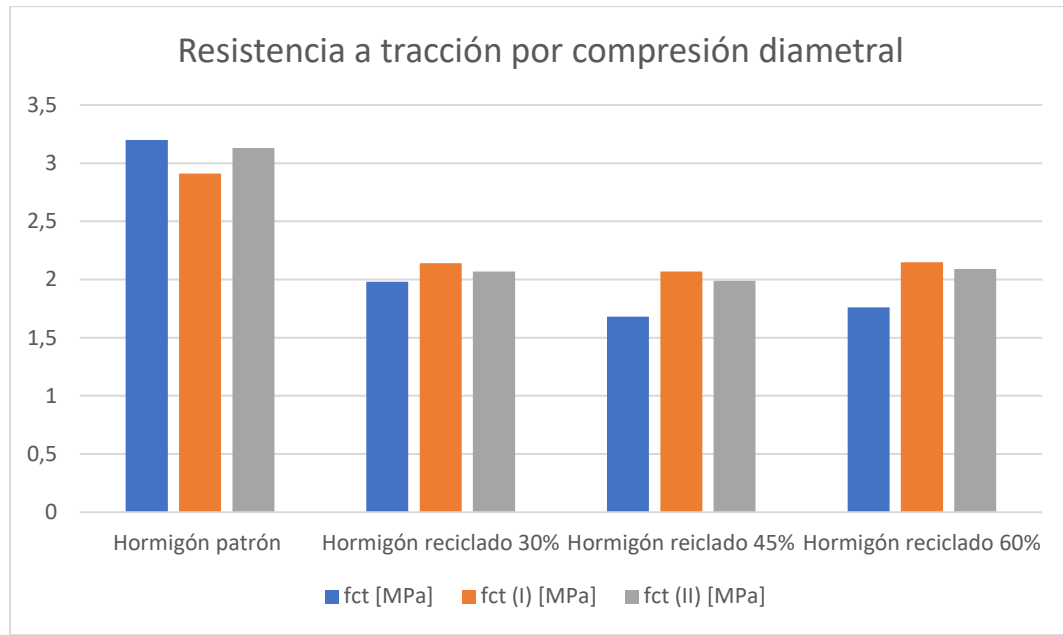


Gráfico 14: Resultados de ensayos de tracción por compresión diametral

Flexión

Se repite el proceso, pero esta vez para los ensayos de tracción por flexión, para el cual se utilizaron las probetas prismáticas.

En la tabla 22 se indican los valores medios de los ensayos para el hormigón patrón y con distintos porcentajes de material reciclado. Además se han calculado las resistencias a flexión aplicando las fórmulas siguientes obtenidas de: Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements^[10]:

$$K (A.C.P.A) = \frac{fctf}{f'cm^{\frac{1}{2}}}$$

$$K (Raphael) = \frac{fctf}{f'cm^{\frac{2}{3}}}$$

Los valores calculados resultan inferiores hasta en un 1,61 % que los mínimos recomendados por la A.C.P.A para agregados redondeados (K=0,62) y hasta un 19,10% menores que el valor recomendado por Raphael, para el hormigón patrón.

Se observa una marcada diferencia entre los resultados obtenidos de los ensayos para las probetas confeccionadas con 30% de material reciclado respecto a aquellas confeccionadas con 45% y 60%. Dado que la resistencia a flexión es el valor más importante a tener en cuenta para el comportamiento del pavimento de hormigón se estima que el hormigón con 30% de material reciclado sería el más conveniente a utilizar en estructuras sometidas al tránsito.

Tipo de hormigón	f_{ctf} [MPa]	Coefficiente de variación CV %	% de variación de f_{ctf} respecto $f_{ctf}(\text{patrón})$	K (A.C.P.A)	Dif %	K (Raphael)	Dif %
Hormigón patrón	3,65	8,7	-	0,64	3,23	0,36	-19,10
Hormigón reciclado 30%	3,59	6,32	-1,64	0,87	40,32	0,54	21,35
Hormigón reciclado 45%	2,62	9,29	-28,22	0,65	4,84	0,41	-7,87
Hormigón reciclado 60%	2,53	3,00	-30,68	0,61	-1,61	0,38	-14,61

Tabla 22: Resultados de ensayos de tracción por flexión

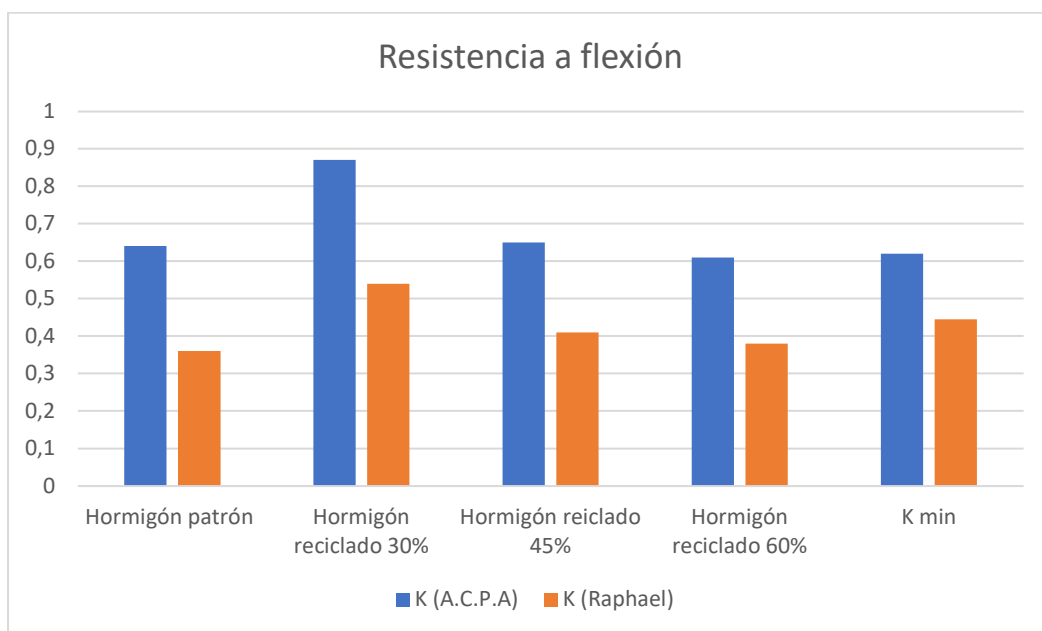


Gráfico 15: Resultados de ensayos de tracción por flexión

Resumen de los resultados obtenidos.

En los gráficos 16, 17 y 18 se pueden observar las variaciones entre los resultados de las resistencias medias y características de los ensayos a compresión simple, tracción por compresión diametral y flexión de las probetas con material reciclado respecto al hormigón patrón.

Con respecto a la resistencia a compresión simple se registran las mayores disminuciones porcentuales para el hormigón elaborado con 45% de material reciclado. La misma tendencia se manifiesta para la resistencia a tracción por compresión diametral.

Respecto a la resistencia a flexión se observa que la variación porcentual disminuye a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado en la mezcla.

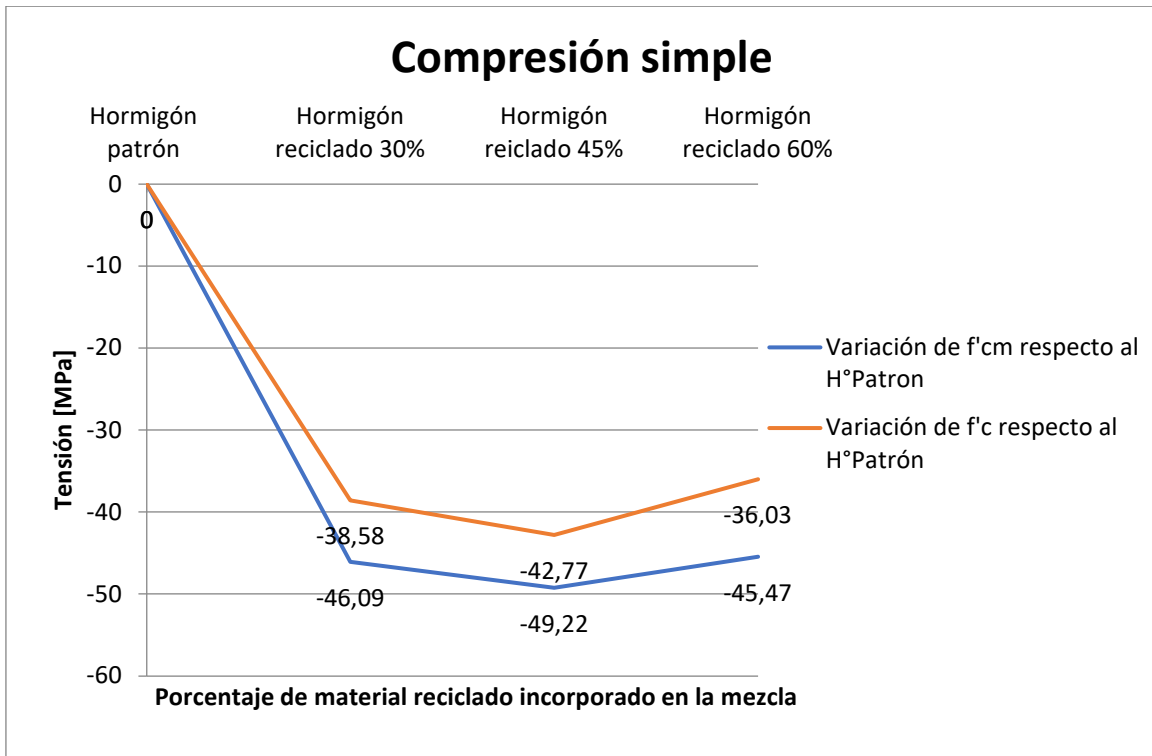


Gráfico 16: Comparación de variación de resistencias a compresión simple

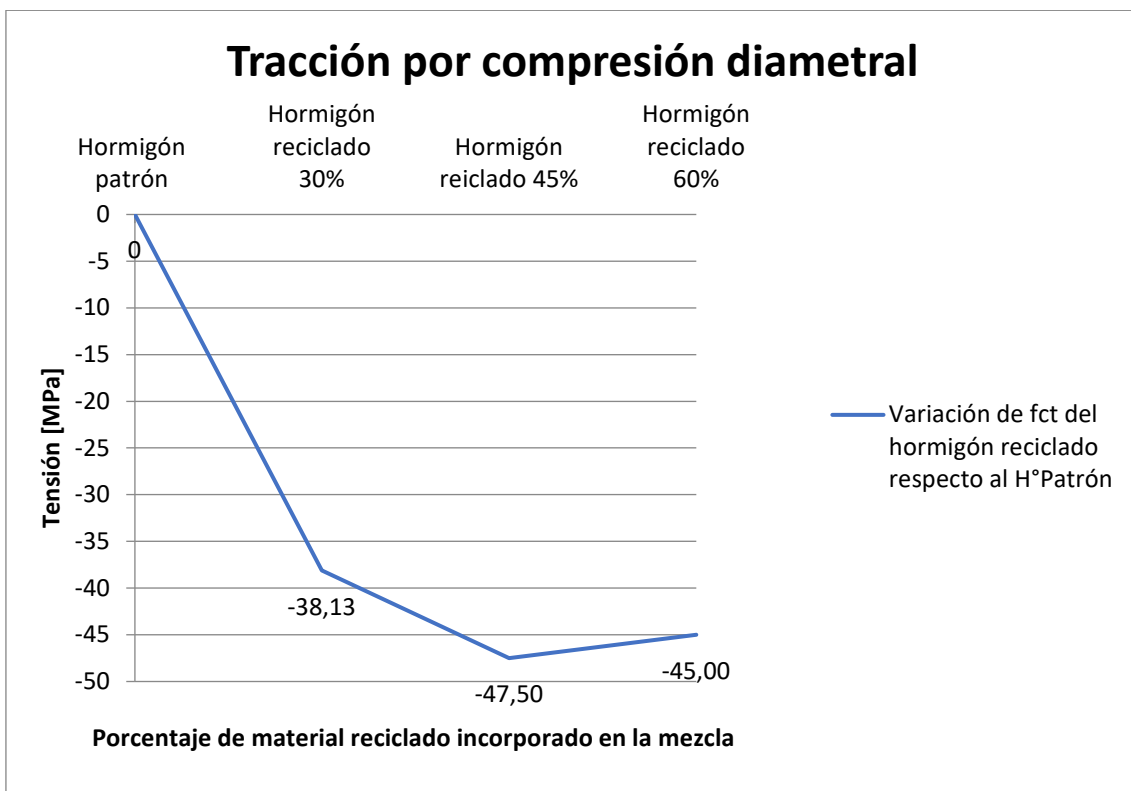


Gráfico 17: Comparación de variación de resistencias a tracción por compresión diametral

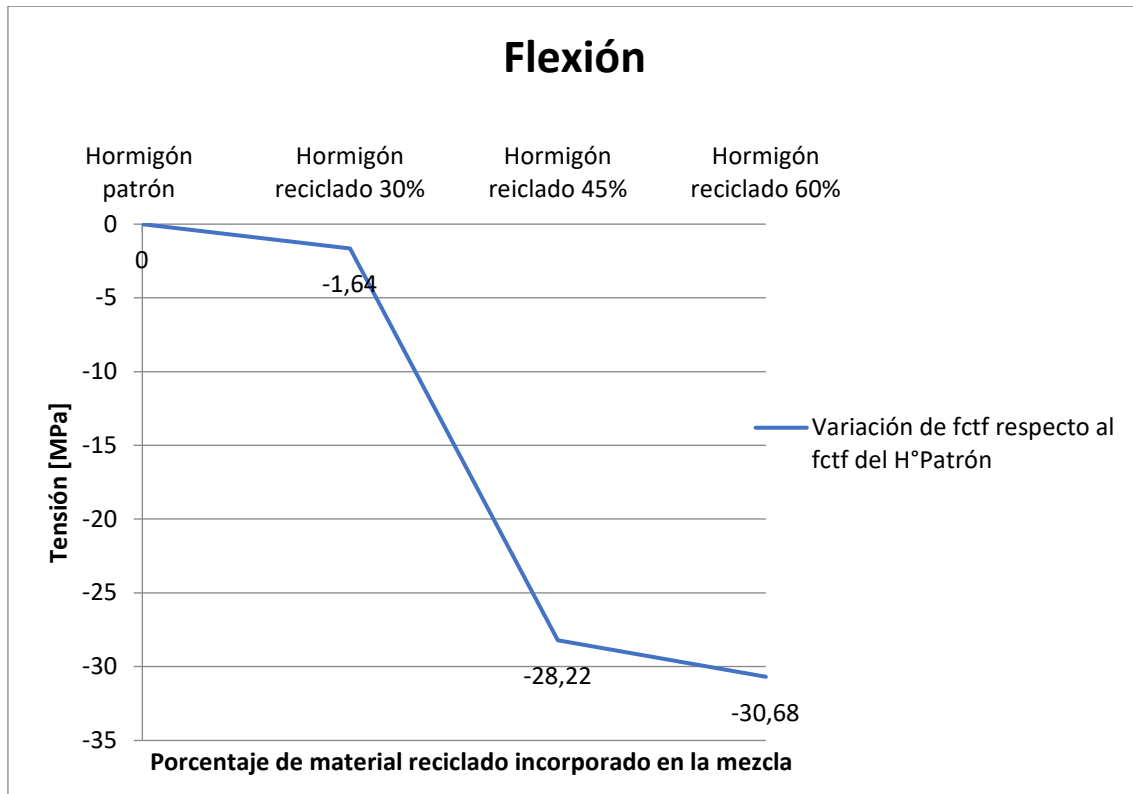


Gráfico 18: Comparación de variación de resistencias a flexión

Evaluación económica

En la tabla 23 se realizó el análisis económico de los distintos pastones elaborados con material reciclado, comparándolos con un hormigón H-17 elaborado en la misma planta donde se recupera el material utilizado, ya que la resistencia característica del ensayo a compresión realizado en nuestras probetas dio valores próximos a este.

En la tabla 24 se puede observar la incidencia porcentual de cada material para las distintas dosificaciones ejecutadas.

En la tabla 25 se puede apreciar la diferencia porcentual en el costo de los hormigones elaborados con material reciclado respecto al hormigón comercial H-17. El menor costo lo tiene el hormigón con 60% de material reciclado y los demás hormigones superan el costo del hormigón comercial, pero en porcentajes muy pequeños.

Esto nos indica que de utilizarse estos hormigones con materiales reciclados estaríamos contribuyendo a la preservación del medioambiente debido a que se reduce sustancialmente el consumo energético necesario para producir y transportar áridos comerciales. Por otra parte, se le da un destino productivo al material que en principio se transformaría en un deshecho no utilizable.

Materiales	Precio Unitario	Unidad	Hormigon reciclado						H-17	
			30%		45%		60%		Dosificacion	Precio
			Dosificacion	Precio	Dosificacion	Precio	Dosificacion	Precio		
Cemento	\$ 6,473.57	tn	0.35	\$ 2,259.28	0.36	\$ 2,330.49	0.37	\$ 2,388.75	0.30	\$ 1,942.07
Arena fina	\$ 163.15	tn	0.00	\$ 0.00	0.00	\$ 0.00	0.00	\$ 0.00	0.45	\$ 73.42
Arena Gruesa	\$ 325.00	tn	0.48	\$ 156.33	0.38	\$ 123.50	0.28	\$ 91.65	0.48	\$ 156.00
Canto rodado 1-2	\$ 1,155.00	tn	0.46	\$ 535.92	0.37	\$ 422.73	0.27	\$ 314.16	0.52	\$ 600.60
Canto rodado 1-3	\$ 1,008.00	tn	0.37	\$ 375.98	0.28	\$ 278.21	0.18	\$ 183.46	0.49	\$ 493.92
Reciclado	\$ 120.00	tn	0.48	\$ 57.24	0.71	\$ 84.84	0.93	\$ 112.08	0.00	\$ 0.00
Sikament 90E	\$ 131,112.50	tn	0.0028	\$ 366.07	0.0029	\$ 377.60	0.0030	\$ 387.04	0.0024	\$ 314.67
Agua		lts	157	\$ 0.00	162	\$ 0.00	166	\$ 0.00	150	\$ 0.00
Costo Materiales				\$ 3,750.81		\$ 3,617.37		\$ 3,477.14		\$ 3,580.68
Costo de elaboracion	\$ 1,376.72	m3								
COSTO TOTAL			\$	5,127.53	\$	4,994.09	\$	4,853.86	\$	4,957.40

Tabla 23: Análisis económico de los distintos pastones elaborados con hormigón reciclado, comparados contra un H-17 elaborado en planta

Materiales	Incidencia en el precio			
	Hormigon reciclado			H17
	30%	45%	60%	
Cemento	60%	64%	69%	54%
Arena fina	0%	0%	0%	2%
Arena Gruesa	4%	3%	3%	4%
Canto rodado 1-2	14%	12%	9%	17%
Canto rodado 1-3	10%	8%	5%	14%
Reciclado	2%	2%	3%	0%
Sikament 90E	10%	10%	11%	9%
Agua	0%	0%	0%	0%
	100%	100%	100%	100%

Tabla 24: Incidencia de los distintos materiales en el precio final del Hormigón

Varación porcentual del costo de los hormigones reciclados respecto del hormigón comercial H-17		
Porcentaje de material reciclado		
30%	45%	60%
5%	1%	-3%

Tabla 25: variación porcentual del precio de los hormigones reciclados respecto del hormigón comercial.

Conclusiones

- Para realizar un correcto análisis del proyecto de investigación realizado es importante comprender la situación actual que se está viviendo a nivel mundial en lo que respecta a desarrollo sostenible, paradigma mediante el cual se busca, entre otros objetivos, reducir la contaminación ambiental. Entendiendo que la misma afecta la calidad de vida no solo de los seres humanos, sino también del resto de los seres vivos del planeta.

Particularmente este proyecto tiene la intención de reducir los desechos de la construcción, tratando de que puedan ser incorporados en nuevas obras civiles.

Se debe tener en cuenta también que en la medida en que se use más material reciclado en las estructuras, se reducirá la emisión de gases nocivos para la atmósfera generados durante los procesos de explotación y transporte de áridos comerciales y de la fabricación del cemento, material que exige un gran consumo de energías no renovables.

Actualmente a nivel global se está tomando mucha conciencia en lo que respecta a la contaminación del medioambiente y el cambio climático, motivo por el cual en la mayoría de las actividades de construcción civil se están adoptando medidas para reducir el impacto que la generación de RCD provoca durante el proceso de producción.

Por este motivo aquellos profesionales, estudiantes y personas involucradas en el rubro de la construcción debemos interiorizarnos en el desarrollo de estas nuevas tecnologías de reutilización de residuos de la construcción y la demolición en nuevas obras civiles.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos se observa que no se pudo alcanzar la resistencia característica de proyecto de 25 MPa, lográndose resistencias del orden de 17 MPa. Esto nos indica que estos hormigones no serían aptos para carreteras de tránsito de primera categoría. No obstante, podrían utilizarse para la construcción de elementos estructurales accesorios como cordones cuneta, sumideros, badenes, barandas de protección, bases, etc.
- Comparando los hormigones reciclados con el hormigón patrón, se puede concluir lo siguiente:

Con respecto a la resistencia a compresión simple se registran las mayores

disminuciones porcentuales para el hormigón elaborado con 45% de material reciclado.

La misma tendencia se manifiesta para la resistencia a tracción por compresión diametral.

En cuanto a la resistencia a flexión se observa que la variación porcentual disminuye a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado en la mezcla.

- Comparando los hormigones con material reciclado entre sí se puede concluir lo siguiente:

Respecto a la resistencia a compresión simple, se obtienen los mayores valores para el hormigón elaborado con 60% de material reciclado.

En lo que respecta a la resistencia a tracción por compresión diametral, se observan mejores valores en las probetas con menor porcentaje de material reciclado. En cuanto a los valores deducidos a través de las fórmulas extraídas de la bibliografía se observa que las resistencias calculadas se encuentran dentro del entorno de variación previsto por las mismas.

En los valores obtenidos de los ensayos de flexión se observa que las mayores resistencias se registran en las probetas elaboradas con el menor porcentaje de material reciclado. Dado que la resistencia a flexión es un valor determinante en la performance de los pavimentos, si se construyeran losas con este tipo de material y si estas fueran sometidas al efecto del tránsito, se estima que debería utilizarse el hormigón con 30% RCD.

- Consideramos que esta investigación sirve como una primera aproximación para comenzar a comprender el comportamiento de este material, por lo tanto, es necesario realizar ensayos adicionales (como por ejemplo los ensayos de durabilidad, determinación del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, etc.), a los fines de corroborar su comportamiento frente a diferentes condiciones de servicio, e incorporarlos a las metodologías de cálculo empírico-mecanicistas.
- Finalmente, para evaluar el comportamiento de estos hormigones in-situ se deberían ejecutar tramos experimentales en zonas de tránsito liviano, como accesos a propiedades, o playas de estacionamiento y evaluar su comportamiento a los esfuerzos dinámicos.

Bibliografía

- [1] <https://hormigonelaborado.com/wp-content/uploads/sites/185/2019/05/Hormigonar38-ilove.pdf> - Revista Hormigonar Año 12, N° 38.
- [2] “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón – CIRSOC 201”; INTI; Buenos Aires, Argentina.
- [3] “Ese material llamado hormigón”; Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón; Octubre 2012; Buenos Aires, Argentina.
- [4] http://www.lomanegra.com/wp-content/uploads/2017/09/Ficha_CPC_40-1.pdf - Ficha técnica Cemento San Martín CPC 40.
- [5] <https://www.teknobayres.com.ar/tienda/sika-sikament-90-e/> - Ficha técnica Sikament 90E.
- [6] <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-tecnologica-nacional/tecnologia-del-hormigon/apuntes/dosificacion-de-hormigones-icpa/3985986/view> - Diseño Racional de mezclas de Hormigón – Método ICPA
- [7] http://www.eis.unl.edu.ar/apuntes/Laboratorio/5_year/Traccion_estatica_%20de_metal.pdf – Tracción estática de materiales
- [8] “Introducción al cálculo de Hormigón Estructural”; Ing. Rodolfo Orler, Ing. Hugo Juan Donini -2da ed; Buenos Aires; Nobuko, 2011.
- [9] Edition Leonhardt Fritz y Mönning Eduard “Estructuras de hormigón armado Tomo I”. Ed. El Ateneo.1985
- [10] Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements-Canadian.

Referencias

Gráficos

Gráfico 1: Estadísticas de la Producción de Hormigón Elaborado 2014 al 2018 (Socios AAHE).

Fuente: <https://hormigonelaborado.com/2019/05/05/estadisticas-de-la-produccion-de-hormigon-elaborado-2014-al-2018-socios-aahe/>

Gráfico 2: Curva granulométrica canto rodado 10-20

Gráfico 3: Curva granulométrica canto rodado 10-30

Gráfico 4: Curva granulométrica de la arena fina

Gráfico 5: Curva granulométrica de arena gruesa

Gráfico 6: Curva granulométrica del material reciclado por vía seca

Gráfico 7: Curva granulométrica del material reciclado por vía húmeda

Gráfico 8: Curva granulométrica para mezcla con 60% de material reciclado

Gráfico 9: Curva granulométrica para mezcla con 45% de material reciclado

Gráfico 10: Curva granulométrica para mezcla con 30% de material reciclado

Gráfico 11: Demanda de agua en función del asentamiento

Gráfico 12: Relación agua-cemento en función de la resistencia de diseño y del tipo de cemento utilizado

Gráfico 13: Resistencia a compresión simple vs resistencia característica a compresión

Gráfico 14: Resistencia a tracción por compresión diametral vs resistencia característica a tracción por compresión diametral

Gráfico 15: Comparación de los factores K obtenidos por las fórmulas de A.C.P.A y Raphael

Gráfico 16: Comparación de variación de resistencias a compresión simple

Gráfico 17: Comparación de variación de resistencias a tracción por compresión diametral

Gráfico 18: Comparación de variación de resistencias a flexión.

Imágenes

Imagen 1: Canto rodado 10-20

Imagen 2: Canto rodado 10-30

Imagen 3: Balanza hidrostática para determinar la densidad del canto rodado

Imagen 4: *Preparación de arena fina para ser posteriormente ensayada*

Imagen 5: *Preparación de arena gruesa para ser posteriormente ensayada*

Imagen 6: *Arena fina llevada a la condición de saturada superficie seca.*

Imagen 7: *Arena gruesa llevada a condición de saturada superficie seca.*

Imagen 8: *Volumenómetro utilizado para determinar la densidad de la arena.*

Imagen 9: *Piletas de decantación del material proveniente del lavado de los camiones.*

Imagen 10: *Acopio del material sacado de las piletas de decantación*

Imagen 11: *Tamiz para material reciclado previo a su acopio*

Imagen 12: *Sector semicubierto – Acopio Final*

Imagen 13: *Obtención de muestras mediante cuarteo.*

Imagen 14: *Volumenómetro utilizado para determinar la densidad de la porción fina del material reciclado*

Imagen 15: *Granulometría por vía húmeda del material reciclado*

Imagen 16: *presentación comercial de bolsas de cemento de 50kg*

Imagen 17: *Volumenómetro para determinar la densidad del cemento*

Imagen 18: *Pesado de la arena gruesa para determinar posteriormente su humedad*

Imagen 19: Pesado del canto rodado para determinar posteriormente su humedad

Imagen 20: Pesado del material reciclado

Imagen 21: Materiales luego de ser pesados y separados en bandejas

Imagen 22: Se ajustan los moldes de las probetas antes de llenarlas con el pastón de hormigón

Imagen 23: Ensayo de asentamiento del cono de Abrams

Imagen 24: Varillado y llenado de moldes para la ejecución de probetas

Imagen 25: Probetas cilíndricas en estado fresco

Imagen 26: Probetas prismáticas en estado fresco

Imagen 27: Curado de probeta cilíndricas y prismáticas

Imagen 28: Dinamómetro registrador de cargas de maquina AMSLER

Imagen 29: Prensa AMSLER preparada para realizar el ensayo de compresión simple

Imagen 30: Probeta luego de realizado el ensayo de compresión simple

Imagen 31: Esquema de cargas actuantes y esfuerzos internos en probeta cilíndrica sometida al ensayo de tracción por compresión diametral

Imagen 32: Probeta colocada en la prensa para ser ensayada a tracción por compresión diametral

Imagen 33: Probeta luego de ser ensayada a tracción por compresión diametral

Imagen 34: Esquema de cargas y tensiones para el ensayo de flexión con probetas prismáticas

Imagen 35: Probeta prismática durante el ensayo de flexión

Imagen 36: Rotura de probeta por ensayo de flexión

Tablas

Tabla 1: Granulometría de canto rodado 10-20

Tabla 2: Granulometría de canto rodado 10-30

Tabla 3: Densidades y absorciones de canto rodado 10-20 y 10-30

Tabla 4: Granulometría de arena fina

Tabla 5: Granulometría de arena gruesa

Tabla 6: Densidad y absorción de la arena fina

Tabla 7: Densidad y absorción de la arena gruesa

Tabla 8: Granulometría por vía seca del material reciclado

Tabla 9: Granulometría por vía húmeda del material reciclado

Tabla 10: Densidad y absorción de la fracción fina del material reciclado

Tabla 11: Densidad y absorción de la fracción gruesa del material reciclado

Tabla 12: Resultados del ensayo de densidad del cemento

Tabla 13: Tabla resumen de caracterización de materiales

Tabla 14: Porcentajes de participación de agregados en mezcla para 60% de reciclado

Tabla 15: Porcentajes de participación de agregados en mezcla para 45% de reciclado

Tabla 16: Porcentajes de participación de agregados en mezcla para 30% de reciclado

Tabla 17: Determinación de los volúmenes de materiales intervinientes para 1 m³ de Hormigón

Tabla 18: Determinación de los volúmenes de materiales intervinientes para el volumen necesario para la ejecución del pastón

Tabla 19: Calculo del peso de los materiales para la ejecución de 4 probetas

Tabla 20: Resistencias a rotura y características en ensayos de compresión simple

Tabla 21: Resistencias a rotura y resistencias características en ensayos de tracción por compresión diametral

Tabla 22: Resistencias a rotura y factores K determinados por las fórmulas del A.C.P.A y Raphael

Tabla 23: *Análisis económico de los distintos pastones elaborados con hormigón reciclado, comparados contra un H-17 elaborado en planta*

Tabla 24: *Incidencia de los distintos materiales en el precio final del Hormigón*

Tabla 25: Variación porcentual del precio de los hormigones reciclados respecto del hormigón comercial.

Ábacos

Ábaco 1: Demanda de agua en función del asentamiento y del módulo de fineza (Método ICPA)

Ábaco 2: Relación agua cemento para las distintas resistencias de diseño y tipos de cemento (Método ICPA)