

Evaluación de Zeolita Natural, Polvo Volcánico, Polvo de Ladrillo de Arcilla, Partículas de Nano Sílice y Áridos Reciclados en El Diseño de Pavimentos Aeroportuarios en FAARFIELD 2.0

Evaluation of Natural Zeolite, Volcanic Ash, Brick Dust, Nano Silica Particles and Recycled Aggregates in the Desing of Aiport Pavements in FAARFIELD 2.0.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Blas Quezada ^{1,*}, Lucas Zúñiga ¹, Loreto Araya ¹, Pablo Medina ¹, Leonardo Brescia ¹.

¹Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Obras Civiles, Santiago, Chile.

Historial del artículo:

Recibido

14-11-2023

Aceptado

16-04-2024

Publicado

25-08-2024

Palabras Clave:

Pavimento

aeroportuario

Zeolita natural

Polvo volcánico

Polvo de ladrillo de
arcilla

Nano sílice

Áridos reciclados

FAARFIELD 2.0

Emisiones CO₂

Article history:

Received

14-11-2023

Accepted

16-04-2024

Available

25-08-2024

Keywords:

Airport pavement

Natural zeolite

Volcanic ash

Brick dust

Nano silica

Recycled

aggregates

FAARFIELD 2.0

CO₂ emissions

Resumen

Se evalúa el diseño de pavimentos aeroportuarios flexibles y rígidos utilizando tanto materiales tradicionales como no convencionales en sus mezclas, empleando el software FAARFIELD 2.0, y basándose tanto en estudios académicos que analizan el uso de estos últimos en mezclas de pavimento, como en información proporcionada por la Dirección de Aeropuertos sobre estructuras de pavimento existentes en necesidad de rediseño. Se verifica que las mezclas utilizadas se ajusten a los requisitos establecidos por las normativas nacionales para su uso en pavimentos aeroportuarios. El objetivo general es evaluar la viabilidad de diseño de estas mezclas en FAARFIELD 2.0, siguiendo las disposiciones de la normativa internacional vigente. Con espesores estructurales determinados y factores de emisión de CO₂/m³ asociados a la producción de mezclas de hormigón, se calcula la emisión total de CO₂ en 1 m³ de cada mezcla y en la cantidad total de material requerida para su hipotética implementación en una estructura de pavimento rígido. Las mezclas evaluadas consideran zeolita natural chilena + RAP para pavimentos flexibles, y polvo de ladrillo de arcilla + RCA, polvo volcánico + RCA y nanopartículas de sílice para pavimentos rígidos. Se utiliza una mezcla de hormigón tradicional como referencia para comparar resultados de emisiones de CO₂. Los resultados obtenidos indican la posibilidad de modelar estos materiales en FAARFIELD 2.0, aunque se requieren estudios adicionales para determinar su nivel óptimo de uso y lograr diseños eficientes. Asimismo, se destaca la importancia de actualizar las normativas nacionales para regular el uso de estos materiales en pavimentos aeroportuarios.

Abstract

The design of flexible and rigid airport pavements is evaluated using both traditional and unconventional materials in their mixtures, utilizing the FAARFIELD 2.0 software, and based on academic studies that analyze the use of these materials in pavement mixtures, as well as information provided by the Dirección de Aeropuertos regarding existing pavement structures in need of redesign. It is verified that the mixtures used comply with the requirements established by national regulations for their use in airport pavements. The general objective is to assess the design feasibility of these mixtures in FAARFIELD 2.0, following the provisions of current international regulations. With determined structural thicknesses and CO₂/m³ emission factors associated with the production of concrete mixtures, the total CO₂ emissions are calculated for 1 m³ of each mixture and for the total amount of material required for its hypothetical implementation in a rigid pavement structure. The evaluated mixtures consider Chilean natural zeolite + RAP for flexible pavements, and brick dust + RCA, volcanic ash + RCA, and silica nanoparticles for rigid pavements. A traditional concrete mixture is used as a reference to compare CO₂ emission results. The results obtained indicate the feasibility of modeling these materials in FAARFIELD 2.0, although further studies are required to determine their optimal level of use and achieve efficient designs. Additionally, the importance of updating national regulations to govern the use of these materials in airport pavements is emphasized.

* Corresponding author at: Blas Quezada, Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Obras Civiles, Av. Victor Jara 3659, Santiago, Chile. E-mail address: blas.quezada@usach.cl

RIOCI

Journal homepage: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 02, pp. 1–9, Agosto 2024

1. Introducción.

Las estructuras aeroportuarias son vitales para la conectividad de un país con el resto del mundo, permitiendo la entrada y salida de personas tanto por motivos turísticos como comerciales, y posibilitan la importación y exportación de productos desde o hacia el extranjero. El crecimiento urbano y económico ha dejado en evidencia la necesidad de contar con infraestructura aeroportuaria capaz de satisfacer la demanda de vuelos nacionales e internacionales, y que resista las cargas provenientes de aeronaves cada vez más modernas y de mayor envergadura.

En Estados Unidos, la Federal Aviation Administration (FAA) regula el diseño y construcción de aeropuertos mediante las normativas denominadas Advisory Circulars (AC). En cuanto al diseño de pavimentos, la FAA proporciona una metodología de diseño de capas y comportamiento de pavimento en su software de diseño propio FAARFIELD. Actualmente, el diseño de pavimentos aeroportuarios en Chile sigue siendo mayormente ejecutado de acuerdo con la norma AC 150/5320-6F en conjunto con FAARFIELD 1.42, ambos en desfase de una generación en cuanto a lo que versiones disponibles se refiere. De igual modo, las Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección de Aeropuertos (DAP) que regulan las características y construcción de las capas superficiales de pavimentos aeroportuarios tanto flexibles como rígidos y que están actualmente vigentes (ETG N°1 y ETG N°16 respectivamente), se basan en versiones desfasadas de la normativa AC 150/5370-10, que concentra las mismas disposiciones discutidas en un único documento.

Por otra parte, la producción de materiales como el cemento y las mezclas asfálticas conlleva un alto consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Ministerio del Medioambiente, 2017). Una opción para reducir la emisión de CO₂ en la producción de pavimentos es incorporar áridos reciclados en las mezclas, lo cual mejora la sostenibilidad del proceso de adquisición y transporte de áridos. Para pavimentos asfálticos, se puede considerar el uso de zeolita natural y áridos reciclados para obtener mezclas asfálticas en tibio (WMA), lo que reduce la temperatura de producción y las emisiones de GEI (Valdés Vidal et al., 2020). Para pavimentos rígidos, se pueden incorporar materiales como las nano partículas de sílice con el fin de mejorar su comportamiento ante la abrasión y mejorar la durabilidad de la mezcla (Salas Valdés et al., 2020), o materiales cementicios suplementarios como el polvo de ladrillo de arcilla (CBP) (Letelier., 2018) o el polvo de ceniza volcánica (VP) (Letelier., 2018), que dadas sus características puzolánicas pueden suplir parte de la pérdida de resistencia mecánica originada por el uso de áridos reciclados en el hormigón y contribuir a para reducir la emisión de CO₂ asociada a su proceso productivo.

Considerando que tanto la normativa como el software de diseño son de origen extranjero, que estos están en constante revisión, y que actualmente no se cuenta con una versión en español de la normativa más actual que adapte el diseño a la realidad constructiva chilena, se hace necesario evaluar la respuesta de diseño de pavimentos aeroportuarios que ofrece FAARFIELD 2.0 en conjunto con la versión de la normativa más actualizada disponible, a partir de las propiedades mecánicas de mezclas de pavimento tradicionales y mezclas que contienen materiales no convencionales para determinar la factibilidad de uso de estos últimos en este tipo de estructuras. Adicionalmente, se analizan las emisiones de CO₂ (Vicuña., 2022) asociadas a la producción de los componentes de las mezclas de pavimento rígido consideradas para generar recomendaciones de diseño en virtud de los resultados de diseño estructural y su emisión de asociada de este gas.

Este estudio se basa en información proporcionada por la Dirección de Aeropuertos y en estudios teóricos y prácticos sobre el uso de materiales no convencionales en mezclas de pavimento urbano o probetas de laboratorio ejecutados por profesionales afines al área de la ingeniería civil, y no pretende ser una respuesta definitiva sobre el uso de éstos, sino representar una primera aproximación al potencial de utilización de los materiales estudiados en pavimentos aeroportuarios. Se considera el Aeropuerto Internacional Comodoro Arturo Merino Benítez y el aeropuerto El Loa, Calama, para estudiar estructuras existentes de pavimento rígido y flexible respectivamente, con diferentes niveles de tráfico aéreo. No se incluye un análisis económico debido a que parte de los materiales discutidos no se explotan de manera comercial actualmente.

2. Metodología.

Los materiales seleccionados para este estudio se eligieron considerando que su uso como alternativa constructiva plantea beneficios medioambientales en comparación con las mezclas tradicionales de pavimentos rígidos y flexibles. Dada la alta emisión de CO₂ asociada a la producción de cemento, se consideró para pavimentos rígidos el uso de CBP y de VP, ambos materiales cementicios suplementarios con bajas emisiones de gases asociados a su procesamiento, y que, en uso conjunto con árido de hormigón reciclado (RCA), disminuyen la porosidad de la mezcla, suplen la disminución de propiedades mecánicas producto del reúso de material árido y reducen la cantidad de cemento utilizada. El CBP empleado en este estudio proviene de residuos de ladrillos industriales de escombros de demolición (Letelier., 2018). Por su parte el VP se obtuvo de depósitos de tefra caída proveniente del volcán Calbuco (Letelier., 2018). Se considera también el uso de partículas de nano sílice coloidal provenientes del hiperplastificante Viscocrete 40 – HCSL de SIKA en reemplazo de una fracción de cemento, que contribuye a

mejorar la durabilidad de la mezcla (Salas Valdés., 2020). Para pavimentos flexibles se considera el uso de zeolita natural chilena extraída de la cantera Quinamávida, VII región de Chile, en conjunto con pavimento asfáltico reciclado (RAP) resultando en la obtención de WMA, que, en comparación con una mezcla asfáltica en caliente tradicional, presenta una importante reducción en gases de efecto invernadero emitidos (20 – 35%) (Valdés Vidal., 2020).

Dado que actualmente no existen normativas que regulen el uso y las características de la zeolita natural, el CBP y el VP para su uso en el diseño de pavimentos, la Tabla 1 y la Tabla 2 concentran las propiedades físicas y químicas que los describen.

Tabla 1. Propiedades de la zeolita natural. (Fuente: Elaboración propia con base G. Valdés-Vidal, A. Calabi-Floody y E. Sanchez-Alonso, 2018)

Identificación del mineral	
Descripción	Zeolita natural chilena
Nombre químico	Aluminosilicatos de calcio y magnesio hidratado
Tamaño de partícula	0 – 0,173 [mm]
Características mineralógicas	
Principal componente zeolítico	Clinoptilolita – modernita
Otros componentes	Plagioclasa, esmectita y cuarzo
Color	Marfil
Características fisicoquímicas	
Composición química (%)	SiO ₂ : 64,19 TiO ₂ : 0,51 Al ₂ O ₃ : 11,65 Fe ₂ O ₃ : 2,53 MnO: 0,03 MgO: 0,66 CaO: 3,42 Na ₂ O: 0,75 K ₂ O: 1,60 P ₂ O ₅ : 0,03 PxC: 14,64
Capacidad de intercambio de catión (cep)	86,82 – 112,88 [cmol/kg]
Superficie específica (método Bet)	446 – 480 [m ² g ⁻¹]
Estabilidad térmica	< 450[°C]
Estabilidad química	8,9
Densidad	0,661 [g/cm ³]
Humedad natural	12,6%

Tabla 2. Composición química del cemento, polvo ladrillo arcilla y polvo volcánico. (Fuente: Elaboración propia en base a V.Letelier, JM. Ortega, P.Muñoz, E. Tarela y G.Moriconi, 2018)

Composición Química	Cemento Puzolánico	Polvo Ladrillo Arcilla	Polvo Volcánico
SiO ₂	38,06%	41,47%	57,76%
Al ₂ O ₃	8,88%	39,05%	14,54%
CaO	40,92%	0,63%	8,27%
Fe ₂ O ₃	2,83%	12,73%	11,00%
SO ₃	2,33%	1,59%	-
MgO	1,59%	-	2,44%
Na ₂ O	1,75%	-	2,41%
K ₂ O	1,62%	2,81%	2,14%
TiO ₂	-	1,03%	1,42%
CuO	-	0,70%	-

El estudio se desarrolló contrastando toda característica de la mezcla seleccionada y de sus materiales con lo requerido según las especificaciones técnicas generales N°1 y N°16 de la Dirección de Aeropuertos. La Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 concentran las características principales de estas, incluyendo además los límites establecidos en la normativa pertinente según tipo de mezcla para su uso como capa superficial de pavimento aeroportuario. Una vez verificadas las propiedades de la mezcla, se utiliza el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica, o, en caso de pavimento rígido, la resistencia a la flexotracción (Tabla 8), para caracterizar el comportamiento del material en FAARFIELD 2.0 empleando una “capa definida por el usuario” para el diseño de pavimento asfáltico o utilizando el valor de la resistencia a la flexotracción como dato de entrada para el diseño de la capa superficial en pavimento de hormigón.

A partir de la información provista por la DAP, se selecciona una estructura de pavimento con vida útil residual que evidencie la necesidad de un rediseño en un periodo proyectado de 20 años hacia el futuro, se extraen la proyección de demanda y la flota de diseño determinada para el aeródromo en cuestión y utilizada en la estructura de pavimento seleccionada; así como también la capacidad de soporte de la subrasante (CBR / k) y las características geométricas y mecánicas de sus capas estructurales. Los datos anteriores se ingresan en el software para ejecutar el “diseño por espesor” y determinar así la respuesta de diseño ante las distintas mezclas consideradas. Con el fin de evaluar el impacto en el espesor estructural de las mezclas que consideran materiales no convencionales, los espesores estructurales se contrastan con el rediseño propuesto por la DAP para las estructuras analizadas.

Tabla 3: Características de la mezcla WMAR20 junto con verificación con ETG N°1.
(Fuente: Elaboración propia con base en G. Valdés-Vidal, A. Calabi-Floody y E. Sanchez-Alonso, 2018 y ETG N°1.)

Características de mezcla	Unidad	WMAR20	ETG N°1
Temperatura	[°C]	135	175
Total de bitumen contenido (% por peso de la mezcla)	[%]	5,4	5,0 - 7,5
Zeolita Natural	[%]	0,6	-
RAP (Pavimento asfáltico reciclado)	[%]	20	≤ 30
Huecos de aire	[%]	4,4	2,0 - 5,0
VMA (Vacíos agregado mineral)	[%]	15,1	15

Tabla 4. Dosificación de las mezclas CBP10-RCA30 y VP15-RCA30 junto con verificación con ETG N°16 (Fuente: Elaboración propia en base a V.Letelier, JM. Ortega, P.Muñoz, E. Tarela y G.Moriconi, 2018.)

Dosificación	Unidades	CBP10- RCA30	VP15- RCA30	ETG N°16
Agregado Grueso Natural (NA) (6.3-19.0 mm)	[kg]	644	644	Granulometría ¾" – N°4
Árido Grueso Reciclado (RCA) [30%] (6.3-19.0 mm)	[kg]	276	276	
Cemento	[kg]	343,8	324,7	≥ 300 kg/m3
Polvo Ladrillo de Arcilla (CBP) [10%]	[kg]	38,2	-	-
Polvo de Ceniza Volcánica (VP) [15%]	[kg]	-	57,3	-
Arena	[kg]	877	877	-
Agua	[L]	203	203	-
Cono de Abrams	[cm]	4,0	4,0	2,5 – 5,0
Razón Agua / (cemento + agregado fino)	[CTE]	0,42	0,42	0,45

Tabla 5. Cantidad de puzolana en el cemento, CBP y VP, junto con verificación con ETG N°16.

Composición de la puzolana	Cemento [%]	CBP [%]	VP [%]	ETG N°16	ASTM C618
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	49,77	93,25	83,30	30-50%	>50%

Tabla 6. Porcentaje de álcali equivalente en el cemento, CBP y VP, junto con verificación con ETG N°16.

Álcali equivalente en cemento	Cemento [%]	CBP [%]	VP [%]	ETG N°16
%Na ₂ O+0,658*%K ₂ O	2,81	1,85	3,82	< 0,6

Tabla 7. Dosificación de la mezcla con Nano Sílice y hormigón de control, junto con verificación con ETG N°16. (Fuente: Elaboración propia en base a F. Salas Valdés, S. Santiagos Hevia, 2020 y ETG N°16)

Dosificación	Unidades	Nano sílice	Hormigón de control	ETG N°16
Arena	[kg]	762,0	762,0	(0,15 - 9,5mm)
Cemento	[kg]	356,4	360,0	≥ 300 kg/m ³
Gravilla 3/4	[kg]	582,0	582,0	(4,75 – 25,4mm)
Grava 1 1/2	[kg]	616,0	616,0	(4,75 – 25,4mm)
Agua libre	[L]	156,4	158,0	-
Plastocrete HP450	[kg]	1,98	1,98	-
Viscocrete 40 HSCL	[kg]	7,2	-	-
Cono de Abrams	[cm]	5,0	5,0	2,5 – 5,0
Razón Agua / (cemento + agregado fino)	[CTE]	0,44	0,44	0,45
Resistencia a la Flexotracción	[MPa]	5,2	4,9	-

Finalmente, a partir de los espesores estructurales obtenidos y de la dosificación de cada mezcla de pavimento rígido estudiada, se hace uso de factores de emisión de CO₂/m³ asociados a la producción de mezclas de hormigón (Tabla 9) para determinar la emisión total de este gas en 1 m³ de mezcla, y en la cantidad total de material necesario para su hipotética implementación en la estructura de pavimento analizada. Se consideró el uso de una mezcla de hormigón de control diseñada para su uso específico en pavimento aeroportuario para la comparación de resultados de emisiones de CO₂, puesto que no se cuenta con la dosificación del rediseño propuesto por la DAP para la estructura estudiada.

Tabla 8. Características de las mezclas utilizadas

Mezclas	Tipo de pavimento	Función	Parámetro de diseño en FAARFIELD 2.0
Zeolita natural + RAP	Flexible	Aditivo	Módulo de elasticidad: 9,085 [MPa]
Polvo de Ladrillo de Arcilla + RCA	Rígido	Material cementicio suplementario	Resistencia a la flexotracción: 3,64 [MPa]
Polvo volcánico + RCA	Rígido	Material cementicio suplementario	Resistencia a la flexotracción: 3,45 [MPa]
Nano sílice	Rígido	Material cementicio suplementario	Resistencia a la flexotracción: 5,20 [MPa]
Hormigón de control	Rígido	-	Resistencia a la flexotracción: 4,90 [MPa]

Tabla 9. Emisiones de CO₂ de materiales que componen las mezclas utilizadas. (Fuente: Elaboración propia en base a S. Vicuña, C. Marín, A. Pica y A. Rivera, 2022 y a V. Letelier, JM. Ortega, P. Muñoz, E. Tarela, I. Henríquez y G. Moriconi, 2018)

Componente	KgCO ₂ /t
Cemento	581
CBP	28
VP	6
Nano sílice	845
Aditivo para hormigón	3715
Agregado grueso natural (NCA)	10
Agregado grueso reciclado (RCA)	14
Agregado fino (arena)	28
Agua	0,3

3. Análisis de resultados.

El efecto de los materiales no convencionales en el diseño se evalúa en virtud de los resultados de modelación estructural, según tipo de pavimento y material considerado capa superficial.

3.1. Espesores estructurales: Pavimentos flexibles.

La Figura 3.1, muestra un aumento de espesor estructural de 5,7 [cm] entre el rediseño estructural de pavimento propuesto por la DAP y la mezcla asfáltica con zeolita natural chilena + RAP. Dado que el diseño de pavimentos flexibles de FAARFIELD 2.0 se realiza buscando un espesor de base granular que satisfaga las necesidades estructurales, el espesor de capa superficial no varía independiente de las características de ésta.

La Figura 3.2 presenta como curva todas las combinaciones posibles del par módulo de elasticidad – espesor de base granular

permitidas por FAARFIELD para la configuración estructural estudiada. Como se observa en esta, la implementación de la mezcla con materiales no convencionales significa un aumento del espesor estructural debido a la menor rigidez que ésta presenta en comparación con el diseño con materiales tradicionales propuesto por la DAP, sin embargo, se destaca que el módulo de elasticidad de la mezcla con zeolita natural + RAP se encuentra dentro del rango de valores permitidos por FAARFIELD para su modelación estructural.

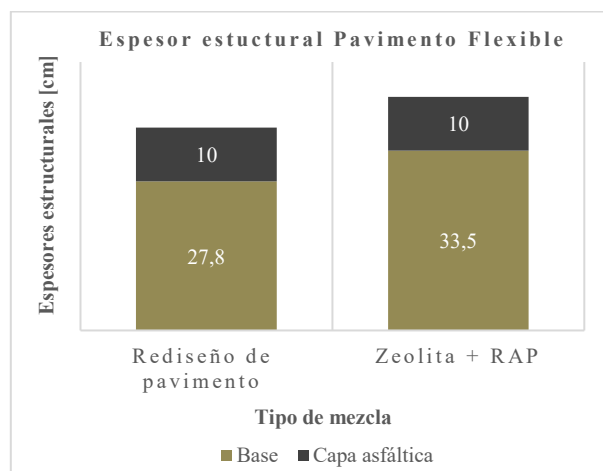


Figura 1.1. Gráfico espesores de base obtenidos. (Fuente: Elaboración propia.)

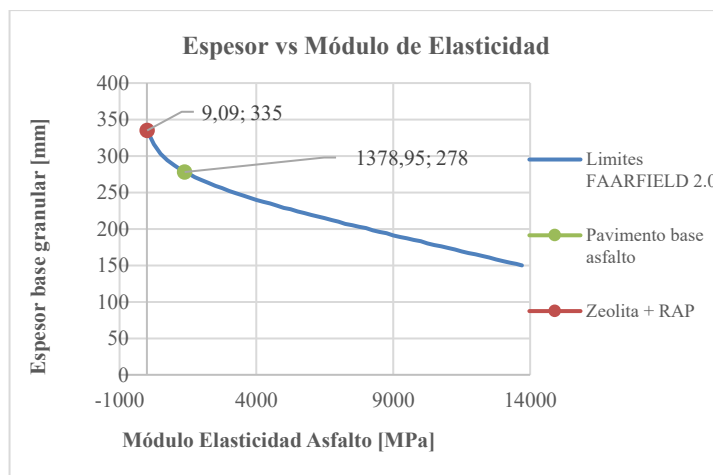


Figura 3.2. Gráfico espesor v2 resistencia. (Fuente: Elaboración propia.)

3.2. Espesores estructurales: Pavimentos rígidos.

Se evidencia en la Figura 3.3, el cambio de espesor estructural según mezcla de pavimento utilizada. La mezcla de la que mayor espesor estructural resulta corresponde a la mezcla con polvo volcánico + RCA, en la que se da un aumento de espesor estructural de 10,8 [cm] frente al rediseño de pavimento propuesto por la DAP. Por otro lado, se presencia una disminución de espesor de 5,5 [cm] cuando se analiza la mezcla que contiene partículas de nano sílice.

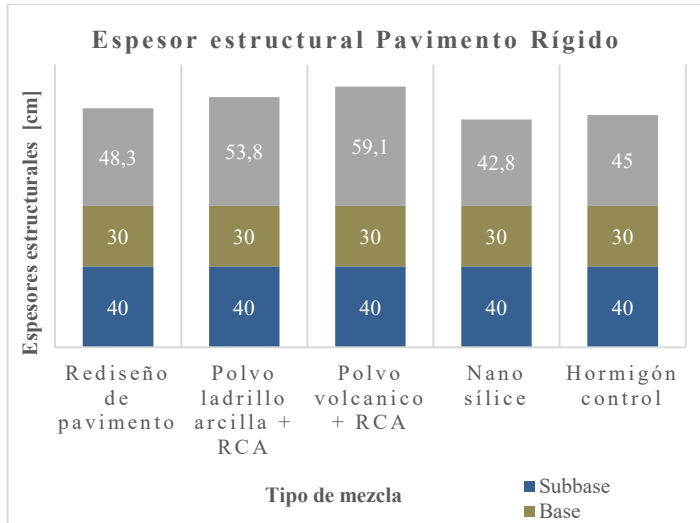


Figura 1.2. Gráfico espesores de capa superficial obtenidos. (Fuente: Elaboración propia).

Al igual que para pavimentos flexibles, la curva graficada en la Figura 3.4, presenta toda posible combinación de resistencia a la flexotracción versus espesor de capa superficial para la configuración estructural estudiada. Las mezclas que consideran el uso de áridos reciclados presentan los espesores estructurales más altos, resultados originados de una menor resistencia mecánica en contraste con las mezclas tradicionales de pavimento y la mezcla que considera el uso de nano sílice. Como se observa, las mezclas estudiadas presentan valores de resistencia a la flexotracción que se encuentran dentro de los límites permitidos por FAARFIELD para una capa superficial de pavimento rígido, posibilitando la ejecución de modelaciones estructurales con éstos.

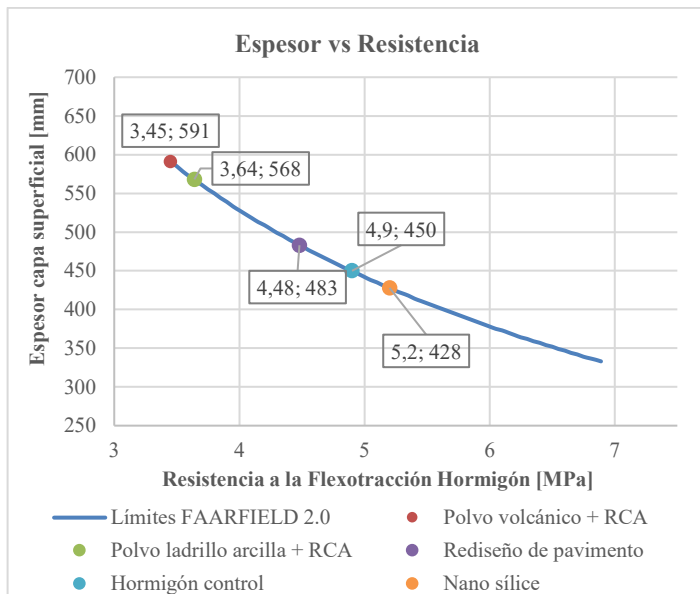


Figura 1.3. Gráfico espesor vs resistencia, mezclas de hormigón. (Fuente: Elaboración propia.)

3.2.1. Emisión de CO₂ en proceso de producción de mezclas de hormigón.

En base a los factores de emisión de CO₂ se contrastan resultados de emisiones de CO₂ del proceso de producción de las mezclas de pavimento que consideran materiales no convencionales con las del hormigón de control. Se omite el análisis de emisiones de CO₂ para pavimentos flexibles en virtud de que la información disponible para la realización de este documento no resulta suficiente para entregar resultados conclusivos al respecto, sin embargo, de contar con la información necesaria, el procedimiento de cálculo para pavimentos rígidos es aplicable en pavimentos flexibles.

Para esto se compararon los totales de emisión de CO₂ de la producción de las mezclas en 1 metro cúbico y para la totalidad de material necesario para su implementación en la estructura modelada en pavimento rígido considerando los espesores obtenidos anteriormente del diseño en FAARFIELD 2.0.

3.2.1.1. Emisiones de CO₂ en la producción de un metro cúbico de mezcla.

Como se puede observar en la Figura 3.5 las emisiones en 1 metro cúbico de pavimento de hormigón para el caso del polvo de ladrillo de arcilla + RCA y polvo volcánico + RCA se ven reducidas con respecto al hormigón de control en un orden de 5,7% y 10,4% respectivamente, mientras que para la nano sílice se ve aumentada en 1,6%. Se destaca también que esta última supera las emisiones de CO₂ de la mezcla de control, y que aunque no se esperan reducciones importantes de CO₂ debido a que no se utiliza RCA en la mezcla, las emisiones de este gas asociadas a la producción de nano sílice son suficientes como para aportar casi 4 kgCO₂/m³ por sobre las emisiones del hormigón de control, lo que apunta a que, aunque la producción de cemento es el factor que más impacta ambientalmente, el reemplazo de la porción de cemento por nano sílice no es suficiente para disminuir las emisiones de una mezcla tradicional. Por otro lado, el uso de nano sílice también implica mayores emisiones resultantes en la mezcla en comparación con las de CBP y de VP, que provienen de procesos productivos que liberan cantidades mucho menores de este gas.

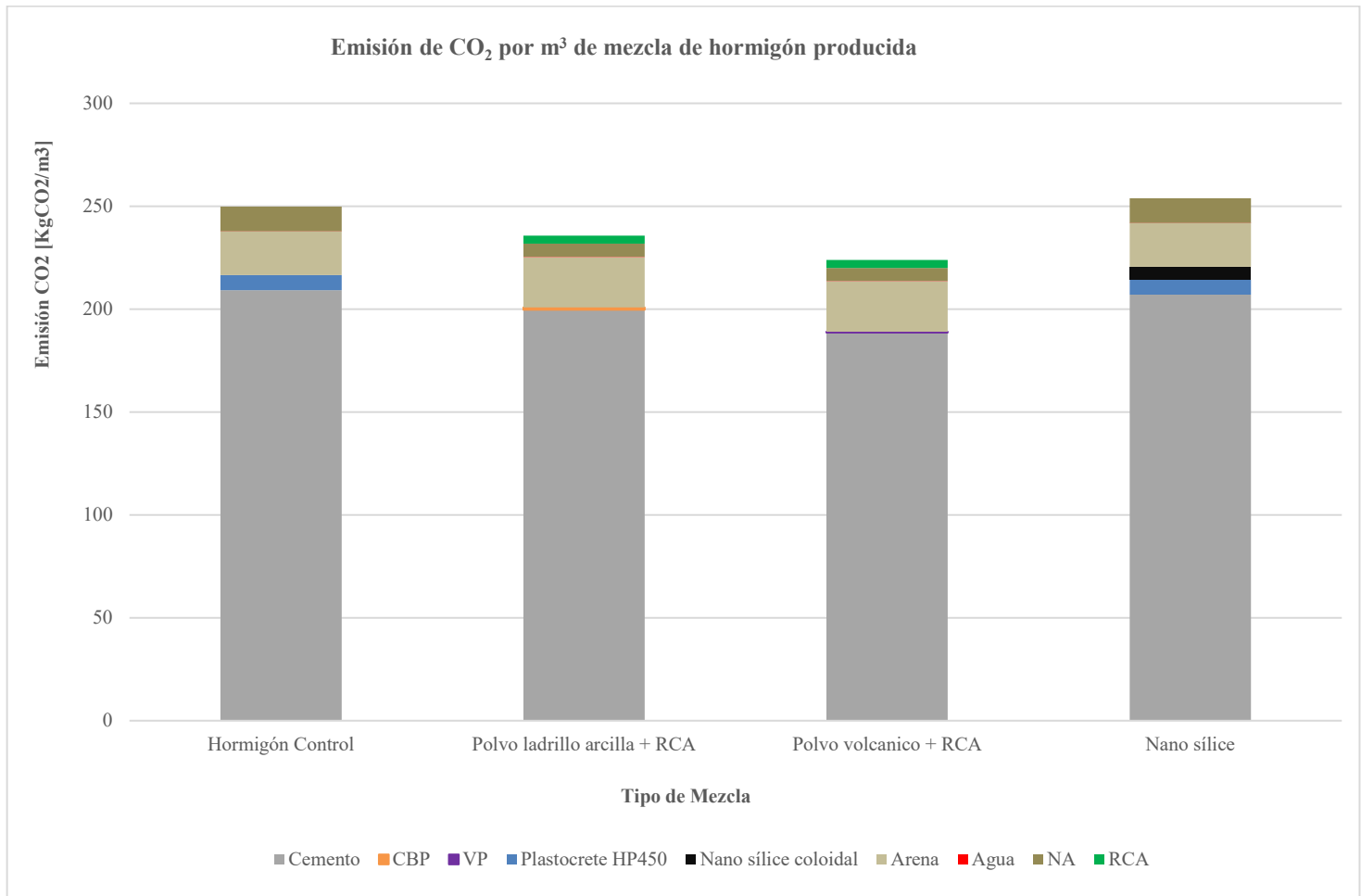


Figura 1.4. Gráfico de emisiones de CO₂ en 1m³ de pavimento de hormigón. (Fuente: Elaboración propia.)

3.2.1.2. Emisiones de CO₂ para la estructura de pavimento rígido. La estructura modelada corresponde a la calle de rodaje Alfa del aeropuerto internacional Comodoro Arturo Merino Benítez, cuyas dimensiones son de 3505,7 [m] x 23,5 [m], que representa un área común de valor $A = 82.384 \text{ [m}^2\text{]}$. A partir del área y de los resultados de espesor estructural, se determina el volumen de la capa superficial para todas las mezclas. Con el volumen resultante y la emisión de CO₂ para un metro cubico mezcla, se determina el valor total de la emisión de CO₂ que se produce al implementarlas como pavimento rígido aeroportuario.

Se observa en la Figura 3.6 a diferencia del caso anterior para 1 metro cubico, las mezclas aumentaron sus emisiones de CO₂ al implementarlas en la calle de rodaje alfa en el orden de un 13,2% para polvo de ladrillo de arcilla + RCA, 19,4% para polvo de ladrillo + RCA y 10,6% para la nano sílice con respecto al hormigón de control. Este resultado es esperable en consideración de que el uso de materiales no convencionales en todos los casos aumentó el espesor de capa superficial del pavimento, y con ello la cantidad de cemento que se necesitará para su construcción, que como

vimos en el análisis anterior, es el material que más emisiones de CO₂ produce.

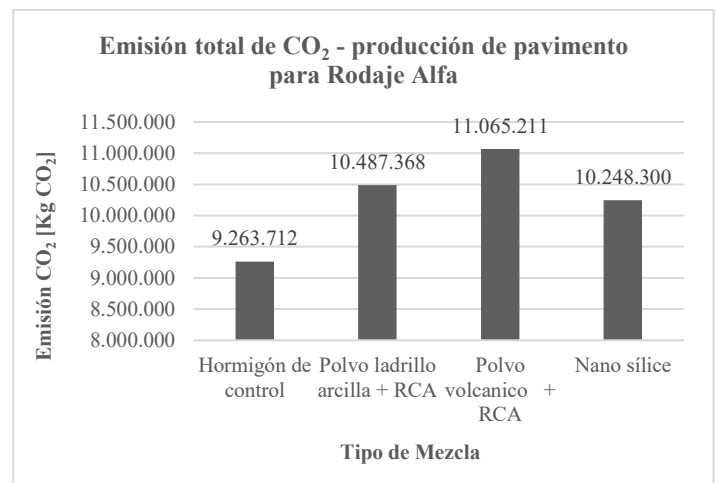


Figura 1.5. Gráfico emisiones CO₂ de las mezclas evaluadas en el Rodaje Alfa. (Fuente: Elaboración propia.)

4. Conclusiones.

El desarrollo de infraestructura aeroportuaria plantea el desafío de garantizar un uso sustentable de los recursos no renovables, asegurando su disponibilidad para las generaciones futuras. Para lograrlo, es fundamental aprovechar los avances técnicos y tecnológicos para obtener diseños estructurales óptimos. Asimismo, es necesario evaluar el uso de materiales de construcción no tradicionales, los cuales permiten reutilizar desperdicios de construcción y demoliciones, a la vez que contribuyen a reducir la emisión de gases perjudiciales durante el proceso de extracción, transporte y procesamiento de materiales.

En resumen, si bien los resultados presentados en este estudio no son concluyentes acerca del uso de materiales no convencionales en pavimentos aeroportuarios, destacan la importancia de optimizar los diseños de infraestructura para reducir las emisiones de gases dañinos y sugieren la revisión de las normativas de diseño actuales, a fin de considerar materiales que no cumplan con las especificaciones de las normativas vigentes.

La realización de este estudio permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Conclusión 1. La mezcla que contiene zeolita natural + RAP cumple con los requisitos para su implementación en pavimentos aeroportuarios según la normativa ETG N°1.
- Conclusión 2. La mezcla que contiene partículas de nano sílice cumple con los requisitos para su implementación en pavimentos aeroportuarios según la normativa ETG N°16.
- Conclusión 3. El CBP y VP no cumplen las características necesarias para ser utilizados como materiales cementicios suplementarios según la ETG N°16, sin embargo, sí cumple los requisitos especificados en la normativa internacional ASTM C618 para su uso como tal.
- Conclusión 4. Los espesores estructurales resultantes de la implementación de mezclas con materiales no convencionales representan aumentos que son consistentes con las características mecánicas que estos poseen. Lo anterior es atribuible al origen documental de las mezclas utilizadas y el propósito con el cual fueron estudiadas en la investigación de la que se originan, así como también al hecho de que estas no fueron diseñadas para su uso específico en pavimentos aeroportuarios.
- Conclusión 5. El hecho de poder obtener resultados de modelación estructural significa que es posible considerar materiales no convencionales dentro de las mezclas de pavimento que reporten beneficios medioambientales y que funcionen dentro de los parámetros establecidos en las normativas pertinentes y los de FAARFIELD 2.0, y que resultan en espesores construibles considerando cierto grado de inseguridad debido a la poca información

relacionada al control del uso y comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones climáticas, vida de servicio, etc.

- Conclusión 6. El uso de materiales no convencionales resulta en una mayor emisión de gas de CO₂ en las mezclas de pavimento rígido comparado con las emisiones del hormigón de control. Este resultado se explica en consideración del aumento de espesor asociado a su uso cuando se analiza la cantidad de CO₂ emitida en la cantidad de material necesaria para materializar la calle de rodaje Alfa.
- Conclusión 7. Los resultados de emisión de CO₂ para cada mezcla en 1 m³ evidencian una importante reducción de kgCO₂ emitido debido al uso de materiales cementicios suplementarios y RCA, materiales que presentan factores de emisión menores que su alternativa tradicional, brindando relevancia al uso de estos desde una perspectiva medioambiental.
- Conclusión 8. En porcentajes bajos de remplazo de cemento, el origen del material cementicio suplementario cobra relevancia en consideración de que el uso de nano sílice, material proveniente de un proceso de producción industrial, presenta mayores niveles de emisión en 1 m³ que la mezcla de control.

5. Agradecimientos.

Los autores agradecen la colaboración de la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas por su colaboración en el desarrollo de este estudio al proporcionar la información referente a las estructuras de pavimento que fueron modeladas y las cargas a las que estas se ven afectas.

6. Referencias.

- Asadollahfardi, G., Katebi, A., Taherian, P., & Panahandeh, A. (2021). *Environmental life cycle assessment of concrete with different mixed designs*. International Journal of Construction Management, 21(7), 665-676. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1579015>
- Dirección de Aeropuertos. (2014). *ETG N°1: Para pavimentos bituminosos tipo mezcla en planta*. ETG N°1. Versión B. Dirección de Aeropuertos.
- Dirección de Aeropuertos. (2016). *ETG N°16: Para pavimento de hormigón hidráulico*. ETG N°16. Versión B. Dirección de Aeropuertos.
- Dirección de Presupuestos. (2020). *Ficha de definiciones estratégicas año 2019 – 2022*. Ficha A1. Santiago. Recuperado el 10 de marzo de 2023 de: https://www.dipres.gob.cl/597/w3-multiptyvalues-15400-25190.html#gestion_instrumentos_8
- Farooq, M. A., & Mir, M. S. (2017). *Use of reclaimed asphalt*

pavement (RAP) in warm mix asphalt (WMA) pavements: a review. Innovative infrastructure solutions, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0058-7>

- Federal Aviation Administration. (2015). *Change 2 to Airport Master Plans*. AC 150/5070-6B. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration. (2018). *Airport Terminal Planning*. AC 150/5360-13A. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration. (2021). *Airport Pavement Design and Evaluation*. AC 150/5320-6G. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Fořt, J., Vejmelková, E., Koňáková, D., Alblová, N., Čáchová, M., Keppert, M., Rovnaníková, P., & Černý, R. (2018). *Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: Functional and environmental aspects*. Journal of Cleaner Production, 194, 714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.181>
- Letelier, V., Ortega, J., Muñoz, P., Tarela, E., & Moriconi, G. (2018). *Influence of Waste Brick Powder in the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete*. Sustainability, 10(4), 1037. <https://doi.org/10.3390/su10041037>
- Letelier, V., Ortega, J., Tarela, E., Muñoz, P., Henriquez Jara, B., & Moriconi, G. (2018). *Mechanical Performance of Eco-Friendly Concretes with Volcanic Powder and Recycled Concrete Aggregates*. Sustainability, 10(9), 3036. <https://doi.org/10.3390/su10093036>
- Manual de ayuda FAARFIELD 2.0 (2020).
- Martínez Soto, A., Calabi Floody, A., Valdes Vidal, G., Huckle, A., & Martínez Toledo, C. (2023). *Life Cycle Assessment of Natural Zeolite-Based Warm Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement*. Sustainability, 15(2), 1003. <https://doi.org/10.3390/su15021003>
- Ministerio del Medioambiente. (2017). *Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017 – 2022*. Santiago. Recuperado el 10 de marzo de 2023 de: <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/1423>
- OACI. (2016). *Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional: Aeródromos (7ª ed.)*. ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN INTERNACIONAL CIVIL INTERNACIONAL. ISBN 978-92-9258-035-3.
- OACI. (2005). *Manual de diseño de aeródromos Parte 2: Calles de rodaje, plataformas y apartaderos de espera (4ª ed.)*. Organización de Aviación Civil Internacional. ISBN 92-9194-567-6.
- PITRA. (2011). *Mezclas asfálticas tibias*. Boletín Técnico N°15. Vol. 2. Programa de infraestructura del transporte.
- Salas Valdés, F., & Santiago Hevia, S. (2020). *Validación del uso de partículas de nano sílice en hormigón para pavimentos de aeropuertos*. Tesis para optar al título de

Ingeniero Civil en Obras Civiles inédita. Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles. Santiago.

- Valdés Vidal, G., Calabi Floody, A., Sanchez Alonso, E., Díaz, C., & Fonseca, C. (2020). *Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt*. Construction and building materials, 262, 120069. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120069>
- Valdes Vidal, G., Calabi Floody, A., & Sanchez Alonso, E. (2018). *Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction*. Construction and Building Materials, 174, 576-585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.149>
- Vicuña, S., Marín, C., Pica, A., & Rivera, A. (2022). *Simulaciones del precio social del carbono en el sector de la infraestructura en países seleccionados de América Latina*. Recuperado el 14 de marzo de 2023 de: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48293>
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). *A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete*. Resources, conservation, and recycling, 171, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>