



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL MENDOZA**

Tesis para otorgar el Título de Magister en Ingeniería Estructural

**EVALUACIÓN DE HORMIGONES CON
RESIDUOS DE CAUCHO DESTINADOS A
REHABILITACIÓN EN ZONA SÍSMICA**

Autor: Esp. Ing. Gustavo A. CASTRO

Director: Dr. Ing. Pablo E. MARTÍN

Mendoza, Argentina

2.023

Resumen

Debido al crecimiento del parque automotor en Argentina y en el mundo, encontramos los desperdicios y residuos generados por esta industria, se incrementan en forma exponencial año tras año. Sin una reincorporación al sistema productivo de estos volúmenes de residuos, los actuales métodos de disposición de residuos, se verán colapsados por la misma industria. Es primordial generar la inmediata necesidad de integrar estos residuos dentro de las matrices productivas de nuevos procesos. Uno de los elementos provenientes de la industria automotriz más descartados son los neumáticos fuera de uso.

Este estudio tiene por objetivo evaluar la influencia de diferentes contenidos de residuo de caucho en hormigones en forma experimental. Se analizarán diferentes tipos de muestras de hormigón con caucho reciclado, comparando su comportamiento con muestras de hormigón convencional. Se evaluará la resistencia a compresión axial, a tracción por compresión diametral, a tracción por flexión, permeabilidad al aire y capacidad de succión capilar. La necesidad de restaurar, mantener y mejorar las estructuras es muy importante y requiere de la implementación de técnicas distintas a las que hasta ahora se han utilizado. La modificación de parámetros tan sensibles como la rigidez, resistencia y flexibilidad, entre otros, puede generar que la estructura traslade cargas de manera diferente a la que está diseñada y colapse. El actual desafío de la confección de hormigones, es lograr el mismo producto con menos clinker, aprovechando los residuos industriales, de ahí la necesidad de, no sólo evaluar el comportamiento en estado fresco y su capacidad resistente, sino también su durabilidad y ductilidad para aplicarlos en la rehabilitación de la mampostería estructural.

Abstract

Due to the growth of the vehicle fleet in Argentina and the world, we find that the waste and residues generated by this industry are increasing exponentially year after year. Without a reincorporation of these volumes of waste into the productive system, the current methods of waste disposal will be collapsed by the industry itself. The immediate need to integrate these wastes into the production matrix of new processes is paramount. One of the most discarded elements from the automotive industry are end-of-life tyres.

This study aims to evaluate the influence of different rubber residue contents in concrete on an experimental basis. Different types of concrete samples with recycled rubber will be analysed with samples of conventional concrete. Axial compressive strength, diametral compressive strength, flexural tensile strength, air permeability and capillary suction capacity will be evaluated. The need to restore, maintain and improve structures is very important and requires the implementation of techniques different from those used so far. The modification of such sensitive parameters as stiffness, strength and flexibility, among others, can cause the structure to transfer loads differently from the way it is designed and collapse. The current challenge in the manufacture of concrete is to achieve the same product with less clinker, taking advantage of industrial waste, hence the need not only to evaluate the behaviour in the fresh state and its resistance capacity, but also its durability and ductility in order to apply it in the rehabilitation of structural masonry.

Agradecimientos

A Dios.

A mi madre María y a mi padre Esteban “Chicho”, por darme la oportunidad de estudiar y apoyarme constantemente para ser Ingeniero. Ellos estarían muy orgullosos en este momento, los extraño todos los días.

A mi hijo Ciro (mi único héroe en este lío), por ser la luz de mi vida.

Al amor de mi vida Pato, por el apoyo incondicional y las horas que le robé, por la paciencia y su amor completo. Sin su entrega y compañía, no podría haber llegado adonde llegué. Amore, éste logro también es tuyo. Mil gracias.

A mi hermano del alma David “Cabezón” por apoyarme en toda mi carrera e impulsarme a superarme siempre.

A mi Director de tesis, Dr. Ing. Pablo Martín y a la Dra. Ing. Graciela Maldonado por la paciencia, enseñanzas, acompañamiento y el invaluable tiempo dedicado en todo este proceso.

A mi amigo Dr. Ing. Marcelo Guzmán (mi pilar), por las charlas, consejos, enseñanzas, horas (muchas) dedicadas desinteresadamente, por el apoyo permanente y por estar siempre presente y dispuesto para mis consultas, que no son pocas.

A la Ing. Daniela Barrera y al futuro Ing. Jesús Ceppi, con quienes formamos un maravilloso equipo. Por su trabajo, enseñanzas y, sobre todo, las horas dedicadas. Sin Ustedes, no habría podido ser posible la culminación de esta tesis. Mi más sincero agradecimiento.

A todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron en forma desinteresada en este trabajo.

A las autoridades del CeReDeTeC Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. A las autoridades del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, por su apoyo desinteresado y a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.

“La diferencia entre ganar y perder, a menudo consiste en no abandonar”

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi hermano de la vida, el Ing. Marcelo Sarmiento “Enano”, por su amistad y compañerismo en todo momento. Por estar en el momento más duro de mi vida, por sacarme del pozo e impulsarme a recibirme de Ingeniero. Se te extraña mi hermano. Dios te tenga en su gloria.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	iii
Abstract	iv
Agradecimientos	v
Dedicatoria	vi
Capítulo I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo de la tesis	1
1.2. Situación actual	2
1.3. N.F.U.: Neumáticos fuera de uso - Proceso de reciclado	4
1.4. Legislaciones	8
1.5. Organización de la tesis.....	8
Capítulo II	10
ESTADO DEL ARTE	10
2.1. Generalidades	10
2.2. Morteros con incorporación de caucho	10
2.3. Hormigones con incorporación de caucho	16
Capítulo III	29
MATERIALES Y METODOLOGIA	29
3.1. Materiales	29
3.1.1. Agua	29
3.1.1.1. Requisitos químicos, físicos y mecánicos mínimos del agua de mezclado y curado	30
3.1.2. Cemento.....	30
3.1.2.1. Cuidados y condiciones mínimas del cemento utilizado	31
3.1.3. Agregados.....	31
3.1.3.1. Agregado fino	31
3.1.3.2. Agregado grueso	33
3.1.4. Caucho reciclado	34
3.1.4.1. Polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU)	34
3.1.4.2. Fibras de caucho reciclado (FCR)	35
3.1.4.2.1. Ensayo de absorción de las fibras de caucho reciclado (FCR).....	36
3.1.5. Aditivo	37
3.2. Diseño y dosificación de la mezcla	37
3.2.1 Diseño de la mezcla.....	37

3.2.2 Dosificación de la mezcla	37
3.2.2.1. Selección del asentamiento	38
3.2.2.2. Elección del tamaño máximo del agregado	38
3.2.2.3. Estimación del contenido de agua y aire	38
3.2.2.4. Determinación de la resistencia de diseño	39
3.2.2.5. Estimación de la relación agua/cemento (a/c)	40
3.2.2.6. Cálculo del contenido de cemento	40
3.2.2.7. Estimación del contenido de agregado grueso	40
3.2.2.8. Estimación del volumen sólido del agregado fino	41
3.2.2.9. Determinación del peso unitario del hormigón	41
3.3. Metodología	42
Capítulo IV	45
ENSAYOS	45
4.1. Mediciones	45
4.2. Densidad del hormigón	45
4.3. Evaluación de la consistencia del hormigón	45
4.4. Determinación de la resistencia a compresión axial	47
4.5. Ensayo de tracción por compresión diametral	49
4.6. Ensayo de tracción por flexión	50
4.7. Determinación del módulo de elasticidad	52
4.7.1. Determinación empírica	52
4.7.2. Determinación experimental	53
4.8. Ensayo de permeabilidad al aire	53
4.9. Determinación de la capacidad de succión capilar, grado de saturación y coeficiente o velocidad de succión capilar	56
4.9.1. Probetas	57
4.9.2. Procedimiento	57
4.9.3. Cálculos	60
4.9.3.1. Capacidad de succión capilar	61
4.9.3.2. Grado de saturación	61
4.9.3.3. Coeficiente o velocidad de succión capilar	62
4.10. Ensayo de ultrasonido	62
4.10.1. Resumen del ensayo	63
4.10.2. Procedimiento	64
4.10.2.1. Elección de la posición de los transductores	64
4.10.2.2. Control de funcionamiento del aparato	64

4.10.2.3. Procedimiento para la determinación del tiempo de traspaso	64
4.10.2.4. Precisión	65
4.10.2.5. Cálculos	65
Capítulo V	67
RESULTADOS	67
5.1. Densidad.....	67
5.2. Consistencia	67
5.3. Compresión axial.....	69
5.4. Tracción por compresión diametral.....	71
5.5. Tracción por flexión.....	72
5.6. Módulo de elasticidad.....	74
5.7. Permeabilidad al aire	76
5.8. Succión capilar, grado de saturación y coeficiente o velocidad de succión capilar	79
5.9. Ultrasonido.....	82
Capítulo VI	85
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
6.1. Densidad.....	85
6.2. Consistencia	85
6.3. Compresión axial.....	86
6.4. Tracción por compresión diametral.....	87
6.5. Tracción por flexión.....	87
6.6. Módulo de elasticidad.....	87
6.7. Permeabilidad al aire	87
6.8. Capacidad y velocidad de succión capilar	88
6.9. Ultrasonido.....	88
Capítulo VII	90
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	90
7.1. Conclusiones	90
7.2. Trabajos futuros	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Identificación de tipos de morteros y dosificación (Andrada et al., 2018).	11
Tabla 2.2. Valores de resistencias a compresión a 7 y 28 días (Andrada et al., 2018).	11
Tabla 2.3. Densidad por pesaje de la probeta (Andrada et al., 2018).	11
Tabla 2.4. Determinación de la absorción (Andrada et al., 2018).	11
Tabla 2.5. Conductividad térmica (Andrada et al., 2018).	11
Tabla 2.6. Dosificación, consistencia. Relación agua/cemento (Andrada et al., 2018).	12
Tabla 2.7. Resultados de ensayos en estado fresco (Andrada et al., 2018).	12
Tabla 2.8. Resultados de ensayos en estado endurecido (Andrada et al., 2018).	12
Tabla 2.9. Dosificación de dados de mortero (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020).	13
Tabla 2.10. Toma de temperaturas (°C) en los prototipos (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020).	14
Tabla 2.11. Resistencias a compresión a 7 y 14 días (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020).	14
Tabla 2.12. Dosificación de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022).	15
Tabla 2.13. Resultados de asentamiento, peso unitario y contenido de aire de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022).	15
Tabla 2.14. Resultados de resistencias a compresión y flexión de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022).	15
Tabla 2.15. Dosificación de hormigones con fibras de caucho (Witoszek Schultz et al., 2004).	16
Tabla 2.16. Resultados de ensayos de hormigones con fibras de caucho (Witoszek Schultz et al., 2004).	16
Tabla 2.17. Determinación de Módulo de Elasticidad (Urrea Carrasco, 2006).	18
Tabla 2.18. Dosificaciones de los distintos hormigones (Peñaloza Garzón, 2015).	20
Tabla 2.19. Dosificaciones de hormigones con NFU fino y grueso (Estrada Rivera J. C., 2016).	21
Tabla 2.20. Dosificación de los distintos hormigones (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017).	23
Tabla 2.21. Resultados de resistencias promedio del ensayo a compresión en [Psi] (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017).	23
Tabla 2.22. Resultados de ensayos en estado fresco (López Kuchudis et al., 2020).	24

Tabla 2.23. Resultados de ensayos en estado endurecido (López Kuchudis et al., 2020).	25
Tabla 2.24. Dosificación de los hormigones (Fernández Torrez et al., 2022).	26
Tabla 3.1. Requisitos químicos del agua de mezclado y curado (IRAM 1601, 2012).	30
Tabla 3.2. Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y del tamaño máximo del agregado (ACI 211-1, 2009).	38
Tabla 3.3. Resistencia de diseño de la mezcla cuando no se conoce la desviación estándar para hormigones sin armar y armados (ACI 211-1, 2009).	39
Tabla 3.4. Estimación de la relación a/c a partir de la resistencia de diseño f'_{cr} y del porcentaje de aire incorporado a la hormigón (ACI 211-1, 2009).	40
Tabla 3.5. Estimación del volumen de agregado grueso seco y compactado en función del módulo de finura del agregado fino y del tamaño máximo nominal del agregado grueso (ACI 211-1, 2009).	40
Tabla 3.6. Peso unitario del hormigón diseñado.....	41
Tabla 3.7. Designación de los hormigones.	42
Tabla 3.8. Dosificación de materiales por hormigón.	43
Tabla 4.1. Clasificación de la permeabilidad del hormigón, basada en resultados de kT (IRAM 1892, 2022).	55
Tabla 5.1. Densidades teóricas de hormigones con caucho adicionado.	68
Tabla 5.2. Asentamientos según dosificación de PNFU y FCR.	69
Tabla 5.3. Resultados de ensayos a compresión axial de hormigones con caucho.	70
Tabla 5.4. Resultados de ensayos a tracción por compresión diametral de hormigones con caucho.	72
Tabla 5.5. Resultados de ensayos a tracción por flexión de hormigones con caucho.	73
Tabla 5.6. Módulos de elasticidad E_c de hormigones con PNFU.	74
Tabla 5.7. Módulos de elasticidad E_c de hormigones con FCR.	75
Tabla 5.8. Resultados de ensayos de permeabilidad al aire por Método Torrent.	76
Tabla 5.9. Capacidad de succión capilar y coeficiente o velocidad de succión capilar para hormigones con caucho.	79
Tabla 5.10. Grados de saturación de hormigones con caucho.	81
Tabla 5.11 Resultados de ensayos de ultrasonido.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema interno de un neumático. (Neumáticos KAMELGEN kamelgen.cl/neumaticos/).	5
Figura 1.2. Representación de cadena de reciclado de neumáticos usados. (Diario La Vanguardia, “¿cómo crear un parking de bicicletas con unos neumáticos usados?”).	6
Figura 1.3. Composición de neumático tipo. (motor1b.com/noticias/neumaticos-de-invierno-ventajas-e-inconvenientes/).	7
Figura 1.4. Tamaños de partículas de caucho en distintos procesos de trituración. (Méndez D., Panella F., tesis de grado UTN-FRM).	7
Figura 2.1. Resultados de ensayos Edad vs. Resistencia a compresión, (Urta Carrasco, 2006).	17
Figura 2.2. Gráficos relación Tensión – Deformación (Urta Carrasco, 2006).	18
Figura 2.3. Resistencia a la compresión en función del agregado de caucho particulado, (Benítez et al., 2013).	19
Figura 2.4. Comparación general de $f'c$ de las mezclas, (Peñaloza Garzón, 2015).	20
Figura 2.5. Resistencia a compresión con edades de rotura de 7 y 28 días para hormigón de referencia y hormigones con incorporación de PNFU (0 - 0.6mm), (Estrada Rivera J. C., 2016).	22
Figura 2.6. Resistencia a compresión con edades de rotura de 7 y 28 días para hormigón de referencia y hormigones con incorporación de caucho grueso, (Estrada Rivera J. C., 2016).	22
Figura 2.7. Resultados de ensayos de resistencia a compresión comparando valores de muestra patrón y hormigón con caucho, (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017).	24
Figura 2.8. Resultados de ensayos de resistencia a compresión de hormigones con caucho, (Fernández Torrez et al., 2022).	26
Figura 2.9. Resultados de ensayos de resistencia a tracción de hormigones con caucho, (Fernández Torrez et al., 2022).	26
Figura 2.10. Resultados de ensayos de resistencia a flexión de hormigones con caucho, (Fernández Torrez et al., 2022).	27
Figura 2.11. Absorción de las mezclas con caucho a los 28 días, (Fernández Torrez et al., 2022).	27
Figura 2.12. Densidad de las mezclas con caucho a los 28 días, (Fernández Torrez et al., 2022).	28

Figura 2.13. Índice de vacíos de las mezclas con caucho a los 28 días, (Fernández Torrez et al., 2022).	28
Figura 3.1. Materiales componentes de un hormigón tipo.	29
Figura 3.2. Muestra de arena.	32
Figura 3.3. Curva granulométrica del agregado fino.....	32
Figura 3.4. Muestra de ripio.	33
Figura 3.5. Curva granulométrica del agregado grueso.	34
Figura 3.6. Muestra de PNFU.	35
Figura 3.7. Muestra de FCR.	35
Figura 3.8. Ensayo de absorción de FCR.	36
Figura 3.9. Moldeado de probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm.	44
Figura 4.1. Ensayo del Cono de Abrams (Méndez D., Panella F., tesis de grado UTN-FRM).	45
Figura 4.2 Encabezados de neopreno y moldes de acero.	47
Figura 4.3. Probeta previo al ensayo de compresión axial y luego de alcanzar la carga de rotura.	48
Figura 4.4. Disposición de la probeta (IRAM 1658, 1995).	49
Figura 4.5. Probeta previo al ensayo de tracción por compresión diametral y luego de alcanzar la carga de rotura.	50
Figura 4.6. Posicionamiento de probeta y esquema de cargas en ensayo de tracción por flexión (IRAM 1547, 1992).	51
Figura 4.7. Probeta prismática previo al ensayo de tracción por flexión y luego de alcanzar la rotura.	52
Figura 4.8 Esquema de funcionamiento del permeabilímetro de Torrent, 2013).	54
Figura 4.9. Mediciones de la humedad superficial para ensayo de permeabilidad al aire.	55
Figura 4.10. Equipo de Método Torrent en funcionamiento.	56
Figura 4.11. Probeta de ensayo para succión capilar (IRAM 1871, 2021).	57
Figura 4.12. Sellado de probetas para ensayo de succión capilar.	58
Figura 4.13. Secado de probetas para ensayo de succión capilar.	58
Figura 4.14. Instante (t_0) en ensayo de succión capilar.	59

Figura 4.15. Proceso de pesaje para determinar la capacidad de succión capilar.	60
Figura 4.16. Ejemplo de gráfico de succión capilar para tres muestras (IRAM 1871, 2021).	62
Figura 4.17. Equipo de ultrasonido.	63
Figura 4.18. Medición del tiempo de traspaso del pulso ultrasónico.	65
Figura 5.1. Asentamiento de hormigones con caucho.	69
Figura 5.2. Resistencia a compresión normalizada de hormigones con caucho a 28 días.	71
Figura 5.3. Resistencia a compresión vs. Densidad teórica de hormigones.	71
Figura 5.4. Resistencia a tracción por compresión diametral normalizada de hormigones con caucho.	72
Figura 5.5. Resistencia a tracción por flexión normalizada de hormigones con caucho.	73
Figura 5.6. Correlación entre el módulo E y resistencia a compresión de hormigones con PNFU.	75
Figura 5.7. Correlación entre el módulo E y resistencia a compresión de hormigones con FCR.	76
Figura 5.8. Coeficientes de permeabilidad al aire kT de hormigones con PNFU.	77
Figura 5.9. Coeficientes de permeabilidad al aire kT de hormigones con FCR.	78
Figura 5.10. Permeabilidad normalizada de hormigones con caucho.	79
Figura 5.11. Capacidad de succión capilar normalizada de hormigones con caucho.	81
Figura 5.12. Velocidad de pulso ultrasónico de hormigones con caucho.	84
Figura 6.1. Material disgregado en la máquina hormigonera.	84

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos de la ingeniería, es poder recuperar estructuras de hormigón armado debido a la acción sísmica. Por ello, en esta tesis se evalúa el comportamiento de un material deformable como es el caucho, incorporado en una matriz cementicia, logrando de este modo hormigones adicionados con resistencias a compresión acordes a los requerimientos establecidos en la reglamentación sismorresistente actualmente vigente en nuestro país (IMPRES CIRSOC 103 Parte II, 2005).

1.1. Objetivo de la tesis

Se tiene como objetivo de esta tesis, la investigación y desarrollo tecnológico de la implementación de Polvo de Neumáticos Fuera de Uso (PNFU) y de Fibras de Caucho Reciclado (FCR) provenientes del tratamiento de Neumáticos Fuera de Uso (NFU), como adición a la mezcla en hormigones con resistencias mecánicas apropiadas para su uso como material en rehabilitación sísmica.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar el comportamiento mecánico de hormigones con PNFU y FCR como adición respecto a hormigones de referencia.
- Evaluar el comportamiento físico de hormigones con PNFU y FCR como adición respecto a hormigones de referencia.
- Determinar el porcentaje de caucho incorporado para obtener el rango de desempeño óptimo en los hormigones elaborados.
- Evaluar distintas técnicas de ensayos destructivos y no destructivos a fin de alcanzar una mejor comprensión de la incorporación de este residuo en el hormigón.
- Analizar y comparar la influencia del caucho en las propiedades de los hormigones, en función de distintos porcentajes.
- Aportar al estado del conocimiento del proporcionamiento de hormigones con residuos molidos.

Con la reutilización de los NFU se busca lograr una alternativa ecológica a la situación actual, donde estos terminan depositados en basurales o utilizados como combustibles en otras industrias, buscando lograr un cambio en las políticas medio ambientales y de regulación de espacios públicos, utilizando este recurso en la industria de la construcción.

1.2. Situación actual

La rápida acumulación de residuos de neumáticos ha provocado muchos problemas ambientales en todo el mundo en los últimos años. En particular, más de 300 millones de llantas de desecho se producen anualmente en los Estados Unidos, y este número aumenta continuamente. Se ha demostrado que reciclar el caucho de llantas de desecho como agregados finos para la producción de hormigón es una forma posible de reciclar neumáticos.

En la última década el parque automotor (compuesto por automóviles livianos, vehículos utilitarios, vehículos de carga y ómnibus, entre otros) se ha visto incrementado en simultaneidad con la cantidad de habitantes, así como todos los productos derivados y necesarios para esta industria.

La generación de residuos de caucho en los últimos años ha recibido gran atención, en España se han generado 250.000 toneladas/año de neumáticos usados de los cuales un 45% no tiene ningún tratamiento para su desecho, aun cuando existen diversas vías para la recuperación del caucho y su utilización [Khatib & Bayomy (1999), Khatib (2009)].

En el país la Resolución 523/2013 establece las pautas del reciclado de neumáticos por el impacto ambiental que producen, ya que desde 2010 están establecidas plantas de tratamiento de neumáticos usados en Buenos Aires. En Cuyo se desechan 8000 toneladas de neumáticos por año (Los Andes, 2016).

La tasa de motorización, es decir, la cantidad de vehículos motorizados por habitante en Argentina, tuvo un crecimiento del 30,31% entre los años 2004 y 2009 (Gartner, 2011).

La cantidad de vehículos que ha habido en la República Argentina, desde el año 2016, según datos proporcionados por ADEFA (2016, 2021), en un periodo de 5 años se vio incrementada de 14.641.285 a 17.945.850.

Dado por un análisis realizado por el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) en su anexo del “Centro de investigación y desarrollo del caucho” (conexionreciclado.com.ar), se estima que es necesario un periodo de 600 años para la descomposición de NFU que hayan sido enterrados o usados en rellenos sanitarios. Tan solo en nuestro país, se estima una generación de NFU de

100.000 toneladas anuales, de las cuales el 50% corresponde solo a la provincia de Buenos Aires, y un total aproximado de 8% es la generada por la región de Cuyo (<https://www.mendoza.gov.ar/prensa/mendoza-tratará-neumaticos-fuera-de-uso/>).

Un problema pendiente es la reducción de la resistencia del hormigón con la incorporación de residuos de caucho en comparación con el hormigón convencional, que incluye tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la tracción, por lo que es necesario caracterizar estos residuos de neumáticos y encontrar las aplicaciones ingenieriles más adecuadas.

Es importante la mitigación de la fragilidad del hormigón normal de cemento Portland y la mejora de su resistencia al impacto y la ductilidad con la incorporación de estos residuos. Estas mejoras se generan principalmente a partir de la capacidad de absorción de energía de los materiales de goma blanda.

El actual desafío de la confección de hormigones es lograr el mismo producto con menos clinker, aprovechando los residuos industriales, de ahí la necesidad de no sólo evaluar el comportamiento en estado fresco y su capacidad resistente, sino también su durabilidad.

El caucho tiene la propiedad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla, la determinación de parámetros de comportamiento plástico con buena capacidad de deformación y elevada ductilidad son base de la utilización del elemento y como material para la reparación de elementos estructurales de diferentes características.

En la actualidad gran parte de los neumáticos que terminan su ciclo de uso se utilizan como relleno sanitario de terreno o terminan como desperdicios en basureros. El mayor problema que existe es la utilización como combustibles para los hornos e industrias. Estas emisiones al aire que produce la quema de neumáticos contienen los contaminantes críticos, tales como partículas de: monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO), óxidos de nitrógeno (NO), y compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Según un estudio del Centro de Información de Contaminación de Aire (C.I.C.A.), las concentraciones de plomo, hierro, y zinc en el penacho de humo eran 11 mg/m³, 14 mg/m³, y 122 mg/m³, respectivamente, tras producirse la quema de neumáticos a cielo abierto. El análisis de los residuos de los neumáticos mostró la complejidad de la muestra, que contenía miles de compuestos individuales, donde se detectaron concentraciones bajas de tolueno, benceno, xileno y limoneno.

Gerges et al. (2018) indican que se han considerado tres categorías amplias de diseño de mezcla de hormigón de caucho de neumáticos desechados:

1. Caucho astillado: este tipo de caucho tiene unas dimensiones de aproximadamente 25–30 mm y se usa para reemplazar los agregados gruesos en hormigón.
2. Caucho de miga: las partículas de caucho son muy irregulares, varían entre 3 y 10 mm y se utilizan para reemplazar agregados.
3. Caucho en polvo: las partículas del caucho son más pequeñas que 1 mm y consisten en el polvo formado durante el proceso de obtención.

En el INTI Argentina, Benítez et al (2013) comenzaron a investigar las mezclas de hormigón con caucho a través de tipos de mezclas predeterminadas, con resultados parciales que no han tenido una conclusión específica al respecto de su utilización y características.

La comunidad internacional tampoco se encuentra ajena a la problemática ambiental que presenta la creciente acumulación de neumáticos fuera de uso y los inconvenientes ecológicos que estos presentan. Tampoco es ajena en los avances técnicos y tecnológicos que tratan de dar una finalidad a estos residuos. Debido a ello, numerosos autores han desarrollado estudios que buscan obtener las aplicaciones prácticas dentro de la industria de la construcción y de la producción de hormigones. Algunos de ellos son Topçu & Unverdi (2018) y Topçu & Uygunoglu (2016) en Turquía, Oikonomou & Mavridou (2009) en Grecia, y Corinaldesi & Donnini (2019) en Italia.

1.3. N.F.U.: Neumáticos fuera de uso - Proceso de reciclado

Los neumáticos, en su mayoría, están conformados por la unión del caucho con la incorporación de una malla de acero que brinda estabilidad y rigidez a los mismos, además fibras textiles provenientes de derivados del petróleo con un gran poder calorífico y con propiedades de aislación térmica y acústica. Figuran en menores proporciones de óxido de zinc, azufre y aditivos, que pueden haber incorporado los distintos fabricantes de neumáticos. En la Figura 1.1 se puede el esquema interno de un neumático.



Figura 1.1. Esquema interno de un neumático. (Neumáticos KAMELGEN)

Dentro de la industria existen varios métodos para el procesamiento de FCR, siendo estos: la termólisis, la pirólisis, la trituración criogénica y la trituración mecánica (este último, el más común, dado su técnica simple y bajo costo). El proceso de trituración mecánica es el único proceso que logra mantener las propiedades físicas y químicas sin alterar, según Chimborazo Azogue et al. (2017).

A continuación, se describe el proceso de trituración mecánica, ejemplificado en la Figura 1.2.

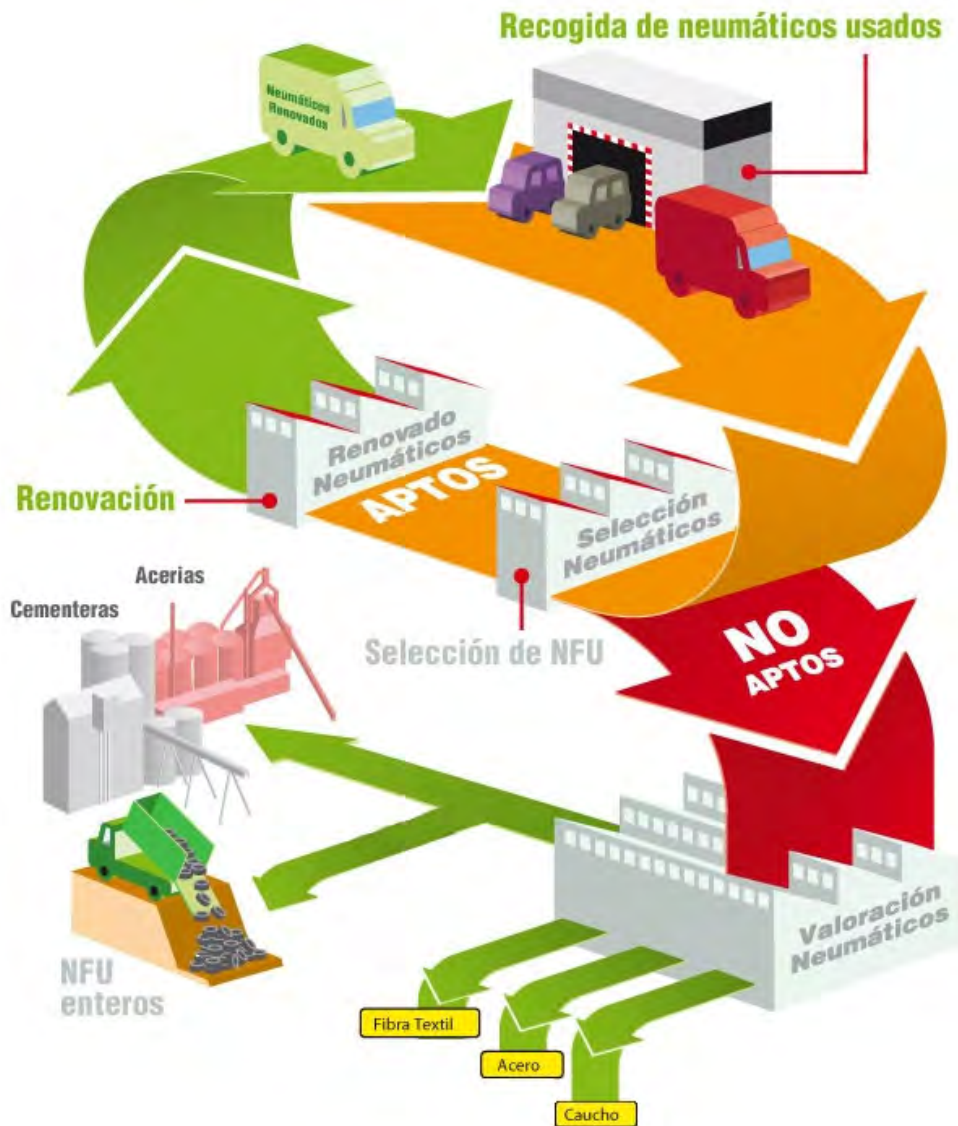


Figura 1.2. Representación de cadena de reciclado de neumáticos usados (Diario La Vanguardia)

Tras la recepción de los NFU, se genera la primera clasificación, identificándolos por tipo y estado de conservación en que se encuentran, determinando si son aptos para ser reutilizados dentro del parque automotor. Los neumáticos no aptos serán sometidos al proceso de trituración, o en la situación actual, desechados o usados como combustibles en otras industrias.

Este proceso de preselección es importante, ya que neumáticos de gran calibre, provenientes de vehículos de gran rodado o maquinaria pesada, deben ser sometidos a un proceso de desvenado, donde se separa la malla principal del neumático, antes de poder iniciarse el proceso de trituración mecánica sobre el caucho.

Posteriormente se pasa a un proceso de trituración primaria, donde se reduce a los NFU a fragmentos de 50 mm aproximadamente. En este paso, se obtienen los 3 componentes que integran un neumático: caucho triturado (70% - 75%), fibra textil (12% - 15%) y acero (12% - 15%), como se puede apreciar en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Composición de neumático tipo (motor16.com)

Tras ser separados los distintos productos entre sí, el caucho se somete a un proceso de trituración secundaria, donde se reducen las FCR a un tamaño aproximado de 5 mm. Este puede estar acompañado con un proceso de trituración terciaria, llamado pulverización, donde se continúa disminuyendo el tamaño de los granos, según Olivares Carmona (2016). En la Figura 1.4. se ejemplifican los tamaños de FCR.

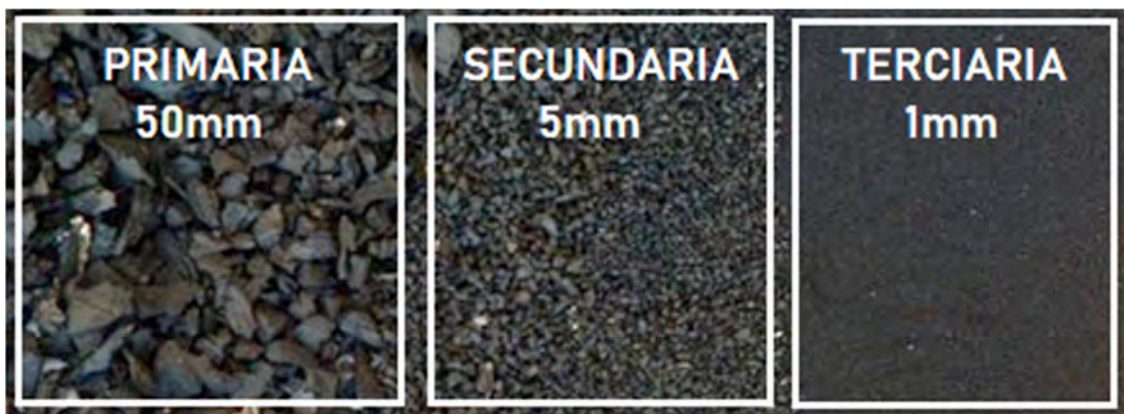


Figura 1.4. Tamaños de partículas de caucho en distintos procesos de trituración (Méndez y Panella, 2020)

1.4. Legislaciones

Dentro de la legislación nacional de la República Argentina, se encuentra una limitada variedad de normativas referentes al tratamiento de los NFU, todas estas impulsadas por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, la cual existió hasta diciembre de 2019 cuando fue reemplazada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Durante el año 2017, se presentó el proyecto de ley S-3047/17 por parte del Senador Alfredo Héctor Luenzo (Chubut Somos Todos), el cual busca legislar sobre la disposición final de los NFU para disminuir el impacto sobre el medio ambiente. Aplica el principio de responsabilidad extendida del productor y el principio de responsabilidad individual del mismo, estos implican la responsabilidad legal y financiera de los productores, extendida hasta el momento de post consumo de los neumáticos y la gestión de los NFU que se fabriquen.

También, este proyecto de ley, abarca el control efectivo del cumplimiento de recuperación, recolección, clasificación, almacenamiento, transporte y tratamiento de los NFU. Un punto importante, es la financiación de la gestión colectiva que se materializará a través de la obligación de los productores y de los importadores de realizar un aporte económico por cada neumático producido e introducido al actual parque automotor.

En la provincia de Mendoza existe el “Plan de Manejo Sustentable de Neumáticos Fuera de Uso” que estipula condiciones, consideraciones y penalizaciones de manera similar que el proyecto de ley nacional.

Además, dentro de la legislación provincial se encuentra la Ley 9143, que prohíbe la acumulación de neumáticos a cielo abierto, el transporte y disposición de neumáticos junto con otros residuos sólidos o peligrosos, la quema de neumáticos a cielo abierto, entre otras consignas. Esta ley también detalla el marco legal para la disposición final de los NFU y las respectivas sanciones en caso de incumplir con esta.

1.5. Organización de la tesis

En el Capítulo I se da la introducción de la tesis, se establecen los objetivos generales, específicos de la tesis y las hipótesis principales del trabajo.

En el Capítulo II, se revisa el estado actual del conocimiento respecto al análisis del hormigón con residuos de caucho aportado por otros investigadores, dividiendo el capítulo en dos partes, siendo

la primera de ellas la recopilación de antecedentes sobre el tema en lo referente al comportamiento del mortero con residuos de caucho. En la segunda parte de este capítulo se abarca el estudio del hormigón con incorporación de caucho.

En el Capítulo III se detallan en primera instancia todos los materiales utilizados para los hormigones estudiados. Posteriormente se muestra el diseño de la mezcla y por último se presenta la metodología utilizada y la designación de los distintos hormigones según los porcentajes de adición de PNFU como de FCR.

En el Capítulo IV, se presentan todos los ensayos destructivos y no destructivos que se realizaron para poder caracterizar los hormigones con caucho adicionado, detallando para cada ensayo su procedimiento, consideraciones a tener en cuenta y cálculos realizados.

En el Capítulo V, se muestran los resultados de los ensayos realizados, tanto para los hormigones con adición de PNFU como de FCR. Dichos resultados se indican en diferentes tablas y se acompañan con gráficos para una mejor visualización.

En el Capítulo VI, se realiza un análisis de los resultados de cada ensayo, indicando para uno el porcentaje de adición de caucho de mejor desempeño.

Por último, en el Capítulo VII, se presentan las observaciones finales y conclusiones extraídas a partir de la caracterización de los hormigones con caucho adicionado, se explican y fundamentan los resultados obtenidos. Finalmente se indica las líneas de investigación para trabajos futuros.

Capítulo II

ESTADO DEL ARTE

2.1. Generalidades

En el estado del arte de la reparación y rehabilitación de estructuras sismorresistentes, se ha incorporado el conocimiento que se tiene sobre los materiales de construcción de producción industrial masiva y los nuevos materiales de reparación, desarrollados en los últimos treinta años, especialmente para el hormigón armado (resinas epoxi, fibras de carbono, etc.).

Los distintos terremotos han ido actualizando las técnicas de rehabilitación con materiales tradicionales. Estudios locales sobre reparaciones de la estructura de mampostería y hormigón armado, han utilizado materiales tradicionales, en especial, para la recuperación de construcciones de un nivel, como viviendas desde el terremoto de 1985 en Mendoza (Michelini et al., 1987, 1991, Maldonado y Olivencia 1992, Maldonado et al., 2008).

La necesidad de incluir la sustentabilidad en la construcción en investigaciones locales, ha permitido incluir distintos tipos de residuos de origen cementicio (Maldonado et al., 2013, 2014, Guzmán et al., 2018), cerámico (Palencia et al., 2012), plástico (Martín et al., 2016, Méndez et al, 2022) con resultados experimentales que orientan su aplicación en zonas sísmicas.

Es importante adquirir conocimiento de antecedentes e información respecto al tema de interés, así se obtendrá un primer acercamiento formal con base teórica, conociendo otras investigaciones que permitan clarificar ideas respecto a dicho tema.

En este capítulo se describe el estado del arte respecto al análisis de morteros y hormigones con residuos de caucho. En una primera instancia, se recopilaron los antecedentes sobre morteros con incorporación de caucho y seguidamente lo referido a hormigones.

2.2. Morteros con incorporación de caucho

Andrada et al. (2018) realizaron un estudio de morteros sustentables para lo cual plantearon el reemplazo del agregado pétreo por caucho reciclado como potencial contribución a la disminución del peso propio de las estructuras y mejoramiento en sus propiedades térmicas.

Se diseñaron mezclas con sustitución del 10% y 20% del agregado fino por caucho y se compararon los resultados con un mortero patrón. El cemento que se utilizó es CPF 40, cemento portland con filler calcáreo.

La dosificación utilizada es la que se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Identificación de tipos de morteros y dosificación (Andrada et al., 2018)

Muestras	Descripción según tipo de aglomerante	Dosificación
MP	Mortero patrón de cemento y arena	1:3
MC10	Mortero de cemento, arena, con sustitución de 10% de agregado por caucho	
MC20	Mortero de cemento, arena, con sustitución de 20% de agregado por caucho	

Los resultados obtenidos al ensayar estos morteros se presentan en las Tablas 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5.

Tabla 2.2: Valores de resistencias a compresión a 7 y 28 días (Andrada et al., 2018)

Edad (días)	MP	MC10	MC20
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
7	13,1	5,2	1,8
28	19,6	8,0	3,8

Tabla 2.3: Densidad por pesaje de la probeta (Andrada et al., 2018)

Muestras	MP	MC10	MC20
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Densidad	1952	1683	1529

Tabla 2.4: Determinación de la absorción (Andrada et al., 2018)

Muestras	MP	MC10	MC20
	[%]	[%]	[%]
Absorción	7,3	9,2	9,4

Tabla 2.5: Conductividad térmica (Andrada et al., 2018)

Muestras	MP	MC10	MC20
	[W/m.k]	[W/m.k]	[W/m.k]
Conductividad térmica (W/m.k)	1,470	1,323	1,179

Del análisis de los resultados obtenidos, las autoras concluyeron que es viable la incorporación del caucho triturado a los morteros, y que estos presentan propiedades físicas y mecánicas acordes a lo especificado en la normativa vigente en Argentina.

Andrada et al. (2019) realizaron un estudio de adherencia de morteros con incorporación de caucho reciclado para lo cual diseñaron morteros de cemento-cal-arena 1:1:6 y con morteros con reemplazo de 5%, 10% y 15% de arena por caucho triturado. El cemento que se utilizó es CPF 40, cemento portland con filler calcáreo.

Las dosificaciones utilizadas son las que se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Dosificaciones, consistencia. Relación agua/cemento (Andrada et al., 2019)

Muestras	Cemento [gr]	Cal [gr]	Arena [gr]	Caucho [gr]	Agua [gr]
MPCC	250	250	1500	0	350
MCC5	250	250	1425	75	367
MCC10	250	250	1350	150	385
MCC15	250	250	1275	225	410

Los resultados obtenidos al ensayar estos morteros se presentan en las Tablas 2.7 y 2.8.

Tabla 2.7: Resultados de ensayos en estado fresco (Andrada et al., 2019)

Muestras	Tiempo de utilización [min]
MPCC	105
MCC5	90
MCC10	85
MCC15	70

Tabla 2.8: Resultados de ensayos en estado endurecido (Andrada et al., 2019)

Muestras	Resistencia compresión 7 días [MPa]	Resistencia compresión 28 días [MPa]	Resistencia flexión 7 días [MPa]	Resistencia flexión 28 días [MPa]	Adherencia 7 días [KN]	Adherencia 28 días [KN]	Densidad [gr/cm ³]
MPCC	4,18	5,57	1,46	2,29	0,50	0,63	2,12
MCC5	3,30	5,28	1,08	1,84	0,28	0,32	2,04
MCC10	1,72	2,75	0,81	1,23	0,14	0,29	1,96
MCC15	1,51	2,50	0,74	1,20	0,13	0,15	1,85

Del análisis de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que las propiedades físicas y mecánicas de los morteros con caucho en los porcentajes estudiados, se asemejan a los morteros convencionales sin adiciones. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos establecidos en la normativa vigente para morteros en la Argentina, en dos aplicaciones diferentes, por lo tanto, se concluye que es viable su utilización en los mismos.

Batallanos Pozo y Romero Zenteno (2020), estudiaron, en su tesis de grado, las propiedades del mortero con caucho pulverizado en reemplazo del agregado fino en porcentajes del 10%, 20% y 30%, tomando como modelo un mortero tradicional.

Los ensayos realizados fueron conductividad térmica y resistencia a la compresión, la cual se midió a los 7 y 14 días.

La dosificación utilizada es la que se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Dosificación de dados de mortero (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020)

Tipos	Agua [gr]	Cemento [gr]	Agregado fino [gr]	Caucho [gr]
Mortero tradicional	40,33	83,33	229,16	0,00
M. con 10% de caucho	40,33	83,33	206,24	22,92
M. con 20% de caucho	40,33	83,33	183,33	45,83
M. con 30% de caucho	40,33	83,33	160,41	68,75

Los resultados obtenidos en la toma de temperaturas en los prototipos se muestran en la Tabla 2.10, en tanto que los resultados de la resistencia a compresión a 7 y 14 días se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.10: Toma de temperaturas (°C) en los prototipos (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020)

Hora	Temperatura ambiente	Prototipo N°1	Prototipo N°2	Prototipo N°3	Prototipo N°4	Prototipo N°5
		Vivienda sin revoque	Revoque tradicional	10% de caucho	20% de caucho	30% de caucho
00:00	13,4	19,5	19,8	18,3	19,5	21,8
04:00	5,7	15,2	15,9	15,9	17,6	20,1
08:00	14,8	14,6	14,7	14,4	14,7	15,3
12:00	24,1	19,2	19,9	17,7	17,0	18,4
16:00	21,4	22,4	23,3	21,9	20,7	22,5
20:00	15,1	20,9	20,8	20,4	21,4	22,5
23:00	13,8	20,8	20,5	20,2	21,3	23,0

Tabla 2.11: Resistencias a compresión a 7 y 14 días (Batallanos Pozo y Romero Zenteno, 2020)

Tipos	Resistencia a compresión a 7 días [kg/cm ²]	Resistencia a compresión a 28 días [kg/cm ²]
Mortero tradicional	18,14	27,19
M. con 10% de caucho	6,98	11,19
M. con 20% de caucho	4,79	5,48
M. con 30% de caucho	3,57	4,87

De los resultados obtenidos se concluye que el mortero adicionado con caucho presenta una menor transmisibilidad térmica a través de los muros, por lo tanto, funciona como buen aislante térmico. Respecto a los valores de resistencias a compresión, se concluye que, cuando se utiliza caucho en el mortero, sus valores disminuyen considerablemente.

Baca Zans y Yopez Fuentes (2022), en su tesis de grado, realizaron un análisis comparativo de las propiedades físico – mecánicas de un mortero patrón y un mortero sustituyendo el peso del agregado con caucho reciclado en porcentajes del 7%, 10% y 13%.

La dosificación utilizada es la que se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Dosificación de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022)

Mortero	Agua [lts]	Cemento [kg]	Agregado [kg]	Caucho [kg]
Mortero patrón	2,16	3,18	18,20	-
Mortero + 7% de caucho	2,16	3,18	16,92	1,27
Mortero + 10% de caucho	2,16	3,18	16,37	1,82
Mortero + 13% de caucho	2,16	3,18	15,84	2,36

Las propiedades analizadas en estado fresco fueron la consistencia, peso unitario y contenido de aire, por otra parte, las propiedades analizadas en estado endurecido fueron la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión.

Los resultados obtenidos en las determinaciones en estado fresco se muestran en la Tabla 2.13, en tanto que los resultados de las determinaciones en estado endurecido se presentan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.13: Resultados de asentamiento, peso unitario y contenido de aire de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022)

Mortero	Asentamiento [cm]	Peso unitario [kg/m³]	Contenido de aire [%]
Mortero patrón	5,99	816,08	1,35
Mortero + 7% de caucho	6,70	755,43	1,95
Mortero + 10% de caucho	8,26	722,37	2,15
Mortero + 13% de caucho	12,46	702,73	2,59

Tabla 2.14: Resultados de resistencias a compresión y flexión de los morteros (Baca Zans y Yepez Fuentes, 2022)

Mortero	Resistencia a compresión a 7 días [kg/cm²]	Resistencia a compresión a 14 días [kg/cm²]	Resistencia a compresión a 28 días [kg/cm²]	Resistencia a flexión a 7 días [kg/cm²]	Resistencia a flexión a 14 días [kg/cm²]	Resistencia a flexión a 28 días [kg/cm²]
Mortero patrón	95,12	114,42	127,52	75,18	87,06	92,73
Mort. + 7% de caucho	89,08	102,09	111,07	59,50	66,53	70,04
Mort. + 10% de caucho	85,11	82,81	79,13	53,83	63,83	67,34
Mort. + 13% de caucho	50,40	56,30	68,49	48,15	50,05	59,24

De los resultados obtenidos se concluye que el mortero adicionado con caucho presenta una mejor consistencia y menor peso unitario respecto al mortero patrón. En tanto que las resistencias a compresión y flexión del mortero adicionado, disminuyeron respecto al mortero patrón.

2.3. Hormigones con incorporación de caucho

Witoszek Schultz et al. (2004) realizaron un estudio experimental sobre hormigones reforzados con fibras de caucho reciclado (FCR), de tamaño variable y superficie rugosa, procedentes del recauchutado de neumáticos.

La relación a/c utilizada fue 0,4 y la dosificación utilizada es la que se muestra en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Dosificación de hormigones con fibras de caucho (Witoszek Schultz et al., 2004)

Componentes	Hormigón de referencia	Hormigón caucho (3.5% volumen)	Hormigón caucho (5% volumen)
Grava 12/18 [kg]	26,77	26,77	26,77
Arena 3/6 [kg]	16,92	16,92	16,92
Finos 0/3 [kg]	4,73	4,73	4,73
Ceml 42.5R [kg]	8,69	8,69	8,69
Agua [litros]	3,67	3,67	3,67
Sikament 500 [g]	173,84	173,84	173,84
Bettoretad [g]	25,95	25,95	25,95
Fibermesh PP [g], 0.1% Vol.	21,13	21,13	21,13
Fibras caucho [g]	-	869,20	1241,58

Los resultados obtenidos al ensayar estos hormigones a compresión, tracción indirecta y flexión se presentan en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16: Resultados de ensayos de hormigones con fibras de caucho (Witoszek Schultz et al., 2004)

Resistencia característica a 28 días	Volumen de caucho incorporado	
	0,00%	3,50%
Compresión	36,34 MPa	25,97 MPa
Tracción indirecta	3,11 MPa	2,67 MPa
Flexión	5,47 MPa	4,88 MPa

Con respecto a la compresión y tracción indirecta, los autores evidenciaron que las resistencias se ven fuertemente afectadas y reducidas con el aumento de la adición del volumen incorporado de

FCR debido a la baja adherencia entre el hormigón y el caucho, y por la porosidad que origina dicha incorporación. Para estos ensayos se usaron probetas cilíndricas de 15cm x 30cm.

En el estudio realizado por Urra Carrasco (2006), se estudiaron distintas mezclas donde se reemplazó parte de los áridos por caucho reciclado en los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% y se las comparó con un hormigón de referencia. Se realizaron ensayos de compresión y determinación del módulo de elasticidad.

Los resultados de los ensayos de compresión para los distintos hormigones se muestran en la Figura 2.1.

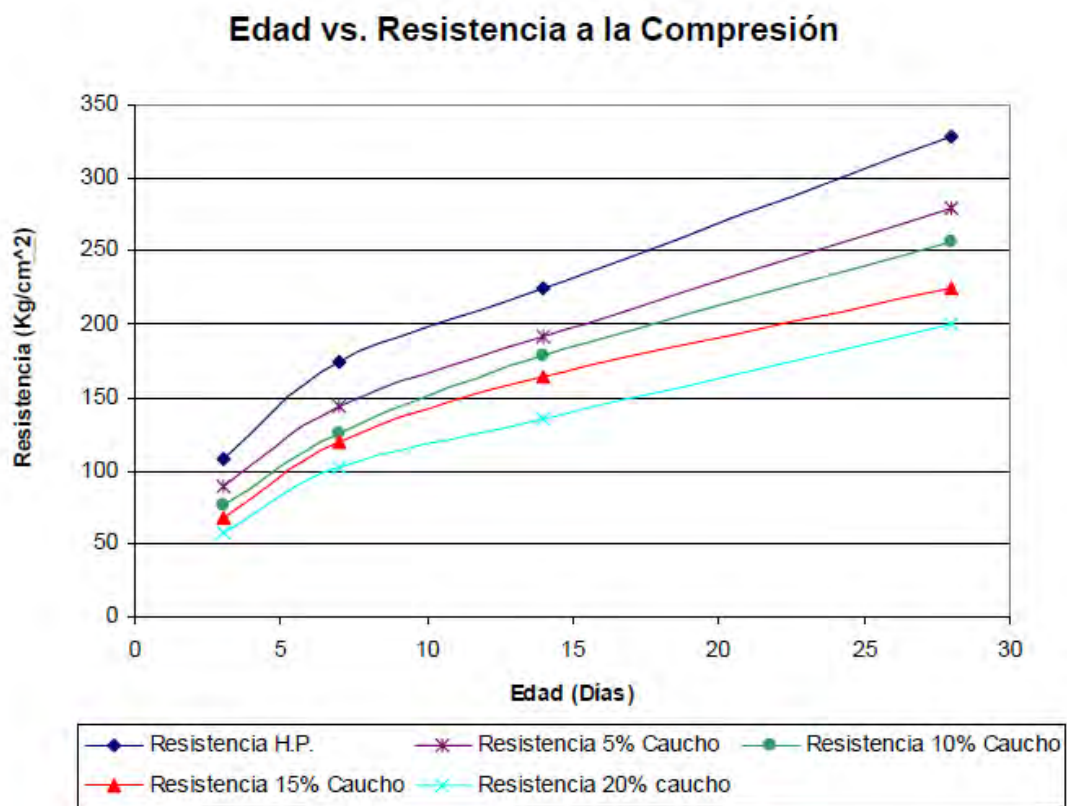


Figura 2.1. Resultados de ensayos Edad vs. Resistencia a compresión (Urra Carrasco, 2006)

Posteriormente se calculó el módulo de elasticidad, como se muestra en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Determinación del módulo de elasticidad (Urra Carrasco, 2006)

MEZCLAS	Resistencia a Compresión [kg/cm ²]				E [kg/cm ²]
	3 días	7 días	14 días	28 días	28 días
Hormigón Patrón	108	174	225	328	101297
5% Caucho	89	144	192	280	78247
10% Caucho	76	126	179	256	72934
15% Caucho	67	119	164	224	65519
20% Caucho	58	102	136	200	60596

También la autora realizó el gráfico de Carga vs. Deformación, el cual se puede ver en la Figura 2.2. En dicho gráfico se puede apreciar el incremento de la resistencia a compresión para hormigones con menores concentraciones de caucho incorporado, siendo las mezclas con 20% de caucho, las más desfavorables en la relación de tensiones vs. deformaciones.

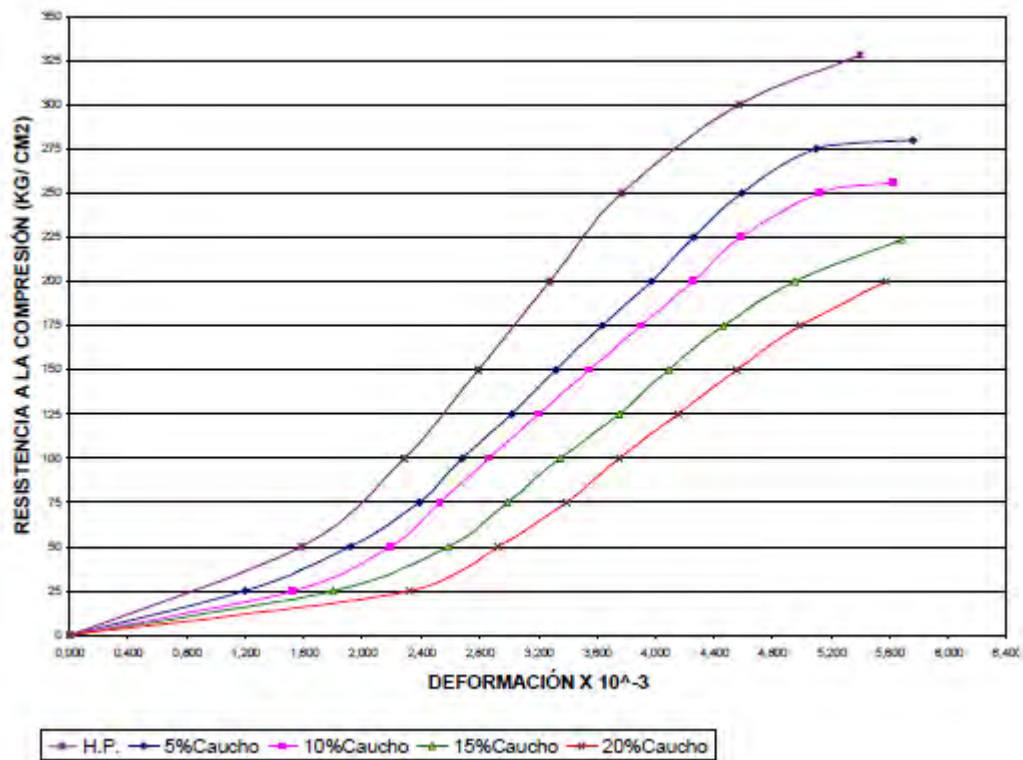


Figura 2.2. Gráfico relación Tensión - Deformación (Urra Carrasco, 2006)

Del análisis de las curvas tensión- deformación se puede observar que el comportamiento del hormigón con caucho frente a cargas de compresión es prácticamente lineal hasta una tensión relativa del orden del 70% de la resistencia máxima. Por encima de este porcentaje las curvas se

apartan de la linealidad. La pendiente de la zona lineal de la curva tensión-deformación es el módulo de elasticidad o módulo de Young.

En los gráficos se observó que cuando el módulo es mayor, la deformación elástica resultante de la aplicación de la carga es menor. Así también se observó que el módulo de elasticidad disminuye con el aumento del contenido de caucho.

En el estudio realizado por Benítez et al. (2013), se determinó la resistencia a compresión en probetas cilíndricas moldeadas, evaluando la disminución respecto de un patrón, con el objeto de encontrar el porcentaje óptimo de reemplazo que cause la menor reducción, de forma tal, que la ecuación costo/beneficio sea conveniente. Las mezclas estudiadas consistieron en reemplazar el agregado en 0%; 5%; 7,5%; 10% y 12,5% por caucho reciclado y dosificar dos mezclas con diferentes relaciones a/c, la mezcla M1 con $a/c = 0,45$ y la M2 con $a/c = 0,55$. Los resultados de resistencia a compresión se ilustran en Figura 2.3.

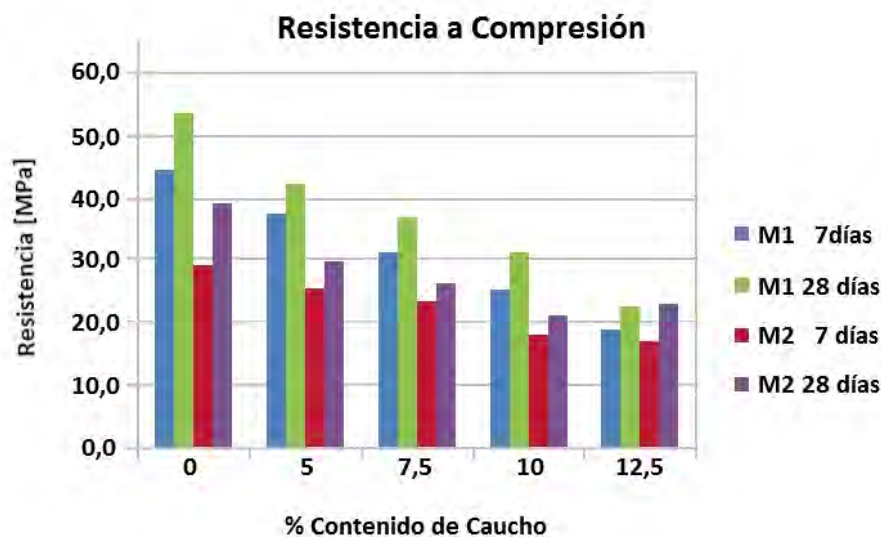


Figura 2.3. Resistencia a la compresión en función del agregado de caucho particulado (Benítez et al., 2013)

Las autoras arribaron a las siguiente conclusiones: el reemplazo de los agregados naturales por partículas de caucho afectó la trabajabilidad, pero el uso de un aditivo superfluidificante contribuyó a la buena colocación, compactación y terminación. La densidad disminuyó con contenidos crecientes de agregados de caucho. La resistencia a la compresión presentó una disminución con el agregado de caucho.

En el estudio realizado por Peñaloza Garzón (2015), se diseñaron mezclas con caucho como reemplazo de agregado en 10% y 30% y se las comparó con una mezcla patrón para verificar si dichas mezclas eran apropiadas para su uso como hormigón estructural. La relación agua/cemento adoptada fue 0,48 y dosificaciones que se analizaron se presentan en las Tabla 2.18.

Tabla 2.18: Dosificaciones de los distintos hormigones (Peñaloza Garzón, 2015)

MATERIALES	Hormigón patrón	Hormigón reemp. del 10% de arena	Hormigón reemp. del 30% de arena
	peso seco [kg/m ³]	peso seco [kg/m ³]	peso seco [kg/m ³]
Cemento	422,92	422,92	422,92
Agua	203,00	203,00	203,00
Agregado Grueso	1169,04	1169,04	1169,04
Agregado Fino	513,01	461,71	359,11
Caucho	0,00	24,54	73,60
Total	2307,97	2281,21	227,67

Los resultados de los ensayos a compresión realizados a los dos tipos de mezclas, que buscaban la sustitución de arena del 10% y el 30% respectivamente, mostraron que la mezcla que sustituyó el 10% de fino, alcanzó la resistencia de diseño de 21MPa a la edad de los 28 días y en comparación con el comportamiento de un hormigón convencional, se determinó una diferencia en la resistencia por debajo del 3%. De la misma manera se ha visto que con el 30% es mucho mayor la reducción de la resistencia a compresión.

Los resultados obtenidos se grafican en la Figura 2.4.

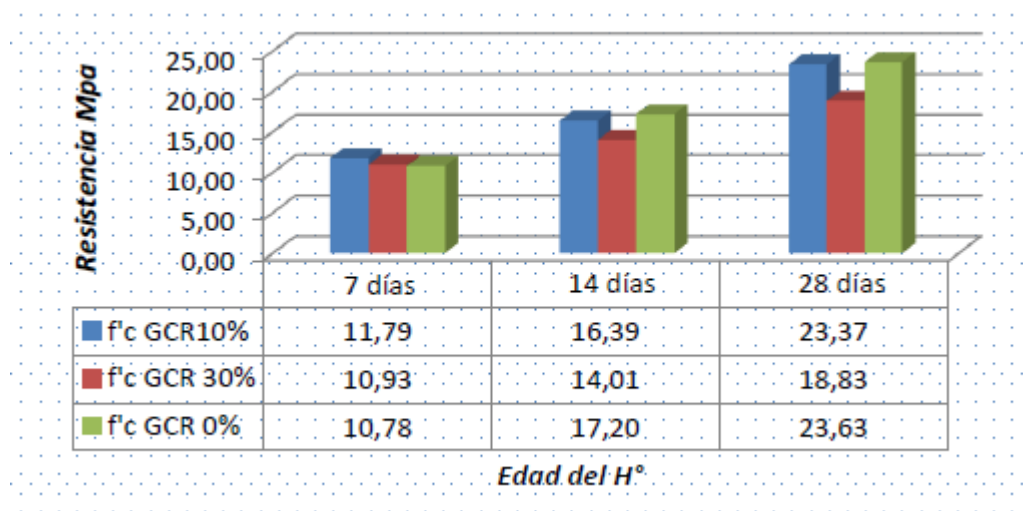


Figura 2.4. Comparación general de f'c de las mezclas (Peñaloza Garzón, 2015)

Como conclusión de este trabajo se obtuvo que la mezcla en la que se sustituyó el 10% de agregado fino por caucho, logró alcanzar la resistencia a compresión de diseño a los 28 días, por lo que el autor estima que esta mezcla sería apta para su uso como hormigón estructural, mientras que, la mezcla en la que se sustituyó el 30% tuvo una resistencia a la compresión por debajo de la requerida a los 28 días lo que no la haría apta para su uso como hormigón estructural.

Estrada Rivera (2016), estudió en su tesis de maestría, las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho. Para ello se sustituyó el 5%, 10% y 15% del volumen de agregado fino por polvo de neumáticos fuera de uso. La relación agua/cemento utilizada fue 0,45 y las dosificaciones que se utilizaron fueron las que se presentan en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19: Dosificaciones de hormigones con NFU fino y grueso (Estrada Rivera J. C., 2016)

Tipo de hormigón	Cemento [kg/m ³]	Filler [kg/m ³]	Áridos convencionales		Tipo de caucho		Agua [kg/m ³]
			Arena [kg/m ³]	Gravilla [kg/m ³]	Fino	Grueso	
HP	330,00	70,00	802,00	1132,00	-	-	132,00
NFU 5% FINO	330,00	70,00	761,90	1132,00	17,90	-	132,00
NFU 10% FINO	330,00	70,00	721,80	1132,00	35,90	-	132,00
NFU 15% FINO	330,00	70,00	681,70	1132,00	53,80	-	132,00
NFU 5% GRUESO	330,00	70,00	761,90	1132,00	-	17,90	132,00
NFU 10% GRUESO	330,00	70,00	721,80	1132,00	-	35,90	132,00
NFU 15% GRUESO	330,00	70,00	681,70	1132,00	-	53,80	132,00

Se ensayaron probetas cúbicas de 10x10x10 cm. El ensayo a compresión se realizó en tres muestras de cada hormigón, observándose una disminución en la resistencia a compresión muy notoria cuando se incorporó polvo de caucho con un tamaño entre 0 a 0,6 mm por sustitución del volumen del agregado fino (arena) con respecto a la resistencia obtenida por el hormigón de referencia.

En la Figura 2.5 se observa la disminución de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de fabricación de las probetas. El hormigón con una incorporación de PNFU (0 a 0,6 mm) de 15%, representa el porcentaje de disminución más notable, con un valor de 83% a los siete días y de 81% a los 28 días.

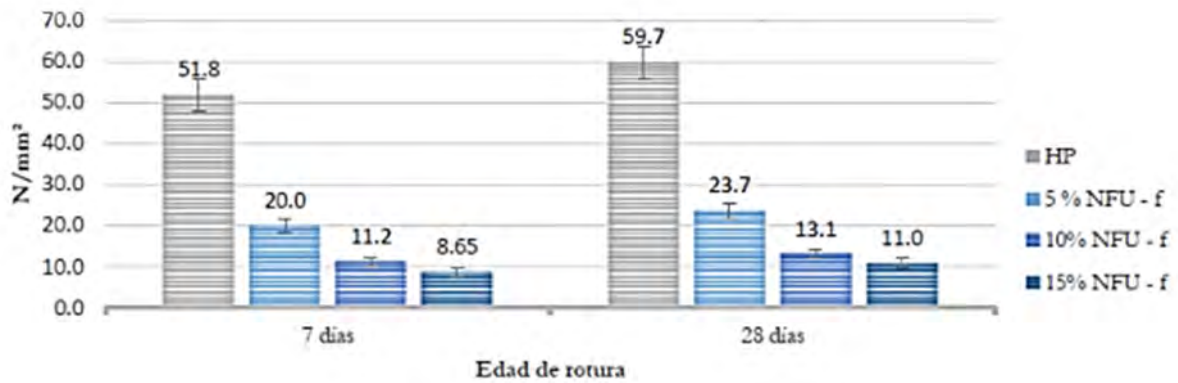


Figura 2.5. Resistencia a compresión con edades de rotura de 7 y 28 días para hormigón de referencia y hormigones con incorporación de PNFU (0 a 0,6mm) (Estrada Rivera J. C., 2016)

El hormigón con un 5% de sustitución de PNFU (0 a 0,6mm) tiene una disminución a los 7 y 28 días de rotura de 61% y 60% respectivamente. Por otro lado, el hormigón con un porcentaje de sustitución del 10% presenta una resistencia a compresión de 11.3 MPa a los 7 días y de 13.1 MPa a los 28 días, lo que representa un porcentaje de disminución en la resistencia a compresión de 78% para ambos casos.

El PNFU más grueso se comporta de una mejor forma, debido a que un menor número de partículas de caucho es incorporado, lo que reduce el espacio de propagación de las fisuras al momento de la aplicación de las cargas. Se muestran los resultados en la Figura 2.6.

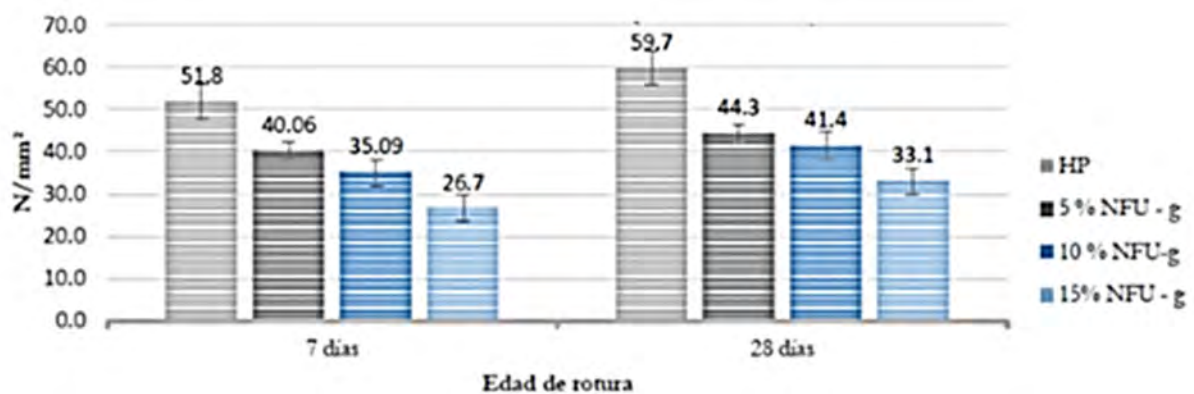


Figura 2.6. Resistencia a compresión con edades de rotura de 7 y 28 días para hormigón de referencia y hormigones con incorporación de caucho grueso (Estrada Rivera J. C., 2016)

Pérez Oyola y Arrieta Ballén (2017), estudiaron, en su tesis de grado, la caracterización de una mezcla de hormigón con caucho reciclado al 5%. La relación agua/cemento adoptada fue 0,5 y dosificaciones que se analizaron se presentan en las Tabla 2.20.

Tabla 2.20: Dosificaciones de los distintos hormigones (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017)

MATERIALES	50% caucho grueso	70% caucho grueso	30% caucho grueso
	50% caucho fino	30% caucho fino	70% caucho fino
	peso seco [gr/m ³]	peso seco [gr/m ³]	peso seco [gr/m ³]
Cemento	647,95	647,95	647,95
Agua	344,94	344,94	344,94
Aire	-	-	-
Agregado Grueso	1809,20	1764,34	1854,07
Agregado Fino	1459,86	1504,73	1415,00
Caucho Grueso	112,16	157,02	67,29
Caucho Fino	112,16	67,29	157,02
Total	4486,27	4486,27	4486,27

Los resultados obtenidos del ensayo a compresión se presentan en la Tabla 2.21:

Tabla 2.21: Resultados de resistencia promedio del ensayo a compresión en [Psi], (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017)

Mezcla	7 días	14 días	21 días	28 días	% Variación respecto a hormigón patrón a 28 días
Patrón	3074	3366	3645	3688	-
C50%/50%	1503	1667	1828	1995	45,92
C70%/30%	1756	1832	1955	1933	47,59
C30%/70%	1368	1850	2262	2244	39,16

Se puede observar que los autores obtuvieron un mejor comportamiento cuando se redujo la cantidad de agregados gruesos frente a los agregados finos. De esta manera se logró aumentar la resistencia a compresión media. Esto fue dado por una mejor interacción con las FCR, lo cual se puede ver representado en la Figura 2.7.

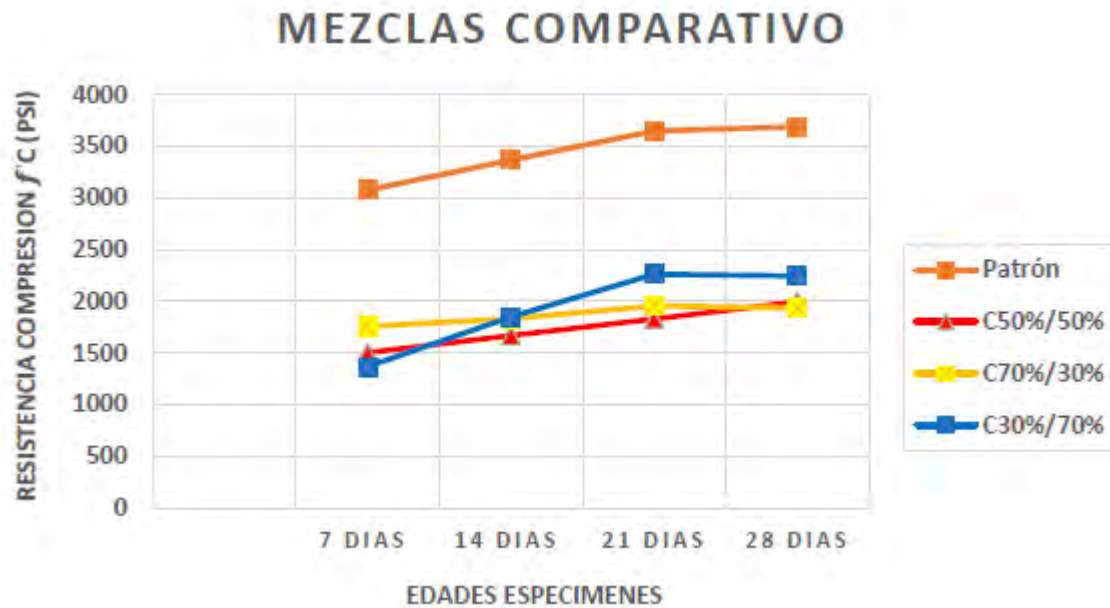


Figura 2.7. Resultados de ensayos de resistencia a compresión comparando valores de muestra patrón y hormigón con caucho (Pérez Oyola y Arrieta Ballén, 2017)

López Kuchudis et al. (2020), evaluaron la incorporación de fibras de caucho para mejorar la durabilidad en hormigones. Para ello, se elaboraron tres hormigones patrones convencionales con diferentes relaciones agua/cemento. Ellos son: C1: $a/c=0,50$; C2: $a/c=0,46$ y C3: $a/c=0,42$. Luego se incorpora 40 kg/m^3 de fibras de caucho al hormigón con relación $a/c=0,50$, C1+0,40: C1 + 40 kg/m^3 de FRN. El cemento utilizado fue cemento portland compuesto CPC 30.

Al analizar las propiedades en estado fresco, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22: Resultados de ensayos en estado fresco (López Kuchudis et al., 2020)

Hormigón	Asentamiento [cm]	Peso Unit. [kg/m^3]	Cont. Aire [%]
C1 (0,50)	8,00	2366,20	2,50
C1+40 FRN (0,50)	1,25	2341,55	3,75
C2 (0,46)	7,75	2341,55	-
C3 (0,42)	6,75	2376,76	-

La inclusión de FRN produce una marcada disminución del asentamiento. Esto se debe a que no se modifica el volumen de pasta del patrón “C1” y al agregarle las fibras de caucho, aumenta la

superficie específica a envolver. Por otra parte, aumenta el contenido de aire y disminuye el peso unitario.

Tras analizar las propiedades en estado endurecido, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23: Resultados de ensayos en estado endurecido (López Kuchudis et al., 2020)

Hormigón	Resist. Compresión [MPa]	Resist. Tracción [MPa]	Penetración Agua a Presión		Velocidad de Succión Capilar [g/m ² /s ^{1/2}]
			Máxima [mm]	Mínima [mm]	
C1 (0,50)	23,36	2,56	52	42,71	12,22
C1+40 FRN (0,50)	23,55	2,41	27	24,27	8,22
C2 (0,46)	27,46	3,08	38	29,48	11,60
C3 (0,42)	36,82	3,68	27	20,92	9,68

Se observa que a medida que disminuye la relación agua/cemento, la resistencia a compresión aumenta. En cuanto a la incorporación de fibras de caucho en 40 kg/m³, se verifica que no produce disminución en la resistencia a compresión.

La resistencia a tracción por compresión diametral aumenta a medida que disminuye la relación agua/cemento. Se observa que la inclusión de FRN produce una reducción del 6% respecto al patrón, valor poco significativo.

En lo que respecta a penetración de agua, se observa que el hormigón “C1” no cumple, en tanto que los hormigones “C2”, “C3” y “C1+40” cumplen satisfactoriamente.

Finalmente, en lo que respecta a la velocidad de succión capilar, evidentemente la participación de las FRN en la matriz del hormigón “C1+40”, en comparación con su homólogo (C1), cumple la función de bloquear los capilares que este posee en estado endurecido y en consecuencia reduce la succión capilar.

Fernández Torrez et al. (2022), evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con residuos de caucho (RCN) como sustituto parcial de la arena. Para ello, se sustituyó la arena por caucho en los porcentajes del 5%, 10% y 20%, evaluando sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción y flexión) y físicas (masa específica, absorción de agua e índice de vacíos).

La dosificación utilizada es la que se muestra en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24: Dosificación de los hormigones (Fernández Torrez et al., 2022)

Hormigón	Agua [kg/m ³]	Cemento [kg/m ³]	Ag. grueso [kg/m ³]	Ag. fino [kg/m ³]	Caucho [kg/m ³]
Patrón	143,64	272,29	1156,91	868,23	0,00
Caucho 5%	143,64	272,29	1156,91	824,82	17,24
Caucho 10%	143,64	272,29	1156,91	781,41	34,48
Caucho 20%	143,64	272,29	1156,91	694,58	67,35

En las Figuras 2.8, 2.9 y 2.10 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de compresión, tracción y flexión respectivamente.

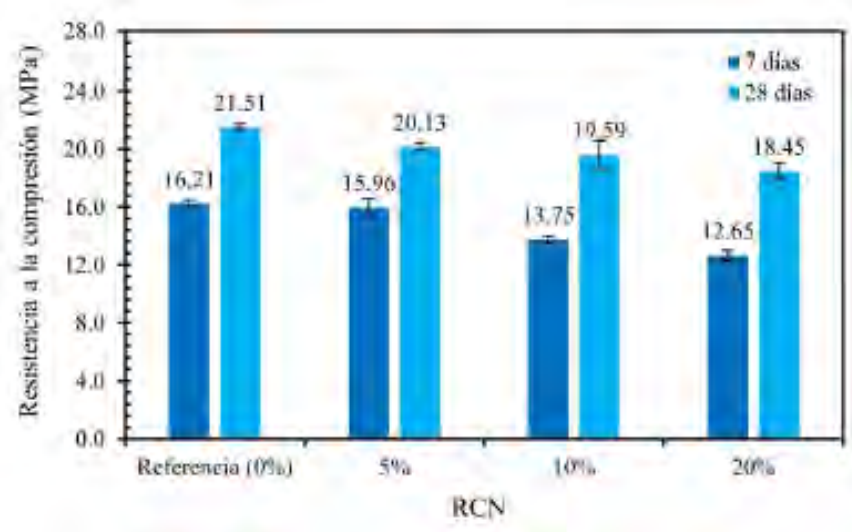


Figura 2.8. Resultados de ensayos de resistencia a compresión de hormigones con caucho (Fernández Torrez et al., 2022)

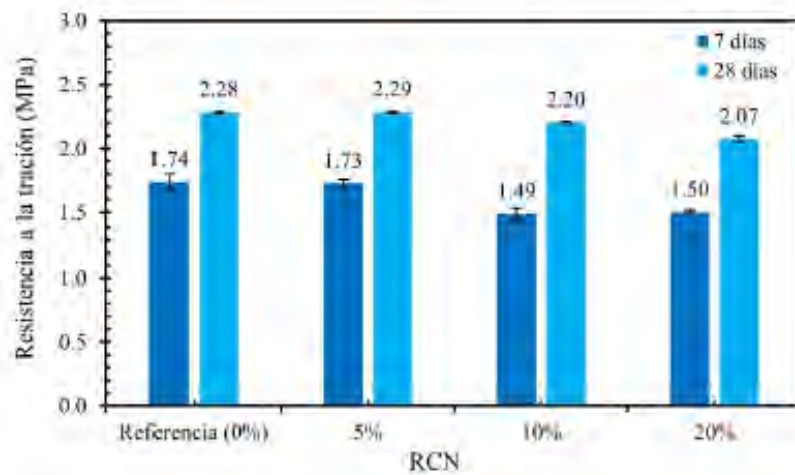


Figura 2.9. Resultados de ensayos de resistencia a tracción de hormigones con caucho (Fernández Torrez et al., 2022)

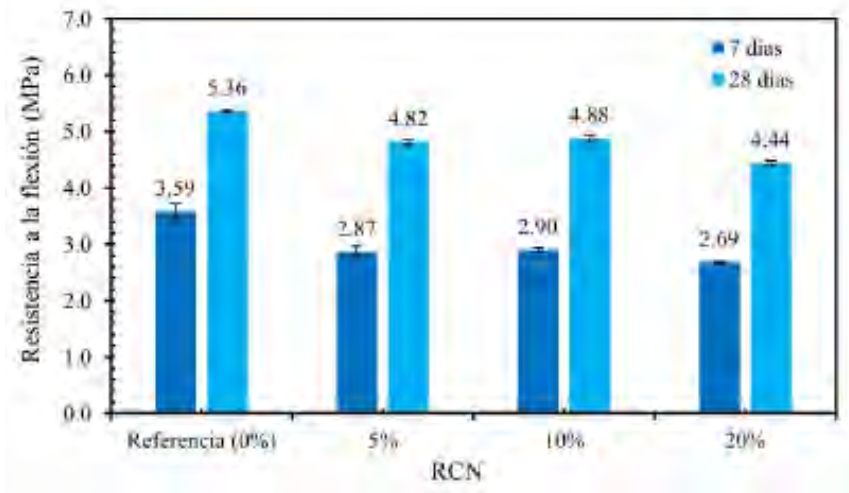


Figura 2.10. Resultados de ensayos de resistencia a flexión de hormigones con caucho (Fernández Torre et al., 2022)

En tanto que, en las Figuras 2.11, 2.12 y 2.13 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de absorción, densidad e índice de vacíos respectivamente.

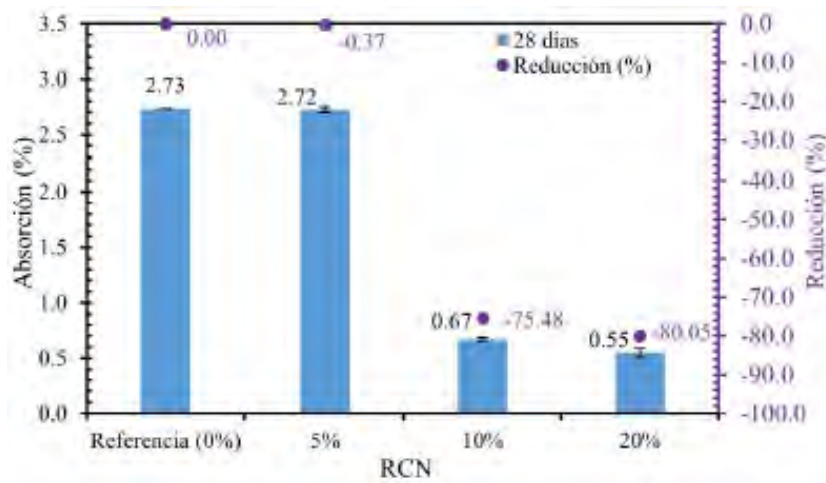


Figura 2.11. Absorción de las mezclas con caucho a los 28 días (Fernández Torre et al., 2022)

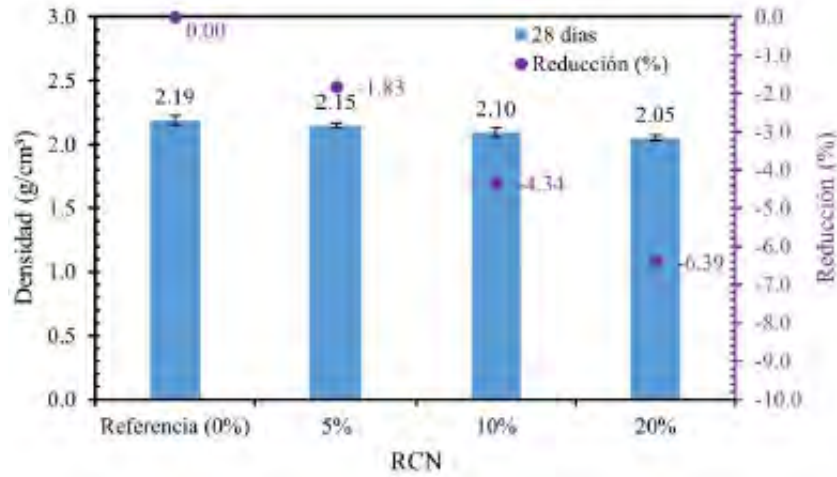


Figura 2.12. Densidad de las mezclas con caucho a los 28 días (Fernández Torre et al., 2022)

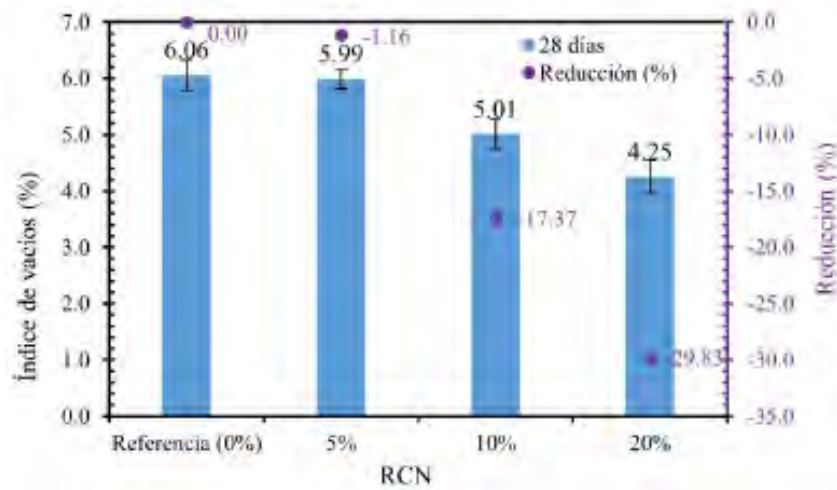


Figura 2.13. Índice de vacíos de las mezclas con caucho a los 28 días (Fernández Torre et al., 2022)

A partir de los resultados, se pudo concluir que el remplazo de arena por caucho tiene un impacto negativo sobre la trabajabilidad y propiedades mecánicas. La pérdida de trabajabilidad es más significativa a mayores porcentajes de caucho. Las propiedades mecánicas (compresión, tracción y flexión) también disminuyen con el aumento de caucho, no obstante, la mezcla con 5% de caucho, no muestra diferencias significativas con la mezcla de referencia. En tanto que, la absorción, densidad e índice de vacíos presentaron una mejora debido al caucho.

Por lo tanto, el hormigón con bajo contenido de caucho (hasta 5%) constituye una alternativa técnicamente viable en la industria de la construcción, toda vez que presenta el mismo rendimiento físico-mecánico que un hormigón convencional.

Capítulo III

MATERIALES Y METODOLOGIA**3.1. Materiales**

En este apartado se dará una descripción general de los materiales necesarios para conformar una mezcla de hormigón y en particular de los materiales utilizados en esta investigación.

En la Figura 3.1 se muestran los materiales componentes de un hormigón tipo.

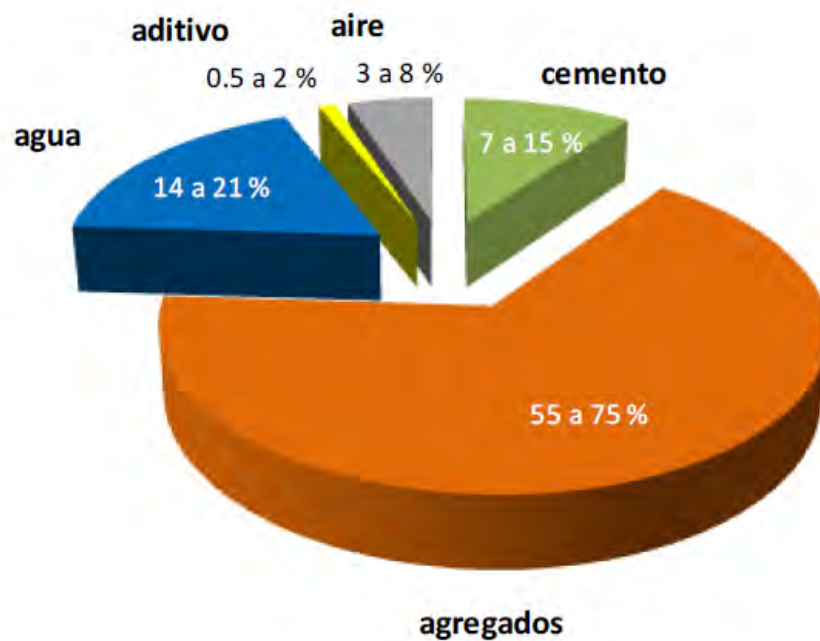


Figura 3.1. Materiales componentes de un hormigón tipo

3.1.1. Agua

El agua es uno de los componentes principales que intervienen en la elaboración del hormigón, el cual se incorpora intencionalmente, pero a su vez se suma a la eventual humedad de los agregados. Sus funciones son: reaccionar con el cemento produciendo así su hidratación, actuar como un lubricante contribuyendo a la fluidez de la mezcla fresca, y asegurar el espacio necesario en la pasta para el desarrollo de los productos de hidratación.

3.1.1.1. Requisitos químicos, físicos y mecánicos mínimos del agua de mezclado y curado

En la construcción, el agua se utiliza para casi todo, como mezclas, limpieza, instalaciones, etc. Por lo mismo, es muy importante garantizar las condiciones mínimas de calidad, exigidas en la IRAM 1601 (2012). Los requisitos físicos se pueden ver en la citada norma, en tanto que los requisitos químicos se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Requisitos químicos del agua de mezclado y curado (IRAM 1601, 2012)

Requisitos		Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Residuo sólido	Agua recuperada de procesos de la industria del hormigón	mg/L	–	50 000	Apartado 10.1
	Agua de otros orígenes	mg/L	–	5 000	
Materia orgánica, expresada en oxígeno consumido ¹⁾		mg/L	–	3	Apartado 10.2
pH	Para su uso como agua de amasado	–	4,0	–	Apartado 10.3
	Para su uso como agua de curado	–	6,0	–	
Sulfato, expresado como SO ₄ ²⁻		mg/L	–	2 000	Apartado 10.4
Cloruro expresado como Cl	Para emplear en hormigón simple	mg/L	–	4 500	Apartado 10.5
	Para emplear en hormigón armado	mg/L	–	1 000	
	Para emplear en hormigón pretensado	mg/L	–	500	
Hierro, expresado como Fe ³⁺	Para su uso como agua de curado ³⁾	mg/L	–	0,5	Apartado 10.6.1
	Para su uso como agua de amasado		–	–	Apartado 10.6.3
Álcalis, (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O) ²⁾		mg/L	–	1 500	Apartado 10.7
¹⁾ Si se excede este valor, el agua puede ser utilizada si cumple con los requisitos establecidos en 5.1. ²⁾ Esta determinación es aplicable sólo si se espera utilizar agregados potencialmente reactivos. ³⁾ Se debe cumplir sólo cuando es importante el aspecto estético.					

Cabe destacar que para la fabricación y curado de los hormigones se utilizó agua de la red de abastecimiento general (agua potable) de la ciudad de Mendoza.

3.1.2. Cemento

El cemento, según la norma IRAM 50000 (2000), es un material inorgánico finamente dividido 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. El cemento más común es el cemento Portland, el cual es un material grisáceo finamente pulverizado conformado principalmente por silicatos de calcio y aluminio.

El cemento que se utilizó es cemento portland puzolánico CPP40 de la marca comercial Holcim, perteneciente a su planta ubicada en Campana, Buenos Aires, que cumple con la mencionada norma.

3.1.2.1. Cuidados y condiciones mínimas del cemento utilizado

Los cuidados para el almacenamiento del cemento se relacionan principalmente con la humedad, debido a que el cemento reacciona con el agua, la humedad contenida en un ambiente puede dañar el hormigón y crear grumos, lo cual es un fenómeno que indica que el cemento fue afectado por la humedad. El reglamento CIRSOC 201 (2005) establece los tiempos de almacenamiento de acuerdo al empaque, y que ensayos hay que realizar para asegurarse que el cemento está en buenas condiciones.

3.1.3. Agregados

Como se presenta al inicio de este capítulo, en los hormigones normales, los agregados representan aproximadamente entre el 55% y 75% del volumen de la masa endurecida. Cabe destacar que mientras más densamente pueda distribuirse el agregado mayor será la resistencia a compresión del hormigón. Es por este motivo que la gradación de los agregados resulta ser de vital importancia. También es importante que el agregado posea una buena resistencia, durabilidad y resistencia a la intemperie.

Para esta investigación se verificó que los agregados a utilizar estuvieran libres de impurezas como arcillas, limos o materia orgánica, las cuales pueden debilitar la unión entre la pasta de cemento; y prevenir que se produzca una reacción química desfavorable entre el agregado y el cemento.

Los materiales pétreos utilizados corresponden a agregados rodados extraídos de canteras del Río Mendoza en Luján de Cuyo, Mendoza y fueron provistos por un proveedor local.

3.1.3.1. Agregado fino

La arena utilizada proviene de las canteras ubicadas en Anchoris, Mendoza. Tiene una densidad de 2,61 [gr/cm³], una absorción del 0,2%, un módulo de finura de 2,4 y en el tamizado por vía húmeda (Pasa tamiz N°200, según IRAM 1540, 2004) tiene un retenido de 3,2%, cumpliendo con el límite

fijado por la norma IRAM 1512 (2013). La arena presenta el aspecto que se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Muestra de arena

En la Figura 3.3 se muestra la curva granulométrica del agregado fino.

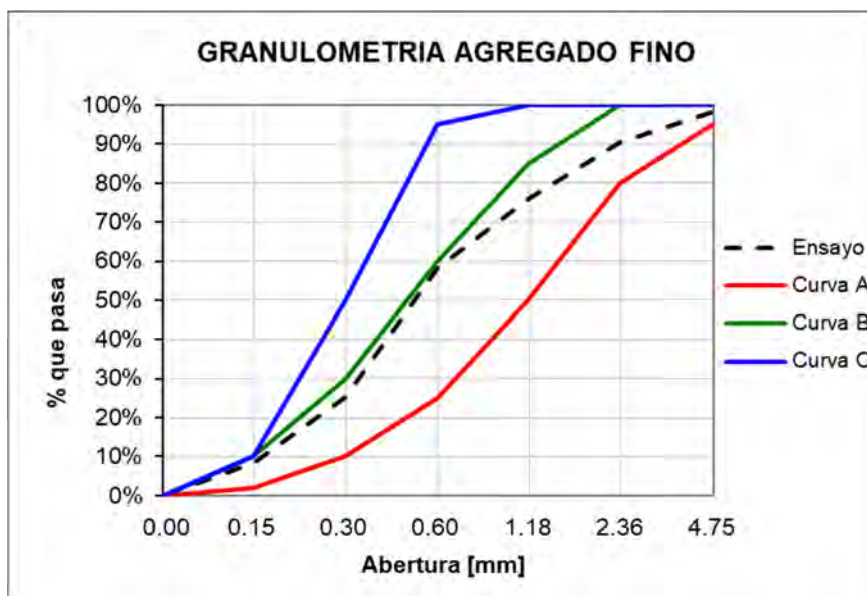


Figura 3.3. Curva granulométrica del agregado fino

3.1.3.2. Agregado grueso

El ripio utilizado tiene una densidad seca de 2,71 [gr/cm³], una absorción del 0,7%, un módulo de finura de 6,7 y presenta el aspecto que se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4. Muestra de ripio

En la figura 3.5 se muestra la curva granulométrica del agregado grueso.

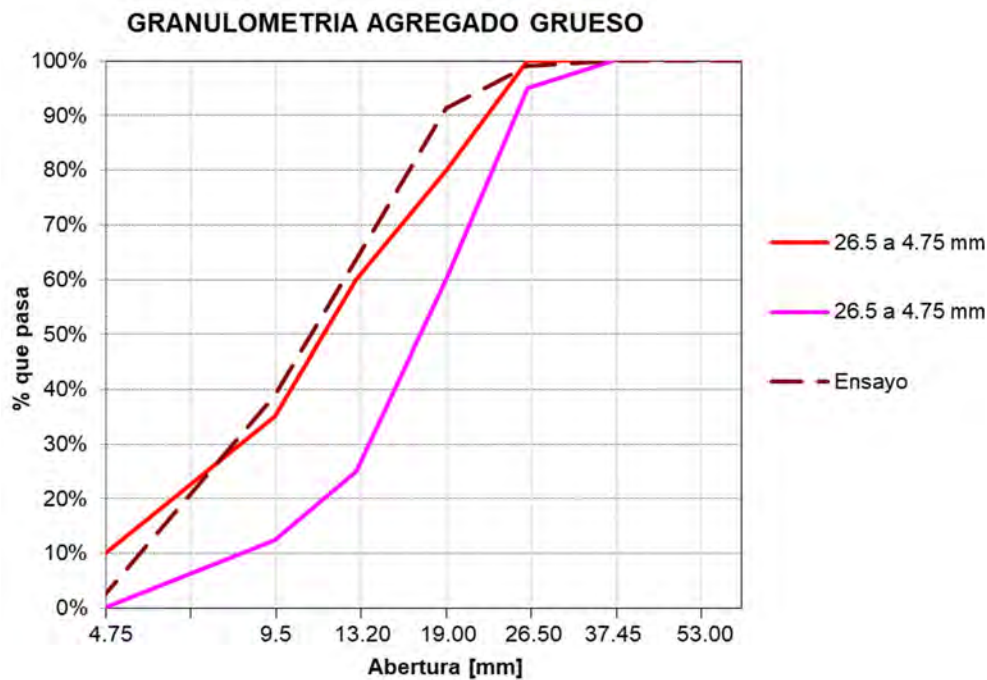


Figura 3.5. Curva granulométrica del agregado grueso

3.1.4. Caucho reciclado

El caucho reciclado fue adquirido mediante un productor y proveedor local (ECO-CUYUM S.A.). Este abastece normalmente a la industria textil y la deportiva, en el ámbito de canchas de fútbol, además de complemento en mezclas asfálticas.

En esta investigación se utilizaron dos tipos de caucho reciclado, uno proveniente de tratamiento de trituración secundaria y otro de trituración terciaria.

3.1.4.1. Polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU)

Este producto proviene de un método de trituración terciaria. Tiene un tamaño entre 0,1 a 0,5 mm, densidad entre 0,4 y 0,5 gr/cm³ y su aspecto se puede ver en la figura 3.6.



Figura 3.6. Muestra de PNFU

3.1.4.2. Fibras de caucho reciclado (FCR)

Este producto proviene de un método de trituración secundaria. Tiene un tamaño entre 5 a 8 mm y su aspecto se puede ver en la figura 3.7.



Figura 3.7. Muestra de FCR

3.1.4.2.1. Ensayo de absorción de las fibras de caucho reciclado (FCR)

Se realizó el ensayo para determinar la absorción de las fibras de caucho reciclado con el objeto de poder evaluar si dicha absorción podía interferir en la trabajabilidad del hormigón al modificar la cantidad de agua de amasado.

Para el ensayo, se tomó una muestra de caucho de 2 kg en estado natural y luego se lo saturó en agua durante 24 hs, como se puede apreciar en la figura 3.8.



Figura 3.8. Ensayo de absorción de FCR

Transcurridas las 24 hs se lo dejó escurrir lo más posible y se registró un peso de 2,315 kg, determinando así, una absorción para el caucho del 15,75%.

Esta absorción del caucho, produce una reducción de la relación agua/cemento (a/c) a medida que se incrementa el contenido de FCR. Así, por ejemplo, para la adición del 1% de FCR la relación $a/c= 0,49$, para adición del 5% de FCR la relación $a/c= 0,48$ y para adición del 10% de FCR la relación $a/c= 0,45$. Se puede inferir que este valor de absorción para las FCR, no afectaría la trabajabilidad del hormigón de estudio en porcentajes de adición hasta el 5%. Superando este porcentaje de adición, el hormigón comienza a perder trabajabilidad, lo cual se ve más adelante en el ensayo de consistencia.

3.1.5. Aditivo

Con el objeto de mejorar la fluidez del hormigón, se añadió un aditivo fluidificante. Previo a dicha consideración se llevaron a cabo ensayos en Cono de Kantro a efectos de evaluar el desempeño del tipo de aditivo y la dosis a utilizar.

En este sentido, se evaluaron dos tipos de aditivos y tres dosis de cada uno de estos, determinado que el aditivo de mejor desempeño resultó ser Sikament 90 E en una dosis del 0,6%, la cual se encontraba dentro del rango recomendado por el fabricante.

3.2. Diseño y dosificación de la mezcla

3.2.1 Diseño de la mezcla

El propósito del diseño de la mezcla es lograr un hormigón que reúna las propiedades requeridas o especificadas que garanticen su adecuada colocación y su posterior uso. Dichas propiedades hacen referencia a la resistencia, durabilidad y fluidez, entre otras.

En el diseño por resistencia del hormigón, se estableció como condicionante, lograr un hormigón de clase resistente H20, cumplimentando así el límite inferior en términos resistentes exigidos por la reglamentación sismorresistente actualmente vigente en nuestro país.

En lo que respecta al diseño por durabilidad, se consideró como escenario probable que la rehabilitación estructural implicaría elementos ubicados en el interior de un edificio. Ante esta hipótesis planteada, la clase de exposición a la que estaría sujeto el hormigón, correspondería a la clase A1, donde los requisitos de durabilidad de acuerdo al reglamento actualmente vigente, refieren a una clase resistente hormigón H20, a una relación agua/cemento máxima de 0,6 y a un contenido mínimo de cemento de 280 kg/m³.

Por otra parte, y en lo que a la manejabilidad del hormigón se refiere, se consideró como consistencia apropiada para el hormigón, la de muy plástica, correspondiente a un rango de asentamiento entre 10 y 15 cm.

En este caso particular de estudio y teniendo presente que se utilizarían para el moldeo de probetas, las de tamaño 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, se adoptó un agregado grueso de tamaño máximo nominal de 26,5 mm.

3.2.2 Dosificación de la mezcla

Habiendo diseñado la mezcla, se procedió a la dosificación de la misma. Para ello se siguieron los lineamientos de la Norma ACI 211-1 (2009). A continuación, se presentan los pasos a seguir:

- Selección de asentamiento
- Elección de tamaño máximo del agregado
- Estimación del contenido de agua y aire
- Determinación de la resistencia de diseño
- Estimación de la relación agua cemento
- Cálculo del contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso
- Estimación del contenido de agregado fino
- Corrección por humedad
- Determinación del peso unitario del hormigón

3.2.2.1. Selección del asentamiento

Para el diseño de la mezcla, se adopta un asentamiento entre 75 y 100 mm \pm 20mm. Esta tolerancia se obtiene de la tabla 5.2 del CIRSOC 201 (2005) para una mezcla de consistencia plástica.

3.2.2.2. Elección del tamaño máximo del agregado

En la distribución granulométrica, se puede observar que el tamaño máximo del agregado grueso es 26,5 mm (1”).

3.2.2.3. Estimación del contenido de agua y aire

Por medio de la tabla 3.2, se puede determinar el contenido de agua y aire.

Tabla 3.2. Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y del tamaño máximo del agregado (ACI 211-1, 2009)

Asentamiento (cm)	Consumo de agua (kg/m ³) para los tamaños máximos (mm) indicados ⁽¹⁾								
	9,5	12,5	19	25	37,5	50 ⁽²⁾	75 ⁽²⁾	150 ⁽²⁾	
Hormigón con aire naturalmente incorporado									
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113	
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124	
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-	
Contenido aproximado de aire incorporado (%)	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2	
Hormigón con aire intencionalmente incorporado									
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107	
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119	
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-	
Contenido total recomendado de aire incorporado para diferentes niveles de exposición (%)	Exposición leve	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
	Exposición moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
	Exposición extrema	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

De tabla 3.3 se obtiene el contenido de agua estimado de 193 kg/m³ y 1,5% de aire atrapado naturalmente.

3.2.2.4. Determinación de la resistencia de diseño

Conociendo la resistencia característica deseada f_c , pero desconociendo la desviación estándar, la resistencia de diseño se determina con la ayuda de la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resistencia de diseño de la mezcla cuando no se conoce la desviación estándar para hormigones sin armar y armados (ACI 211-1, 2009)

Resistencia especificada (f_c) [MPa]	Resistencia de diseño de la mezcla (f_{cr}) [MPa]
Igual o menor que 20	$f_c + 7,0$
Mayor que 20 y menor que 35	$f_c + 8,5$
Mayor que 35	$f_c + 10$

En este caso, por tratarse de una $f_c = 20$ MPa, se tiene que la resistencia de diseño $f_{cr} = 20 + 7$ MPa, es decir, $f_{cr} = 27$ MPa.

3.2.2.5. Estimación de la relación agua/cemento (a/c)

Para la estimación de la relación a/c, hay que basarse en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Estimación de la relación a/c a partir de la resistencia de diseño f_{cr} y del porcentaje de aire incorporado a la mezcla (ACI 211-1, 2009)

Resistencia de diseño f_{cr} [MPa]	Relación a/c	
	SIN aire	CON aire
40	0,42	-
35	0,54	0,39
30	0,57	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Interpolando entre $f_{cr}= 25$ MPa y $f_{cr}= 30$ MPa para un hormigón sin aire intencionalmente incorporado, se obtiene una relación a/c= 0,59.

3.2.2.6. Cálculo del contenido de cemento

Sabiendo que la relación a/c= 0,59 y que el contenido de agua estimado es de 193 kg/m^3 , resulta ser el contenido de cemento de 327 kg/m^3 .

3.2.2.7. Estimación del contenido de agregado grueso

La estimación del volumen de agregado grueso seco y compactado, se puede obtener de la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Estimación del volumen de agregado grueso seco y compactado en función del módulo de finura del agregado fino y del tamaño máximo nominal del agregado grueso (ACI 211-1, 2009)

Tamaño Máximo Nominal [mm]	Volumen del Agregado Grueso Seco y Compactado			
	Módulo de Finura del Agregado Fino			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Para un módulo de finura del agregado fino de 2,4 y un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 26,5 mm, resulta ser el volumen del agregado grueso seco y compactado de 0,71 m³/m³H°.

El peso del agregado grueso seco y compactado, conociendo el peso unitario para la misma condición, resulta ser de 1136 kg/m³H°.

3.2.2.8. Estimación del volumen sólido del agregado fino

Se determina a partir de la siguiente expresión:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de H}^\circ = V_C + V_A + V_{\text{aire}} + V_{AG} + V_{AF}$$

Sabiendo que:

$$V_C = 0,104 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{H}^\circ$$

$$V_A = 0,193 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{H}^\circ$$

$$V_{\text{aire}} = 0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{H}^\circ$$

$$V_{AG} = 0,423 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{H}^\circ$$

El volumen sólido del agregado fino resulta ser $V_{AF} = 0,265 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{H}^\circ$.

El peso sólido del agregado fino, conociendo el volumen sólido del mismo y el peso unitario para la misma condición, resulta ser de 700 kg/m³H°.

3.2.2.9. Determinación del peso unitario del hormigón

Luego de calcular el peso de cada componente, el peso unitario del hormigón diseñado se puede ver en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Peso unitario del hormigón diseñado

Componente	Peso por m ³ de H° [kg/m ³ H°]
Agua	193
Cemento	327
Agregado Grueso	1136
Agregado Fino	700
TOTAL	2356

3.3. Metodología

Para la presente investigación, se plantearon dos series de dosificaciones de hormigones, la primera con adición de PNFU (polvo de neumáticos fuera de uso) y la otra con adición de FCR (fibras de caucho reciclado). En cada serie se fueron incrementando los porcentajes de PNFU y FCR respectivamente. Dichos porcentajes se adoptaron de acuerdo a lo observado en las experiencias prácticas de las investigaciones antes mencionadas.

Otro factor de importancia es que las incorporaciones de PNFU y FCR, en sus distintos porcentajes, se incorporan en adición a la mezcla, es decir, como adición a los materiales necesarios para el hormigón patrón denominado P1 y no como sustitución de alguno de los materiales, como si lo hicieron diversos autores.

En la tabla 3.7 se presentan las distintas dosificaciones de PNFU y FCR y designaciones de los hormigones.

Tabla 3.7. Designación de los hormigones

Porcentajes de adición	Designación de hormigones con adición de PNFU	Designación de hormigones con adición de FCR
0,0 %	P1	P1
1,0 %	PP2	PF2
2,0 %	PP3	PF3
3,5 %	PP4	PF4
5,0 %	PP5	PF5
6,0 %	PP6	PF6
7,0 %	PP7	PF7
8,0 %	PP8	PF8
9,0 %	PP9	PF9
10,0 %	PP10	PF10

Para esta investigación se dosificó un hormigón H20, con una resistencia característica a la compresión, medida a los 28 días, de $f_c = 20$ MPa. Se adicionó, a los materiales del hormigón, un proporcional de caucho del 1% al 10% en función del peso de cemento más arena. Sustentado en el trabajo que se venía desarrollando por el grupo de investigación que forma parte del Proyecto PID UTN 7677TC que se desarrolló en el ámbito de la UTN – Facultad Regional Mendoza, se optó por continuar con dicha metodología de incorporación del caucho, en virtud de haber observado un buen desempeño de las muestras obtenidas llevando a cabo esta metodología de adición.

Habiendo llevado a cabo la dosificación de los materiales, pero previendo que la adición de caucho podría dar lugar a hormigones con capacidades resistentes significativamente menores que la del

hormigón de referencia (dosificado en el punto 3.2.2), con lo cual se estaría por debajo del límite inferior admitido por el reglamento sismorresistente, se consideró adoptar una relación agua/cemento menor a la obtenida en el proceso de dosificación. En ese sentido se adoptó la relación agua/cemento de 0,5, ajustando el resto de los materiales constituyentes a dicho valor adoptado.

La incorporación de caucho se analizó como adición de agregado fino en la mezcla y la inferencia frente a la presencia del agregado grueso. Esto deriva de lo planteado por Peñalosa Garzón (2015), en donde se presenta un mejor comportamiento de la mezcla cuando se incorporan granos de caucho triturado de pequeñas dimensiones.

La tabla 3.8 muestra la dosificación de materiales utilizada para cada hormigón en función de la adición de caucho considerada. Como se dijo anteriormente, dicha adición resultó en función del peso de arena más cemento. Pero, por otra parte, en la última fila de la tabla, se presenta ahora el porcentaje de caucho adicionado en función de las masas de los restantes materiales constituyentes.

Tabla 3.8. Dosificación de materiales por hormigón

Designación de hormigones		Porcentaje de PNFU o FCR incorporado al hormigón									
		P1	PP2 PF2	PP3 PF3	PP4 PF4	PP5 PF6	PP6 PF6	PP7 PF7	PP8 PF8	PP9 PF8	PP10 PF10
Componentes		0,0 %	1,0 %	2,0 %	3,5 %	5,0 %	6,0 %	7,0 %	8,0 %	9,0 %	10,0 %
Ag. Grueso	[kg/m ³]	1064	1038	1012	977	943	922	902	883	864	846
Ag. Fino	[kg/m ³]	828	807	788	760	734	717	702	687	672	658
Cemento	[kg/m ³]	330	322	314	303	293	286	280	274	268	263
Agua	[lts/m ³]	165	161	157	152	146	143	140	137	134	131
Relación a/c		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Aditivo	[lts/m ³]	6,5	6,3	6,1	5,9	5,7	5,6	5,5	5,3	5,2	5,1
Caucho	[kg/m ³]	0,0	11,3	22,0	37,2	51,3	60,1	68,6	76,8	84,7	92,2
[%] de caucho respecto al hormigón		0,00	0,48	0,97	1,69	2,42	2,90	3,38	3,87	4,36	4,84

La metodología aplicada para la elaboración de los distintos hormigones se mantuvo constante en todo el estudio. Se contó con el uso de una máquina hormigonera con capacidad de 120 lts. para la producción de los hormigones. En un comienzo, con todo el equipamiento en condiciones para su uso, se incorporaba el agregado grueso y una fracción del agua total de la mezcla, posteriormente se incorporaba el cemento. El proceso continuaba con la incorporación del agregado fino, el caucho y el agua restante, la cual debía poseer el aditivo. Tras el adecuado tiempo de mezclado, el proceso

terminaba y se retiraba el hormigón de la máquina hormigonera para la elaboración de las probetas. Para el caso del hormigón de referencia, el volumen elaborado resultó ser de aproximadamente 40 lts, volumen que se levemente incrementó en los siguientes hormigones toda vez que se adicionó el caucho.

Se confeccionaron probetas de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura, las cuales tuvieron un curado de 28 días, según IRAM 1534 (2018). Por cada hormigón, se elaboraron un total de 10 probetas, 5 para los ensayos de compresión axial, 4 probetas para ensayos de tracción por compresión diametral y 1 para el ensayo de capacidad y velocidad de succión capilar y ensayo de ultrasonido. Las mismas se muestran en la figura 3.9.



Figura 3.9. Moldeado de probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm

Para el ensayo de tracción por flexión y permeabilidad al aire, se realizaron, en moldes prismáticos de 150 mm x 150 mm x 500 mm, 2 probetas por cada hormigón.

Capítulo IV

ENSAYOS

4.1. Mediciones

Previo a la ejecución de cada ensayo, se relevaron las medidas de las probetas (altura, ancho y diámetro). Estas medidas fueron realizadas por un mismo operario para reducir la interferencia de errores, situación que se recomienda en distintos manuales y reglamentos técnicos. Para cada medida, se tomaron varias lecturas que luego se promediaron para obtener el valor definitivo.

Para dicha tarea, se utilizó un Calibre Stronger, con rango de lectura de 0-200 mm.

Las mediciones presentaron variaciones en ± 2 mm en la altura de las probetas y ± 1 mm en los diámetros y secciones medias de las mismas.

4.2. Densidad del hormigón

La densidad teórica de los hormigones fue determinada a partir de la suma de los materiales constituyentes de cada uno de ellos. Las cantidades de estos materiales constituyentes están indicadas en la Tabla 3.8.

4.3. Evaluación de la consistencia del hormigón

En simultáneo a la elaboración de los distintos hormigones, y antes de moldear las probetas, se realizaron ensayos de asentamiento en tronco cono de Abrams a efectos de evaluar la consistencia de los hormigones. Este ensayo se realiza según la Norma IRAM 1536 (1978) y también es conocido como Ensayo del Cono de Abrams.

Dicho ensayo consiste en someter a un vibrado manual a la mezcla de hormigón, dentro de un molde metálico, cuyas medidas son 20 cm de diámetro inferior, 10 cm de diámetro superior y 30 cm de altura. Para el desarrollo del ensayo, se ubica el molde metálico sobre una base plana y libre de interferencias extrañas. Tanto el molde como la base deben ser humectados previamente, pero no deben poseer exceso de agua sobre las superficies de los mismos.

Como se ejemplifica en la Figura 4.1, el llenado del molde se realiza en 3 capas, aportando en forma aproximada 1/3 del volumen en hormigón en cada capa. Tras la colocación de una capa de mezcla en análisis, se procede a una compactación manual de 25 golpes concéntricos, realizados por un operario, con una varilla de diámetro 16 mm y una longitud de 600 mm y características estipuladas

por la norma. Dicho proceso se realiza en las sucesivas capas, pero con la salvedad que la varilla, durante el proceso de compactación de una capa superior, debe penetrar aproximadamente 25 mm en la capa inferior, para que no se produzca una junta entre capas.

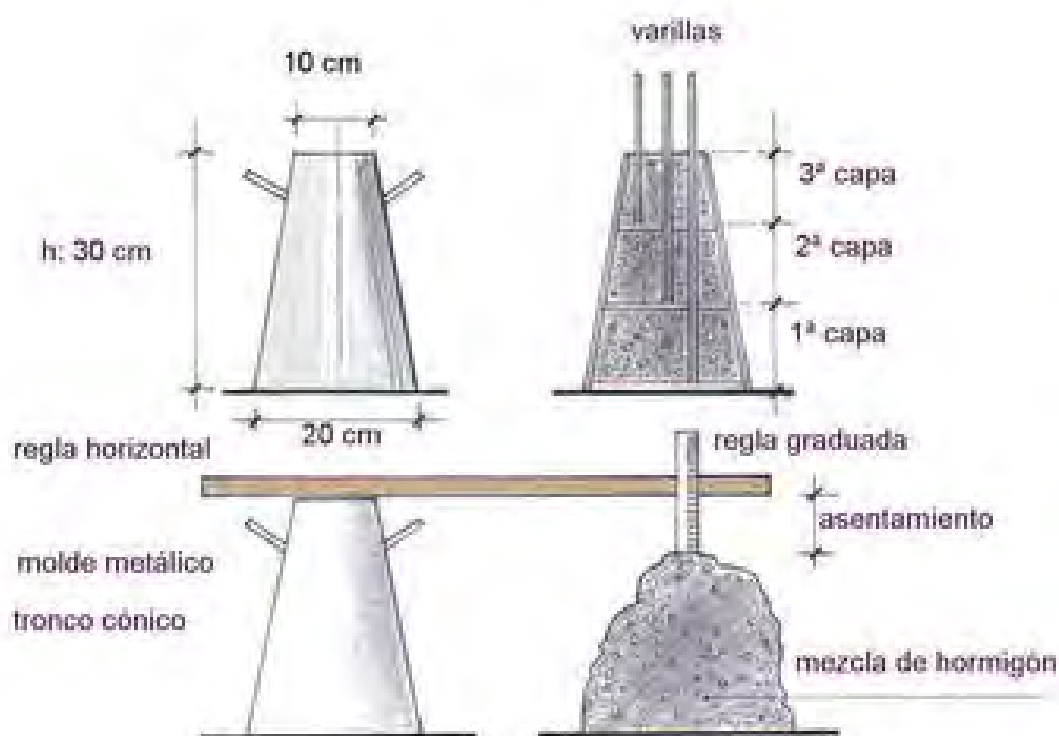


Figura 4.1. Ensayo del cono de Abrams (Méndez y Panella, 2020)

Se realiza el llenado de la tercera capa, pero teniendo en cuenta lo siguiente, antes de comenzar la compactación de la última capa, se coloca suficiente cantidad de hormigón para que exceda el borde del molde. Si durante la compactación, la superficie del hormigón está por debajo del borde del molde, se añade un exceso de hormigón sobre la superficie del molde. Después que la última capa ha sido compactada, se enrasa de manera que el molde quede totalmente lleno.

Luego se retira de inmediato el molde, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical, con un movimiento constante hacia arriba, en un tiempo entre 5 y 10 seg. Este movimiento no debe ser lateral ni torsional.

Inmediatamente se mide el asentamiento, en centímetros, por diferencia entre la altura del molde y el centro de la mezcla desmoldada.

Esta medida del asentamiento es una forma cuantitativa de caracterizar el tipo de comportamiento que poseerá la mezcla en estado fresco. En ese sentido, al momento de llevar a cabo los ensayos, se

tendrá en cuenta la consideración de que dicho ensayo solo es válido para consistencias comprendidas entre seca y fluida.

El comportamiento del hormigón en estado fresco, es de gran importancia, debido a que en ese período debe ser transportado, colocado, compactado y terminado adecuadamente.

4.4. Determinación de la resistencia a compresión axial

Para determinar la resistencia a compresión axial de los distintos hormigones, se realizó el ensayo según lo especificado en la Norma IRAM 1546 (2013) con una prensa para compresión de 200 tn, marca Losenhausen, dispuesta en el Laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza. El mencionado equipamiento posee un sistema hidráulico de regulación de aplicación de cargas, tal que, estas puedan aumentarse en forma continua y sin saltos bruscos, entre los límites de velocidad indicados en la mencionada norma.

La edad de ensayo de las probetas se estableció en 28 días. Las probetas permanecieron ese tiempo en curado y se retiraron 1 hora antes de ser ensayadas.

Posteriormente las probetas se llevaron a la máquina de compresión, utilizando encabezados de placas de neopreno con confinamiento de moldes de acero, según norma IRAM 1709 (2002). Dichas placas de neopreno debían ser limpiadas previamente a la realización de cada ensayo, así como los moldes de acero, para evitar la posible existencia de partículas o residuos previos que pudiesen afectar el correcto desarrollo del ensayo. Estos encabezados se pueden ver en la figura 4.2.



Figura 4.2. Encabezados de neopreno y moldes de acero

Se colocó la probeta sobre el plato inferior de apoyo y se la centró sobre su superficie. Al iniciarse el acercamiento de la probeta al bloque superior, la parte móvil de éste se hace rotar en forma manual, con el fin de facilitar un contacto uniforme y sin choques con la base superior de la probeta. A continuación, se aplicó la carga en forma continua y sin choques bruscos, de manera que el aumento de la tensión media sobre la probeta sea de $0,4 \text{ MPa/s} \pm 0,2 \text{ MPa/s}$.

La carga se aplica sin variación de las condiciones indicadas anteriormente, hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. A partir de ese momento, no se deben modificar las posiciones de los mandos de la máquina hasta que se produzca la rotura. Se registra el valor de la carga máxima alcanzada y el tipo de rotura.

En la figura 4.3 se muestra el estado de la probeta previo a la realización del ensayo y luego de alcanzar la carga de rotura.



Figura 4.3. Probeta previo al ensayo de compresión axial y luego de alcanzar la rotura

Una vez concluido el ensayo, se registra la carga de rotura P [N] y conociendo la sección transversal de la probeta A [mm^2], se determina la resistencia a compresión axial como indica la mencionada norma.

Se determina la resistencia de todas las probetas destinadas a este ensayo y luego se promedia, obteniendo así, la resistencia a compresión axial de la hormigón.

Se observa la forma de fisuración de las probetas.

4.5. Ensayo de tracción por compresión diametral

Para poder realizar este ensayo, reglamentado por la Norma IRAM 1658 (1995), se utiliza la misma máquina de ensayos de compresión axial. La edad de ensayo de las probetas fue de 28 días.

Se procede a la marcación de las probetas, trazando en cada extremo de la probeta, una línea recta, de modo que, las dos líneas resultantes queden contenidas en el mismo plano axial. Estas líneas servirán como guía para la colocación de los listones de madera blanda, exentos de defectos, de largo igual a la generatriz de la probeta y sección transversal con las medidas definidas en la Figura 4.4. Dichos listones de madera deben utilizarse una sola vez.

Se coloca la probeta de modo que quede apoyada a lo largo de una generatriz sobre el plato de la máquina de compresión, como también se puede ver en la figura 4.4.

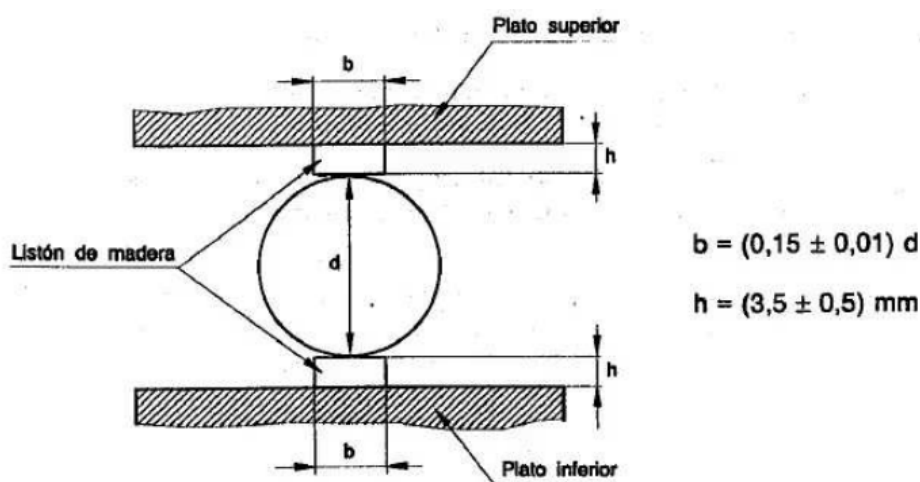


Figura 4.4. Disposición de la probeta (IRAM 1658, 1995)

Tras el posicionamiento de la probeta en la máquina de ensayo, se ajustan los platos de la máquina hasta obtener una compresión capaz de mantener en posición la probeta.

Luego se aplica la carga en forma continua, sin choques, con un incremento constante de la tensión de tracción, de $0,5 \pm 0,02$ [MPa/s], hasta la rotura de la probeta. Tras alcanzar dicho nivel de carga, se concluye el ensayo, procediendo después a la reducción de la carga y limpieza del equipamiento.

En la figura 4.5 se muestra el estado de la probeta previo a la realización del ensayo y luego de alcanzar la carga de rotura.



Figura 4.5. Probeta previo al ensayo de tracción por compresión diametral y luego de alcanzar la rotura

Como se puede observar en la figura 4.5, la rotura de la probeta se produce paralela a la dirección de la aplicación de carga. El hormigón sometido a tensiones de tracción, logra bajos desempeños, debido a que este material no posee un comportamiento adecuado para esta situación.

Una vez concluido el ensayo, se registra la carga de rotura P [N] y conociendo las dimensiones de la probeta en [mm], se determina la resistencia a tracción por compresión diametral del hormigón como indica la mencionada norma.

Se observa el aspecto de la rotura para analizar el impacto del aumento del contenido de caucho.

4.6. Ensayo de tracción por flexión

Para este ensayo, reglamentado por la Norma IRAM 1547 (1992), se utilizó una máquina universal de ensayos de 40 tn, marca Losenhausen del Laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza.

Se coloca la probeta a ensayar con su eje mayor sobre los apoyos, centrándola entre ellos. En caso de probetas moldeadas, se deben poner en contacto con las piezas de aplicación de la carga y los apoyos, las caras que han sido laterales en la posición de moldeo.

El posicionamiento de la probeta y esquema de cargas, se puede ver en la figura 4.6.

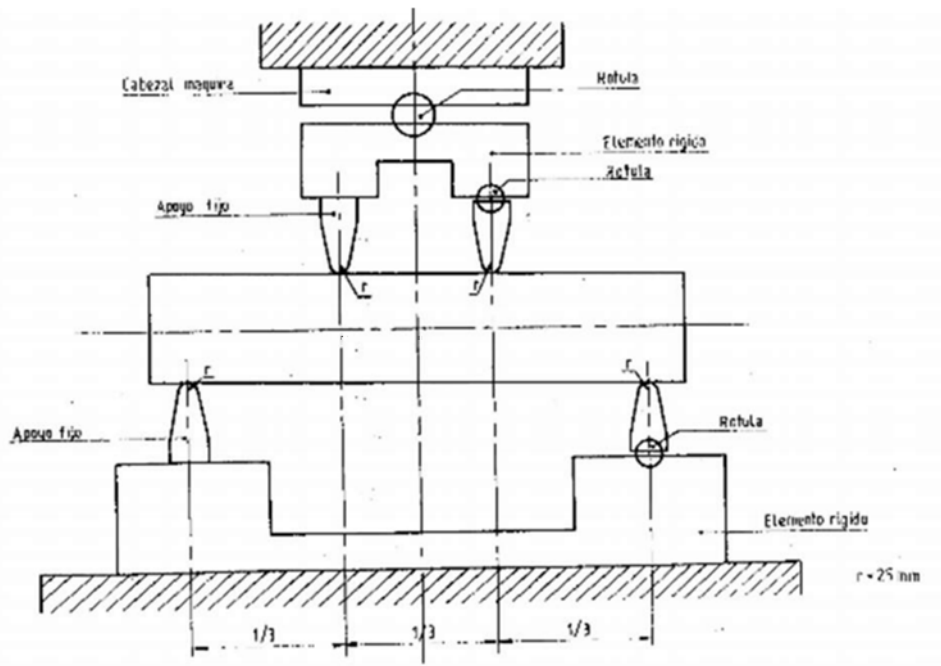


Figura 4.6. Posicionamiento de probeta y esquema de cargas en ensayo de tracción por flexión (IRAM 1547, 1992)

La carga puede aplicarse en forma rápida hasta llegar aproximadamente al 50% de su valor máximo, después de lo cual, se la mantendrá a un régimen tal que, el aumento de tensión en la fibra extrema, no exceda de $0,017 \text{ [MPa/s]}$ (1 MPa/min).

Una vez efectuado el ensayo, se procede a medir la probeta en su sección de fractura para determinar, asegurando 1 mm , el ancho y la altura promedios.

Si la fractura se produjera fuera del tercio medio de la luz, el ensayo debe descartarse.

En la figura 4.7 se muestra el estado de la probeta previo a la realización del ensayo y luego de alcanzar la carga de rotura.



Figura 4.7. Probeta prismática previo al ensayo de tracción por flexión y luego de alcanzar la rotura

El módulo de rotura (resistencia a la tracción por flexión), se determina como indica la mencionada norma.

4.7. Determinación del módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo. Es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria, por lo tanto, mide la resistencia del material a la deformación elástica.

El módulo de elasticidad fue determinado de dos formas, una empírica a través de la ecuación prevista en el reglamento CIRSOC 201 (2005), y la otra experimental a partir de ensayos de ultrasonido. Para el caso de ultrasonido, la determinación inicial corresponde al módulo dinámico y, valiéndose de relaciones existentes (Lydon y Balendran, 1986), se obtiene el módulo estático.

4.7.1. Determinación empírica

El módulo de elasticidad E_c del hormigón de densidad normal (entre 2000 y 2800 kg/m³) se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad (\text{Ec. V. 1})$$

Donde:

f'_c : resistencia a compresión del hormigón en [MPa]

4.7.2. Determinación experimental

El módulo de elasticidad E_c del hormigón se obtiene a partir de la determinación experimental del módulo dinámico E_d cuya relación entre ambos resulta:

$$E_c = 0,83 E_d [MPa] \quad (\text{Ec. V. 2})$$

Donde E_d se determina de la siguiente forma:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [MPa] \quad (\text{Ec. V. 3})$$

Donde:

μ : relación dinámica de Poisson

ρ : densidad en $[\text{kg}/\text{m}^3]$

V: velocidad del pulso $[\text{km}/\text{seg}]$

4.8. Ensayo de permeabilidad al aire

Muchos materiales poseen una porosidad superficial que no es apreciable ante el ojo humano y son de difícil cuantificación, la cual es de gran importancia cuando se relacionan dichos materiales con gases y líquidos. La permeabilidad del hormigón ha sido reconocida como un factor importante para evaluar la durabilidad del mismo.

Se analizó el comportamiento de los distintos hormigones ante la permeabilidad al aire y a los gases, por el Método Torrent, según la Norma IRAM 1892 (2022). Es un equipo rápido y fiable para medir de manera no destructiva la permeabilidad al aire en estructuras y elementos de hormigón.

El ensayo consiste en aplicar, sobre la superficie del hormigón, una celda de vacío que contiene dos cámaras concéntricas. Mediante una bomba, se aplica vacío en ambas cámaras. La celda de vacío se mantiene en contacto sobre la superficie del hormigón, sin ayuda externa debido a la presión atmosférica, dado que cuenta con anillos de material elastomérico.

Después de 60 seg., y con un vacío habitual comprendido entre 30 mbar y 50 mbar, la cámara de ensayo central se aísla de la bomba. A partir de entonces, su presión comienza a aumentar debido al aire en los poros del hormigón (originalmente a una presión atmosférica aproximada de 1000 mbar), que fluye hacia la celda evacuada. El aumento de presión en la cámara central, es más

pronunciado cuanto más permeables son las capas superficiales de hormigón afectadas por el ensayo.

El rasgo característico de este método de ensayo es que, gracias a un regulador de presión, la cámara externa (siempre conectada a la bomba de vacío), evacúa el aire a la velocidad exacta necesaria para mantener el nivel de vacío permanentemente equilibrado con el de la cámara central, actuando como un anillo de guarda (protección). En la figura 4.8 se presenta un esquema del equipo utilizado.

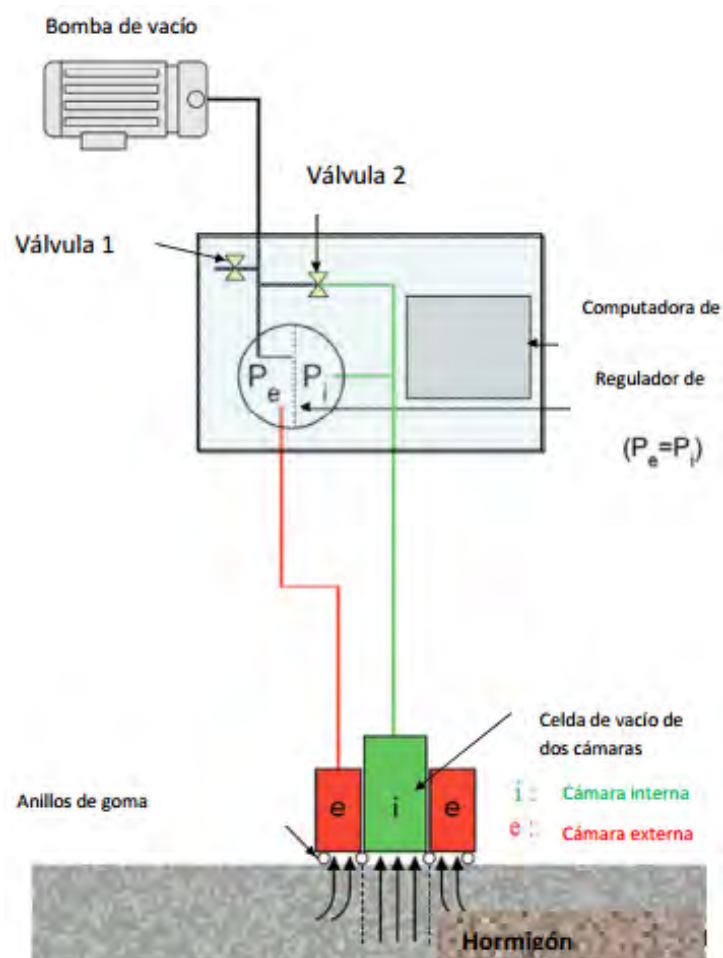


Figura 4.8. Esquema de funcionamiento del permeabilímetro de Torrent (Torrent, 2013)

La tabla 4.1 presenta una clasificación de permeabilidades, basada en resultados de permeabilidad al aire kT.

Tabla 4.1. Clasificación de la permeabilidad del hormigón, basada en resultados de kT (IRAM 1892, 2022)

kT (10^{-16} m ²)	Menor que 0,001	de 0,001 a 0,01	de 0,01 a 0,1	de 0,1 a 1,0	de 1,0 a 10	Mayor que 10
Clase de permeabilidad	PK0 (despreciable)	PK1 (muy baja)	PK2 (baja)	PK3 (moderada)	PK4 (alta)	PK5 (muy alta)

La metodología de uso consiste en limpiar la superficie de ensayo de polvo, aceite, grasa, pintura o cualquier otra sustancia que pueda afectar el instrumento o el resultado del ensayo. Si las irregularidades superficiales son excesivas, se debe proceder al fresado manual o mecánico de las áreas a ensayar.

Antes de realizar el ensayo, se mide la humedad superficial en cada punto a ensayar. Se deben realizar dos lecturas aproximadamente perpendiculares entre sí, como se puede ver en la figura 4.9.



Figura 4.9. Mediciones de la humedad superficial para ensayo de permeabilidad al aire del Método Torrent

Una de las condiciones preferibles para la realización de este ensayo es que la humedad superficial sea cercana a 5%.

Luego de medir la humedad superficial, se posiciona el cabezal de elemento centrado en el mismo y se inicia la bomba de vacío. El equipo mide la diferencia de presión entre la superficie del elemento

y el exterior, con ello se obtiene el parámetro de permeabilidad kT . El equipo en funcionamiento se puede ver en la figura 4.10.

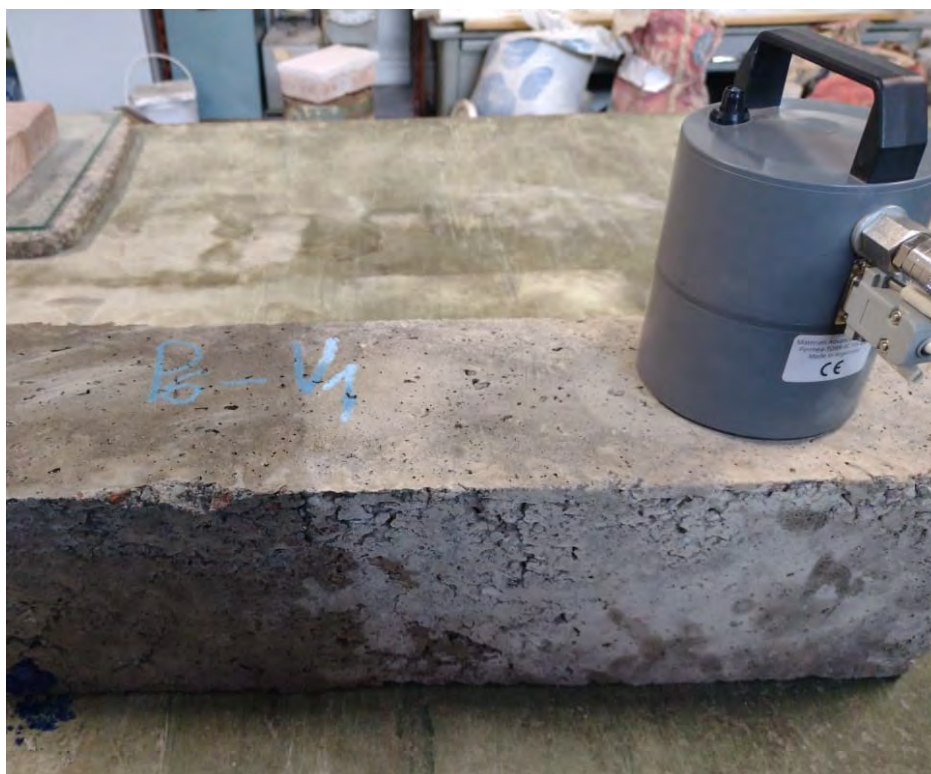


Figura 4.10. Equipo de Método Torrent en funcionamiento

4.9. Determinación de la capacidad de succión capilar, grado de saturación y coeficiente o velocidad de succión capilar

La capacidad y el coeficiente o velocidad de succión capilar del hormigón y particularmente del hormigón de recubrimiento, son parámetros asociados con la durabilidad de las estructuras de hormigón.

El método es sensible a los cambios de las características del hormigón y, sobre todo, a las condiciones de curado. Por lo tanto, resulta una herramienta eficaz para especificaciones basadas sobre el desempeño, dependiendo el resultado, del contenido de humedad inicial del hormigón.

El coeficiente o velocidad de succión capilar es un parámetro que refiere a la rapidez de absorción de agua por capilaridad. En tanto que, la capacidad de succión capilar, es la capacidad máxima nominal que tiene una muestra de ensayo para incorporar agua a través de la base por succión.

4.9.1. Probetas

Para obtener la muestra de ensayo de cada probeta, se debe realizar un primer aserrado de 30 mm del extremo correspondiente a la base de contacto de la probeta con el molde, se descarta el corte realizado y se reitera el aserrado de la probeta a una distancia de (50 ± 2) mm. Esta porción conforma la probeta de ensayo, como se puede ver en la figura 4.11.

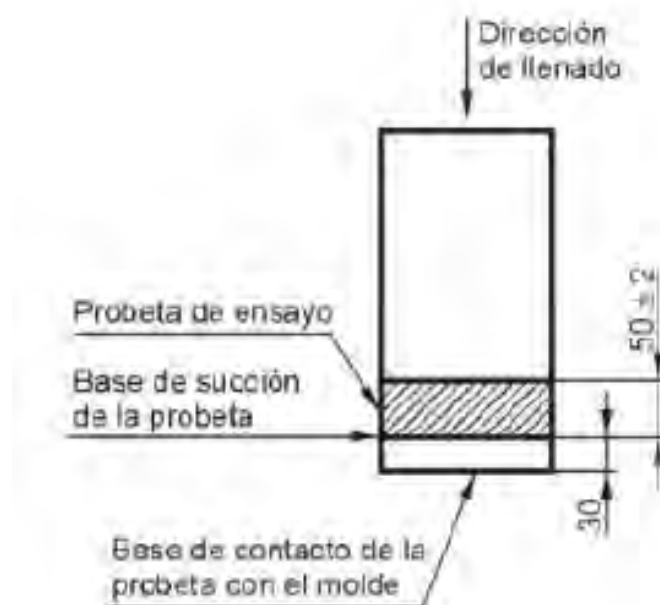


Figura 4.11. Probeta de ensayo para succión capilar (IRAM 1871, 2021)

4.9.2. Procedimiento

Este ensayo está reglamentado por la Norma IRAM 1871 (2021) y el procedimiento es el siguiente: se determina el diámetro del área de la sección transversal de cada muestra a ensayar, promediando los largos de dos diámetros normales medidos en la mitad de la altura de cada espécimen. Se determina el área de la sección transversal de cada muestra de ensayo.

Luego de cortadas las probetas y para evitar la absorción en el área no contemplada en los cálculos, toda la superficie lateral de las muestras, se sella con pintura impermeabilizante (como por ejemplo pinturas epoxídicas, asfálticas o de caucho clorado base solvente), para lo cual, previamente la superficie lateral, se debe encontrar seca, de forma tal, que el tratamiento seleccionado adhiera correctamente. El proceso de sellado de la superficie lateral de las muestras, se puede ver en la figura 4.12.



Figura 4.12. Sellado de probetas para ensayo de succión capilar

Previamente al ensayo, las muestras se deben colocar y mantener sumergidas en agua durante un periodo de 72 h. Se retiran las muestras del agua. Se secan la base de succión con un paño. Se pesan las muestras y se registra (M_{sat}).

Las muestras se secan en estufa a $(50 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y se registran los pesos cada (24 ± 1) h, hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas sea menor que 0,1% de la última medición. Esto se puede ver en la figura 4.13.



Figura 4.13. Secado de probetas para ensayo de succión capilar

Se advierte que el resultado del ensayo es muy sensible al secado de las muestras.

Antes de cada pesada, las muestras se deben dejar enfriar hasta temperatura ambiente, guardándolas previamente en una envoltura de dos bolsas de polietileno.

Una vez secadas las muestras, se registra la masa seca (M_{so}) y se recubren con doble película de polietileno durante un tiempo comprendido entre 72 h y 7 d, en ambiente de laboratorio.

Luego de extraerles la envoltura de polietileno, se registra la masa seca (M_{si}) de las muestras. Luego se introducen en un recipiente sobre la base de apoyo, con una altura de agua respecto de la base de succión de (3 ± 1) mm y a una temperatura de (20 ± 2) °C.

Este instante se registra como el tiempo inicial de ensayo (t_0) y se puede ver en la figura 4.14.



Figura 4.14. Instante (t_0) en ensayo de succión capilar

El recipiente debe taparse para alcanzar una humedad de equilibrio del aire mayor que el 95% y para reducir la evaporación por las bases de las muestras en contacto con el aire.

Se retira cuidadosamente cada muestra de ensayo, con el paño se seca la base de succión y la superficie lateral, y se determina la masa húmeda (M_{hit}) en los tiempos siguientes: 15, 30 y 45 min; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 24 y 48 h.

Y en adelante cada (24 ± 1) h, hasta que la variación de masa de la muestra sea menor que 0,1% entre dos determinaciones sucesivas.

En la figura 4.15 se muestra el proceso de pesaje de las probetas para determinar la capacidad de succión capilar.



Figura 4.15. Proceso de pesaje de probetas para determinar la capacidad de succión capilar

4.9.3. Cálculos

Para cada muestra (i) en el instante de lectura (t), se determina el incremento de masa por unidad de área (C_{it}), mediante la siguiente ecuación:

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i} \quad (\text{Ec. V. 4})$$

Donde:

C_{it} : el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la muestra (i) en el instante de lectura (t), en $[\text{gr}/\text{m}^2]$

M_{hit} : la masa húmeda de la muestra (i) en el instante de lectura (t), en $[\text{gr}]$

M_{si} : la masa seca de la muestra (i) en $[\text{gr}]$

A_i : el área de la sección transversal de la muestra (i), en $[\text{m}^2]$

4.9.3.1. Capacidad de succión capilar

La capacidad de la muestra (C_{it}) se debe determinar, según lo expuesto anteriormente, hasta que la variación de masa entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda (M_{hit}) sea mayor que 0,1%. El valor de C_{it} correspondiente al tiempo (t) en que se verifique lo anterior, es la capacidad de succión capilar de la muestra (i).

4.9.3.2. Grado de saturación

Una vez finalizado el ensayo de succión capilar, las muestras se colocan en estufa a $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 48 h.

Se retiran las muestras de la estufa. Se dejan enfriar hasta temperatura ambiente, primero en ambiente de laboratorio durante 1 h y luego se guardan en una envoltura de dos bolsas de polietileno hasta que alcancen la temperatura ambiente. Se pesan y se registra (M_0).

El grado de saturación al inicio (G_0) y al final (G_f) del ensayo, se calculan según las siguientes ecuaciones:

$$G_0(\%) = \frac{M_{si} - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\text{Ec. V. 5})$$

$$G_f(\%) = \frac{M_{hi} - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\text{Ec. V. 6})$$

Donde:

G_0 : el grado de saturación al inicio del ensayo de succión capilar, en [%]

G_f : el grado de saturación al final del ensayo de succión capilar, cuando se alcanza la capacidad de succión capilar C_i en [%]

M_{hi} : la masa húmeda de la muestra en el instante en que se alcanza la capacidad de succión capilar C_i en [gr]

M_{si} : la masa seca de la muestra (i) en [gr]

M_0 : la masa seca a $105 ^\circ\text{C}$ de la muestra (i) en [gr]

4.9.3.3. Coeficiente o velocidad de succión capilar

En forma individual se grafica el incremento de masa por unidad de área de la serie de ensayo (C_{it}), en gramos por metro cuadrado, en función del tiempo de lectura elevado a la un cuarto ($t^{0,25}$), en segundos a la un cuarto (ver Figura 4.16).

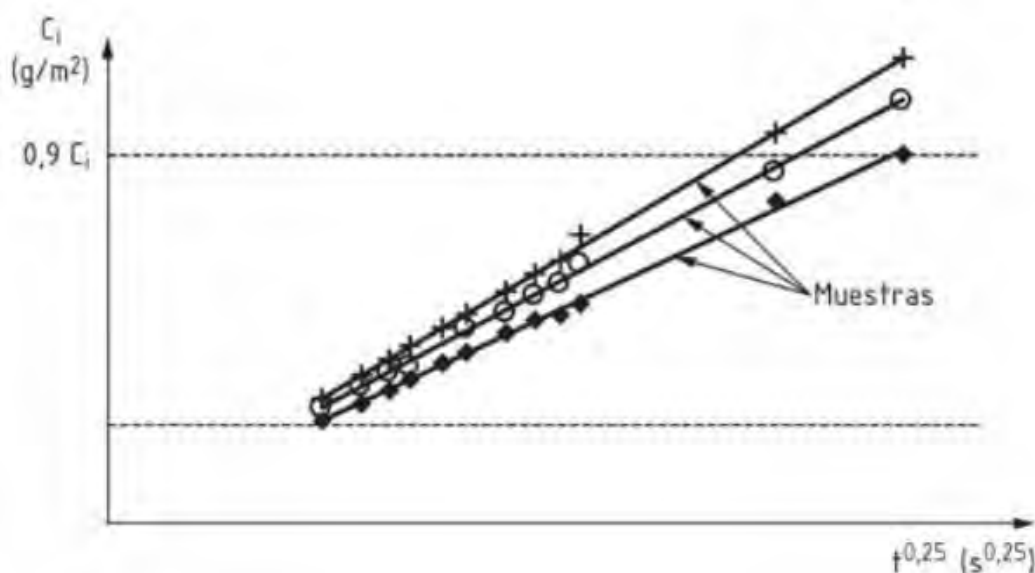


Figura 4.16. Ejemplo de gráfico de succión capilar para tres muestras (IRAM 1871, 2021)

En estos gráficos, los valores C_{it} correspondientes a $t= 15$ min, $t= 45$ min y $t= 1,5$ h se consideran solo si se ha observado humedad en la base superior de la muestra antes de las 6 h de iniciado el ensayo. En caso contrario, se deben descartar las mediciones para esos tiempos.

El coeficiente o velocidad de succión capilar (S_i) correspondiente a cada muestra ensayada (en gramos por metro cuadrado por segundo a la un cuarto) es la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos del conjunto de puntos. Este ajuste de la curva se realiza en forma individual para cada muestra con los puntos que cumplen la condición de que el valor correspondiente al incremento de la masa por unidad de área de la sección transversal de la muestra (i) de la serie de ensayo en el instante de lectura (t), (C_{it}), debe estar comprendido dentro del intervalo $0,1 C_i$ y $0,9 C_i$.

4.10. Ensayo de ultrasonido

Este ensayo está reglamentado por la Norma IRAM 1683 (1990) y se fundamenta en que la velocidad de un pulso ultrasónico depende de las propiedades del hormigón que determinan su

rigidez elástica y su resistencia mecánica. Las diferencias en la velocidad de los pulsos ultrasónicos en distintas zonas de una estructura, reflejan las correspondientes variaciones de la calidad del hormigón.

Al presentarse zonas de compactación deficiente, vacíos o material deteriorado en los hormigones que se someten a ensayo, se obtendrá una disminución de la velocidad del pulso ultrasónico.

La velocidad de pulsos ultrasónicos, determinada mediante este método, está influenciada por una serie de factores, como son las condiciones de la superficie, contenido de humedad, temperatura del hormigón, distancia de traspaso y forma y tamaño de la muestra. En la figura 4.17 se puede ver el equipo de ultrasonido utilizado.

Pueden obtenerse relaciones empíricas entre la velocidad de pulsos ultrasónicos y la resistencia a compresión del hormigón.



Figura 4.17. Equipo de ultrasonido

4.10.1. Resumen del ensayo

Se produce un pulso ultrasónico longitudinal de vibraciones por un transductor electroacústico (emisor), el cual está en contacto con una de las caras del elemento de hormigón a ensayar. Luego de atravesar una distancia de traspaso (L) conocida en el hormigón, las vibraciones del pulso son convertidas en una señal eléctrica por medio de otro transductor (receptor) y un circuito electrónico de tiempo que permite obtener el tiempo de traspaso (T) del pulso ultrasónico medido. La velocidad del pulso (V) está dada por la siguiente expresión:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Ec. V. 7})$$

Donde:

V: velocidad de traspaso

L: distancia de traspaso

T: tiempo de traspaso

4.10.2. Procedimiento

4.10.2.1. Elección de la posición de los transductores

Las mediciones en los elementos o piezas a estudiar, pueden realizarse colocando los transductores en tres posiciones diferentes:

- a) caras opuestas (transmisión directa)
- b) caras adyacentes (transmisión semi-directa)
- c) en la misma cara (transmisión indirecta o superficial)

La transmisión directa es la más conveniente porque evalúa toda la longitud de la muestra, dado que la energía máxima del pulso es dirigida directamente hacia el transductor receptor. Este es el modo de medición (transmisión directa) optado para esta investigación.

4.10.2.2. Control de funcionamiento del aparato

Cada vez que se utiliza el equipo, es necesario verificar su correcto funcionamiento antes de efectuar las mediciones.

Se colocan los transductores en los extremos de la barra patrón, provista junto con el equipo, y se registra el tiempo de traspaso, el que debe coincidir con el indicado en la barra, caso contrario, será necesario ajustar el equipo.

4.10.2.3. Procedimiento para la determinación del tiempo de traspaso

Para asegurar que los pulsos generados por el transductor emisor pasen a través del hormigón y sean detectados por el transductor receptor, es necesario que exista un buen contacto entre los transductores y las superficies del hormigón en estudio. Por ello, se coloca un medio de acople que puede ser grasa, vaselina u otro material viscoso, y se ejerce una pequeña presión en los transductores sobre la superficie del hormigón, lográndose así rellenar los poros superficiales.

Se registra el tiempo de traspaso y se mide la distancia en línea recta entre los centros de los transductores. La figura 4.18 muestra el procedimiento de medición del tiempo de traspaso del pulso ultrasónico.



Figura 4.18. Medición del tiempo de traspaso del pulso ultrasónico

4.10.2.4. Precisión

La distancia entre centros de transductores se medirá asegurando el $\pm 1\%$.

El tiempo de traspaso de la onda se medirá asegurando el $\pm 1\%$.

4.10.2.5. Cálculos

La velocidad del pulso ultrasónico se calcula con la siguiente expresión:

$$V = 10^6 \frac{L}{T} \quad (\text{Ec. V. 8})$$

Donde:

V: la velocidad del pulso ultrasónico, en [m/s]

L: la distancia entre transductores, en [m]

T: el tiempo de traspaso, en [s]

Se puede dar una problemática cuando se aplica este procedimiento en construcciones existentes, debido a la presencia de armaduras que pueden distorsionar las mediciones.

Capítulo V

RESULTADOS**5.1. Densidad**

Las densidades teóricas fueron determinadas como fuera indicado anteriormente y los resultados de las mismas se presentan en tabla 5.1.

Tabla 5.1. Densidades teóricas de hormigones con caucho adicionado

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Densidad [kg/m ³]	Variación porcentual
P1	P1	0,0 %	2393	0,0 %
PP2	PF2	1,0 %	2346	2,0 %
PP3	PF3	2,0 %	2299	3,9 %
PP4	PF4	3,5 %	2235	6,6 %
PP5	PF5	5,0 %	2173	9,2 %
PP6	PF6	6,0 %	2134	10,8 %
PP7	PF7	7,0 %	2098	12,3 %
PP8	PF8	8,0 %	2063	13,8 %
PP9	PF9	9,0 %	2028	15,3 %
PP10	PF10	10,0 %	1995	16,6 %

5.2. Consistencia

Se presentaron algunas diferencias entre los distintos hormigones, debido al aumento de la cantidad de caucho adicionado. Se destaca una disminución gradual del asentamiento, de la mezcla en estado fresco, a medida que se incrementó el porcentaje de PNFU y FCR como adición. Los resultados de los distintos asentamientos son los detallados en tabla 5.2.

Tabla 5.2. Asentamientos según dosificación de PNFU y FCR

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Asentamiento [cm]	
			H° con PNFU	H° con FCR
P1	P1	0,0 %	12,0	12,0
PP2	PF2	1,0 %	5,5	7,5
PP3	PF3	2,0 %	8,0	7,0
PP4	PF4	3,5 %	6,0	4,5
PP5	PF5	5,0 %	5,0	5,5
PP6	PF6	6,0 %	5,0	6,0
PP7	PF7	7,0 %	3,5	0,9
PP8	PF8	8,0 %	4,5	2,4
PP9	PF9	9,0 %	3,5	1,5
PP10	PF10	10,0 %	3,0	0,5

El asentamiento de los distintos hormigones, según los distintos porcentajes de adición de caucho, se presenta en la figura 5.1.

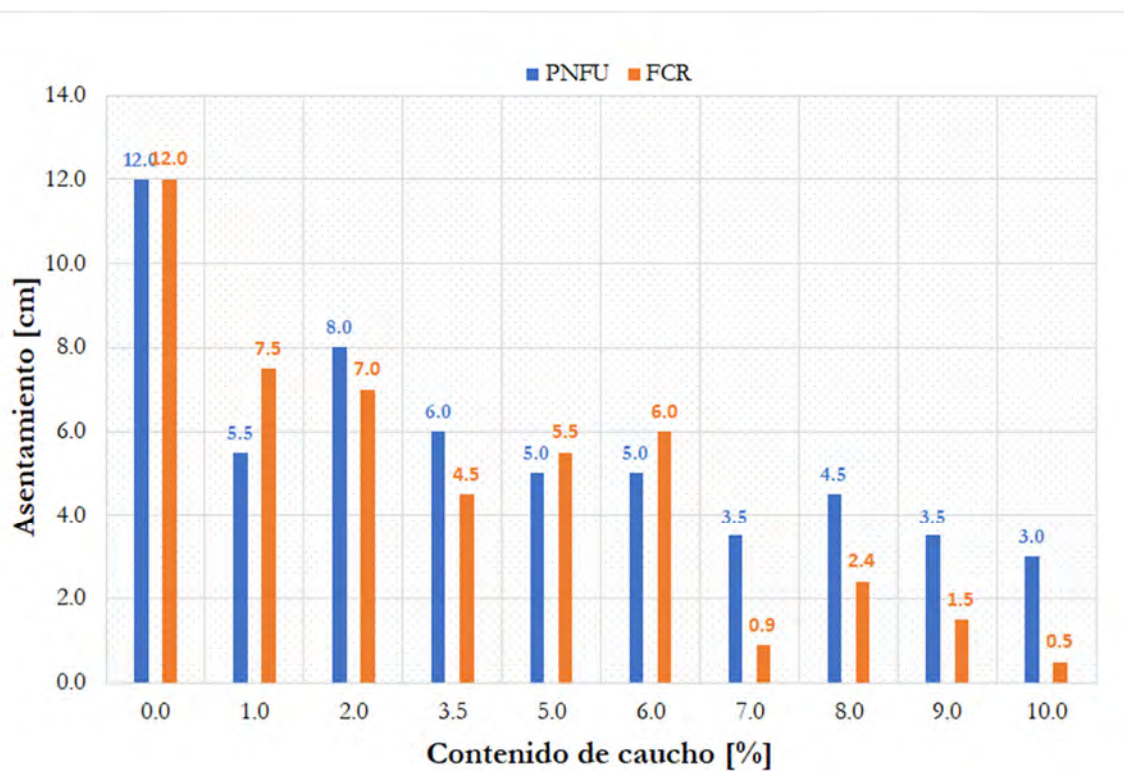


Figura 5.1. Asentamiento de hormigones con caucho

5.3. Compresión axial

Los ensayos realizados sobre las propiedades mecánicas, tales como compresión axial, tracción por compresión diametral y tracción por flexión respectivamente, presentaron variaciones entre elementos dentro de un mismo hormigón.

Con el fin de poder hacer un análisis del desempeño general de cada una de ellas, los resultados presentados son promedios aritméticos de todos los ensayos sobre elementos particulares realizados para cada dosificación. En la tabla 5.3 se presentan los promedios de resultados de ensayos a compresión axial, tanto para la adición de PNFU como de FCR.

Tabla 5.3. Resultados de ensayos a compresión axial de hormigones con caucho

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Media aritmética de los ensayos de resistencia a compresión [MPa]	
			H° con PNFU	H° con FCR
P1	P1	0,0 %	27,1 ± 1,5	27,1 ± 1,5
PP2	PF2	1,0 %	25,3 ± 1,6	24,6 ± 1,7
PP3	PF3	2,0 %	23,7 ± 1,8	23,1 ± 2
PP4	PF4	3,5 %	22,2 ± 0,6	22,4 ± 0,4
PP5	PF5	5,0 %	20,6 ± 1,4	20,2 ± 1,5
PP6	PF6	6,0 %	18,6 ± 2	19,7 ± 2,4
PP7	PF7	7,0 %	18,1 ± 1	19,3 ± 1
PP8	PF8	8,0 %	11,6 ± 1,2	17,4 ± 1,1
PP9	PF9	9,0 %	12,7 ± 0,8	15,4 ± 0,7
PP10	PF10	10,0 %	12,8 ± 1,3	13,9 ± 1,4

En la Figura 5.2 se presenta la variación de la resistencia a compresión normalizada con respecto al hormigón patrón, según los distintos porcentajes de adición de caucho.

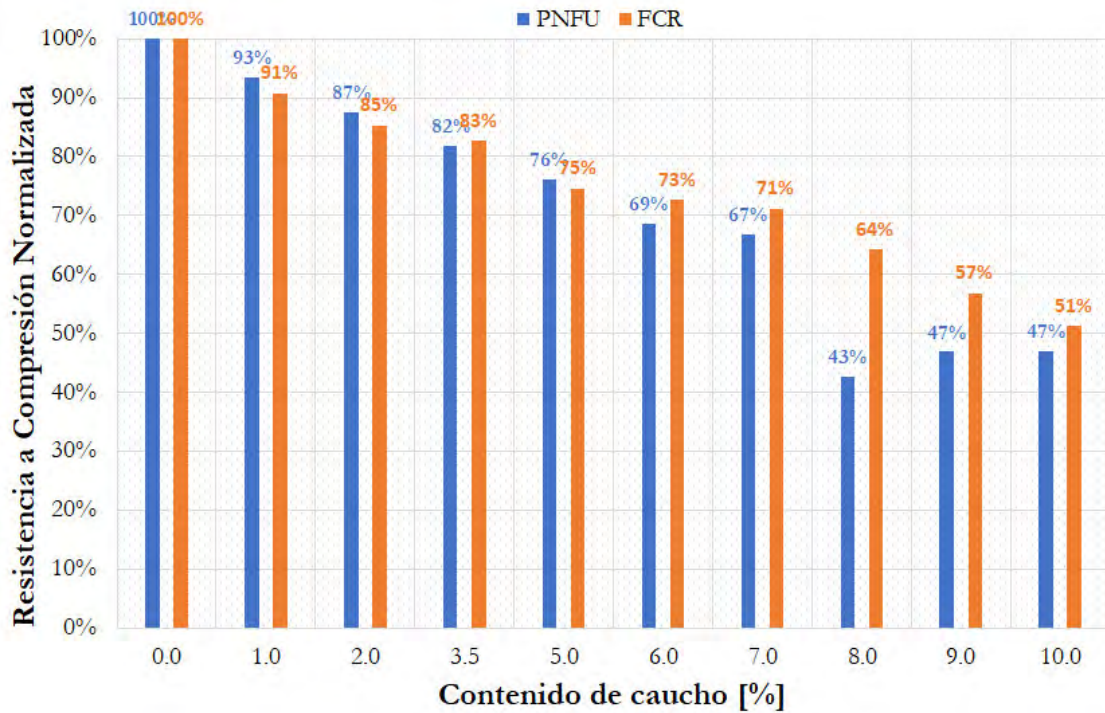


Figura 5.2. Resistencia a compresión normalizada de hormigones con caucho a 28 días

En la Figura 5.3 se presenta la variación a compresión de los hormigones estudiados respecto a las densidades teóricas obtenidas.

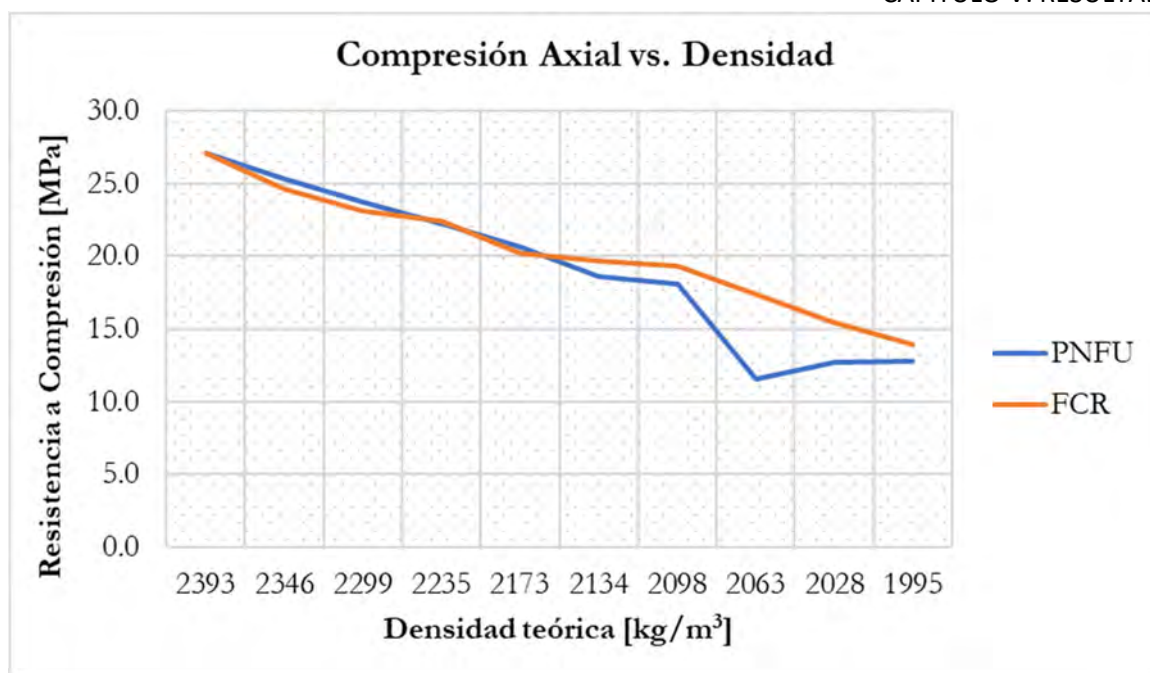


Figura 5.3. Resistencia a compresión vs. Densidad teórica de hormigones

5.4. Tracción por compresión diametral

Se promediaron aritméticamente los resultados, para cada hormigón, de las cuatro probetas moldeadas para este ensayo. En la tabla 5.4 se presentan los promedios de resultados de ensayos a tracción por compresión diametral, tanto para la adición de PNFU como de FCR.

Tabla 5.4. Resultados de ensayos a tracción por compresión diametral de hormigones con caucho

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Media aritmética de resistencia a tracción por compresión diametral [MPa]	
			H° con PNFU	H° con FCR
P1	P1	0,0 %	3,2 ± 0,2	3,2 ± 0,2
PP2	PF2	1,0 %	2,9 ± 0,3	2,8 ± 0,4
PP3	PF3	2,0 %	2,1 ± 0,2	2,5 ± 0,2
PP4	PF4	3,5 %	2,4 ± 0,2	2,4 ± 0,3
PP5	PF5	5,0 %	2,2 ± 0,3	2,6 ± 0,3
PP6	PF6	6,0 %	1,7 ± 0,4	2,4 ± 0,4
PP7	PF7	7,0 %	2,1 ± 0,3	2,5 ± 0,3
PP8	PF8	8,0 %	1,5 ± 0,3	2,1 ± 0,4
PP9	PF9	9,0 %	1,7 ± 0,2	2,4 ± 0,1
PP10	PF10	10,0 %	2,2 ± 0,1	2,1 ± 0,2

En la Figura 5.4 se presenta la variación de la resistencia a tracción por compresión diametral normalizada con respecto al hormigón patrón, según los distintos porcentajes de adición de caucho.

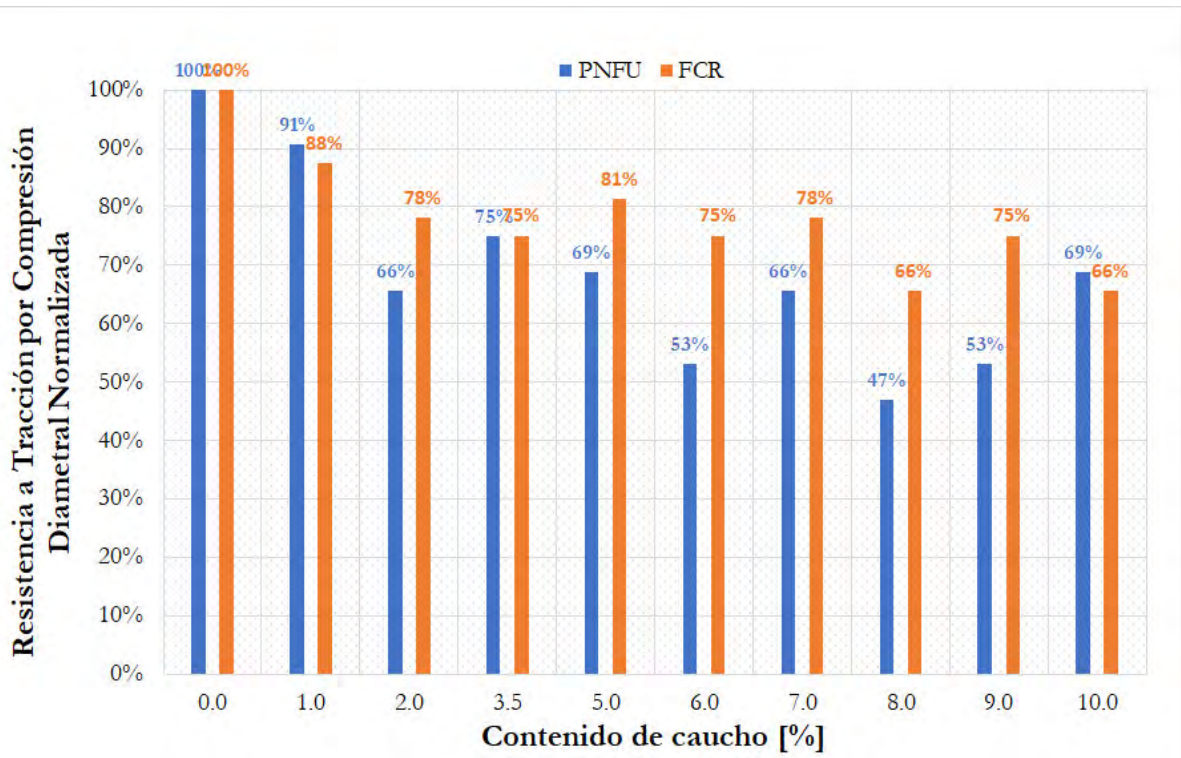


Figura 5.4. Resistencia a tracción por compresión diametral normalizada de hormigones con caucho

5.5. Tracción por flexión

Para este ensayo, se moldearon dos probetas por cada hormigón. Se promediaron aritméticamente los resultados, para cada hormigón y en la tabla 5.5 se pueden visualizar los promedios de resultados de dicho ensayo, tanto para la adición de PNFU como de FCR.

Tabla 5.5. Resultados de ensayos a tracción por flexión de hormigones con caucho

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Tensión promedio a tracción por flexión [MPa]	
			H° con PNFU	H° con FCR
P1	P1	0,0 %	3,5 ± 0,1	3,5 ± 0,1
PP2	PF2	1,0 %	3,4 ± 0,1	3,4 ± 0,1
PP3	PF3	2,0 %	3,2 ± 0,2	3,1 ± 0,2
PP4	PF4	3,5 %	3,4 ± 0,2	2,9 ± 0,1
PP5	PF5	5,0 %	3,3 ± 0,2	2,7 ± 0,1
PP6	PF6	6,0 %	2,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1
PP7	PF7	7,0 %	2,7 ± 0,1	2,9 ± 0,2
PP8	PF8	8,0 %	2,4 ± 0,1	2,8 ± 0,1
PP9	PF9	9,0 %	2,2 ± 0,1	2,6 ± 0,1
PP10	PF10	10,0 %	1,9 ± 0,1	2,3 ± 0,1

En la Figura 5.5 se presenta la variación de la resistencia a tracción por flexión normalizada con respecto al hormigón patrón, según los distintos porcentajes de adición de caucho.

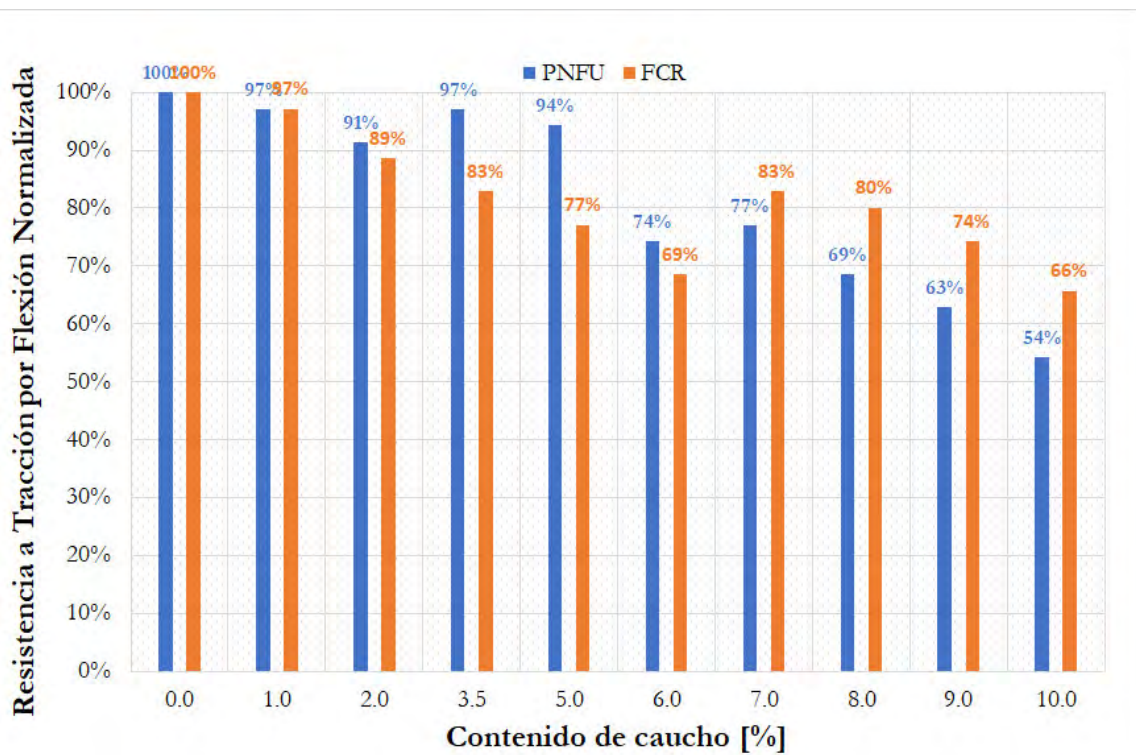


Figura 5.5. Resistencia a tracción por flexión normalizada de hormigones con caucho

5.6. Módulo de elasticidad

Los módulos de elasticidad, determinados tanto empírica como experimentalmente, para hormigones con adición de PNFU se presentan en tabla 5.6.

Tabla 5.6. Módulos de elasticidad E_c de hormigones con PNFU

Designación según PNFU	Módulo de elasticidad E_c [MPa]	
	Empírico	Experimental
P1	24467	25017
PP2	23641	N/A
PP3	22881	N/A
PP4	22145	10822
PP5	21332	18512
PP6	20270	17826
PP7	19996	8104
PP8	16008	9356
PP9	16749	15291
PP10	16815	14722

En la Figura 5.6 se presenta la correlación entre los resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión para hormigones con adición de PNFU.

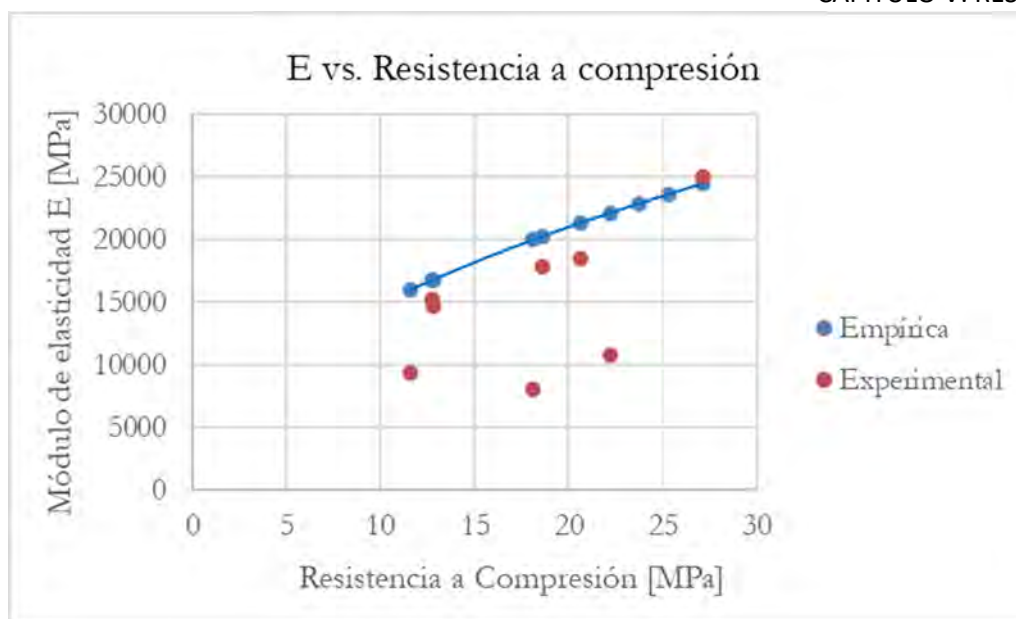


Figura 5.6. Correlación entre el módulo E y resistencia a compresión de hormigones con PNFU

En tanto que, los módulos de elasticidad, determinados tanto empírica como experimentalmente, para hormigones con adición de FCR se presentan en tabla 5.7.

Tabla 5.7. Módulos de elasticidad E_c de hormigones con FCR

Designación según FCR	Módulo de elasticidad E_c [MPa]	
	Empírico	Experimental
P1	24467	25017
PF2	23311	20438
PF3	22589	22742
PF4	22244	21135
PF5	21124	20067
PF6	20861	18591
PF7	20648	20788
PF8	19605	19018
PF9	18444	15397
PF10	17523	13890

En la Figura 5.7 se presenta la correlación entre los resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión para hormigones con adición de FCR.

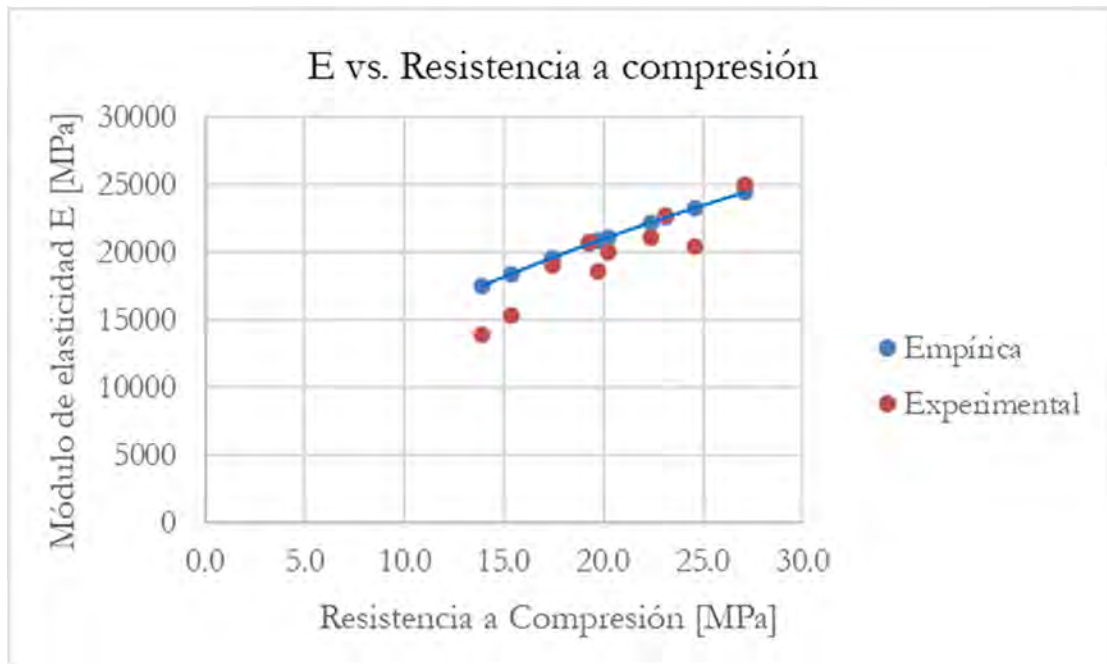


Figura 5.7. Correlación entre el módulo E y resistencia a compresión de hormigones con FCR

5.7. Permeabilidad al aire

Se presentan a continuación, los resultados de ensayo de permeabilidad superficial al aire y gases, según el método Torrent. En este ensayo, se deben mencionar las constantes variaciones durante la ejecución del mismo, ya que se presentaban errores o falsas mediciones en el equipo, lo que genera continuas repeticiones de mediciones.

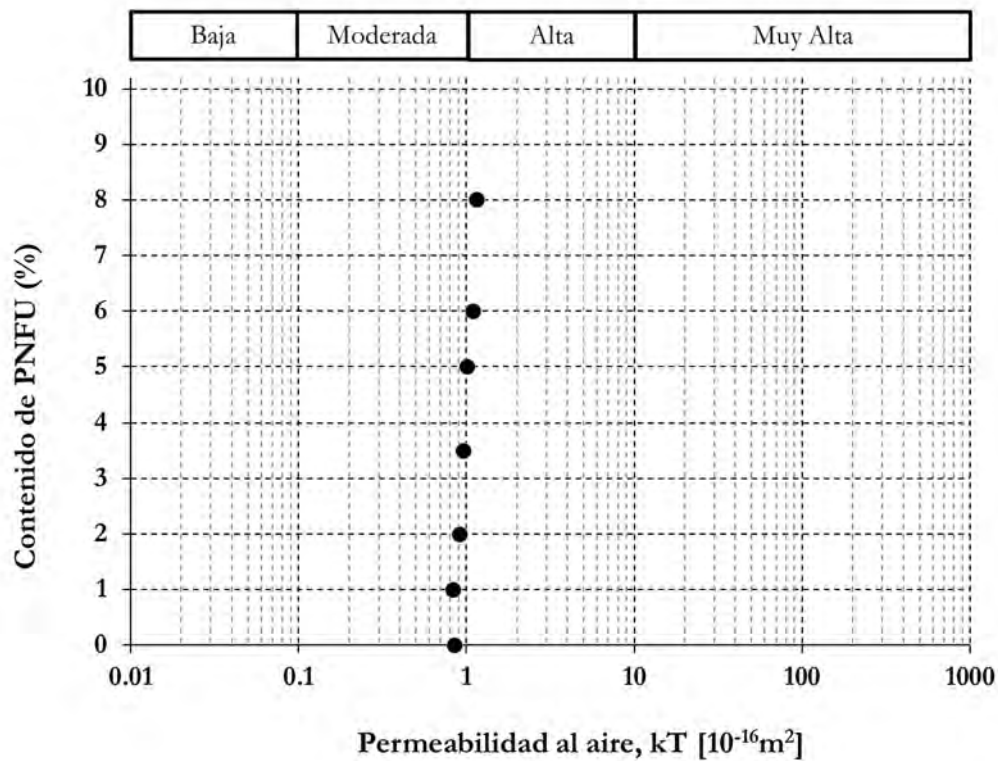
Cabe destacar que, para algunas dosificaciones de PNFU, resultó inviable la medición, ya que el equipo arrojaba valores erróneos, debido a la terminación de las probetas y a la alta permeabilidad del material que no permite que se arme vacío. Como no es buena la adherencia entre caucho y pasta cementicia, a medida que aumenta el porcentaje de incorporación de caucho, aumenta este problema, generando una alta permeabilidad del material.

En la tabla 5.8 se pueden visualizar los resultados de dicho ensayo, tanto para la adición de PNFU como de FCR.

Tabla 5.8. Resultados de ensayos de permeabilidad al aire por Método Torrent

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Coeficiente de permeabilidad kT_6	
			kT_6 PNFU	kT_6 FCR
P1	P1	0,0 %	0,852	0,852
PP2	PF2	1,0 %	0,836	0,896
PP3	PF3	2,0 %	0,912	0,912
PP4	PF4	3,5 %	0,957	0,987
PP5	PF5	5,0 %	1,012	1,026
PP6	PF6	6,0 %	1,092	1,095
PP7	PF7	7,0 %	N/A	1,102
PP8	PF8	8,0 %	1,156	1,141
PP9	PF9	9,0 %	N/A	1,195
PP10	PF10	10,0 %	N/A	1,214

La permeabilidad al aire, medida a través del coeficiente kT_6 , y según los distintos porcentajes de PNFU incorporados, se ilustra en la figura 5.8, donde puede observarse la valoración cualitativa para cada uno de los hormigones estudiados.

Figura 5.8. Coeficientes de permeabilidad al aire kT de hormigones con PNFU

Con igual análisis, se presenta en la figura 5.9 para hormigones adicionados con FCR.

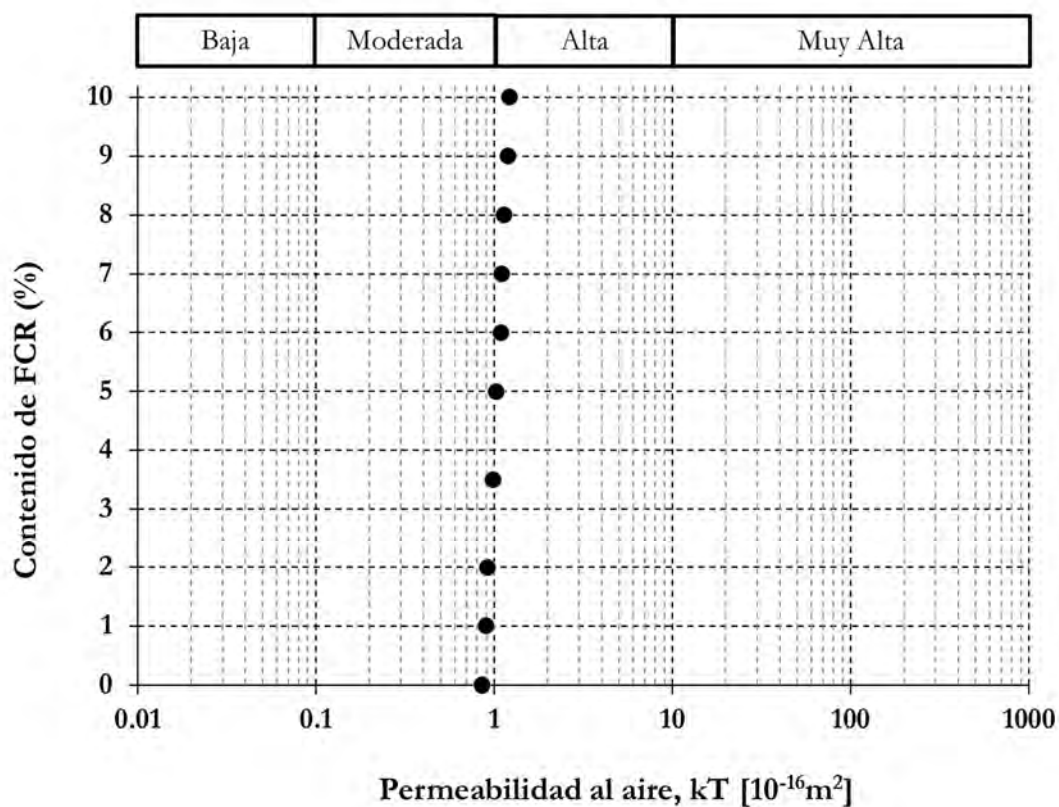


Figura 5.9. Coeficientes de permeabilidad al aire kT de hormigones con FCR

A efectos de visualizar la ganancia de permeabilidad, se presenta en la Figura 5.10 la variación de la permeabilidad normalizada con respecto al hormigón patrón, según los distintos porcentajes de adición de caucho.

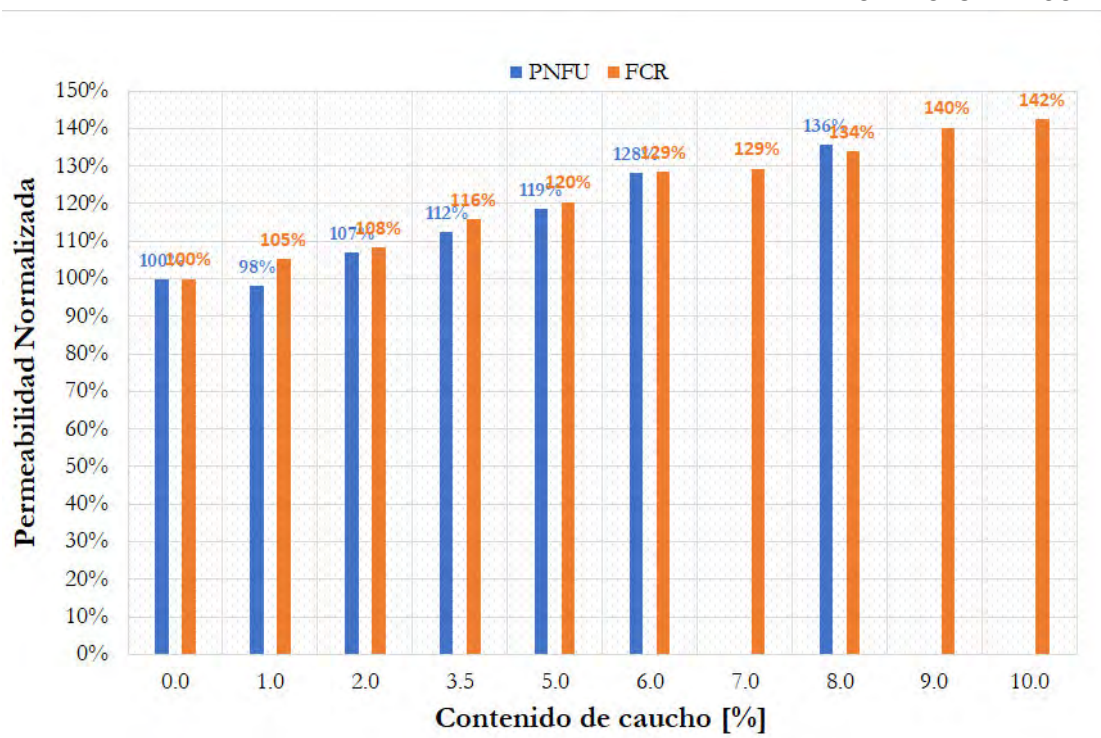


Figura 5.10. Permeabilidad normalizada de hormigones con caucho

5.8. Succión capilar, grado de saturación y coeficiente o velocidad de succión capilar

Se realizaron las determinaciones de estos parámetros en las probetas aserradas, según lo explicado oportunamente, con la salvedad que no se pudieron ensayar los hormigones PF2 y PF3 debido a que no se contaba con probetas para tal efecto.

En la tabla 5.9 se pueden visualizar los valores de capacidad de succión capilar, coeficiente de succión capilar para un tiempo de lectura t elevado a la un cuarto ($t^{0,25}$), y coeficiente de succión capilar para un t elevado a la un medio ($t^{0,5}$), tanto para la adición de PNFU como de FCR. Para estas determinaciones se han seguido las disposiciones establecidas en la Norma IRAM 1871 (2021).

Tabla 5.9. Capacidad de succión capilar y coeficiente o velocidad de succión capilar para hormigones con caucho

Designación hormigones	Capacidad de succión capilar [g/m ²]	Coficiente de succión capilar para $t^{0,25}$ [g/m ² /s ^{0,25}]	Coficiente de succión capilar para $t^{0,5}$ [g/m ² /s ^{0,5}]
P1	4711	214	6,86
PP4	4584	214	6,85
PP5	4966	219	6,90
PP6	5220	240	7,97
PP7	4584	208	6,62
PP8	5857	300	10,18
PP9	5475	251	8,16
PP10	4966	242	8,08
PF2	6494	403	14,66
PF3	5602	312	11,35
PF4	5348	274	9,82
PF5	5984	351	12,76
PF6	5984	335	12,16
PF7	5093	248	8,22
PF8	6239	338	12,14
PF9	6112	329	11,01
PF10	5857	275	8,98

A efectos de visualizar la ganancia de capacidad de succión capilar, se presenta en la Figura 5.11 la variación de la succión capilar normalizada con respecto al hormigón patrón, según los distintos porcentajes de adición de caucho.

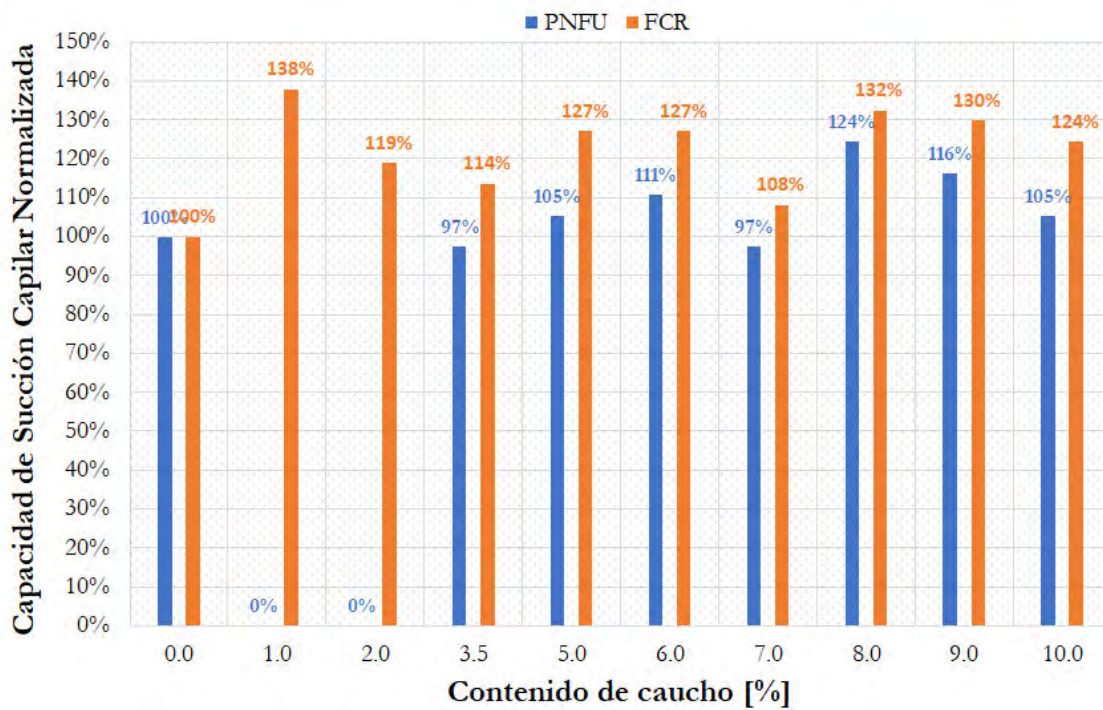


Figura 5.11. Capacidad de succión capilar normalizada de hormigones con caucho

En lo que se refiere a la determinación del grado de saturación, en la tabla 5.10 se presentan los grados de saturación inicial (G_0) y final (G_f).

Tabla 5.10. Grados de saturación de hormigones con caucho

Designación hormigones	Grado de saturación	
	G_0 [%]	G_f [%]
P1	0,66	5,19
PP4	1,10	5,05
PP5	0,87	5,13
PP6	1,29	6,07
PP7	0,89	4,88
PP8	0,92	6,24
PP9	1,01	5,84
PP10	1,63	6,17
PF2	1,34	7,05
PF3	1,29	6,04
PF4	1,80	6,52
PF5	1,42	6,54
PF6	0,68	6,05
PF7	0,22	4,52
PF8	0,23	5,86
PF9	0,22	5,57
PF10	0,68	5,92

5.9. Ultrasonido

Se midió el tiempo de traspaso del pulso ultrasónico en la probeta, de cada hormigón, destinada para este ensayo, tanto para las dosificaciones con PNFU como las que contenían FCR.

Con el tiempo de traspaso y conociendo la longitud de la probeta, se determinó la velocidad del pulso.

Cabe destacar que, para algunas dosificaciones de PNFU, resultó inviable la medición, ya que el equipo arrojaba valores erróneos, debido a contaba con probetas para esas dosificaciones.

En base a los estudios realizados por Malhotra (1985), donde el autor publicó un criterio de aceptación del hormigón respecto de la velocidad ultrasónica, se pudieron categorizar nuestros hormigones.

En la tabla 5.11 se pueden visualizar los valores de velocidades de los pulsos ultrasónicos y la calidad de los hormigones según la bibliografía citada, tanto para las adiciones de PNFU como así también de FCR.

Tabla 5.11. Resultados de ensayo de ultrasonido

Designación según PNFU	Designación según FCR	Porcentaje de adición	Resultados de ensayos de ultrasonido			
			Velocidad [m/s] PNFU	Calidad del H° con PNFU	Velocidad [m/s] FCR	Calidad del H° con FCR
P1	P1	0,0 %	3741	Buena	3741	Buena
PP2	PF2	1,0 %	N/A	N/A	3415	Regular
PP3	PF3	2,0 %	N/A	N/A	3639	Regular
PP4	PF4	3,5 %	2546	Pobre	3558	Regular
PP5	PF5	5,0 %	3377	Regular	3516	Regular
PP6	PF6	6,0 %	3344	Regular	3415	Regular
PP7	PF7	7,0 %	2274	Pobre	3642	Regular
PP8	PF8	8,0 %	2464	Pobre	3513	Regular
PP9	PF9	9,0 %	3177	Regular	3188	Regular
PP10	PF10	10,0 %	3143	Regular	3053	Regular

La velocidad de pulso ultrasónico, según los distintos porcentajes de adición de caucho, se ilustra en la figura 5.12.

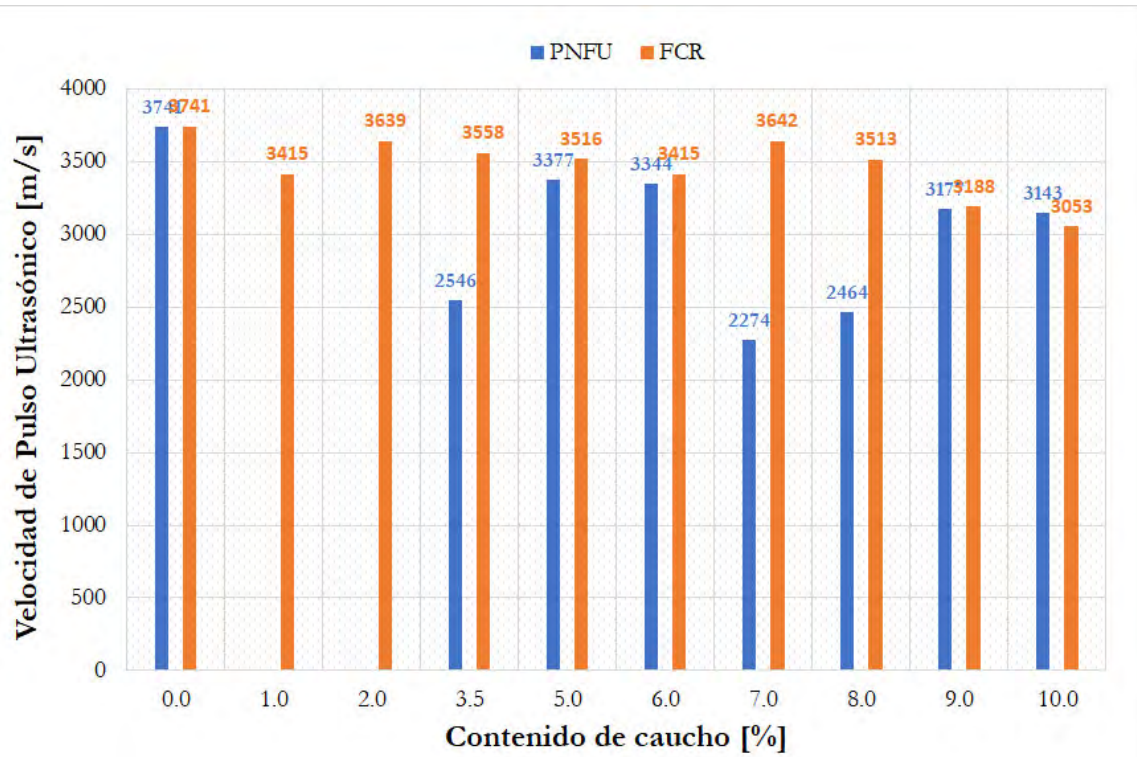


Figura 5.12. Velocidad de pulso ultrasónico de hormigones con caucho

Capítulo VI

ANALISIS DE RESULTADOS**6.1. Densidad**

Respecto a las densidades teóricas determinadas, se pudo observar y, como era previsible, que a medida que aumentó el porcentaje de caucho adicionado, la densidad disminuyó. Para el caso de la máxima adición considerada (10%), la densidad disminuyó un 16,6% respecto al hormigón patrón.

Todas las densidades determinadas presentaron valores que se corresponderían con la de un hormigón de densidad normal (CIRSOC 201, 2005).

6.2. Consistencia

Para porcentajes mayores de 7% de PNFU se presentó una disgregación del caucho con la pasta cementicia. Esto se vio en los residuos sobrantes de la máquina hormigonera usada tras finalizada la preparación de las probetas, como se ilustra en la figura 6.1.



Figura 6.1. Material disgregado en la máquina hormigonera

Al mencionado comportamiento, se le atribuyen dos posibles factores. El primero de ellos es un efecto adverso provocado por la utilización del fluidificante, por un comportamiento incompatible con el caucho. Se genera una disgregación en la pasta cementicia y es la causal de que el caucho no se integre correctamente al conjunto. Un segundo análisis se centra en las formas y propiedades

superficiales de las partículas de caucho, donde no presenta una rugosidad superficial suficiente como para garantizar la adherencia entre las partículas y la pasta cementicia. Este último efecto adverso también fue observado por Witoszek Schultz et al. (2004).

Se destaca también una tendencia a la disminución gradual del asentamiento de la mezcla en estado fresco, a medida que se incrementa el porcentaje de caucho como adición para mezclas con FCR (ver Figura 5.2).

Esta disminución se podría deber a la menor disponibilidad de pasta cementicia a medida que se incrementa la adición de caucho y, en consecuencia, menor capacidad de lubricación. Esto se sustenta a partir de observar en la Tabla 3.8 las cantidades de cemento y agua (pasta cementicia) que forman parte de los hormigones de estudio.

6.3. Compresión axial

Se puede observar una reducción significativa de la resistencia media a compresión, que crece con el aumento del contenido de caucho, donde para la máxima adición (10%), la disminución de la resistencia resultó del orden del 50% respecto al hormigón de referencia. Sin embargo, si se limita la cantidad de caucho incorporado al 5%, y si se considera que la planta elaboradora opera en Modo 1 (CIRSOC 201, 2005), pueden obtenerse hormigones de resistencia que cumplen con el límite inferior de 20 MPa establecido en la reglamentación sismorresistente (INPRES CIRSOC 103 Parte II, 2005).

La disminución en la resistencia a compresión puede deberse a varios factores, uno de ellos podría ser que el caucho adicionado presenta una baja densidad en comparación con los agregados convencionales. Otra razón podría estar asociada a los poros generados en el mezclado como consecuencia de la inclusión de partículas de caucho, lo cual origina una disminución de la densidad del hormigón adicionado resultante. Esta porosidad podría estar debilitando al hormigón y con ello disminuyendo su resistencia a la compresión.

Un efecto importante en la reducción de la resistencia a compresión puede ser el comportamiento muy diferente de dos materiales que deben estar adheridos y trabajar solidariamente, como son el caucho y la pasta cementicia. El caucho sometido a determinadas cargas, tiende a deformarse por sus propiedades elásticas, sin embargo, la pasta que lo envuelve, no reacciona del mismo modo. Esto produce tensiones internas dentro del hormigón que facilita la aparición de fisuras en la interfaz caucho-pasta cementicia, generando una zona de debilitamiento frente a sollicitaciones de compresión.

6.4. Tracción por compresión diametral

Para este parámetro, se observa nuevamente una disminución de la resistencia a medida que se incrementó la adición de caucho. No obstante, las pérdidas de resistencia fueron menos significativas que lo sucedido para la compresión. Para la máxima adición (10%), la disminución de la resistencia resultó del orden del 30%.

El caucho actúa como un material blando y podría comportarse como una resistencia a la propagación de grietas y con ello, podría tener mayor resistencia a tracción. Pero los resultados muestran lo contrario. Sabido es que en los hormigones convencionales la zona débil resulta ser la interfaz pasta-agregado. En el caso de los hormigones adicionados con caucho esta situación podría potenciarse debido a la supuesta falta de cohesión entre este y la pasta cementicia, favoreciendo con ello la presencia y propagación de fisuras en dicha interfaz.

6.5. Tracción por flexión

En el caso de tracción por flexión, se puede notar una vez más, una disminución en la resistencia a medida que se incrementó la cantidad de adición de caucho. Para la máxima adición (10%) la disminución para el caso de adición de PNFU resultó del orden del 46%, mientras que, para adición de FCR resultó del orden del 34%.

6.6. Módulo de elasticidad

En la determinación del módulo de elasticidad se observó, en la mayoría de los casos, la correspondencia entre los valores obtenidos empírica y experimentalmente. Conforme el porcentaje de adición se incrementó, el módulo de elasticidad disminuyó. Para el caso de la máxima adición (10%), la disminución del módulo de elasticidad respecto al hormigón patrón, resultó del orden del 30% para la determinación empírica y del 40% para la determinación experimental.

6.7. Permeabilidad al aire

Se puede notar un incremento paulatino en la permeabilidad al aire a medida que se aumenta el porcentaje de caucho incorporado, alcanzando un incremento del 42% respecto al hormigón patrón, para un 10% de adición de FCR. Esto se podría deber a varios factores, el caucho generalmente se agrega en forma de partículas o polvo a la mezcla de hormigón. Estas partículas ocupan espacios

dentro de la matriz cementicia y pueden generar porosidad adicional. Estos poros podrían permitir que el aire se mueva más fácilmente a través del material, lo que aumentaría la permeabilidad.

Otro factor podría ser la interacción química entre el caucho y los componentes del hormigón, la cual podría provocar cambios en las propiedades físicas del material. Dependiendo de la cantidad de caucho utilizado y las características específicas de la mezcla de hormigón, esta interacción podría afectar la estructura interna del hormigón y aumentar su permeabilidad.

6.8. Capacidad y coeficiente de succión capilar

A medida que se fue incrementando la adición de caucho, se pudo observar un aumento paulatino en la capacidad de succión capilar, alcanzando un incremento máximo del 24% para adición de PNFU y del 32% para FCR, con respecto al hormigón patrón.

Estos incrementos en la capacidad de succión podrían deberse a que, cuando se incorpora caucho al hormigón, las partículas de este crean poros adicionales en la matriz, lo que aumentaría su capacidad de absorber agua.

De los resultados indicados, se observa que la adición de FCR da lugar a hormigones más porosos, y con ello, más propensos al ingreso de agentes agresivos.

Respecto al coeficiente de succión capilar para $t^{0,25}$, nuevamente se observa un mejor comportamiento en los hormigones con adiciones de PNFU. El incremento máximo del coeficiente para esta adición resultó ser del 40% con respecto al hormigón patrón, en tanto que resultó del 88% para adición de FCR. Se observa entonces que en los hormigones con adición de FCR el mecanismo de transporte asociado a la succión se desarrollaría a una velocidad mayor que en el caso de PNFU.

Por último, los resultados obtenidos para el coeficiente de succión capilar para $t^{0,5}$, permiten establecer que las mezclas adicionadas serían apropiadas para la rehabilitación estructural en condición de exposición medioambiental del tipo A1 (CIRSOC 201, 2005).

6.9. Ultrasonido

La velocidad de traspaso de pulso ultrasónico fue disminuyendo con el incremento de adición de caucho hasta registrar una reducción del 18% aproximadamente para la adición máxima (10%). Dado que la velocidad de traspaso es dependiente de la densidad del material, se observa en ese sentido, una correspondencia con los valores de densidades oportunamente determinadas, donde para el 10% de adición, la densidad disminuyó un 17%.

Los valores de velocidad de pulso ultrasónico permitieron considerar en general una calidad del hormigón del tipo regular (Malhotra, 1985).

Capítulo VII

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**7.1. Conclusiones**

Se observa que el hormigón con caucho adicionado en sus dos formas de coprocesamiento tuvo una disminución en los valores de resistencias a compresión axial con respecto al hormigón patrón, a medida que el contenido de caucho se fue incrementando.

Para el caso de la máxima adición considerada del 10% (4,84% del hormigón), dicha resistencia disminuyó en el orden de la mitad de la obtenida para el hormigón de referencia. Aun así, en el caso de porcentajes medios de adición del 5% (2,42% del hormigón), se obtuvieron resultados de resistencias a compresión acordes a lo requerido en la reglamentación sismorresistente actualmente vigente en nuestro país.

En el análisis de la resistencia a tracción, se pudo apreciar una disminución toda vez que se incrementó la adición de caucho. Esto se correspondió con lo observado para la resistencia a la compresión.

Respecto a la durabilidad, la incorporación de caucho dio lugar a un hormigón con mayor porosidad, y con ello, a un incremento en los mecanismos de transporte asociados a la succión capilar y a la permeabilidad. No obstante, y para el caso de porcentajes medios de adición del 5% (2,42% del hormigón), este incremento resultó del orden del 20% con respecto al hormigón de referencia.

En lo referente al del módulo de elasticidad se observó que conforme el porcentaje de adición se incrementó, el módulo de elasticidad disminuyó. Para el caso de la máxima adición del 10% (4,84% del hormigón), la disminución del módulo de elasticidad respecto al hormigón patrón, resultó del orden de entre el 30% y el 40% aproximadamente.

Los hormigones adicionados con PNFU y FCR tuvieron un comportamiento físico-mecánico similar. Frente a ello y dado el menor impacto que implica el coprocesamiento del FCR, sería esta la opción más apropiada a utilizar como adición.

Por último, la viabilidad de poder incorporar adiciones de caucho aún en pequeñas cantidades (5%) y en su forma más simple (FCR), permitiría obtener hormigones de características resistentes adecuadas para el uso como material en rehabilitaciones estructurales, y al mismo tiempo, contribuir a la sustentabilidad del medio ambiente por encontrar una alternativa para la deposición final a este residuo.

7.2. Trabajos futuros

Con el fin de ampliar los resultados obtenidos previamente, así como las ventajas y desventajas tecnológicas de los hormigones con caucho reciclado como adición, se plantea un listado de ensayos e investigaciones futuras a desarrollarse:

- Análisis del comportamiento frente a diferentes mecanismos de degradación material.
- Análisis del comportamiento termoacústico.
- Comportamiento al fuego de los hormigones con caucho.
- Evaluación del efecto granulométrico de la adición del caucho en el comportamiento de hormigones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211-1, (2009).** “Práctica estándar para seleccionar proporciones para hormigón normal, pesado y masivo”.
- ADEFA, Asociación de Fabricantes de Automotores (2016, 2021).** Anuarios Parque Automotor en Argentina.
- ANDRADA C., MUGETTI V., BOSSIO F., (2018).** “Morteros sustentables con reemplazo de agregado fino por caucho molido”. VIII Congreso Internacional y 22° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarría, 7 al 9 de noviembre.
- ANDRADA C., MUGETTI V., GUTIERREZ F., RAGGIOTTI B., LUDUEÑA F., (2019).** “Morteros sustentables: Estudio de adherencia de morteros con incorporación de caucho reciclado”. III Encuentro Latinoamericano y Europeo sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles (EUROelecs 2019), Paraná y Santa Fe, 22 al 25 de mayo.
- BACA ZANS M. y YEPEZ FUENTES R., (2022).** “Análisis comparativo de las propiedades físico – mecánicas de un mortero patrón; y un mortero sustituyendo el peso del agregado con caucho reciclado en porcentajes de 7%, 10% y 13%”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Andina del Cusco, pp. 1-223.
- BATALLANOS POZO C. y ROMERO ZENTENO A., (2020).** “Propiedades del mortero utilizando caucho pulverizado de neumáticos”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, pp. 1-18.
- BENITEZ A., POLZINETTI M., AGNELLO J., (2013).** “Alternativas para el aprovechamiento de material particulado de caucho en mezclas de hormigón poroso”. UT Tecnología del Hormigón – Centro de Investigación y Desarrollo en Construcciones.
- BENITEZ A., POLZINETTI M., AGNELLO J., (2013).** “Desarrollo de mezclas de hormigón con la adición de partículas de caucho”. UT Tecnología del Hormigón – INTI Construcciones.
- CHIMBORAZO AZOGUE L., CAISA YUCAILLA E., MIRANDA LÓPEZ R., (2017).** “Trituración de neumáticos reciclados como desencadenantes en los procesos industriales en la Provincia de Tungurahua”. Revista Publicando, ISSN-e 1390-9304, Vol. 4, N°12, 2, pp. 427-439.
- CICA, Centro de Información sobre Contaminación de Aire, (1997).** "Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas". Office of Research and Development Washington, EPA-600/R-97-115 pp. 17-19.
- CIRSOC 201, (2005).** “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”.
- CONEXIONRECICLADO.COM.AR** <https://conexionreciclado.com.ar/normativa-reciclaje-de-neumaticos-fuera-de-uso-en-argentina/> (Acceso 28/3/2023).
- CORINALDESI V., DONNINI J., (2019).** “Waste rubber aggregates”, New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete, pp. 87-119.
- DIARIO LOS ANDES, (2016).** “Cada año se desechan 8000 toneladas de neumáticos en Cuyo”. Sociedad. (<https://www.losandes.com.ar/en-cuyo-se-desechan-al-ano-8-000-toneladas-de-neumaticos/>) (Acceso 28/3/23).

- ESTRADA RIVERA J. C., (2016).** “Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho”, Tesis Maestría, Escola de Camins, UPC Barcelona Tech, pp. 1-77.
- FERNÁNDEZ TORREZ L., AQUINO ROCHA J., CAYO CHILENO N., (2022).** “Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del residuo de caucho de neumático como reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón”. Revista Hábitat Sustentable, ISSN 0719-0700, Vol. 12, N°2, 2, pp. 52-65. <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.04>
- GARTNER A., (2011).** "Estudio sobre tasa de motorización. Relaciones y determinantes”, Centro Tecnológico de Transporte, Tránsito y Seguridad Vial. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda.
- GERGES N., ISSA C., FAWAS S., (2018).** “Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties”, Case Studies in Construction Materials. Volume 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00184>.
- GRIFFITH A. A., (1921).** "The phenomena of rupture and flow in solids”. Philosophical Transactions of the Royal Society, A221: 163-198.
- GUZMAN M., MALDONADO N., AFFRANCHINO G., (2018).** Libro: Reusable and Sustainable Building Materials in Modern Architecture. Capítulo 6: Comprehensive Evaluation for Mortars and Concretes Incorporating Wastes. IGI Global book series Advances in Civil and Industrial Engineering. (ACIE) (ISSN: 2326-6139; e ISSN:2326-6155).
- INPRES CIRSOC 103 Parte II, (2005).** “Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, Construcciones de Hormigón Armado”.
- IRAM 1512, (2013).** “Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos”.
- IRAM 1534, (2018).** “Hormigón de cemento. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayo de compresión y de tracción por compresión diametral”.
- IRAM 1536, (1978).** “Hormigón fresco de cemento Portland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono”.
- IRAM 1540, (2004).** “Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 µm, por lavado”.
- IRAM 1546, (2013).** “Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión”.
- IRAM 1547, (1992).** “Ensayo de tracción por flexión”.
- IRAM 1601, (2012).** “Agua para morteros y hormigones de cemento portland”.
- IRAM 1627, (1997).** “Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones”.
- IRAM 1658, (1995).** “Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral”.
- IRAM 1683, (1990).** “Método para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos”.
- IRAM 1709, (2002).** “Hormigón. Método para el uso de encabezado con placas de elastómero en la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas”.
- IRAM 1871, (2021).** “Hormigón. Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido”.

- IRAM 1892, (2022).** “Método de ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad al aire (kT) del hormigón endurecido”.
- IRAM 50000, (2000).** “Cemento. Cemento para uso general”.
- KANTRO D. L., (1980).** “Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste. A miniature slump test”, Cement, Concrete and Aggregates. CCAGDP, Vol. 2, No. 2, Winter 1980, pp. 95-102.
- KHATIB J., (2009).** “Sustainability of Construction Materials”. Woodhead Publishing Lt.
- KHATIB Z., BAYOMY F., (1999).** “Rubberized Portland Cement Concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 11, No. 3, 1999, pp. 206-213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:3\(206\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(206)).
- LEY 9.143 (2019).** “Plan de Manejo Sustentable de Neumáticos Fuera de Uso”. Publicada en el Boletín Oficial, 22 de febrero de 2019, Mendoza, Argentina.
- LÓPEZ KUCHUDIS B., ISAS PEDRAZA R., PALAZZI S., (2020).** “Inclusión de fibras de caucho para mejorar la durabilidad en hormigones”. IX Congreso Internacional y 23º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2 al 6 de noviembre.
- LYDON F. D., y BALENDRAN R. V., (1986).** “Some observations on elastic properties of plain concrete”. Cement and Concrete research, 16(3), 314-324.
- MARTÍN G., FUSARI F., QUIROGA G., PELEGRINA A., GUZMÁN M., MALDONADO N., MARTÍN P., (2016).** “Caracterización de morteros adicionados para la elaboración de un mampuesto sustentable”. T1-24. VII Congreso Internacional y 21º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Salta, 28 al 30 de septiembre. Editores: Edgardo F. Irassar; Viviana Rahhal; Luis P. Traversa. – 1ª ed revisada. – Buenos Aires, 2016. ISBN 978-987-21660-9-0.
- MALDONADO N., GUZMÁN M., AFFRANCHINO G., CASTRO G., MALDONADO I., GONZÁLEZ DEL SOLAR G., CUETO A., (2014).** “Comportamiento de la Lixiviación en Hormigones Fabricados con Residuos Industriales”. Memorias VI Congreso Internacional y 20º Reunión Técnica “Ing. Alberto S. C. Fava”. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Concordia, Entre Ríos, 22 al 24 de octubre. Editor: J. Sota. ISBN 978-987-21660-7-6, pp. 437-444.
- MALDONADO N., GUZMÁN M., OROPEL M., AFFRANCHINO G., CASTRO G., BELMAR C., GONZÁLEZ DEL SOLAR G., CUETO A., PETRONI F., (2013).** “Utilización de un Residuo Siderúrgico en Hormigones Confeccionados con Agregados Rodados Locales”. Actas EnIDI Desarrollos e Investigaciones Científico-Tecnológicas en Ingenierías 2013, septiembre 2013, Los Reyunos, San Rafael, Mendoza. ISBN 978-950-42-0152-6, pp. 58-69.
- MALDONADO N., OLIVENCIA L., (1992).** “Techniques used to repair seismic-resistant masonry walls”. Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España (julio 1992). Proceedings, Volumen 9, pp. 5389-5394.
- MALDONADO N., PIZARRO N., MICHELINI R., GUZMÁN M., (2008).** “An approach of service life in repair of structures with concrete due natural hazards”. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II. Theme 3: Concrete repair, rehabilitation and retrofitting. Seismic Retrofit and Rehabilitation.152.pdf. Editores: M. G. Alexander, H. D. Beushausen, F. Dehn & P. Moyo. CRC Press/Balkema Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3. Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR), Cape Town, South Africa, 24 al 26 de noviembre, pp. 1129-1133.

MALHOTRA V. M., (1985). “Nondestructive methods for testing concrete”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

MEDIO AMBIENTE. SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE. “Resolución 523/2013 Manejo Sustentable de Neumáticos”. (<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resolución-523-2013-214412/texto>) (Acceso 28/3/23).

MÉNDEZ D. y PANELLA F., (2020). “Estudio de Comportamiento y Desempeño de Hormigones con Fibras de Caucho Reciclado”, Tesis de Grado, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, pp. 1-41.

MÉNDEZ F., NÚÑEZ M., GALLELLI A., TORNELLO M., MARTÍN P., MALDONADO N., (2022). “Mampuestos sustentables, ecológicos y portantes para la construcción de muros resistentes a la acción sísmica”. X Congreso Internacional y 24° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, 31/10/2022 al 04/11/2022. Memorias ISBN 978-987-47035-6-9, pp. 513-520.

MENDOZA.GOV.AR. <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/mendoza-tratará-neumaticos-fuera-de-uso/> (Acceso 28/3/2023).

MICHELINI R., OLIVENCIA L., MALDONADO N., (1987). “Ductilidad disponible en muros de mampostería reparada obtenida de resultados experimentales”. I Congreso Internacional Ciudad y Arquitectura en Área Sísmica, Mendoza, Argentina (octubre 1987).

MICHELINI R., OLIVENCIA L., FORNI D., MALDONADO N., (1991). “Recuperación de estructuras aporricadas con relleno parcial de mampostería afectadas por acciones horizontales”. I Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y III de Control de Calidad, Córdoba, Argentina (abril 1991). Tomo II.

OIKONOMOU N., MAVRIDOU S., (2009). “The use of waste tyre rubber in civil engineering works”, Sustainability of Construction Materials, pp. 213-238.

OLIVARES CARMONA D., (2016). “Planta de reciclaje de neumáticos de caucho. Comercialización de miga de caucho”, Tesis Maestría Universidad de Chile.

PALENCIA J. C., MALDONADO N., DAGNE C., (2012). “Reutilización de mampuestos como nuevo material de cerramiento para construcciones sismorresistentes”. VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras CINPAR 2012, 4 al 6 de junio, La Plata, Argentina.

PEÑALOZA GARZÓN C., (2015). “Comportamiento mecánico de una mezcla para hormigón reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen del agregado fino para un hormigón con fines de uso estructural”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, pp. 1-71.

PÉREZ OYOLA J. C. y ARRIETA BALLÉN Y. L., (2017). “Estudio para caracterizar una mezcla de hormigón con caucho reciclado en un 5% en peso comparado con una mezcla de hormigón tradicional de 3500 PSI”, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, pp. 1-81.

TOPÇU I., UNVERDI A., (2018). “Scrap tires/crumb rubber”, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, pp. 51-77.

TOPÇU I., UYGUNOGLU T., (2016). “Sustainability of using waste rubber in concrete”, Sustainability of Construction Materials (Second Edition), pp. 597-623.

TORRENT R., (2013). “Permeabilidad al aire del hormigón – Método Torrent (kT)”.

URRA CARRASCO I., (2006). “Hormigón con caucho: Determinación del módulo de elasticidad”, Tesis de Grado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, pp. 1-87.

WITOSZEK SCHULTZ B., HERNÁNDEZ OLIVARES F., ALONSO FERNÁNDEZ M., BOLLATI PATO M., PARGA LANDA B., BARLUENGA BADIOLA G., BENITO MORO C., (2004). “Hormigón con fibras de caucho de recuperación de neumáticos usados y de propileno, diseño del firme de hormigón de caucho”, VI Congreso Nacional de Firmes, pp. 1-15.