



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Utilización de fibras naturales para el desarrollo de morteros reforzados con fibras

Trabajo realizado por:

Ninel Estefanía Santillán Alarcón

Dirigido por:

Ignacio Segura Pérez

Josep Claramunt

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, 8 de mayo de 2020

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

Agradecimientos

De manera muy especial a mis padres por ser el más grande ejemplo. Por motivarme a ser mejor y capaz de lograr todo lo que me proponga.

A mis tutores Ignacio y Josep, por llevarme por el camino del conocimiento y por la respuesta a cada una de mis dudas y dificultades.

También quiero agradecer a todos mis docentes, me han enseñado tanto y han hecho que esta parte de mi vida sea una de las más especiales, tan llenas de conocimiento.

A cada persona del laboratorio, técnicos, compañeros de trabajo, quienes me guiaron en cada ensayo, por darme aliento.

A mis compañeros del master, mis compañeros de piso, por ser la familia que forme en esta ciudad y que han llenado mi corazón, con cada palabra, gesto y cariño.

Gracias UPC por ser la institución que me abrió la mente, que me abrigó y lleno mis días de alegría, también días de estrés, pero sobre todo de mucho aprendizaje.

Resumen

La incorporación de fibras en el hormigón y morteros es un tema que ha sido estudiado en los últimos años. El uso de fibras naturales vegetales ha sido de gran interés, debido a que, no solo mejoran las características mecánicas de los morteros de cemento, sino que además son renovables, la disponibilidad es alta y económicamente baratos, lo que hace que el uso de fibras vegetales sea más generalizado.

A pesar de que la mayoría de las investigaciones realizadas muestran resultados alentadores, también es cierto que el uso de las fibras vegetales en matrices de cemento presenta deficiencias en cuanto a su durabilidad. La principal causa de esta pérdida de resistencia se debe a la alcalinidad de la matriz y los cambios volumétricos de las fibras, además de la predisposición que existe al ataque de microorganismos en ambientes húmedos.

Con este trabajo se pretende comparar el uso de las fibras vegetales y sintéticas en matrices cementicias, teniendo en cuenta que las características post-fisuración se modificarán y con el uso de fibras naturales se reduce el consumo de materias primas no renovables, por lo que compararán las propiedades en estado fresco de morteros con fibras, determinando que material más sostenible.

En esta investigación se fabricaron mezclas de referencia con dos tipos de aglomerante, cemento portland tipo I y con adiciones de metacaolín, además de 2 tipos de fibras, en proporciones del 1, 2 y 4% de volumen respecto al mortero. Se seleccionó las fibras por su disponibilidad en laboratorio, propiedades mecánicas, costes. Las fibras fueron naturales y de PVA (acetato de polivinilo). Se determinaron el escurrimiento y la densidad en estado fresco. Además, se realizó el estudio de sostenibilidad con la metodología y programa MIVES desarrollados en la Universitat Politècnica de Catalunya.

Abstract

Fiber compositions in concrete and mortars is a subject that has been studied in recent years. The use of natural fibers is of great interest, because not only do they improve the mechanical characteristics of cement mortars, but they are also renewable, availability is high and inexpensive, which makes the use of sea fiber more widespread.

Despite the fact that most of the research carried out shows encouraging results, it's also true that the use of vegetable fibers in cement matrices presents deficiencies in terms of durability. The main cause of this loss of resistance is due to the alkalinity of the matrix and that the fibers undergo volumetric changes, in addition to the predisposition that exists to attack by microorganisms in humid environments.

The objective of this work is to compare the use of vegetable and synthetic fibers in cementitious matrices, taking into account that the post-cracking characteristics will be modified and with the use of natural fibers the consumption of non-renewable raw materials will be reduced, therefore that will compare the properties in the fresh state of mortars with fibers, determining which material is more sustainable.

In this research, reference mixtures were made with two types of binder, Portland cement type I and with metakaolin additions, in addition to 2 types of fibers, in proportions of 1, 2 and 4% by volume with respect to the mortar. Fibers can be selected for their laboratory availability, mechanical properties, costs. The fibers were natural and made of PVA (polyvinyl acetate). Fresh runoff and density were determined. In addition, the sustainability study was carried out with the MIVES methodology and program developed by Universitat Politècnica de Catalunya.

Índice General

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos:	2
1.3.1. Objetivo General:.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos:	2
1.4. Metodología	2
Capítulo 2: Estado del Arte	4
2.1. Introducción	4
2.2. Clasificación de las fibras naturales.....	4
2.3. Fibras naturales vegetales	5
2.4. Tipos de fibras naturales de origen vegetal.	5
2.4.1. Cábano.....	5
2.4.2. Kenaf.....	6
2.4.3. Lino.....	6
2.4.4. Nano fibras de celulosa	6
2.5. Propiedades de las Fibras Naturales.....	7
2.6. Ventajas y Desventajas del uso de fibras vegetales.....	7
2.7. Estructura de la fibra vegetal	8
2.8. Longitud y volumen de fibra incorporada.	9
2.8.1. Longitud de la Fibra	9
2.8.2. Volumen de Fibra	10
2.9. Tratamiento de Fibras.....	10
2.9.1. Tratamientos físicos	11
2.9.2. Tratamientos químicos	11
2.10. Durabilidad de la fibra vegetal dentro de una matriz cementicia.....	12
2.10.1. Proceso de deterioro de la fibra en un medio alcalino	13
2.11. Características del hormigón con fibras	14
2.12. Microfibras para hormigón	15
2.13. Orientación de las fibras.....	15
Capítulo 3: Caracterización de los Materiales.....	17
3.1. Introducción.....	17
3.2. Materiales y Métodos.....	17
3.2.1. Materiales	17
3.2.2. Métodos	19

Capítulo 4: Propiedades de compuestos cementicios con fibras	23
4.1. Introducción	23
4.2. Propiedades de las mezclas de mortero	23
4.3. Resultados y Análisis	24
4.4.1. Características de mezclas fabricadas en laboratorio.....	24
4.4.2. Propiedades en estado fresco de matrices cementicias con fibras.	25
Capítulo 5: Estudio de sostenibilidad, metodología MIVES.....	29
5.1. Introducción.....	29
5.2. Aplicación de la metodología.....	30
5.2.1. Delimitación de la decisión.....	30
5.2.2. Árbol de toma de decisión	31
5.2.3. Funciones de valor de los Indicadores	31
5.2.3.1. Función de valor en S.....	32
5.2.3.2. Función de valor convexa	33
5.2.3.3. Función de valor cóncava	34
5.2.3.4. Función de valor lineal	35
5.2.4. Asignación de pesos	36
5.3. Programación del módulo usuario	39
5.4. Resultados y Análisis	40
5.5. Discusión	43
Capítulo 6: Conclusiones	44
6.1. Conclusión General	44
6.2. Conclusiones Específicas	44
6.3. Futuras líneas de investigación.....	45
Capítulo 7: Referencias Bibliográficas.....	46
ANEJO A: Registro fotográfico de la campaña experimental	51
ANEJO B: Datos y resultados de la campaña experimental	54
ANEJO C: Datos y resultados de indicadores de sostenibilidad en MIVES.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1. Características físico-químicas de las fibras naturales vegetales.....	7
Tabla 2. Propiedades Mecánicas de fibras vegetales	7
Tabla 3. Propiedades mecánicas de compuestos de cemento con adiciones de fibras vegetales.....	12
Tabla 4. Composición química del cemento Portland tipo I	17
Tabla 5. Propiedades de Masterfiber 400	19
Tabla 6. Dosificación inicial de morteros.....	20
Tabla 7. Dosificación real en laboratorio.....	20
Tabla 8. Características morfológicas de los linters de algodón.	22
Tabla 9. Clasificación y denominación en función del escurrimiento (mesa de sacudidas)	23
Tabla 10. Características de mezclas fabricadas	24
Tabla 11. Propiedades en estado fresco de morteros.	25
Tabla 12. Escala de comparación de Saaty.	37
Tabla 13. Porcentaje de pesos de las alternativas.....	38
Tabla 14. Valores de cada indicador de las alternativas.	39
Tabla 15. Densidad de muestras con 0 % y 1% de fibras.....	54
Tabla 16. Densidad de muestras con 2% de fibras.....	54
Tabla 17. Densidad de muestras con 4% de fibras.....	54
Tabla 18. Escurrimiento de muestras de referencia y con 1% de fibras.....	55
Tabla 19. Escurrimiento de muestras con 2% de fibras.	55
Tabla 20. Escurrimiento de muestras con 4% de fibras.	55
Tabla 21. Cuantificación de generación de puestos de trabajo de la fabricación de materias primas de morteros.....	56
Tabla 22. Cuantificación del indicador Generación de puestos de trabajo.	57
Tabla 23. Ponderación del indicador Seguridad durante la construcción.	58
Tabla 24. Cuantificación de indicadores del criterio Consumo de Recursos.....	58
Tabla 25. Indicador de Consumo energético.	59
Tabla 26. Indicadores de emisiones de CO ₂	59
Tabla 27. Indicadores de generación de residuos sólidos.	60
Tabla 28. Cuantificación del indicador Costos directos de construcción.....	60
Tabla 29. Cuantificación de indicador Tiempo de Ejecución de mezclas.	61

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura de la metodología.	3
Figura 2. Clasificación de las fibras para construcción.	4
Figura 3. Estructura de una fibra de vegetal.	9
Figura 4. Grupo de fibras largas de cáñamo en un compuesto cementíceo.	10
Figura 5. Proceso de deterioro de la fibra en un medio alcalino.	13
Figura 6. a) Curva carga-deformación en hormigón (concrete). b) hormigón con fibras (FRC). c) hormigón armado (RC).	14
Figura 7. Representación de micro y macro fibras en el hormigón.	15
Figura 8. Propiedades físicas y granulométricas del metacaolín Peser®.	18
Figura 9. Distribución del tamaño de grano de NORMENSAND.	18
Figura 10. Propiedades de los morteros de referencia: a) Densidad; b) Escurrimiento.	26
Figura 11. Comparación de densidades de morteros con fibras.	26
Figura 12. Escurrimiento del mortero fresco con fibras.	27
Figura 13. Estructura general de la toma de decisión.	30
Figura 14. Árbol de requerimientos de morteros con fibras. Programa MIVES.	31
Figura 15. Funciones de valor en "S": a) creciente; b) decreciente.	32
Figura 16. Asignación de la función de valor en S del indicador "consumo de agua".	33
Figura 17. Funciones de valor convexas: a) creciente; b) decreciente.	33
Figura 18. Programación de la función de valor del indicador densidad.	34
Figura 19. Funciones de valor cóncavas: a) creciente; b) decreciente.	34
Figura 20. Asignación de la función de valor cóncava del indicador "emisiones de CO2".	35
Figura 21. Funciones de valor lineal: a) creciente; b) decreciente.	35
Figura 22. Programación de la función de valor lineal creciente de generación de puestos de trabajo.	36
Figura 23. Matriz de pesos de los indicadores del criterio " Consumo de Recursos".	37
Figura 24. Definición de alternativas con el Módulo Usuario de MIVES.	39
Figura 25. Comparación de los requerimientos de morteros de Referencia.	40
Figura 26. Comparación de mezclas de CEM I y fibras.	41
Figura 27. Comparación de mezclas de CEM I + puzolana y fibras.	42
Figura 28. Comparación de mezclas con 1 y 2% de fibras.	43
Figura 29. Comparación de Criterios de Morteros de Referencia.	62
Figura 30. Comparación de Indicadores de Morteros de Referencia.	62
Figura 31. Comparación de los requerimientos de Morteros y 1% de fibras.	63
Figura 32. Comparación de los requerimientos de Morteros con puzolana y 1% de fibras.	63
Figura 33. Comparación Requerimientos de Morteros de cemento con fibras.	64
Figura 34. Comparación Requerimientos de Morteros de cemento + puzolana con fibras.	64

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

En los últimos años, la industria de la construcción se ha visto obligada a realizar algunos cambios con respecto a la sostenibilidad. Las últimas regulaciones gubernamentales establecen que para el año 2020, todos los edificios nuevos deberán tener una huella de emisiones cercana a 0 (cero) [1], y contribuir activamente al objetivo de descarbonización del 80% para el año 2050. Los edificios deberán estar mejor aislados, obtener su calefacción a partir de fuentes bajas en carbono y ser construidos a partir de materias primas de origen sostenible. [2]

Debidas a las nobles propiedades mecánicas que posee el hormigón, su bajo coste, buenas prestaciones y durabilidad, es el material más utilizado en la industria de la construcción. Sin embargo, el hormigón es un material frágil que exhibe baja resistencia a la tracción, capacidad de deformación, resistencia a la fractura y mala absorción de energía. Las últimas desventajas se pueden mitigar mediante el refuerzo utilizando fibras de acero o sintéticas fabricadas con polipropileno de nailon o PVA (alcohol polivinílico). El uso de acero o fibras sintéticas es costoso y perjudicial para el medio ambiente desde el punto de vista de la producción. [3]

La creciente preocupación ambiental y la conciencia de la contaminación industrial han obligado a las industrias manufactureras y de construcción a buscar materiales innovadores que sean confiables, sostenibles y puedan reemplazar las fibras sintéticas convencionales como refuerzo de materiales estructurales. Las fibras naturales, como el abacá, el cáñamo, coco, la caña guadua, etc., ya se han considerado como alternativas potenciales, dado su respeto por el medio ambiente y su disponibilidad en forma de fibras y el hecho de que pueden extraerse de las hojas, tallos o raíces de las plantas a bajo costo. [4]

El uso de refuerzo de fibra natural, por otro lado, se remonta a casi 5,000 años; las fibras de asbesto se usaron para reforzar las ollas de barro en Escandinavia [5]. Las composiciones de los distintos hormigones encontradas a lo largo de la historia varían según su cronología y locación.

Por ejemplo, los egipcios empleaban morteros de yeso y cal en la construcción de las pirámides entre los años 2550– 2570 A.C [6]. Pero son los romanos quienes dan un paso realmente importante. En primer lugar, poseían un amplio conocimiento de los materiales. En el siglo I A.C. era de conocimiento popular la descripción de las materias primas, dosificaciones y puesta en obra, gracias a escritos como los 10 libros de Vitrubio. El autor, arquitecto e ingeniero, narra a manera de una gran enciclopedia, conocimientos de la época referidos a: arquitectura, materiales de construcción y sus procesos de fabricación, decoración, y armamento militar

Los principales mercados para las fibras naturales que aún permanecen se basan principalmente en los países en desarrollo donde están disponibles localmente y son baratos de adquirir [7]. Sin embargo, el uso de fibras naturales en los países desarrollados sigue siendo limitado, ya que no se ha aceptado plenamente como alternativa a las fibras sintéticas.

1.2. Justificación

Siendo la industria de la construcción responsable del agotamiento de grandes cantidades de recursos no renovables, se ha visto en la necesidad de emplear materiales de construcción basados en recursos renovables, como son las fibras vegetales.

El uso de materia natural en la producción de eco materiales para la industria de la construcción aparece, así como el instrumento necesario para balancear dos problemas al mismo tiempo: la gran demanda elementos prefabricados, que respondan de manera económica y sostenible, y el desperdicio de materia natural valiosa.

Varios autores[8]–[10], hacen referencia a la rápida urbanización en Latinoamérica encontrando que las fibras vegetales pueden ser una solución posible al déficit habitacional, gracias a su bajo costo y a su abundancia sin ser explotada a su máxima capacidad.

Con este preámbulo, el trabajo de fin de máster pretende contribuir a la búsqueda de alternativas constructivas actuales, donde el costo ecológico y económico, se vean reducidos, sin afectar la calidad arquitectónica-constructiva. De igual manera se busca promover el uso de materias primas locales, con un proceso sencillo de fabricación y un menor tiempo de transporte contribuyendo a la disminución de emisión de CO₂.

1.3. Objetivos:

1.3.1. Objetivo General:

Determinar las propiedades de morteros con fibras naturales y compararlas con las fibras de PVA, que medirán la sostenibilidad de los materiales.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- Presentar la evolución histórica de las matrices cementicias reforzadas con fibras, desde sus orígenes a la actualidad, teniendo en consideración el tipo de fibra y comportamiento mecánico deseado.
- Diseñar las mezclas de mortero y fibras, con adición de puzolanas y describir su comportamiento.
- Describir las propiedades en estado fresco de los morteros con distintas fibras.
- Comparar el estudio de sostenibilidad de especímenes de mortero y adiciones de fibras naturales y sintéticas con la Metodología MIVES.

1.4. Metodología

El trabajo se ha estructurado en 6 capítulos. La Figura 1 presenta un resumen de la estructura de cada capítulo que conforma este trabajo.

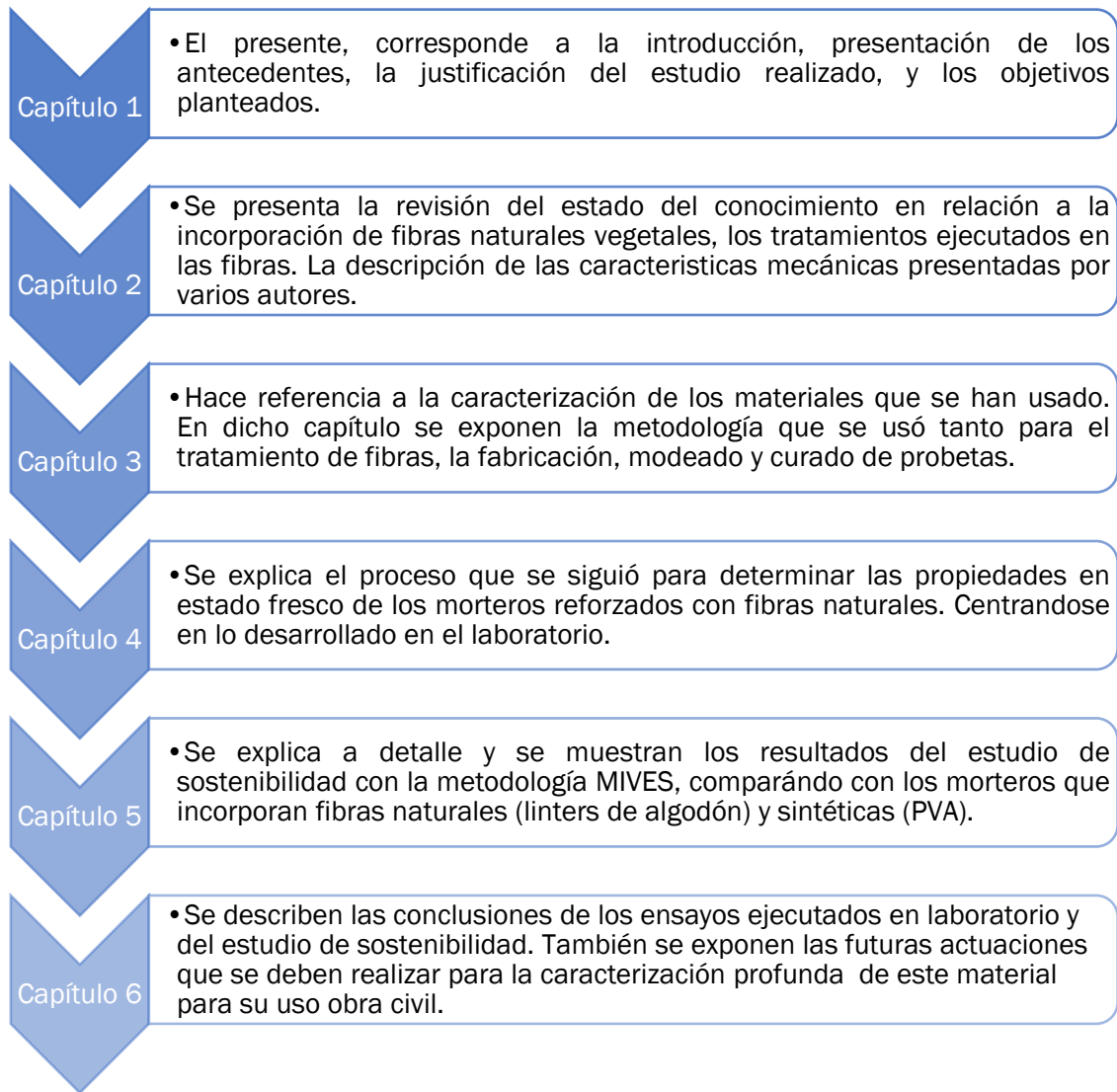


Figura 1. Estructura de la metodología.

Capítulo 2: Estado del Arte

2.1. Introducción

La sostenibilidad fue definida por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo como la satisfacción de las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades[11]. Las demandas de infraestructura construida han generado una importante generación de residuos, energía y consumo de materiales por la industria de la construcción.

Para mejorar la sostenibilidad en el uso de materiales de construcción, la industria constructora debe abarcar la reutilización de los subproductos industriales y los materiales renovables.

La literatura presenta un amplio abanico de estudios que muestran que la ductilidad, la resistencia a la tracción, la tenacidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al impacto y la energía absorbida de los materiales a base de cemento podrían mejorarse significativamente mediante la adición de acero y fibras sintéticas. [12] [13].

La aparición de nuevos materiales, su difusión e incluso su desaparición responden a las exigencias que la sociedad plantea a la técnica. Estos materiales pueden ser de nueva concepción o resultado de un perfeccionamiento de las propiedades de materiales ya existentes. El hormigón reforzado con fibras puede entenderse como resultado de cualquiera de las dos situaciones anteriormente citadas, pues a pesar de ser un hormigón sus características son notablemente distintas a las de los hormigones convencionales.

La incorporación de fibras al hormigón está siendo exhaustivamente estudiado y el ACI, el ASTM, la EHE, la British Standards Institution entre otros, han publicado ya numerosas normas y métodos de experimentación a este respecto [14].

2.2. Clasificación de las fibras naturales.

En la literatura se puede encontrar distintas clasificaciones para fibras destinadas a la construcción. En la Figura 2 se describe la clasificación más empleada por los investigadores del tema.

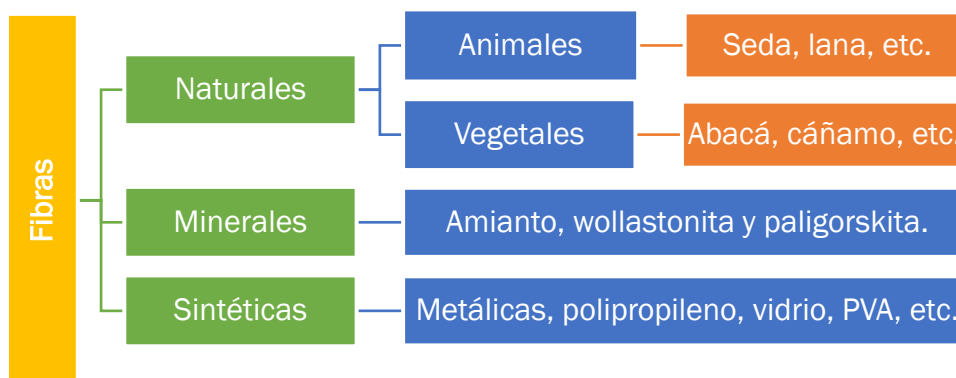


Figura 2. Clasificación de las fibras para construcción.

En este estudio se tomarán en cuenta las fibras naturales vegetales incorporadas en morteros.

Además de esta clasificación podemos encontrar fibras que por su diámetro se clasifican en micro y macro fibras, teniendo micro fibras con diámetros menores a 0.30 mm y macro fibras con diámetros de 0.30 mm o más. [15]

2.3. Fibras naturales vegetales

Históricamente, las fibras naturales vegetales o simplemente fibras naturales eran usadas empíricamente para reforzar varios materiales de construcción, o bien para la producción de material textil.

Las fibras naturales se pueden obtener a un bajo costo usando la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas adecuadas para su obtención, estas fibras son llamadas generalmente fibras naturales no procesadas. Sin embargo, las fibras naturales pueden ser procesadas química o mecánicamente para mejorar sus propiedades, son generalmente de celulosa derivada de la madera. [16]

Las fibras naturales están disponibles en razonables cantidades en todo el planeta, representando así una fuente renovable continua. A finales de los años sesenta, se llevó a cabo una evaluación sistemática de las propiedades de ingeniería de las fibras naturales, y de los compuestos hechos de estas fibras en una matriz de cemento.

Aunque los resultados fueron alentadores ya que se encontró que mejoraban la resistencia a flexión y al impacto del concreto, también se reportaron algunas deficiencias respecto a su capacidad de refuerzo a largo tiempo [17].

2.4. Tipos de fibras naturales de origen vegetal.

Las fibras naturales pueden provenir principalmente del tallo y de las hojas de la planta, también se pueden obtener de la cáscara superficial de algunas frutas. Sin embargo, sólo algunas de estas fibras tienen un verdadero potencial para ser consideradas como refuerzo en el concreto.

A continuación, se describen de manera general las fibras naturales más estudiadas para este fin.

Las fibras de tallo usualmente se extraen de la corteza externa de los tallos de las plantas. Algunos ejemplos de fibras bastas son el yute (*Corchorus olitorius/Corchorus capsularis*), el lino (*Linum usitatissimum*), el abacá (*Musa textilis*) y el kenaf (*Hibiscus cannabinus*).

2.4.1. Cáñamo.

La fibra de cáñamo se obtiene del tallo de la planta. Una de las características más relevante de esta planta es que captura grandes cantidades de carbón. Con 70% de celulosa, el cáñamo es un buen conductor del calor, absorbe muy bien las tinturas, bloquea la luz ultravioleta, es muy resistente al moho y tiene propiedades antibacterianas naturales.

2.4.2. Kenaf

El kenaf (*Hibiscus cannabinus*) es un cultivo de 4000 años con raíces en la antigua África que se ha introducido recientemente y se ha cultivado con éxito en muchas partes de los Estados Unidos. La planta de kenaf puede crecer a alturas de 3.5–4.5 m en 4–5 meses con rendimientos anuales de fibra de 6 a 10 toneladas de fibra seca/acre, que es aproximadamente cuatro veces mayor que la de los pinos del sur. [18]

Es una fuente prometedora de fibras para papel y otros productos derivados de las fibras, siendo introducida en la segunda guerra mundial en China, la ex Unión Soviética, Tailandia, Egipto, Sudáfrica, México y Cuba. [19]

2.4.3. Lino

El lino es una fibra de gran resistencia, es casi tres veces más fuerte que el algodón, rígido y fresco al tacto, altamente resistente a las manchas y de lavado fácil, aunque tiene tendencia a arrugarse ya que sus fibras carecen de elasticidad, por lo que podemos encontrarlo frecuentemente combinado con algodón y otras fibras naturales o sintéticas. [20]

2.4.4. Nano fibras de celulosa

En las plantas, la celulosa se encuentra en forma de microfibras en la pared celular primaria, secundaria y terciaria, organizadas de manera unidireccional o como una malla entretrejida. Estas microfibras están asociadas a una matriz conformada principalmente de lignina y una proporción mínima de hemicelulosa [21].

Para la obtención de estas nano fibras es necesario un tratamiento químico seguido de un tratamiento mecánico, las microfibras de celulosa se desprenden del material que las rodea y mantiene unidas a otras microfibras para dar lugar a la formación de una estructura de red integrada por fibras de dimensiones nanométricas.

Dentro de esta clasificación se encuentran los linters de algodón, que se remueven de las semillas por medio de máquinas desbarradoras [22]. Dependiendo del número de procesos por la en la máquina desbarradora, los linters producidos se componen por: “mill-run linters” que necesitan de un proceso. La mayoría de las plantas procesan las semillas dos veces produciendo linters del primer corte y linters del segundo corte. Los linters del primer corte son de fibras más largas y resistentes y se usan en muchos productos no tejidos mientras que los del segundo corte son fibras más cortas usadas principalmente para producir papel de alto grado y son una fuente de celulosa para la industria química. Otro producto del proceso del despepitado, son “las motas” [22]. Las motas son pequeñas semillas inmaduras con fibra, se puede remover esta fibra de las motas por medio de una máquina desmotadora. Esta fibra, llamada mota del despepitado se usa también en productos no tejidos.

2.5. Propiedades de las Fibras Naturales

Las fibras presentan diferentes composiciones y propiedades físicas que presentan una elevada influencia en la compatibilidad con el hormigón y por tanto en las propiedades finales del compuesto.

Las fibras naturales vegetales consisten en celulosa, hemicelulosa, lignina, extractos y cenizas. Las concentraciones de estos componentes dependen de factores como el tipo de fibra, la condición de crecimiento, la dimensión, la edad, la ubicación en la planta, el método de extracción y procesamiento. La Tabla 1 recoge algunos de las propiedades químicas más importantes de las fibras investigadas para este estudio.

Tabla 1. Características físico-químicas de las fibras naturales vegetales.

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencia
Cáñamo	1.48	88-90	7-10	1.5-2	[23]
Kenaf	-	28	25	22.7	[24]
Lino	1.5	71	18.6-20.6	2.2	[25]

Según un estudio las propiedades mecánicas de las fibras resultan bastante diversas y dependen mucho de las condiciones en las que se encuentra la fibra, principalmente en cuanto al grado de humedad. En Tabla 2 se muestran varias propiedades mecánicas que poseen las fibras estudiadas por los distintos investigadores en sus áreas.

Tabla 2. Propiedades Mecánicas de fibras vegetales

Fibra	Resistencia a la Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Humedad (%)	Referencia
Cáñamo	690	70	1.6	3.5-8	[26]
Kenaf	930	53	1.6	10	[26]
Lino	345-1035	27.6	2.7-3.2	-	[26]

2.6. Ventajas y Desventajas del uso de fibras vegetales

De acuerdo a la bibliografía entre las ventajas y desventajas del uso de las fibras vegetales están [5], [27]-[29]:

Ventajas:

- Bajo peso específico, lo cual es resultado de una mayor resistencia específica que otras fibras como las de vidrio, especialmente a solicitaciones de flexión.
- Elevada resistencia a la tracción y deformación. Gracias a ello brindan al compuesto una elevada ductilidad muy recomendable para admitir cargas dinámicas o accidentales de impacto.

- Recurso renovable, con poco consumo de energía para su elaboración, lo que las convierte en materiales amigables al medio ambiente.
- Por su naturaleza hidrofílica las fibras naturales vegetales son ideales para matrices hidráulicas.
- La incorporación de fibras en compuestos de cemento proporciona buenas propiedades térmica, acústicas y aislantes.
- Su obtención puede lograrse con inversiones relativamente bajas, lo que permite su desarrollo industrial en países en vías de desarrollo.
- En general la obtención de fibras naturales es inocua y no representa riesgos para los manufactureros.
- Su costo es realmente bajo.

Desventajas:

- Alta dispersión en las propiedades, que dependen de factores como el clima o el método de obtención.
- Elevada absorción de agua, incluso llegando a superar el 100% en una hora de inmersión. Esto produce importantes variaciones de peso y volumen, afectando su durabilidad y resistencia mecánica.
- Bajo módulo elástico
- Mala durabilidad de las fibras en los medios alcalinos.
- En general las fibras orgánicas tienen baja resistencia al fuego.
- Falta de continuidad en el suministro y disponibilidad de material (dependiendo del tipo de fibra).

De las desventajas descritas, una de las más importantes es la baja resistencia al álcali, que conlleva a un deterioro relativamente rápido de la fibra en una matriz con base de cemento. La descomposición que sufre la celulosa, hemicelulosa y lignina por reacción con el hidróxido de calcio, disminuye en gran medida el refuerzo proporcionado por la fibra hasta prácticamente anularlo

2.7. Estructura de la fibra vegetal

Según Claramunt [11], las fibras vegetales se encuentran formadas de la siguiente manera:

- ❖ *Cadena de Celulosa:* estas pueden agruparse de dos maneras para formar las micelas:
 - **Ordenadas:** se concentran de manera paralela entre sí, y presentan mejor resistencia mecánica.
 - **Desordenadas:** con desorientación en las cadenas, se las llama también zonas amorfas. Tienen menor resistencia mecánica y son más sensibles al ataque químico.
- ❖ Las micelas se agrupan de manera ordenada, en microfibrillas.
- ❖ Las microfibrillas a su vez se concentran en macrofibrillas.

En la Figura 3 muestra la representación de la estructura de las fibras vegetales de manera general.



Figura 3. Estructura de una fibra de vegetal.

Fuente: Ana Llerena Encalada, [10].

- ❖ Las microfibrillas pasan a formar las paredes de la fibra vegetal. Cada una de estas microfibrillas se encuentran unidas entre sí, gracias a los polímeros naturales que actúan de “pegantes”:
 - Lignina.
 - Hemicelulosa.
 - Pectina.
 - Extensina.

Estos polímeros son afectados por el calor, la alcalinidad, disoluciones ácidas, etc., reduciendo su durabilidad y por tanto su capacidad de refuerzo.

2.8. Longitud y volumen de fibra incorporada.

Juárez [16] en su estudio comenta que a mayor cantidad de fibras se usaba, se requería mayor cantidad de agua para mantener la misma trabajabilidad de la matriz, ya que la fibra misma absorbe una gran parte de ella.

2.8.1. Longitud de la Fibra

Dentro de la clasificación de fibras que se pueden incorporar a matrices de cemento, se tienen tres tipos: largas, cortas y pulpa.

Como se reúnen en las investigaciones de Mwaikambo [5], las fibras tienden a enredarse, pero cuando la relación de aspecto de la fibra es mayor (largo/ancho), con ciertos límites impuestos por el volumen de fibra en el compuesto, las fibras de sisal pueden ser orientadas fácilmente sin enredarse o formar haces.

Lo que se consigue al usar fibras largas, es una mayor adherencia de la fibra con la matriz, pues se tiene mayor área de contacto [30]. La adherencia entre la interfaz del refuerzo y la matriz es sumamente importante, a mayor adherencia mejoran las propiedades mecánicas del compuesto. Se debe procurar que cada fibra este rodeada completamente por la matriz sin “vacíos” que disminuyan el área de contacto. Bajo este criterio, las mejores fibras para reforzar un compuesto son las fibras largas, teniendo especial cuidado en su distribución dentro del compuesto para evitar la formación de grumos.

El inconveniente principal que poseen las fibras, en general las fibras largas es que se enredan y llegan a formar “grumos” en el momento de mezclado, como se puede observar en la Figura 4, evitando una distribución isotrópica y buena trabajabilidad de la mezcla fresca. Esto sucede cuando las fibras son incorporadas en masa y en mayor volumen. Las fibras delgadas y cortas se enredan menos que las fibras largas y gruesas. Gracias a ello es posible agregar un mayor volumen de fibras cortas o en pulpa, que fibras largas.



Figura 4. Grupo de fibras largas de cáñamo en un compuesto cementíceo.

Fuente: Ana Llerena Encalada, [10].

En el caso de fibras con longitudes relativamente elevadas (alrededor de 50mm), se observa una importante pérdida de trabajabilidad del hormigón, incluso con bajos contenidos de fibras, llegando a afectar los resultados del cono de Abrams en hasta 75mm [12].

2.8.2. Volumen de Fibra

La forma de fabricación del compuesto y el tipo de fibra, serán determinantes para el volumen máximo que pueden contener las matrices cementicias.

En los estudios realizado por Coutts, Savastano y compañeros de trabajo [31]–[35][34], utilizaron con éxito una variación del proceso Hatschek (la técnica de deshidratación al vacío de la suspensión) para preparar compuestos de cemento con fracciones de masa de fibra de pulpa de alrededor de 8 % en peso (aproximadamente 10% por volumen de contenido). En esta técnica, los materiales de la matriz se agitan, con la cantidad apropiada de fibra dispersada en agua, para formar una suspensión con aproximadamente 20% de materiales sólidos.

Otra posibilidad basada en el deshidratado con presión se utilizó para preparar con éxito los compuestos de celulosa que incorporan hasta el 4 % en peso de algodón y pulpa de pino [36].

2.9. Tratamiento de Fibras

Muchos de los tratamientos descritos a continuación, se han aplicado a las fibras vegetales, para prepararlos para aplicaciones prácticas en el reforzamiento de estructuras. Existen tratamientos físicos y químicos empleados.

2.9.1. Tratamientos físicos

Los tratamientos físicos cambian las propiedades estructurales y superficiales de la fibra y, por lo tanto, influyen en la unión mecánica de los polímeros; pero a su vez estos no cambian ampliamente la composición química de las fibras, por lo tanto, la interfaz generalmente se mejora a través de una unión mecánica aumentada entre la fibra y la matriz [26].

2.9.1.1. Tratamiento corona

Es una de las técnicas más empleada para la activación de la oxidación de la superficie. Este proceso cambia la energía superficial de las fibras de celulosa. Se descubrió que el tratamiento de descarga de corona en fibra de celulosa y matriz hidrófoba es eficaz para la mejora de la compatibilización entre fibras hidrófilas y una matriz hidrófoba. [26]

2.9.1.2. Tratamiento con plasma

Es un tratamiento similar al tratamiento corona. El método aprovecha la propiedad del plasma para inducir cambios en la superficie de la fibra. Se puede lograr una variedad de modificaciones en la superficie dependiendo del tipo y la naturaleza de los gases utilizados. Se pueden producir radicales libres y grupos reactivos, se puede aumentar o disminuir la energía superficial y se puede introducir reticulación superficial. [26]

2.9.2. Tratamientos químicos

Se investigaron las modificaciones químicas de las fibras naturales destinadas a mejorar la adhesión dentro de la matriz polimérica utilizando diferentes productos químicos. Los tratamientos químicos utilizados en fibras vegetales más comunes son la hidrólisis ácida y tratamiento alcalino [37].

2.9.2.1. Tratamientos alcalinos

El tratamiento alcalino de sustancias lignocelulósicos altera la pared celular, se disuelve la hemicelulosa y la lignina por hidrólisis de ésteres de ácido acético y por la hinchazón de celulosa, la disminución de la cristalinidad de la celulosa [37].

En el proceso Kraft que se utiliza en la industria del papel, el reactivo alcalino que se utiliza es una mezcla de hidróxido de sodio, sulfito sódico y carbonato de sodio. Otras soluciones alcalinas incluyen hidróxido de sodio, alcalino sulfito antraquinona, hidróxido de calcio, hidróxido de potasio, hidróxido de litio, amoníaco [38].

2.9.2.2. Tratamientos con ácidos

Los efectos de los tratamientos ácidos en fibras vegetales varían con la naturaleza y concentración del ácido, y la temperatura del experimento. Las hemicelulosas son muy sensibles a la hidrólisis ácida, y son fácilmente hidrolizados por ácidos [37], [39].

La lignina en las maderas duras se disuelve en parte durante la hidrólisis ácida con ácido sulfúrico [37]. El tratamiento ácido disminuye el contenido de hidroxilo alifático y así disminuye la polaridad de las moléculas de lignina, pero mejoran las propiedades antioxidantes [40]. En el caso de huesos de aceituna, Caballero [41] han demostrado que después de 1 h de ácido sulfúrico (72%) de tratamiento,

hemicelulosa se elimina totalmente sin ninguna alteración si no puede de la estructura de la celulosa y la lignina. Por encima de 2 h de tratamiento con ácido sulfúrico, la celulosa comienza a disolverse, y la lignina es modificada.

2.9.2.3. Tratamientos de pirólisis

Pirólisis es la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor [42].

Shafizadeh [43] estudió la descomposición térmica de la celulosa y se encontró que, por debajo de 300 °C, este resultado reacción en la formación de carbón, agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Sin embargo, entre 300 y 500 °C, los resultados de pirólisis en la formación de alquitrans que consisten en gran parte de los azúcares, oligosacáridos, deshidratación de pirano y furanos.

Varios de estos tratamientos descritos han sido empleados en las fibras, en la Tabla 3 en se muestran los resultados de las propiedades de las fibras dentro de compuestos de cemento.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de compuestos de cemento con adiciones de fibras vegetales.

Tipo	Pretrat.	Densidad (kg/m ³)	Uso	Aplicación	Propiedades Mecánicas			Ref.
					Resistencia compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo Young (GPa)	
Cáñamo	5% NaOH 2% Na ₂ SO ₃	2450- 2480	Hormigón	Probetas	26-28	-	43-45	[27]
	No	2149- 2156	Mortero	Probetas	30.69- 32.59	5.08-5.82	-	[44]
Kenaf	Uretano	-	Hormigón	Probetas	48.5	5	36	[45]
	No	2344- 2560	Mortero	Probetas	7.24-14.20	-	-	[46]
Lino	6 % NaOH	-	Mortero	Probetas	-	8.8	-	[47]

2.10. Durabilidad de la fibra vegetal dentro de una matriz cementicia.

Las fibras por sí solas son un material sensible al ataque de microorganismos, pero al encontrarse dentro de una matriz quedan protegidas, esto se puede asegurar siempre y cuando no exista una grieta o falla en el panel que permita el ingreso de estos microorganismos. [10]

Según el estudio realizado por el Instituto de Investigación del Cemento de Suecia, la durabilidad de las fibras se ve afectada por la alcalinidad de la matriz. Este fenómeno se puede ver reducido mediante el remplazo parcial del cemento portland ordinario con una puzolana altamente reactiva. [10]

Como se sabe, los compuestos que contienen cemento poseen un pH elevado, es decir, su medio es alcalino (12,4 pH) [10]. Algunos autores mencionan que la alcalinidad del poro de agua de la matriz, deteriora la fibra a tal grado, que incluso puede llegar a anularla por completo. Por el contrario, cuando un compuesto pasa

por el proceso de carbonatación, las fibras se mantienen intactas conservando sus cualidades [48].

2.10.1. Proceso de deterioro de la fibra en un medio alcalino

En la Figura 5 se presenta el proceso de descomposición que sufre las fibras dentro de compuestos de cemento en ciclos de humectación y secado repetitivos.

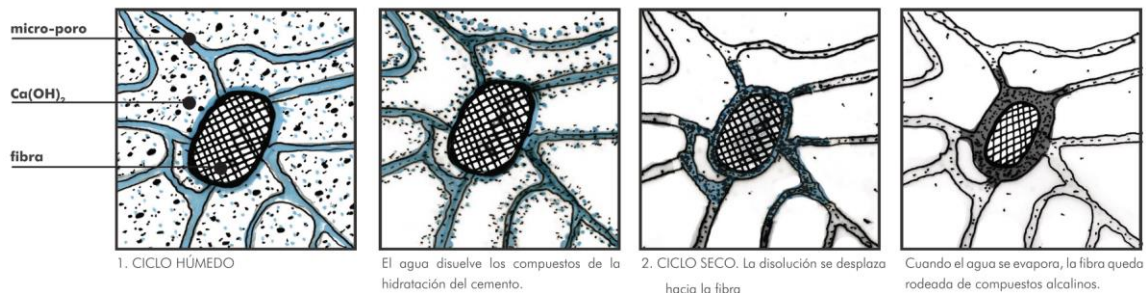


Figura 5. Proceso de deterioro de la fibra en un medio alcalino.

Fuente: Ana Llerena Encalada, [10].

Gram en su estudio describe que la presencia del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) está vinculada con la descomposición de la fibra y pérdida de la resistencia mecánica.

Además, explica que el proceso se da especialmente cuando el compuesto es sometido a ciclos seco-húmedos, ya sea en laboratorio o por envejecimiento natural en un ambiente al exterior, pero también por variaciones de la humedad relativa del ambiente.

Claramunt y colaboradores [36] en su investigación asumen el siguiente modelo de descomposición de la fibra:

- **Primer Ciclo Seco:** La sección transversal de la fibra disminuye, a consecuencia de la pérdida de agua. Esto causa una falta de adherencia entre la fibra-matriz, y es aquí cuando empiezan a aparecer unos “espacios vacíos” o “huecos” en la interfaz.
- **Primer Ciclo Húmedo:** hidratación del cemento (como el hidróxido de calcio) se disuelven en el agua formando una disolución. Las fibras vegetales absorben la disolución.
- **Segundo Ciclo Seco:** en primer lugar, se evapora el agua del compuesto y posteriormente el agua contenida en la fibra. Por tanto, la disolución se desplaza hacia las fibras, depositando el hidróxido de calcio sobre la superficie y lumen de las fibras.
- **Ciclos Siguietes:** este proceso se repite una y otra vez produciendo un bombardeo de hidróxido de calcio sobre las fibras vegetales. Este ataque causa la densificación de la superficie y lumen de las fibras con productos altamente alcalinos, generando la disminución de su resistencia mecánica.

Este desplazamiento de los iones de OH^- y Ca^{2+} , es lento en condiciones estables, pero en ciclos seco-húmedos se acelera. Cuando la fibra es sumergida en una solución alcalina (con contenido de OH^-), los iones de OH^- se incorporan a la celulosa y forma un ácido isosacarínico, mientras que cuando la fibra se seca, la celulosa

vuelve a su estado original. Sin embargo, cuando la solución alcalina contiene también iones de Ca^{2+} , estos se unen a los extremos del compuesto ácido, rompiendo las cadenas de celulosa cuando la fibra se seca. Es por esta razón que el Hidróxido de Calcio afecta en especial a las fibras vegetales, mientras que el Hidróxido de Sodio no lo hace.

El estudio de la durabilidad de las fibras de John y colaboradores [38], muestra el antes y después de fibras de coco sometidas a una solución alcalina por 118 días. La superficie de las fibras cambia debido a la reacción del hidróxido de calcio con la lignina en un medio acuoso.

2.11. Características del hormigón con fibras

La presencia de fibras no varía el patrón de fisuración del hormigón. Por esta razón esta mínima variación de resistencia a compresión es ignorada. Al mezclarse la fibra a una matriz de hormigón, la curva carga-deformación presenta un incremento en la capacidad de carga, así mismo, se mejora el post agrietamiento permitiendo sostener cargas hasta valores altos de deformación, dando como resultado, mayor ductilidad en el elemento [12], en la Figura 6 se puede apreciar este fenómeno.

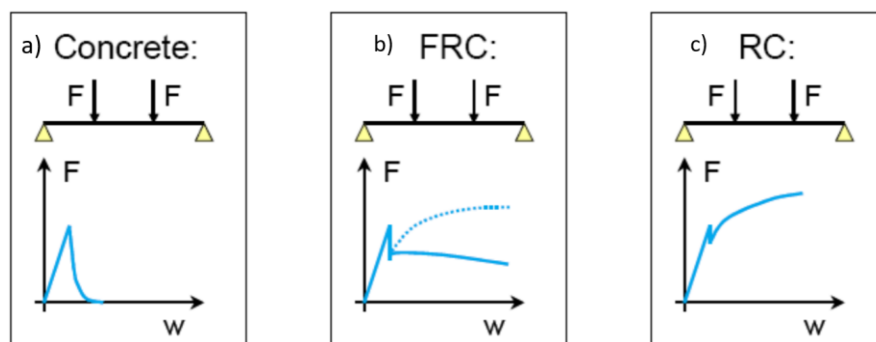


Figura 6. a) Curva carga-deformación en hormigón (concrete). b) hormigón con fibras (FRC). c) hormigón armado (RC).

Fuente: Pujadas, P.[49]

En un hormigón sin fibras inicialmente la curva es lineal, luego se presenta un brusco descenso en la capacidad de carga, fallando súbitamente el material. El incremento de resistencia a la fatiga (que tiene directa relación con la durabilidad), resistencia al impacto y reducción de la permeabilidad, contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento.

El número de fibras es un índice de la frecuencia de fibra, es decir, de la longitud total de fibra existente por unidad de volumen de mortero. En el hormigón este concepto es crítico para asegurar la intercepción de las microfisuras en las primeras horas. La efectividad de las fibras está relacionada con la capacidad de dispersión, frecuencia de fibra y finura de éstas [50]. Resulta obvio que, en función de la dosificación, de las longitudes de fibra y de las propiedades de las mismas se confiere al hormigón propiedades distintas, de esta manera se acentúan más unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del hormigón reforzado con fibras.

2.12. Microfibras para hormigón

Las microfibras, son empleadas generalmente para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón en su proceso de fraguado, utilizadas especialmente en pavimentos y soleras, pero que no asumen funciones estructurales [50].

También se utiliza para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente un elevado número de fibras por kg. Las microfibras se caracterizan no sólo por sus características físico-químicas sino también por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en un kg de hormigón, dato que, a su vez, depende de la longitud de la fibra y muy especialmente de su diámetros [14].

Las microfibras, sin embargo, sí pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20mm a 60mm), la cual debe guardar relación con el tamaño máximo del árido. En la Figura 7 se aprecia una distribución aproximada de las fibras dentro de matrices de cemento.

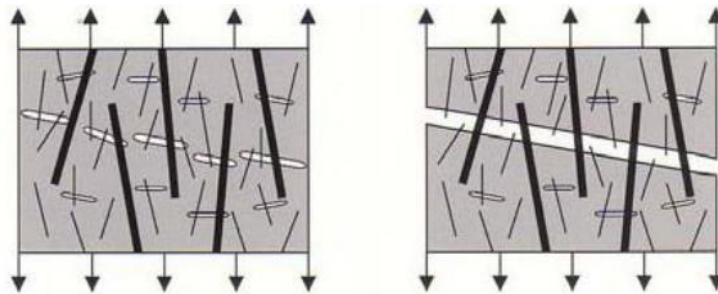


Figura 7. Representación de micro y macro fibras en el hormigón.

Fuente: High-performance Hybrid-fibre Concrete, [51]

Las microfibras mejoran susceptiblemente el comportamiento del hormigón una vez las microfisuras aparecen, y serán su forma y geometría las que determinen el grado de efectividad de dichas fibras. Sin embargo, las microfibras para ser efectivas, deberían tener una relación de aspecto relativamente alto y así controlar el posterior crecimiento de las microfisuras. [52]

2.13. Orientación de las fibras

La bibliografía y experimentaciones de los investigadores señalan que la distribución real de las fibras en elementos estructurales no tiene por qué ser homogénea. Lo mismo ocurre con la orientación de las fibras que se ve muy afectada por el flujo del hormigón durante el llenado de los moldes, por la energía y el método empleado de compactación. Por tanto, conocer la distribución y la orientación de las fibras es fundamental para la efectividad del refuerzo que con ellas se quiere conseguir.

La investigación realizada por Kooiman, Van Der Veen y Walraven [53] demuestra la influencia de la orientación de las fibras en elementos estructurales reales, estudiaron dos casos una losa de supresión hormigonada con bomba bajo el agua y unas dovelas de hormigón con fibras para el revestimiento de un túnel. Del primer caso, concluye que cerca de la bomba las fibras presentan una orientación aleatoria, pero que a medida que aumenta la distancia van presentando una orientación

preferente en la dirección del flujo de hormigón, resultando orientadas en el plano de la losa.

En las dovelas del túnel detectó la influencia que ejercen los bordes del molde y el vibrado. Para determinar la influencia de los distintos efectos, flujo y vibrado, extrajo testigos de dovelas con el hormigón sin compactar y compactado. Observó que el llenado del molde producía orientaciones preferentes en la dirección de sus bordes extremos mientras que en la fase de vibrado se producía una segregación de las fibras que las acumulaba en la parte inferior y un mayor grado de orientación horizontal.

Capítulo 3: Caracterización de los Materiales

3.1. Introducción

El objetivo principal de este capítulo es describir las características de los materiales utilizados para fabricar morteros con adición de fibras naturales y sintéticas.

Se explica el tratamiento previo a la incorporación de las fibras naturales (LINTERS de algodón) en las matrices, además, las dosificaciones de las matrices y finalmente el proceso de fabricación de los especímenes para determinar en el siguiente capítulo las propiedades en estado fresco de las muestras.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Aglomerantes.

En esta investigación se utilizaron dos tipos de aglomerantes disponibles en el mercado español:

- Cemento Portland tipo I (CEM I 52,5 R) suministrado por *Ciments Molins* y;
- Cemento Portland tipo I con adición de puzolana (metacaolín).

La Tabla 4 muestra la composición química del cemento, proporcionada por el proveedor.

Tabla 4. Composición química del cemento Portland tipo I

	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	98	mín. 95 - máx. 100	
Componente minoritario (%)	2	mín. 0 - máx. 5	
Pérdida por calcinación (%)	2,5	máx. 5,0	(1)
Sulfato, SO ₃ (%)	3,4	máx. 4,0	
Cloruros, Cl ⁻ (%)	0,04	máx. 0,10	
Residuo insoluble (%)	0,70	máx. 5,0	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	4600	-	(2)
Expansión Le Chatelier (mm) Inicio	0,5	máx. 10	
fraguado (min)	110	mín. 45	
Final fraguado (min)	170	máx. 720	
Compresión a 1 día (MPa)	27	-	(3)
Compresión a 2 días (MPa)	40	mín. 30,0	
Compresión a 7 días (MPa)	52	-	
Compresión a 28 días (MPa)	61	mín. 52,5	

(1) Químicas (2) Físicas (3) Mecánicas


Fuente: Ficha técnica de Arcilesa Arcillas Refractarias S.A,

3.2.1.2. Metacaolín Peser®

El metacaolín Peser® es un material puzolánico inorgánico artificial, que se obtiene de la calcinación del caolín (que no posee actividad puzolánica previo a la cocción) a temperaturas entre 500 y 800°C. Es un material que contiene silicato de aluminio

deshidroxilado, de composición general $2SiO_2 \cdot Al_2O_3$, estructura amorfa, no cristalina, constituido por partículas laminares de elevada finura [54].

El material fue suministrado por la empresa Arcilesa Arcillas Refractarias S.A. la Figura 8 contiene las propiedades físicas y granulométricas.

Propiedades físicas*			Análisis químico	
Aspecto/Color.....	Polvo blanco		% Al_2O_3	40,24
Pérdida por calcinación.....	< 1,50	% SiO_2	54,61	
Puzolanicidad (Ensayo Chapelle).	988 g $Ca(OH)_2/g$	% Fe_2O_3	0,25	
Superficie específica (Blaine).....	10.971 cm^2/g	% TiO_2	1,08	
Demanda de agua.....	106,2 %	% CaO	< 0,10	
Índice actividad resistente 28 días	111,6 %	% MgO	< 0,10	
Densidad aparente:		% Na_2O	0,02	
– Aireada.....	600 kg/m^3	% K_2O	1,44	
– Compactada.....	800 kg/m^3			
Peso específico.....	2,54 g/cm^3			

* Valores correspondientes al material con $d_{50} = 5$ micras.

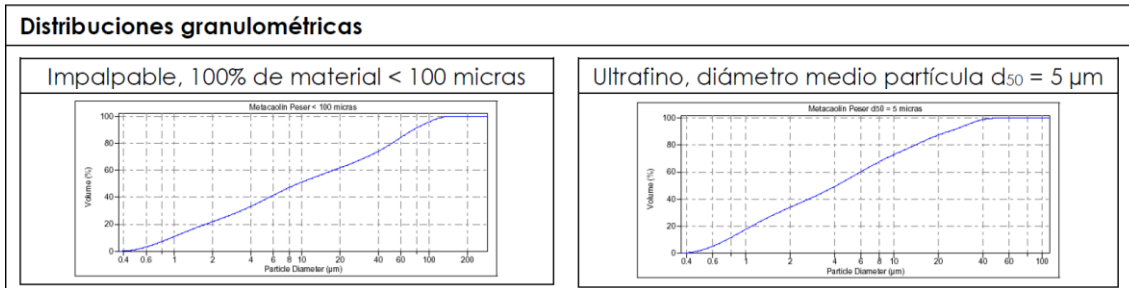


Figura 8. Propiedades físicas y granulométricas del metacaolín Peser®

Fuente: Ficha técnica de Arcilesa Arcillas Refractarias S.A, [54]

3.2.1.3. Áridos

Se utilizó arena normalizada suministrada por la empresa NORMENSAND (alemana) con un tamaño máximo de partícula que oscila entre 0,08 y 2,00 mm para fabricar probetas de referencia y con fibras naturales y PVA. En Figura 9 se muestra la distribución granulométrica de la arena.

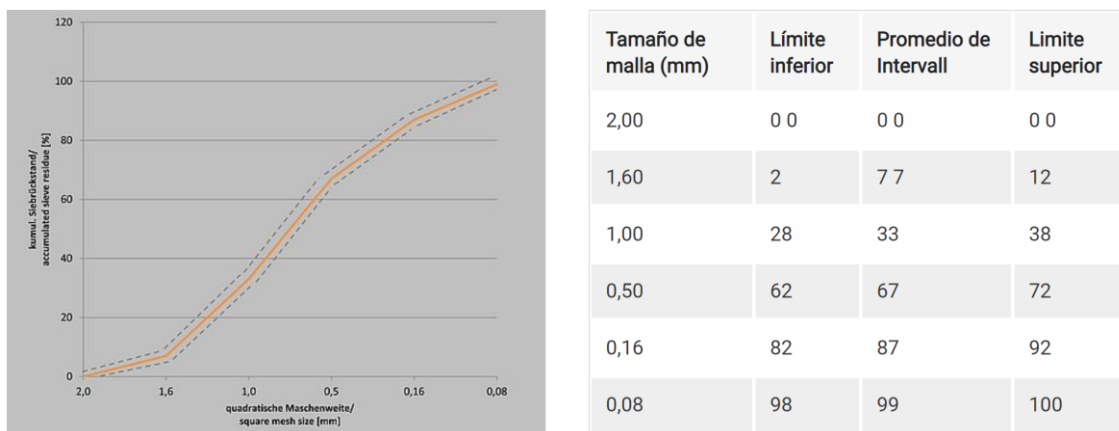


Figura 9. Distribución del tamaño de grano de NORMENSAND

Fuente: Ficha técnica de NORMENSAND, [55]

3.2.1.4. Agua

El agua utilizada para fabricar probetas es potable, a temperatura ambiente. También, se la utilizó como medio para disolver las fibras naturales.

3.2.1.5. Fibras

Se utilizaron dos tipos de fibras: natural, LINTER de algodón proporcionados por Celsur (Cotton South, SL, España) como refuerzo. Y fibra sintética estructural MasterFiber 400 suministrada por *Master Builders Solutions*, que proporcionan las especificaciones en la Tabla 5 mostrada a continuación.

Tabla 5. Propiedades de Masterfiber 400

Propiedades	
Material:	Alcohol polivinílico
Diseño:	Monofilamentada
Diametro equivalente:	0.20 mm
Longitud:	18 mm
Resistencia a la tracción:	750 MPa
Alargamiento a la rotura:	6 - 12%
Módulo de elasticidad:	7100 MPa
Esbeltez:	90
Absorción de agua:	Baja
Densidad:	1300 kg/m ³
Resistencia al Alkali:	Alta

Fuente: ficha técnica de Masterfiber 400, [56].

3.2.1.6. Aditivo

Para mejorar la trabajabilidad de las muestras que contienen metacaolín y fibras se utilizó aditivo superplastificante ViscoCrete®-5970 proporcionado por la empresa Sika®. La introducción de este aditivo en la fabricación del hormigón incrementa las resistencias iniciales y finales del mismo. Proporciona alta durabilidad e impermeabilidad [57]. Para su incorporación en las mezclas se siguió las instrucciones del fabricante.

3.2.2. Métodos

3.2.2.1. Dosificaciones

En cuanto a la dosificación, las pastas de mortero suelen tener entre un 50% y 70% de cemento puro, árido calcáreo muy fino y fibras, y las probetas se fabrican con los moldes de 40x40x160 mm, como se estipula en la norma UNE-EN 196-1:2018 [58].

- Tipos de fibra: naturales y sintéticas
- Porcentaje de cemento: 100 y 85
- Porcentaje de fibra: 1%, 2% y 4% en volumen de cemento.
- Número de muestras: 6 especímenes de mortero por cada ensayo.

Para cuantificar en qué medida se ve influenciada las muestras de cemento con adiciones de fibra y sustitución de cemento por puzolana (metacaolín), se trabajaron dos dosificaciones distintas por cada tipo de fibra, que está descritas en la Tabla 6, tomando en cuenta la instrucción europea UNE-EN 196-1:2018 [58].

Todos los morteros buscaban la misma proporción 1/3/0.5 de aglomerante (cemento portland I y metacaolín) /árido/agua, respectivamente. la Tabla 6 representa la dosificación inicial planeada para la fabricación de 6 probetas.

Tabla 6. Dosificación inicial de morteros

Muestra	Fibra	Aglomerante			Áridos (g)	Fibras (g)	Agua (g)
		Cemento (g)	Mk 15% (g)	Total (g)			
M_{REF} - CEM I	0	450	0	450	1350	0	225
M_{REF} - CEM I+P	0	382.5	67.5	450	1350	0	225
MFN-CEM I	1%	450	0	450	1350	18	225
MFN-CEM I	2%	450	0	450	1350	27	225
MFN-CEM I	4%	450	0	450	1350	36	225
MFN-CEM I+P	1%	382.5	67.5	450	1350	18	225
MFN-CEM I+P	2%	382.5	67.5	450	1350	27	225
MFN-CEM I+P	4%	382.5	67.5	450	1350	36	225
MFP-CEM I	1%	450	0	450	2700	18	225
MFP-CEM I	2%	450	0	450	450	27	225
MFP-CEM I	4%	450	0	450	1350	36	225
MFP-CEM I+P	1%	382.5	67.5	450	1350	18	225
MFP-CEM I+P	2%	382.5	67.5	450	1350	27	225
MFP-CEM I+P	4%	382.5	67.5	450	1350	36	225

** amasada para 6 probetas de 40x40x1600 mm³

Al fabricar las muestras en el laboratorio se incorporó el aditivo superplastificante en mezclas que contenían metacaolín y fibras (linters y PVA), para llegar a la consistencia plástica de morteros de referencia. Mostrándose la dosificación real de las mezclas en la Tabla 7, con las distintas proporciones de aditivo en las mezclas,

Tabla 7. Dosificación real en laboratorio.

Muestras	Fibra	Aglomerante			Áridos (g)	Fibras (g)	Agua (g)	Aditivo
		Cemento (g)	Mk (g)	Total (g)				
M_{REF} - CEM I	0	450.0	0.0	450	1350	0.0	225	0.00%
M_{REF} - CEM I+P	0	382.5	67.5	450	1350	0.0	225	0.30%
MFN-CEM I	1%	450.0	0.0	450	1350	4.5	225	0.50%
MFN-CEM I	2%	450.0	0.0	450	1350	9.0	225	2.00%
MFN-CEM I	4%	450.0	0.0	450	1350	18.0	225	4.00%
MFN-CEM I+P	1%	382.5	67.5	450	1350	4.5	225	1.30%
MFN-CEM I+P	2%	382.5	67.5	450	1350	9.0	225	1.50%
MFN-CEM I+P	4%	382.5	67.5	450	1350	18.0	225	2.00%
MFP-CEM I	1%	450.0	0.0	450	1350	4.5	225	0.00%
MFP-CEM I	2%	450.0	0.0	450	1350	9.0	225	0.50%
MFP-CEM I	4%	450.0	0.0	450	1350	18.0	210	2.00%
MFP-CEM I+P	1%	382.5	67.5	450	1350	4.5	225	0.30%
MFP-CEM I+P	2%	382.5	67.5	450	1350	9.0	225	0.70%
MFP-CEM I+P	4%	382.5	67.5	450	1350	18.0	225	1.00%

3.2.2.2. Tratamiento de las fibras naturales

Los linters de algodón utilizados para la fabricación de probetas se encontraban en formato rollo, fue necesario realizar la desintegración de las fibras en un medio acuoso. El procedimiento fue el siguiente:

- 1) Se hacen trozos pequeños de un tamaño 2x2 cm aproximadamente de la fibra seca, como se muestra en la Fotografía 2 del Anejo A.
- 2) Se pesa y registra la cantidad necesaria para cada dosificación.
- 3) En un recipiente plástico se incorpora agua y las fibras troceadas, con una proporción aproximada de 2 litros de agua por 100 gramos de fibra, o de tal manera que las fibras queden sumergidas completamente.
- 4) Con la ayuda de un agitador y con velocidad constante se revuelven las fibras en el agua, teniendo precaución de no perder fibras en el proceso.
- 5) Este proceso puede ser tardío, es necesario desintegrar completamente las fibras, de tal manera que no se observen trozos blancos de tamaño apreciable en toda la disolución.
- 6) Con la ayuda de un tamiz fino, 0.1 mm se hará pasar las fibras y el agua, con cuidado se aplasta las fibras para eliminar el exceso de agua.
- 7) Las fibras sin exceso de agua, se almacenan en recipientes dentro de una nevera a temperatura $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, hasta ser utilizadas. Esto evitará que la fibra llegue a pudrirse.

3.2.2.3. Proceso de fabricación de probetas

❖ Amasado

Para la fabricación de morteros de referencia se siguió la normativa europea UNE-EN 196-1:2018, las especificaciones se tomaron también como referencia para fabricar los morteros con fibras y puzolana, teniendo el siguiente proceso:

1. Se incorpora primero el agua y cemento con o sin metacaolín según sea el caso, en el cuenco normalizado de la amasadora mecánica.
2. Colocamos el cuenco en la amasadora y la ponemos en marcha a velocidad lenta (28.5 Hz) durante 30 segundos.
3. Durante los 30 segundos siguientes a baja velocidad, introducimos toda la arena.
4. Se dejará la mezcla amasar durante 30 segundos más a velocidad rápida (58 Hz).
5. Parar la amasadora durante 90 segundos, de los cuales, los 15 primeros serán para quitar el mortero adherido fuera de la zona de amasado, además en este punto se incorporan las fibras naturales, que tendrán un contenido de agua, el cual será tomado en cuenta en la cantidad de agua total de la mezcla. Al tener fibras la consistencia del mortero se verá afectado, de tal manera que es necesario en este punto agregar un aditivo superplastificante
6. Continuar el amasado a velocidad rápida durante 60 segundos más y hasta observar que las fibras se han dispersado.
7. En el caso de muestras con fibras, en la última amasada se incorporan las fibras poco a poco, hasta observar una dispersión homogénea.

❖ Enmoldado

Una vez terminado el amasado el mortero es colocado en los moldes de 4x4x16 cm como se estipula en la normativa. El molde y la tolva se colocaron sobre la mesa de la compactadora, se introduce desde el cuenco de la amasadora una primera capa en los tres compartimentos, se compacta con 60 golpes, seguido se coloca una segunda capa y se vuelve a compactar con otros sesenta golpes. Finalmente se retira tolva y eliminar con una espátula el exceso de mortero, alisando la superficie y se cubren las muestras con un plástico dejando que se produzca el fraguado.

❖ Curado de probetas.

Tras transcurrir las 24 horas luego de la fabricación de los morteros, se desmoldan las probetas, las etiquetamos para diferenciar cada tipo de dosificación e inmediatamente se las coloca en agua potable para curarlas hasta el momento de los ensayos. Las probetas permanecen dentro de la cámara húmeda y sumergidas como lo indica la normativa española UNE-EN 196-1:2018 [58].

3.2.2.4. Caracterización de la fibra

Normalmente en las fibras es importante conocer sus dimensiones (longitud y diámetro). En la investigación de Claramunt y colaboradores [59] proporcionan las características de las fibras empleadas en esta investigación, los resultados se logran extrapolar porque corresponde a la misma partida de material utilizada en su investigación.

La longitud, el ancho, la masa lineal (aspereza) lo midieron con el equipo Kajaani FS300 de acuerdo a la normativa ISO 16065-1.

Se tomaron pulpas iniciales y pulpas que hornificadas para investigar los cambios morfológicos que pueden sufrir este material. La evidencia indica que los cambios no fueron significativos, mostrándose en la Tabla 8 las características de los linters de algodón antes de ser incorporadas a las matrices cementicias.

Tabla 8. Características morfológicas de los linters de algodón.

Linters de Algodón	Longitud (mm)	Ancho (µm)	Masa Lineal (mg/m)
Inicial	0.79	20.14	0.244
I	0.81	19.95	0.240
II	0.86	19.61	0.261
III	0.84	19.63	0.237

Fuente: *Morphological characteristics of the pulps and cotton linters*, [59].

Capítulo 4: Propiedades de compuestos cementicios con fibras

4.1. Introducción

Se ha comprobado que la característica mecánica más importante de un hormigón y de morteros es la resistencia a la compresión, debido a que lo convierte en un evaluador adecuado de la calidad del material. En ella influyen múltiples factores entre otros las características de los materiales, la dosificación, el sistema de compactación, el sistema de curado empleado y las condiciones ambientales a las que está expuesto el material.

Otras de las características físicas de los morteros son la trabajabilidad, su densidad y consistencia.

Se partió con la fabricación de probetas de referencia para llegar a las mismas propiedades en estado fresco de las probetas que contienen fibras. Se las denominaron M_{Ref} - CEM I a las fabricadas con cemento portland tipo I y las fabricadas con cemento portland tipo I más puzolana, como M_{Ref} - CEM I+P.

Las probetas fabricadas con fibras naturales y cemento portland tipo I, denominadas MFN-CEM I y MFN-CEM I+P las que han tenido adiciones de puzolana en la mezcla. Las muestras con fibras sintéticas MFP-CEM I y MFP-CEM I+P las fabricadas con cemento Portland tipo I y con cemento portland tipo I más puzolana, respectivamente.

4.2. Propiedades de las mezclas de mortero

Dentro de las propiedades en estado fresco de los morteros y hormigones nos encontramos con la densidad, consistencia y trabajabilidad, para su puesta en obra.

Para el ensayo de escurrimiento se aplicó la normativa UNE-EN 1015-3 [60], esta norma específica un método de ensayo para determinar, por medio del valor del escurrimiento, la consistencia de los morteros frescos amasados, que comprende a los morteros que contienen conglomerantes minerales y a la vez áridos normales y ligeros. En función de dicha medida se distinguen tres tipos de consistencia, como se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 9. Clasificación y denominación en función del escurrimiento (mesa de sacudidas)

Mortero fresco	Consistencia, escurrimiento (mm)	Designación
Seco	< 140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	> 200	F

Fuente: UNE-EN 1015-6, [61].

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de los materiales que lo componen, así como con el contenido en aire [62]. La densidad del mortero fresco se determinó conforme a la Norma Europea UNE-EN 1015-6 [61], en esta norma se

describe el método de ensayo para determinar la densidad aparente de los morteros frescos, comprendiendo los morteros que contienen conglomerantes minerales y a la vez áridos pesados y ligeros.

4.3. Resultados y Análisis

4.4.1. Características de mezclas fabricadas en laboratorio.

Se consideró el tiempo de fabricación, las muestras desechadas, y el volumen de desperdicio de las mezclas, reunidas en la Tabla 10 que corresponde a un total de 40 mezclas ejecutadas, de las cuales 12 fueron descartadas, principalmente por la nula trabajabilidad con respecto a los morteros de referencia.

Tabla 10. Características de mezclas fabricadas

Muestra	Cantidad fabricada	Desechadas	Tiempo (min/mezcla.)	Peso (kg)
M _{REF} - CEM I	2 mezclas	0 mezclas	15	0.01
M _{REF} - CEM I+P	3 mezclas	1 mezclas	16	2.03
MFN-CEM I 6% fibra	2 mezclas	2 mezclas	25	4.10
MFP-CEM I 6% fibra	2 mezclas	2 mezclas	24	4.11
MFN-CEM I 4% fibra	5 mezclas	3 mezclas	19	6.12
MFN-CEM I 2% fibra	2 mezclas	0 mezclas	16	0.01
MFN-CEM I 1% fibra	2 mezclas	0 mezclas	15.5	0.01
MFN-CEM I+P 4% fibra	4 mezclas	2 mezclas	21	4.08
MFN-CEM I+P 2% fibra	2 mezclas	0 mezclas	17	0.01
MFN-CEM I+P 1% fibra	2 mezclas	0 mezclas	16	0.01
MFP-CEM I 4% fibra	3 mezclas	1 mezclas	22	2.03
MFP-CEM I 2% fibra	2 mezclas	0 mezclas	17	0.01
MFP-CEM I 1% fibra	2 mezclas	0 mezclas	17	0.01
MFP-CEM I+P 4% fibra	3 mezclas	1 mezclas	22	2.04
MFP-CEM I+P 2% fibra	2 mezclas	0 mezclas	16	0.01
MFP-CEM I+P 1% fibra	2 mezclas	0 mezclas	15	0.01

Los tiempos de fabricación incluyen el peso de materiales, proceso de mezcla, tiempo de ejecución de ensayos en estado fresco y el proceso de enmoldado. Los pesos corresponden a desperdicios de mezclas, las cuantificaciones de 0.01 kg corresponden a los residuos generados en el proceso de fabricación y limpieza del equipo.

El mortero de referencia denominado M_{REF} - CEM I+P que contenía un 30 % de metacaolín, fue desechada porque la cantidad de esta puzolana hacia a la mezcla era seca, e incluso el equipo de mezclado llegó a detenerse. Con ello se cambió el porcentaje de MK.

Los morteros con denominación *MFN-CEM I 6% fibra* y *MFP-CEM I 6% fibra*, corresponden a las mezclas planificadas en la concepción del trabajo, se las descartaron por nula trabajabilidad, planteándose nuevos porcentajes, más reducidos de fibras naturales y sintéticas.

Las mezclas desechadas con designación *MFN-CEM I 4% fibra* y *MFN-CEM I+P 4% fibra*, fueron descartadas por la trabajabilidad baja, respecto a los morteros de referencia, se buscó la cantidad óptima de aditivo, teniendo en varias ocasiones segregación de agua.

Las mezclas con 4 % de fibra sintética denominadas, *MFP-CEM I 4% fibra* y *MFP-CEM I+P 4% fibra* se desecharon por las cantidades elevadas de plastificante y exceso de agua, con lo que se propuso reducir una mínima cantidad de agua para tener un escurrimiento muy cercano a los morteros de referencia.

Finalmente, las mezclas con 1% y 2% de fibras sintéticas y naturales no presentaron mayor dificultad, para mejorar la trabajabilidad simplemente se jugó con el porcentaje de aditivo, sin descartar ninguna mezcla.

4.4.2. Propiedades en estado fresco de matrices cementicias con fibras.

Los resultados obtenidos de la densidad y escurrimiento de las mezclas óptimas de morteros de referencia y con adiciones de fibras vegetales y sintéticas se muestran en la Tabla 11 de manera resumida; en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 del Anejo B se muestran a detalle los datos hallados en cada muestra fabricada.

Tabla 11. Propiedades en estado fresco de morteros.

Muestras	Dosificación Fibra	Densidad (kg/m ³)	Escurrimiento (mm)
MRef-CEM I	0%	2182.00	174.00
MRef-CEM I+P	0%	2156.00	160.50
MFN-CEM I	1%	2159.50	157.00
MFN-CEM I	2%	2204.00	157.00
MFN-CEM I	4%	2071.50	139.00
MFN-CEM I+P	1%	2159.50	168.25
MFN-CEM I+P	2%	2177.00	155.00
MFN-CEM I+P	4%	2145.00	150.25
MFP-CEM I	1%	2205.00	173.00
MFP-CEM I	2%	2210.00	165.00
MFP-CEM I	4%	2193.00	143.25
MFP-CEM I+P	1%	2186.00	158.25
MFP-CEM I+P	2%	2185.50	159.25
MFP-CEM I+P	4%	2207.50	159.25

Se determinó que a medida que incrementa la proporción de fibras naturales, se reduce notablemente la trabajabilidad del mortero, incluso puede llegar a ser nulo el mezclado. Por esta razón, se redujo agua (MFP-CEM I - 4%) y agregó la cantidad máxima recomendada por el proveedor de aditivo superplastificante para alcanzar la densidad (Figura 10; a) y escurrimiento (Figura 10; b) de las muestras de referencia.

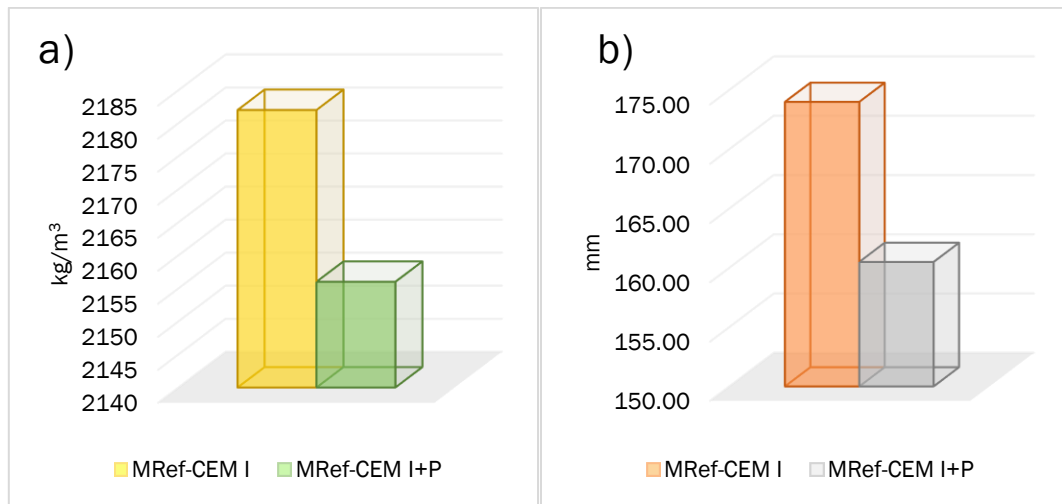


Figura 10. Propiedades de los morteros de referencia: a) Densidad; b) Escorrimento

Los morteros de referencia que contienen metacaolín al 15% con contenidos de agua iguales a los de morteros fabricados únicamente con cemento, reducen drásticamente su consistencia, de estado plástico a seco. Este fenómeno se puede justificar por su efecto relleno que esta puzolana tiene, ya que por su elevada finura contribuye al refinamiento de los poros, incrementando la cohesión de la matriz en estado fresco [63]. La densidad también se ve afectada, los morteros con MK son más densos, lo que se traduce a que la presencia de este aglomerante influye en la cohesión entre partículas, haciendo al material menos poroso y resistente.

Además Frías y otros colaboradores [64] explican que la incorporación de esta puzolana tiene un alto contenido de alúmina en su composición, observa la formación de silicato de calcio y aluminio hidratado (C-A-S-H) que ocurre por el reemplazo de silicio (Si) por aluminio (Al) en las cadenas de Silicato de calcio hidratado (C-S-H), generándose cadena de geles con un mayor grado de polimerización y con cadenas más largas.

En la Figura 11 se muestra de manera gráfica como interactúa la cantidad de fibras y la densidad en estado fresco de los morteros.

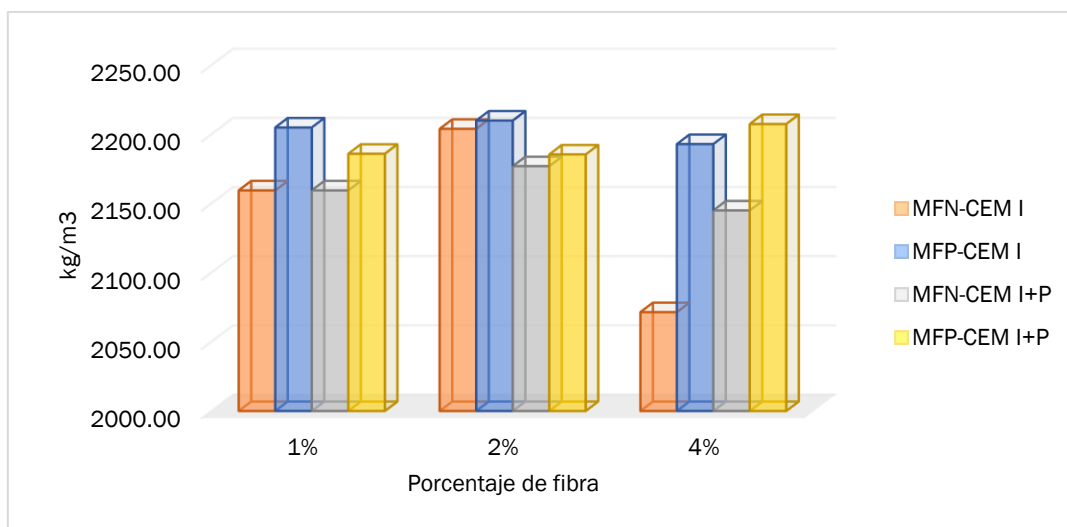


Figura 11. Comparación de densidades de morteros con fibras.

En las probetas con cemento Portland tipo I y fibra natural es claro evidenciar que la densidad disminuye en rangos aproximados 2% al 4% con respecto a las probetas de referencia fabricadas sin ningún tipo de aditivo, ni fibras. Sobre todo es fundamental aclarar que en las probetas de mortero reforzado con fibras de linters 4% (MFN-CEM I), se observó que luego de pasado unos minutos el fenómeno de exudación en la superficie de los moldes fue notorio, como se puede observar en la Fotografía 15 del Anejo A. este fenómeno se puede atribuir principalmente por la presencia de agua en las fibras, ya que para ser incorporadas en los morteros fue necesaria la disolución en agua y conservadas en un frigorífico para evitar la pérdida de humedad.

Por el contrario, las muestras que contenían cemento Portland tipo I y fibras de PVA necesitaron menor cantidad de aditivo, e incluso se redujo una mínima cantidad de agua para evitar la exudación y tener la misma consistencia que las muestras de referencia.

En cuanto a las probetas fabricadas con puzolana (metacaolín) y fibras, se evidencia un incremento de la densidad del 0.1 % al 1.3% aproximado con respecto a las probetas de referencia, este incremento casi despreciable se puede justificar con las muestras de referencia que contenían metacaolín necesitaban de aditivo superplastificante para su fabricación; las mezclas que se pretendieron fabricar sin este aditivo prácticamente no podían ser trabajadas y teniendo consistencia seca.

En la Figura 12 se muestra de forma gráfica la influencia de la cantidad de fibras en el escurrimiento del mortero, que es un indicativo de trabajabilidad de los morteros.

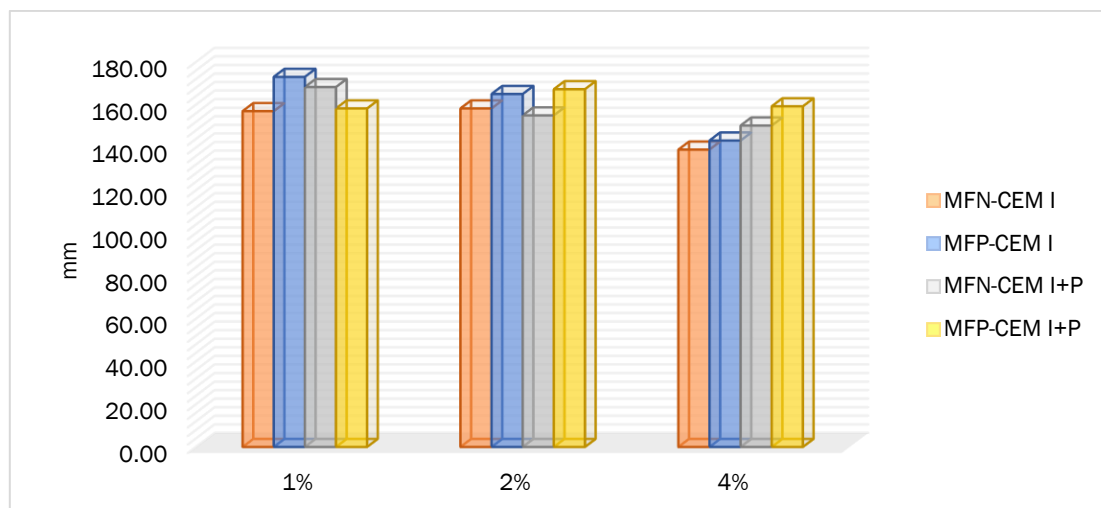


Figura 12. Escurrimiento del mortero fresco con fibras.

Al comparar los resultados de morteros con fibras naturales y fibras de PVA, es evidente notar que el escurrimiento de las muestras disminuye a pesar de utilizar aditivos superplastificantes, esto es más evidente en las mezclas con fibras de linters de algodón, estas absorben el agua y aditivo añadido a la mezcla. Las probetas realizadas con el 1% y 2% de fibra varían sus resultados en menos del 0.5%, mientras que las probetas con 4% necesitaban de una cantidad mayor de aditivo para poder ser trabajable; es importante exponer que se probó con dosificaciones superiores del 6% de fibra y éstas prácticamente eran inservibles. Para poder trabajar se

incrementaban cantidades de hasta 8% de aditivo sin respuesta favorable, por lo que, al trabajar con arenas normalizadas, la cantidad máxima de fibras es del 4%.

Finalmente, en se puede apreciar que los morteros que poseen un 4% de fibras, tanto naturales y de PVA, llega a ser fluido, pero se aleja en gran medida a los morteros de referencia. Las cantidades de agua y aditivo fueron las máximas, e incluso se probó con adiciones de aditivo superiores a las recomendadas por el proveedor, lo cual no ayudó a mejorar la trabajabilidad. Esto se debe a que el cemento en primer lugar reacciona con el agua, formando un gran número de iones en disolución en su superficie. Estos iones tienden a formar, debido a una afinidad electroestáticas, flóculos o capas de solvatación al entrar en contacto con el agua durante la operación de amasado [65].

El aditivo con el cemento, se ionizan los filamentos del aditivo, que produce la separación de los granos de cemento entre sí, las moléculas de aditivo son absorbidas y se orientan en la superficie de los granos de cemento en un espesor de varias moléculas, de lo que resulta una lubricación de las partículas [65]. Por tanto, el exceso de aditivo no reacciona con la mezcla, las cargas eléctricas que se encuentran sobre la superficie de las partículas de cemento han reaccionado en su totalidad y que, en altas dosis se produzca un efecto de retardo de la hidratación de los granos y segregación excesiva de agua [66].

Capítulo 5: Estudio de sostenibilidad, metodología MIVES

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta el estudio de sostenibilidad de la incorporación de fibras vegetales y sintéticas dentro de los compuestos de cemento, para su posible uso en prefabricados industriales.

La metodología MIVES - Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles – desarrollada por la Universitat Politècnica de Catalunya, será empleada para este fin, integrando las aportaciones realizadas por los distintos autores.

Para la implementación práctica de la metodología se presenta el programa MIVES, herramienta informática que se basa en la mencionada metodología y que además puede aplicarse a cualquier ámbito.

MIVES es una metodología de toma de decisión multicriterio, que evalúa cada una de las alternativas que pueden resolver un problema genérico definido, a través de un índice de valor [67].

La metodología MIVES difiere a otras en que el planteamiento de todo el modelo de valoración es anterior a la creación de las alternativas. De esta forma, las decisiones se toman al inicio, cuando se definen los aspectos que se tendrán en cuenta y cómo serán valorados. La ventaja de este planteamiento es que la toma de decisión se realiza sin que exista influencia de las valoraciones de las alternativas evitando que se produzca cualquier tipo de subjetividad.

La metodología MIVES tiene las siguientes fases: [67]

- Delimitación de la decisión: se define al decisor, se fijan los límites del sistema y se establecen las condiciones de contorno.
- Introducción del árbol de toma de decisión: ordenando de forma ramificada los aspectos que se tendrán en cuenta en la decisión.
- Creación de las funciones de valor: se crean unas funciones para poder obtener valoraciones de 0 a 1 de todos los aspectos pertenecientes a la última ramificación.
- Asignación de pesos: se asigna la importancia relativa de cada uno de los aspectos en relación a los restantes pertenecientes a una misma ramificación.
- Definición de las alternativas: se definen diversas alternativas factibles al problema de toma de decisión planteado. En algunos casos, las alternativas están prefijadas al inicio de la toma de decisión y por ello, no se debe realizar esta fase.
- Valoración de las alternativas: se obtiene el índice de valor para cada una de las alternativas planteadas.
- Realización de un análisis de sensibilidad: se analiza el posible cambio del índice de valor de cada una de las alternativas en el caso de variar los pesos o las funciones de valor definidas en las primeras fases. Esta es una fase
- opcional dentro de la metodología MIVES.

5.2. Aplicación de la metodología

5.2.1. Delimitación de la decisión

En esta etapa se estructura y delimita la toma de decisión. Los aspectos fundamentales son:

Decisor: pueden intervenir varios distintos agentes con distintos puntos de vista. En muchos casos, no existe una alternativa que sea la mejor en cada uno de los aspectos considerados [67].

En este estudio la autora, conjuntamente con sus tutores han tomado este papel.

Límites del problema: la estructura para identificar la toma de decisión, está contenida en tres ejes como muestra la Figura 13; la línea entre cortada el límite del sistema. En uno de los ejes, la toma de decisión se descompone en todo su ciclo de vida, siendo las fases temporales de las diferentes alternativas. En otro eje, la toma de decisión se divide en las partes que componen las diferentes alternativas. Por último, en el eje figuran todos los requerimientos en los que se quieren valorar las diferentes alternativas [67].

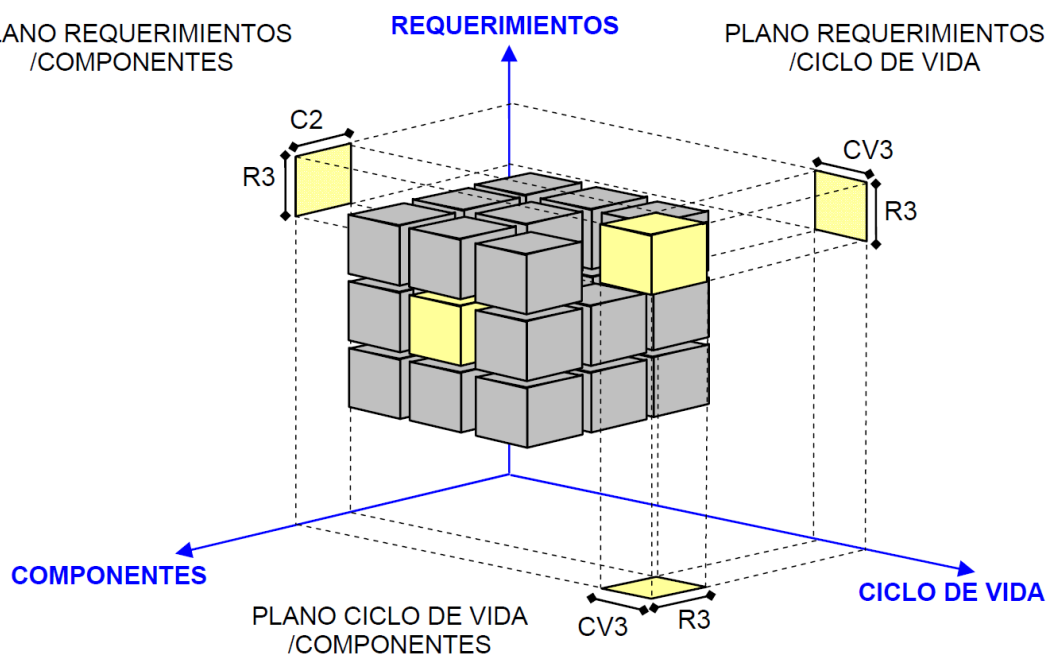


Figura 13. Estructura general de la toma de decisión

Fuente: MIVES: Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones de Sostenibilidad - ICSMM 2009, [67]

Para este estudio los requerimientos han sido del tipo funcional, refiriéndose a las propiedades halladas en laboratorio de los compuestos de cemento y adición de fibras y los aspectos sociales para su fabricación, los requerimientos ambientales y económicos, que son los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad.

Condiciones de contorno existentes: Las circunstancias que rodean a la toma de decisión pueden diferir de factores tales como, temporales, geográficos, climatológicos, tipo de sociedad, etc. Para este estudio se han tomado a la construcción de las mezclas como etapa de ciclo de vida analizada.

5.2.2. Árbol de toma de decisión

En esta etapa ordenamos en forma ramificada de todos los aspectos abordados en la decisión.

En el primer nivel, se encuentran los requerimientos más cualitativos y generales, siendo los requerimientos los tres pilares básicos de la sostenibilidad: económico, funcionalidad (social) y medioambiental.

Los niveles intermedios de la ramificación del problema se encuentran los criterios y subcriterios con que la decisión tomada, y en los últimos niveles de la ramificación se encuentran los aspectos más concretos y que van a ser evaluados directamente: los indicadores.

Como se muestran en la Figura 14 desarrollada con el programa MIVES, las esferas rojas representan a los requerimientos, las azules a los criterios de cada requerimiento y finalmente están los indicadores representados con esferas verdes.



Figura 14. Árbol de requerimientos de morteros con fibras. Programa MIVES.

5.2.3. Funciones de valor de los Indicadores

Las funciones de valor tienen como objetivo comparar las valoraciones de los indicadores con unidades de medida diferente como, por ejemplo, poder comparar variables del tipo costo (€), consumo de materias primas (kg), indicadores cuantificados por atributos (seguridad). De esta manera se realiza una suma ponderada de los diferentes valores de cada uno de los indicadores [68]. La función de valor permite pasar de una cuantificación de una variable o atributo a una variable adimensional comprendida entre 0 y 1.

Estas funciones de valor, que varían entre 0 y 1 en el eje de ordenadas, representan estado de valoración nula o valoración máxima, respectivamente, para cada uno de los indicadores. En las abscisas se coloca la variable del indicador.

En el módulo de programador de MIVES, la función de valor puede ser del tipo continua, escalón o puntuación. En los tres casos, la primera opción existente es definir los límites máximo y mínimo del rango de validez de cada uno de los indicadores.

5.2.3.1. Función de valor en S

Es la función de valor más genérica, que determina el grado de satisfacción del indicador, es decir, en las abscisas alejadas de los valores X_{min} y $X_{máx}$ es donde se refleja mayor aumento (función creciente) o disminución (función decreciente) de la satisfacción para un mismo aumento de la cuantificación del indicador [68].

Existen dos puntos significativos en esta función, en la Figura 15 se muestran los puntos que las componen, el primero es la abscisa cercana al valor de X_{min} y $X_{máx}$, para esta cuantificación del indicador, los valores alejados de los mismos, el grado de satisfacción resulta ser nulo. El segundo es el punto de saturación, en el cual un aumento (funciones crecientes) o una disminución (funciones decrecientes) en la cuantificación del indicador produce un aumento de satisfacción mínimo, ya que el grado de satisfacción en el punto de saturación es casi máximo [68].

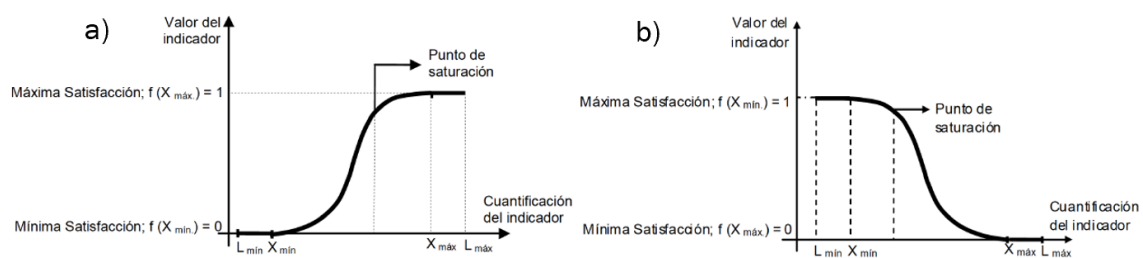


Figura 15. Funciones de valor en "S": a) creciente; b) decreciente

Fuente: Manual MIVES, [68].

Para el estudio de sostenibilidad de las matrices cementicias con fibras naturales y sintéticas, la función de valor en S decreciente representa a los indicadores referentes a consumos:

- Agua
- Aglomerante (cemento y puzolana)
- Aditivo
- Fibras

Con este indicador se considera que, si el consumo es menor, los valores más bajos que la abscisa del punto de saturación, el grado de satisfacción es casi máximo y en el caso de que el consumo sea elevado se produce un decrecimiento del indicador considerable hasta llegar a una abscisa próxima a $X_{máx}$, produciendo así un grado de satisfacción nulo y por consecuencia el valor del indicador será prácticamente 0.

En la Figura 16 se muestra el proceso de programación de la función de valor en S decreciente del consumo de agua con el módulo programador de MIVES.

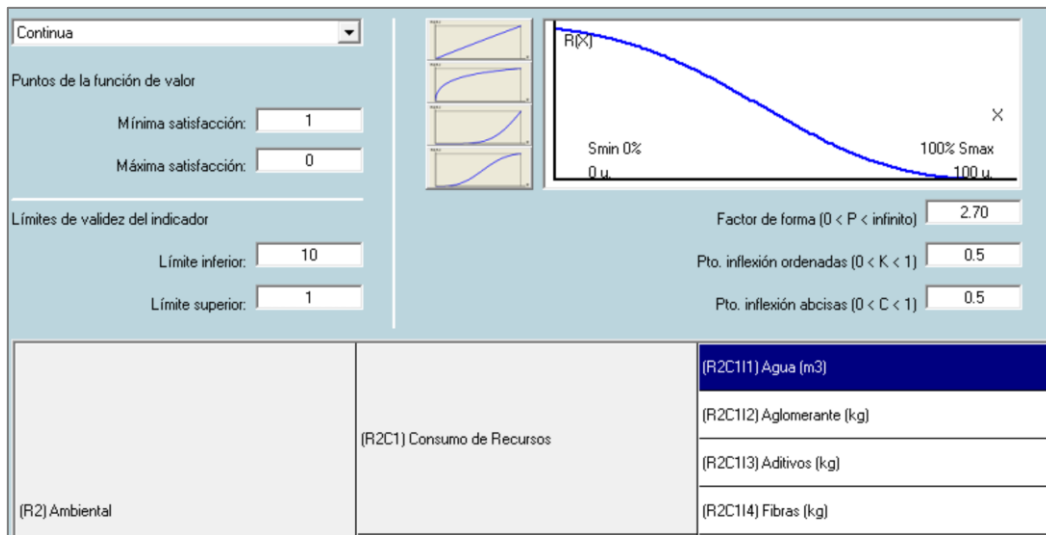


Figura 16. Asignación de la función de valor en S del indicador "consumo de agua".

Los factores de forma pueden ser modificados al igual que los puntos de inflexión, ajustándolos de tal manera que cumplan con las demandas del indicador.

5.2.3.2. Función de valor convexa

Esta forma de la función de valor es utilizada cuando la satisfacción (ordenadas) aumenta cuando el aumento de la variable del indicador está más cerca de los valores de X_{min} . (Figura 17, a). En el caso de función de valor decreciente, sucede lo contrario, la satisfacción aumenta cuando la disminución de la variable del indicador está más cerca de los valores de $X_{m\acute{a}x}$. (Figura 17, b).

Este tipo de funciones se utilizan cuando el decisor considera que la cuantificación de un indicador llega a la abscisa A, puede considerarse que la satisfacción es casi la máxima.

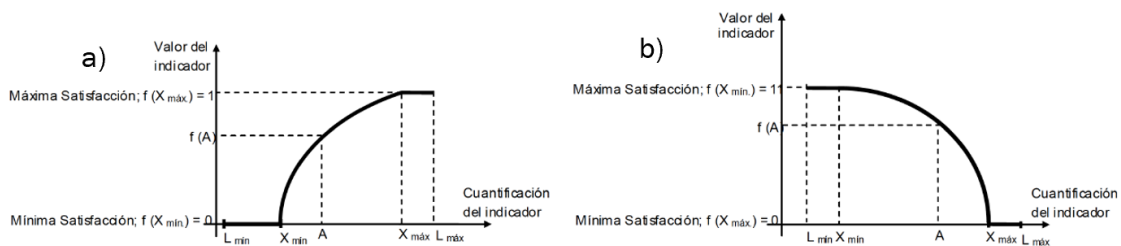


Figura 17. Funciones de valor convexas: a) creciente; b) decreciente

Fuente: Manual MIVES, [68].

Este tipo de función de valor se suele utilizar cuando la mayoría de cuantificaciones del indicador de las diferentes alternativas se sitúa cercano a X_{min} para funciones crecientes y $X_{m\acute{a}x}$ para funciones decrecientes. Otro ejemplo de este tipo de indicador, pueden ser condicionantes normativos en los que se demanda una condición mínima o una condición máxima para que el valor del indicador sea casi 1.

Por tal motivo, en este trabajo las funciones de valor con esta forma son:

- Ecurrimiento (creciente)

- Densidad (decreciente)
- Tiempo de ejecución (decreciente)

En la Figura 18 se muestra la manera de programación del *indicador densidad* en estado fresco de especímenes de matrices cementicias con adiciones de fibras naturales y sintéticas con la función de valor convexa.

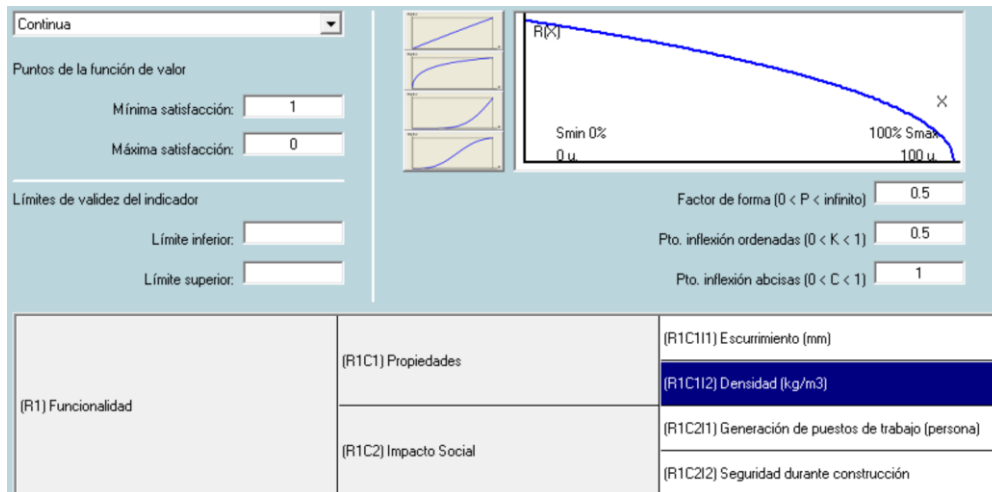


Figura 18. Programación de la función de valor del indicador densidad

Este proceso es iterativo y se ha configurado todos los indicadores con este tipo de función.

5.2.3.3. Función de valor cóncava

Este tipo de función de valor se utiliza cuando la mayoría de cuantificaciones del indicador para las alternativas se halla cerca de $X_{m\acute{a}x}$. para funciones crecientes y $X_{m\acute{i}n}$. para funciones decrecientes, pero sin llegar a alcanzarlos [68].

En la Figura 19 se puede observar una función de valor cóncava creciente y decreciente respectivamente. Para funciones de valor crecientes, la satisfacción (ordenadas) aumenta o disminuye mucho más cuando el aumento o disminución de la variable del indicador está más cerca de los valores de $X_{m\acute{a}x}$. (Figura 19, a).

En el caso de función de valor decreciente, sucede lo contrario, la satisfacción aumenta o disminuye mucho más cuando la disminución o el aumento de la variable del indicador está más cerca de los valores de $X_{m\acute{i}n}$. (Figura 19, b).

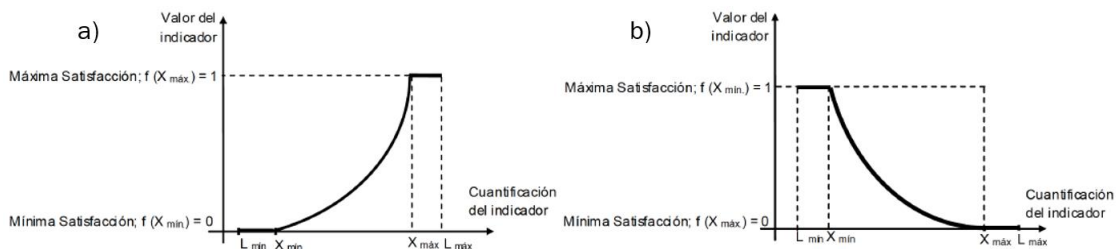


Figura 19. Funciones de valor cóncavas: a) creciente; b) decreciente

Fuente: Manual MIVES, [68].

El empleo de esta función de valor cóncava decreciente pueden ser aquellos indicadores esenciales para la satisfacción del decisor, como los indicadores de tipo económico y temporal.

Para este trabajo, la función de valor cóncava decreciente se ha asignado a los indicadores de de:

- Consumo de energía.
- Emisiones de CO₂.
- Generación de residuos sólido.
- Costos Directos.

En la Figura 20 se muestra el proceso de programación de la función de valor cóncava decreciente de emisiones de CO₂ con el módulo programador de MIVES.

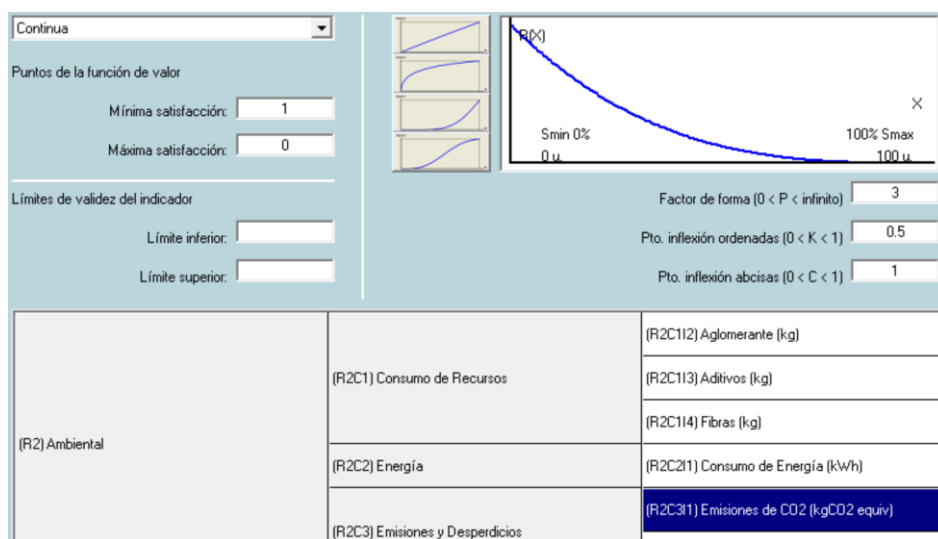


Figura 20. Asignación de la función de valor cóncava del indicador "emisiones de CO₂".

5.2.3.4. Función de valor lineal

Esta función de valor demuestra que al existir un incremento o disminución de la variable del indicador, la satisfacción del decisor aumenta o disminuye por igual independientemente del punto de la abscisa [68].

En se encuentra una función de valor lineal creciente y decreciente y sus puntos más representativos.

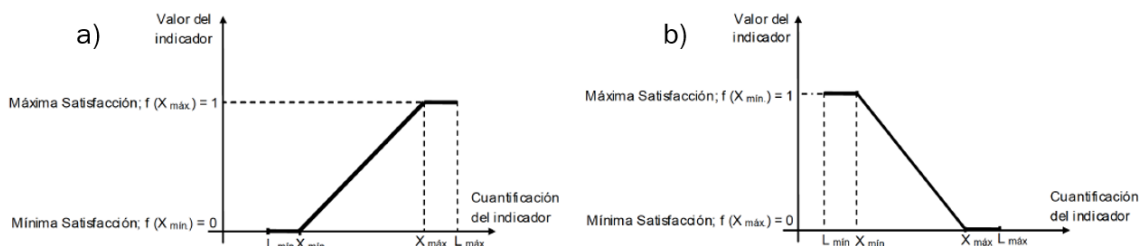


Figura 21. Funciones de valor lineal: a) creciente; b) decreciente

Fuente: Manual MIVES, [68].

Este tipo de función de valor se utiliza en aquellos indicadores en los que un aumento para funciones crecientes o disminución para funciones decrecientes de la cuantificación del indicador supone un aumento de satisfacción igual sin que influya la posición de la abscisa.

En este trabajo las funciones de valor con esta forma son:

- Generación de puestos de trabajo (creciente).
- Seguridad durante construcción (decreciente).

En la Figura 22 se muestra el proceso de programación de la función de valor lineal creciente de *Generación de puestos de trabajo* con el módulo programador de MIVES.

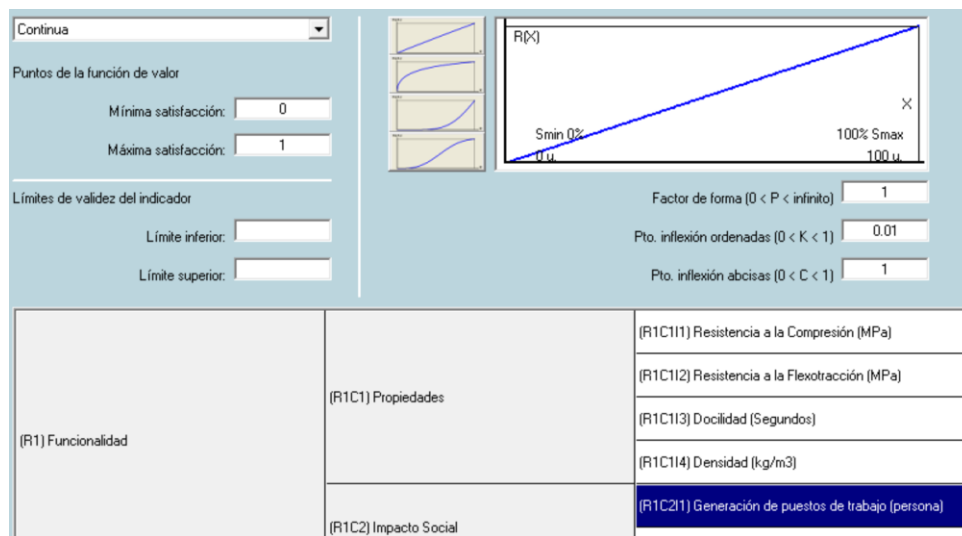


Figura 22. Programación de la función de valor lineal creciente de generación de puestos de trabajo

Una vez terminado con el proceso de asignación de las funciones de valor para cada indicador, se procede a dar las ponderaciones, explicado de manera detallada a continuación.

5.2.4. Asignación de pesos

Se denominan pesos o ponderaciones, a la medida de la importancia relativa de los aspectos que según el decisor sean más relevantes que otros [68]. La asignación de pesos se realiza dentro de una misma ramificación, es decir, se comparan aspectos que sean homogéneos, con esto los pesos de los indicadores se calculan en relación a otros pertenecientes a un mismo criterio.

Una forma de asignar los pesos de los requerimientos, criterios e indicadores es mediante una puntuación directa [67]. Otro método con el cual se asigna pesos es a través de la metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico), que se basa en una comparación por pares de todos los elementos entre ellos. La escala propuesta por Saaty [69] se utiliza para esta comparación, en la que se admiten las situaciones intermedias y los inversos, mostrándose en la Tabla 12 la escala propuesta por el autor.

Tabla 12. Escala de comparación de Saaty.

Importancia del aspecto i respecto j (a_{ij})	Importancia del aspecto j respecto i (a_{ji})
1: Igual importancia	1: Igual importancia
3: Ligeramente más importante o preferido	$\frac{1}{3}$: Ligeramente menos importante o preferido
5: Más importante o preferido	$\frac{1}{5}$: Menos importante o preferido
7: Mucho más importante o preferido	$\frac{1}{7}$: Mucho menos importante o preferido
9: Absolutamente/extremadamente preferido	$\frac{1}{9}$: Absolutamente/extremadamente menos preferido

Fuente: Analytical Hierarchy Process, Saaty [69].

Tras de hacer la comparación entre todos los aspectos se realiza la matriz de comparación que tiene dos características importantes, la matriz tiene el valor 1 en toda la diagonal y el elemento simétrico de la matriz es el número inverso, es decir, si el indicador i respecto al j tiene una importancia de 4, cuando se compara el indicador j con i será el valor inverso, es decir $\frac{1}{4}$.

Todos estos aspectos han sido abordados en el programa MIVES, clicando uno de los indicadores, criterios o requerimientos se muestra un cuadro de diálogo en el que se asignan los pesos a todos los indicadores de un mismo criterio, todos los criterios de un mismo requerimiento o todos los requerimientos.

En la Figura 23 se muestra el proceso de asignación de pesos por el método AHP de los indicadores del criterio *Consumo de Recursos*.

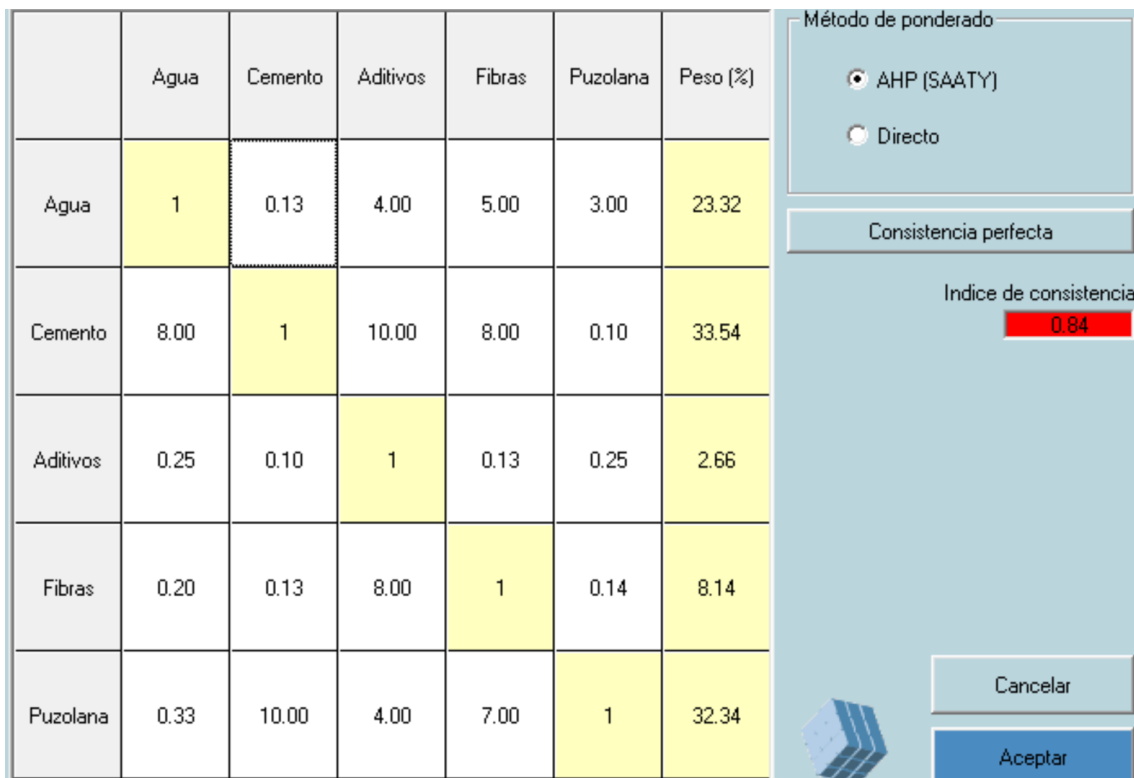


Figura 23. Matriz de pesos de los indicadores del criterio "Consumo de Recursos"

Este proceso se realiza para cada uno de los elementos que componen el árbol de requerimientos. Mostrándose en la Tabla 13 los porcentajes totales de cada indicador ejecutado en el programa.

Tabla 13. Porcentaje de pesos de las alternativas.

Nivel 1 Requerimientos	Nivel 2 Criterios	Nivel 3 Indicadores
(R1) Funcionalidad Peso: 35.00 %	(R1C1) Propiedades Peso: 25.00 %	(R1C11) Esguerrimiento Peso: 83.33 %
		(R1C12) Densidad Peso: 16.67 %
	(R1C2) Impacto Social Peso: 75.00 %	(R1C21) Generación de puestos de trabajo Peso: 16.67 %
		(R1C22) Seguridad durante construcción Peso: 83.33 %
(R2) Ambiental Peso: 45.00 %	(R2C1) Consumo de Recursos Peso: 40.55 %	(R2C11) Agua Peso: 23.32 %
		(R2C12) Cemento Peso: 33.54 %
		(R2C13) Aditivos Peso: 2.66 %
		(R2C14) Fibras Peso: 8.14 %
		(R2C15) Puzolana Peso: 32.34 %
	(R2C2) Energía Peso: 11.50 %	(R2C21) Consumo de Energía Peso: 100.00 %
	(R2C3) Emisiones y Desperdicios Peso: 47.96 %	(R2C31) Emisiones de CO2 Peso: 87.50 %
		(R2C32) Generación de Residuos sólidos Peso: 12.50 %
(R3) Económico Peso: 20.00 %	(R3C1) Construcción Peso: 12.50 %	(R3C11) Costo Directos Peso: 83.33 %
		(R3C12) Tiempo de ejecución Peso: 16.67 %

Como asignó un porcentaje de 45% en el requerimiento ambiental, principalmente porque este contiene más indicadores y que difieren más de alternativa a otra, dando mayor importancia a los recursos consumidos para cada alternativa. Este criterio se siguió para los niveles siguientes, es decir, para el nivel 2, los criterios y el nivel 3, los indicadores.

Finalmente, en el módulo *Programador* se comprueba que el modelo carezca de errores y que la información este completa, para luego proceder al módulo de usuario en el que de ingresan los valores de indicador que ha sido tomado en cuenta en el modelo.

5.3. Programación del módulo usuario

En el módulo usuario el archivo “.mip” generado por el módulo programador, se ejecuta y se programa las alternativas del proyecto, como se muestra en la Figura 24 se generan un total de 14 alternativas, que posteriormente se introducirán todas las cuantificaciones de los indicadores para cada una de ellas. En el Anejo C a partir de la página 56 se detallan las cuantificaciones de cada indicador y los criterios que se tomaron en cuenta para cada uno.

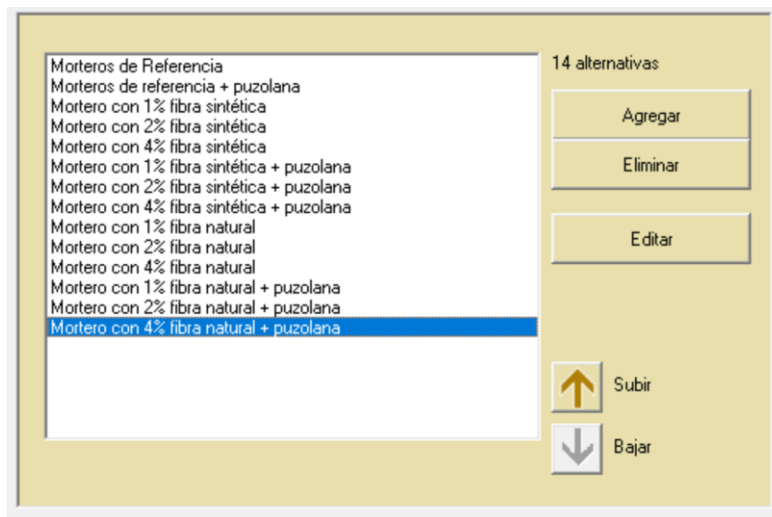


Figura 24. Definición de alternativas con el Módulo Usuario de MIVES.

Una vez introducida todas las cuantificaciones de indicadores de cada alternativa (Tabla 14), se comprueba la carencia de errores, finalmente se genera un archivo de extensión “.miu” con el que se ejecuta el módulo reporte, con el que se obtienen los índices de valor de las diferentes alternativas o los valores de los indicadores, criterios y requerimientos.

Tabla 14. Valores de cada indicador de las alternativas.

Requerimientos	Criterios	Indicadores	Morteros de Referencia	Morteros de referencia + puzolana	Mortero con 1% fibra sintética	Mortero con 2% fibra sintética
(R1) Funcionalidad	(R1C1) Propiedades	(R1C11) Escurrimiento (mm)	174	160.5	173	165
		(R1C12) Densidad (kg/m3)	2182	2156	2205	2210
	(R1C2) Impacto Social	(R1C21) Generación de puestos de trabajo (persona)	9	14	14	14
		(R1C22) Seguridad durante construcción (Selecciones)	Bajo/Nulo	Bajo/Nulo	Bajo/Nulo	Bajo/Nulo
(R2) Ambiental	(R2C1) Consumo de Recursos	(R2C11) Agua (m3)	0.00045	0.00045	0.00045	0.00045
		(R2C12) Cemento (kg)	0.9	0.765	0.9	0.9
		(R2C13) Aditivos (kg)	0	0.0002	0	0.0045
		(R2C14) Fibras (kg)	0	0	0.009	0.018
		(R2C15) Puzolana (kg)	0	0	0	0
	(R2C2) Energía	(R2C21) Consumo de Energía (kWh)	0.125	0.125	0.126	0.126
	(R2C3) Emisiones y Desperdicios	(R2C31) Emisiones de CO2 (kgCO2 equiv)	0.045	0.045	0.045	0.045
		(R2C32) Generación de Residuos sólidos (kg)	0.01	2.03	0.01	0.01
(R3) Económico	(R3C1) Construcción	(R3C11) Costo Directos (euro/kg)	0.14	1.12	1.61	0.14
		(R3C12) Tiempo de ejecución (minutos)	30	48	34	34

5.4. Resultados y Análisis

Con la ayuda del módulo *REPORTE* se generan los gráficos, tablas y valores de las 14 alternativas. A su vez se pueden generar solo los resultados de las alternativas que se desean comparar. La combinación puede ser numerosa, pero se aconseja comparar aquellos indicadores, que posean mayor diferencia en su cuantificación.

En la Figura 25 se ha generado los diagramas de barras de los Requerimientos de los morteros de referencia.

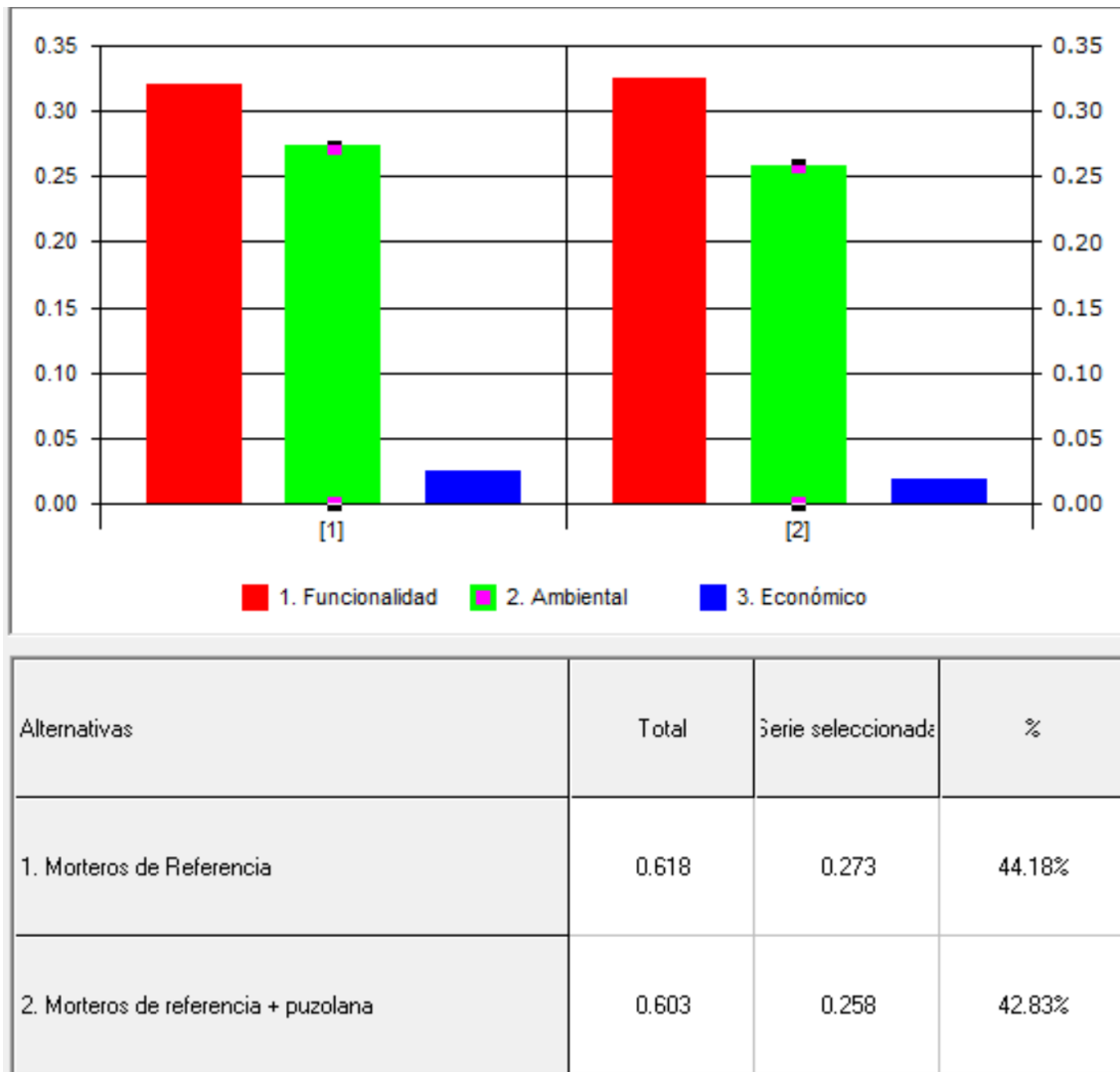


Figura 25. Comparación de los requerimientos de morteros de Referencia.

Estos diagramas nos indican que los morteros de referencia fabricados únicamente con cemento satisfacen en mayor medida que los fabricados con puzolana. El índice de valor total de la alternativa es de 0.618.

En los criterios ambientales los morteros de CEM I son mayores a los morteros que contienen metacaolín en su mezcla, de igual manera el requerimiento económico es mayor en morteros sin puzolanas. De manera detallada se pueden encontrar la comparación de criterios e indicadores en el Anejo C a partir de la página 40.

En la Figura 26 se comparan los morteros fabricados con Cemento portland tipo I y con fibras, esto permite diferenciar en qué medida difieren los requerimientos de cada alternativa.



Figura 26. Comparación de mezclas de CEM I y fibras.

En caso de que los requerimientos de funcionalidad fueran los más importantes para el intérprete, los morteros que poseen 4% de fibra sintética son insatisfactorios, pese a que ambientalmente y económicamente son satisfactorios.

Si de esta valorización se necesita fabricar especímenes a gran escala se confirma que las mezclas con 2% de fibra sintética responderán de manera satisfactoria a las propiedades en estado fresco mientras que las fabricadas con 4% de fibras naturales en términos de sostenibilidad no cumplirán satisfactoriamente.

De la misma forma se comparan los morteros fabricados con aglomerantes de cemento y puzolana (metacaolín) y contenidos de fibras naturales y sintéticas, con lo que es evidente apreciar gráficamente (Figura 27), en qué medida los requerimientos de cada alternativa varían.

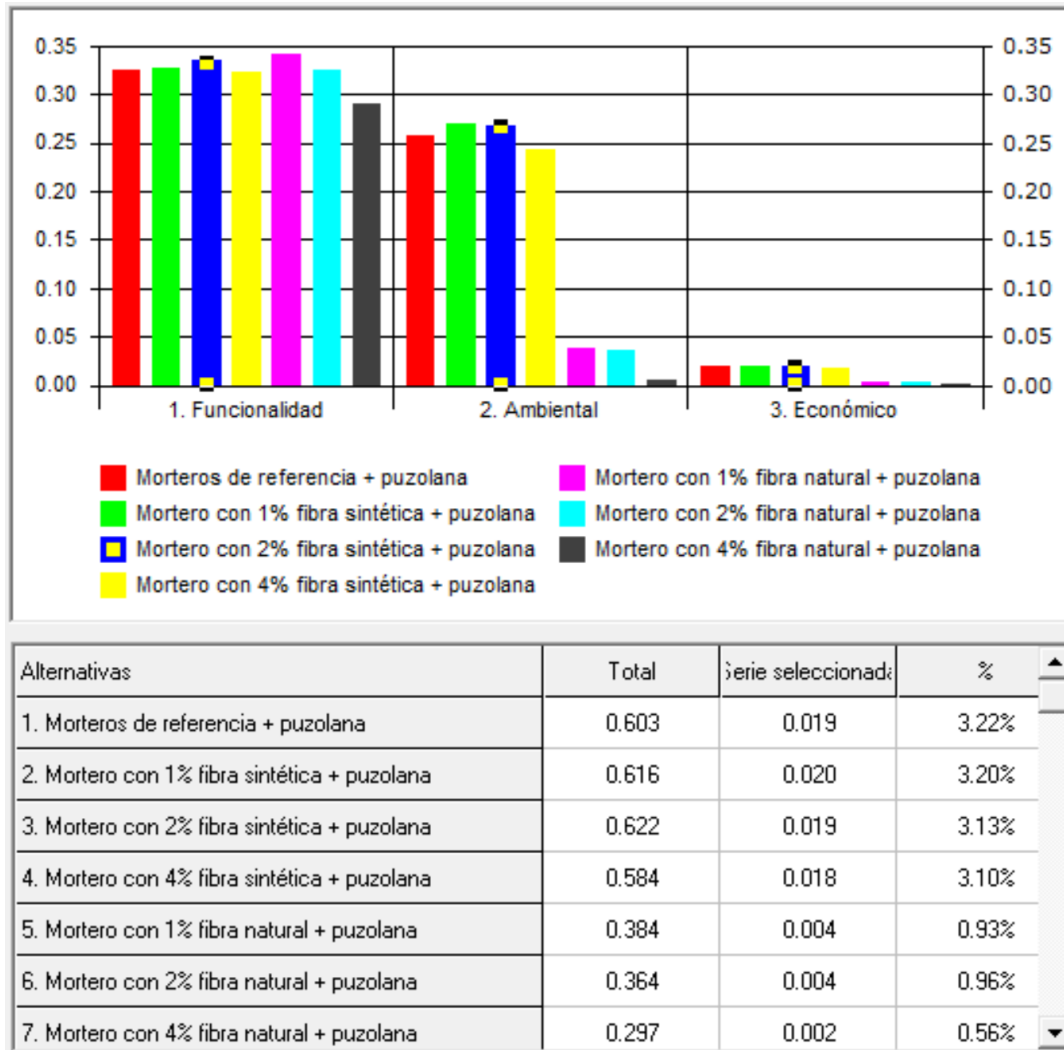


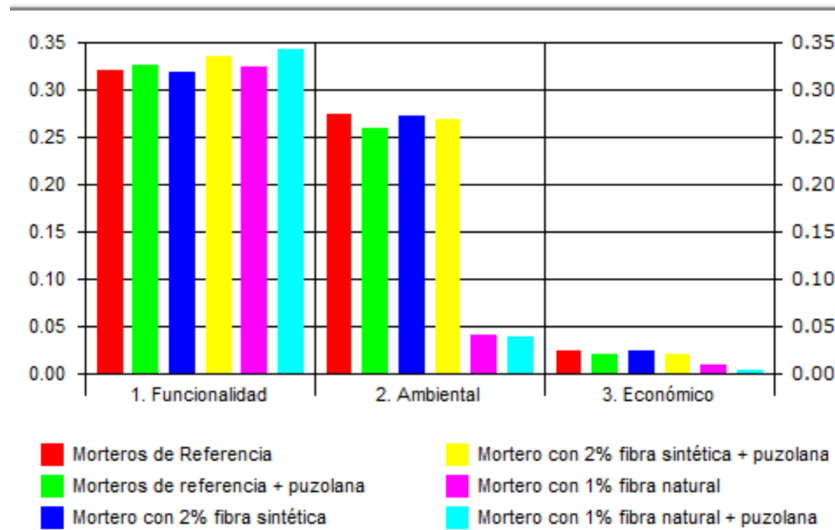
Figura 27. Comparación de mezclas de CEM I + puzolana y fibras.

Se puede probar que los morteros con contenidos de fibras del 2% responden de manera más satisfactoria al compararse a los morteros de referencia. Mientras que los morteros con 4% de fibras de linters son los que se podrían descartar, el índice de satisfacción es bajo principalmente por los requerimientos ambientales.

De este primer análisis se comparan los morteros con fibras que mayor índice de satisfacción han tenido, con lo cual se dará una respuesta del mejor material hablando en términos de sostenibilidad.

Las muestras seleccionadas para este segundo análisis son los morteros de referencia y las mezclas que contienen 1% de fibras naturales y 2 % de fibras de PVA, con lo cual se dará la mejor alternativa en cuanto al uso de morteros con fibras, tanto de naturales como sintéticas.

En la Figura 28 se exhibe de manera graficas las 6 muestras seleccionadas, se han distribuido de acuerdo a los requerimiento funcionales, ambientales y económicos.



Alternativas	Total	erie seleccionac	%
1. Morteros de Referencia	0.618	0.024	3.95%
2. Morteros de referencia + puzolana	0.603	0.019	3.22%
3. Mortero con 2% fibra sintética	0.613	0.024	3.97%
4. Mortero con 2% fibra sintética + puzolana	0.622	0.019	3.13%
5. Mortero con 1% fibra natural	0.373	0.009	2.46%
6. Mortero con 1% fibra natural + puzolana	0.384	0.004	0.93%

Figura 28. Comparación de mezclas con 1 y 2% de fibras.

En los requerimientos de funcionalidad es evidente que las mezclas que poseen 1% de fibra naturales y puzolanas son los más satisfactorios, pero al tener mayor peso los requerimientos ambientales esta alternativa es una de las menos sostenibles. De los requerimientos económicos se evidencia que la mejor alternativa es la de morteros con 2% de fibras sintéticas, pero aquellas mezclas que tienen metacaolín en su fabricación son la solución más sostenible de morteros reforzados con fibras.

5.5. Discusión

Lo que pretende esta metodología es dar un número (cerca de 1) que permita comparar las alternativas y tomar una decisión, en este caso del material (mortero) que cumpla con la mayor satisfacción de los requerimientos de sostenibilidad, para la construcción de elemento a gran escala.

La ventaja de tener una herramienta informática, es simple, se pueden configurar una mayor cantidad de alternativas y obtener resultados en la mitad del tiempo, que a su vez se pueden comparar de manera global o específica. Esta característica permite a los investigadores, un análisis más amplio y con ello tener un conocimiento más generalizado de cómo afectará cada alternativa propuesta y a tomar decisiones más sostenibles. En la etapa constructiva de los morteros con fibras, aquellas que contienen 2% de fibra sintéticas resultan más sostenibles que las muestras que poseen fibras naturales en la misma proporción. Sería interesante analizar otras etapas de ciclo de vida y dar un veredicto final del uso de este material.

Capítulo 6: Conclusiones

6.1. Conclusión General

El mortero conforme a la naturaleza del cemento, adiciones minerales y aditivos químicos puede o no variar su comportamiento en estado fresco. La presencia de metacaolín y fibras (linters de algodón y PVA), perturba el comportamiento de los morteros en estado fresco, el escurrimiento disminuye y por consecuencia dificulta la puesta en obra, por lo que es necesario incluir aditivos que mejoren la trabajabilidad.

Los morteros de referencia que contienen metacaolín reducen notablemente su consistencia, de un estado plástico a morteros secos, teniendo cantidades de agua iguales a los fabricados solo con cemento,

De los morteros con fibras plásticas y con fibras naturales se determinó que los que contenían proporciones igual al 4% carecían de trabajabilidad si no se agregaba ningún plastificante.

También, se halló que la densidad del mortero fresco es superior a las que contienen fibras de PVA, las fibras contienen mayor densidad y la proporción de las mismas en el mortero es mayor, incrementando el peso del mortero.

6.2. Conclusiones Específicas

Del análisis del estado del arte se confirma que el uso de fibras ya era considerado desde las antiguas civilizaciones, enfocándose principalmente en materias sostenibles, sin embargo, los investigadores han modificado estos materiales para aportar una mejor respuesta frente a agentes corrosivos, Con la evolución de la tecnología las fibras sintéticas ganaron protagonismo por sus excelentes propiedades mecánicas, a pesar de su coste elevado.

Se diseñaron un total de 40 mezclas de mortero, referencia, con contenidos de fibras y puzolanas. De total se descartaron 12 fueron, principalmente por la nula trabajabilidad que presentaban las que contenían porcentajes de fibras superior al 2%. Las mezclas con contenidos de metacaolín generan una consistencia más seca, que incluso superan a las fabricadas con cemento y fibras, lo cual implica la necesidad de agregar algún tipo de aditivo, plastificantes o superplastificantes que mejoren la manejabilidad de las mezclas.

Dentro de las propiedades en estado fresco de los morteros con fibras, las mezclas con porcentajes de linters del 4% en relación al peso total del aglomerante total, permiten reducciones en la densidad del material que varían entre 24 y 97.50 kg/m³, con respecto a probetas referencia con densidades promedias de 2169 kg/m³, este aspecto es importante pues influirán en gran medida en las prestaciones finales que ofrecerá el mortero, resistencia y durabilidad principalmente.

Del estudio de sostenibilidad muchas de las cuantificaciones de los indicadores no son valores deterministas y son estimaciones o cálculos aproximados que se generaron principalmente por la decisora, en este caso, se deben contrastar que los

datos que se habían cuantificados sean correctos. Con este se podría estimar que las mezclas fabricadas con mortero de cemento CEM I y 2% de fibras sintéticas generan mayor satisfacción tomando en cuenta los criterios y requerimientos evaluados, mientras que los morteros del 4% de fibra natural, son la alternativa menos favorable.

6.3. Futuras líneas de investigación

Por las condiciones excepcionales presentadas durante la ejecución de este trabajo de investigación se recomienda realizar el análisis profundo de las propiedades en estado endurecido de las mezclas de mortero con puzolana y fibras, para determinar en la etapa de servicio de las muestras el nivel de sostenibilidad.

Capítulo 7: Referencias Bibliográficas

- [1] “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings,” 2010.
- [2] D. of Energy and C. Change, “The Carbon Plan: Delivering our low carbon future,” 2011.
- [3] X. Zhou, H. Saini, and G. Kastiukas, “Engineering Properties of Treated Natural Hemp Fiber-Reinforced Concrete,” *Front. Built Environ.*, vol. 3, Jun. 2017.
- [4] O. Onuaguluchi and N. Banthia, “Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 68, pp. 96–108, Apr. 2016.
- [5] L. Y. Mwaikambo, “Review of the history, properties and application of plant fibres,” 2006.
- [6] M. FERNANDEZ CANOVAS, “HORMIGONES CON FIBRAS: TECNOLOGIA Y PROPIEDADES GENERALES,” *Hormig. y Acero*, no. 228/229, Apr. 2003.
- [7] A. B. Zambrano, “Estudio de las características físico-mecánicas de bloques de hormigón con fibra de cabuya,” Quito, 2016.
- [8] H. Savastano, P. G. Warden, and R. S. P. Coutts, “Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas,” in *Cement and Concrete Composites*, 2003, vol. 25, no. 6, pp. 585–592.
- [9] H. Savastano, P. G. Warden, and R. S. P. Coutts, “Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 379–384, 2000.
- [10] A. G. Llerena Encalada, “Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales,” 2014.
- [11] M. K. Tolba and A. K. Biswas, *Earth and us : population, resources, environment, development* .
- [12] P. Pujadas, “Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno,” 2008.
- [13] J. Turmo, N. Banthia, R. Gettu, and B. Barragán, “Estudio del Comportamiento a Cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras,” *Mater. Construcción*, vol. 58, no. 292, pp. 5–13, Dec. 2008.
- [14] EHE-08, “ANEJO 14 Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras,” pp. 505–525.
- [15] “What are the Differences Between Micro & Macro Synthetic Fibers?,” 2017. [Online]. Available: <https://abcpolymerindustries.com/wp-content/uploads/2017/08/Macro-vs-Micro.pdf>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [16] C. A. Juarez, “Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lecheguilla), como materiales para construcción en México,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002.
- [17] J. Carlos Bamba and A. Jesús González, “refabricating with Natural Elements. Eco-materials in the Age of Mechanical Reproduction.”

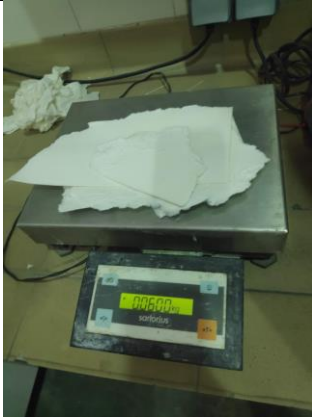








- [18] T. Fook Lam and J. Mohamad Yatim, "Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete with different fiber content and fiber length," *J. Asian Concr. Fed.*, vol. 1, p. 11, 2015.
- [19] U. de B. A. Facultad de Agronomía, "Galería de especies de uso industrial." [Online]. Available: https://www.agro.uba.ar/catedras/cul_indus/galeria/kenaf. [Accessed: 09-Sep-2019].
- [20] P. Méndez, "¿Que es el lino?," 2016. [Online]. Available: <https://www.aboutespanol.com/que-es-el-lino-3201506>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [21] H. M. Espitia Sibaja, "Aislamiento de nanofibras de celulosa a partir de residuos agroindustriales de fique y caña de azúcar, con potencial aplicación en reforzamiento de polímeros termoplásticos," Universidad Nacional De Colombia, Medellín, 2010.
- [22] Cotton Inc., "Recursos Técnicos de los productos No Tejidos de Algodón." [Online]. Available: <http://es.cottoninc.com/Cotton-Nonwoven-Technical-Guide-es/>. [Accessed: 02-May-2020].
- [23] B. Madsen, P. Hoffmeyer, A. B. Thomsen, and H. Lilholt, "Hemp yarn reinforced composites – I. Yarn characteristics," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 10, pp. 2194–2203, Oct. 2007.
- [24] G. Ramakrishna and T. Sundararajan, "Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 575–582, May 2005.
- [25] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, Nov. 2012.
- [26] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, Nov. 2012.
- [27] I. Netinger Grubeša, B. Marković, A. Gojević, and J. Brdarić, "Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 473–484, Sep. 2018.
- [28] D. B. Dittenber, "Natural Kenaf Fiber Reinforced Composites as Engineered Structural Materials," West Virginia University, 2013.
- [29] J. Claramunt, L. J. Fernández-Carrasco, H. Ventura, and M. Ardanuy, "Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 230–239, Jul. 2016.
- [30] L. Robles-Austriaco and D. A. Alexander Professor Cusens J Fyson ME Ioms Professor AE Naaman Professor JP Romualdi Professor SP Shah Professor DN Trikha Professor BR Walkus DP Barnard GL Bowen Daulat Hussain Lawrence Mahan Prem Chandra Sharma BV Subrahmanyam SA Qadeer, "Journal of Ferrocement," pp. 109–125, 1990.
- [31] S. F. Santos, R. Schmidt, A. E. F. S. Almeida, G. H. D. Tonoli, and H.

- Savastano, “Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 84–94, Aug. 2015.
- [32] V. Agopyan, H. Savastano, V. M. John, and M. A. Cincotto, “Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview,” in *Cement and Concrete Composites*, 2005, vol. 27, no. 5, pp. 527–536.
- [33] H. Savastano, S. F. Santos, M. Radonjic, and W. O. Soboyejo, “Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 4, pp. 232–243, Apr. 2009.
- [34] G. H. D. Tonoli, E. Fuente, C. Monte, H. Savastano, F. A. R. Lahr, and A. Blanco, “Effect of fibre morphology on flocculation of fibre-cement suspensions,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 1017–1022, Nov. 2009.
- [35] G. H. D. Tonoli, A. P. Joaquim, M. A. Arsne, K. Bilba, and H. Savastano, “Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 22, no. 2, pp. 149–156, Feb. 2007.
- [36] J. Claramunt, M. Ardanuy, J. A. García-Hortal, and R. D. T. Filho, “The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 586–595, May 2011.
- [37] E. Sjöström, *Wood chemistry: fundamentals and applications*. Academic Press, 1993.
- [38] M.-A. Arsène, A. Okwo, K. Bilba, A. B. O. Soboyejo, and W. O. Soboyejo, “Chemically and Thermally Treated Vegetable Fibers for Reinforcement of Cement-Based Composites,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 22, no. 2, pp. 214–227, Feb. 2007.
- [39] K. Grohmann, R. G. Cameron, and B. S. Buslig, “Fractionation and pretreatment of orange peel by dilute acid hydrolysis,” *Bioresour. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 129–141, Jan. 1995.
- [40] A. N. Netravali and S. Chabba, “Composites get greener,” *Mater. Today*, vol. 6, no. 4, pp. 22–29, Apr. 2003.
- [41] J. A. Caballero, A. Marcilla, and J. A. Conesa, “Thermogravimetric analysis of olive stones with sulphuric acid treatment,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 44, no. 1, pp. 75–88, Nov. 1997.
- [42] “Pirólisis - EcuRed.” [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Pirólisis>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [43] F. Shafizadeh, “Introduction to pyrolysis of biomass,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 3, no. 4, pp. 283–305, Apr. 1982.
- [44] B. Çomak, A. Bideci, and Ö. Salli Bideci, “Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 794–799, Apr. 2018.
- [45] A. Elsaid, M. Dawood, R. Seracino, and C. Bobko, “Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1991–2001, Apr. 2011.

- [46] T. M. Omoniye, S. Duna, and M. W. Othman, “Compressive strength characteristics of kenaf fibre reinforced cement mortar,” *Adv. Mater.*, vol. 4, pp. 6–10, 2015.
- [47] C. Sawsen, K. Fouzia, B. Mohamed, and G. Moussa, “Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 659–664, Mar. 2014.
- [48] M. J. E. Oliveira and V. Agopyan, “Effect of simple treatments of malva fibres for the reinforcement of portland cement mortar,” *Fibre Reinf. Cem. Concr. Proc.*, 1992.
- [49] P. Pujadas Álvarez, “CAPÍTULO VII DURABILIDAD Artículo 37º Durabilidad del hormigón y de las armaduras 37.1 Generalidades.”
- [50] P. Pujadas Álvarez, “Estado general del conocimiento.”
- [51] I. Marković, *High-performance Hybrid-fibre Concrete: Development and Utilisation*. 2006.
- [52] P. Rossi, P. Acker, and Y. Malier, “Effect of steel fibres at two different stages: The material and the structure,” *Mater. Struct.*, vol. 20, no. 6, pp. 436–439, Nov. 1987.
- [53] A. G. Kooiman, C. Van Der Veen, and J. C. Walraven, “Modelling the post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete for structural design purposes.”
- [54] A. R. Arciresa, “Metacaolín Peser®,” 12-Jan-2012. [Online]. Available: http://www.arciresa.es/metacaolin_peser.pdf. [Accessed: 25-Feb-2020].
- [55] NORMENSAND, “CEN-Standard Sand EN 196-1.” [Online]. Available: <https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [56] M. Builders Solutions, “MasterFiber 400.”
- [57] ® S., “Sika ® ViscoCrete ® -5970,” 2013.
- [58] AENOR, “UNE-EN 196-1:2018,” 2018. [Online]. Available: <https://portal-aenormas-aenor-com.recursos.biblioteca.upc.edu/aenor/visor.asp?pidnorma=087057057063057063064062-988715428&pidioma=ES&pidtipo=N#page=11>. [Accessed: 22-Nov-2019].
- [59] J. Claramunt, M. Ardanuy, and J. A. García-Hortal, “Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 79, no. 1, pp. 200–205, 2010.
- [60] AENOR, “UNE-EN 1015-3:2000 Métodos de ensayo para morteros de albañile...” [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023381>. [Accessed: 31-Oct-2019].
- [61] AENOR, “UNE-EN 1015-6:1999 Métodos de ensayo de los morteros para alba...” [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0009380>. [Accessed: 31-Oct-2019].

- [62] R. M. Ávila Ávila, "CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MORTEROS Y HORMIGONES FABRICADOS CON ESCORIAS DE INCINERADORAS URBANAS Y SU INFLUENCIA SOBRE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS," UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID, 2017.
- [63] D. da Silva Andrade, J. H. da Silva Rêgo, P. Cesar Morais, and M. Frías Rojas, "Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosilica," *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 18–26, Jan. 2018.
- [64] M. Frías, S. Martínez-Ramírez, T. Blasco, and M. F. Rodríguez, "Evolution of mineralogical phases by 27 Al and 29 Si NMR in MK- Ca (OH)₂ system cured at 60 °C," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 96, no. 7, pp. 2306–2310, Jul. 2013.
- [65] M. Fernández Canovas, "LOS ADITIVOS."
- [66] C. Safranez, "Características de los principales aditivos químicos para hormigones y morteros y su empleo en la construcción," vol. 23, pp. 85–111, 1970.
- [67] B. Viñolas, F. Cortés, A. Marques, A. Josa, and A. Aguado, "Mives: Modelo Integrado De Valor Para Evaluaciones De Sostenibilidad-Icsmm 2009," // *Congrés Int. Mesura i Model. la Sostenibilitat*, p. 24, 2009.
- [68] I. Josa, B. Viñolas, F. Cortés, A. Marques, A. Josa, and A. Aguado, "MANUAL MIVES Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles 2019," 2019.
- [69] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw, New York. 1980.
- [70] S. General de Planificación Energética Seguimiento, "Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España [PDF][647,80 KB]."

ANEJO A: Registro fotográfico de la campaña experimental

 <p>Fotografía 1. Peso de la fibra natural.</p>	 <p>Fotografía 2. Troceado de fibra natural.</p>	 <p>Fotografía 3. Tratamiento de la fibra natural.</p>
 <p>Fotografía 4. Tamiz para el filtrado del agua en fibras.</p>	 <p>Fotografía 5. Cemento utilizado en las mezclas.</p>	 <p>Fotografía 6. Arena normalizada utilizada.</p>
 <p>Fotografía 7. Mezcla de metacaolín y cemento</p>	 <p>Fotografía 8. Ensayo de escurrimiento del mortero de referencia.</p>	 <p>Fotografía 9. Resultado del ensayo tras 15 golpes.</p>



Fotografía 10. Ensayo de densidad del mortero.



Fotografía 11. Enmoldado de las mezclas de referencia.



Fotografía 12. Desmoldado de probetas de referencia.



Fotografía 13. Ensayo de escurrimiento de mortero y fibras naturales.



Fotografía 14. Aditivo utilizado en las mezclas.



Fotografía 15. Muestras con 4% de fibras naturales.



Fotografía 16. Fibra sintética, PVA.



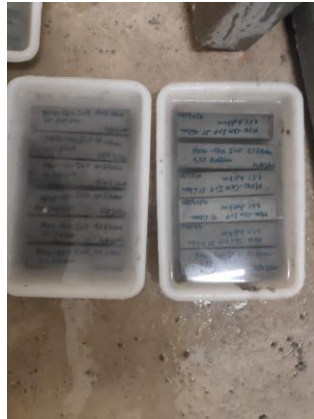
Fotografía 17. Probetas cubiertas durante 24h antes del desmoldado.



Fotografía 18. Llenado de probetas en la mesa de sacudidas.



Fotografía 19. Etiquetado de probetas de referencia.



Fotografía 20. Curado de probetas.



Fotografía 21. Consistencia de morteros con 6% de fibra natural.

ANEJO B: Datos y resultados de la campaña experimental

- Propiedades en estado fresco

Tabla 15. Densidad de muestras con 0 % y 1% de fibras

Muestra	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V _v (m ³)	ρ _m (kg/m ³)	ρ _M (kg/m ³)	Desviación
M _{Ref} - CEM I	1.54	3.722	0.001	2182	2169.00	18.38
M _{Ref} - CEM I + P	1.54	3.696	0.001	2156		
MFN-CEM I	1.54	3.700	0.001	2160	2159.50	0.71
MFN-CEM I	1.54	3.699	0.001	2159		
MFN-CEM I+P	1.54	3.700	0.001	2160	2159.50	0.71
MFN-CEM I+P	1.54	3.699	0.001	2159		
MFP-CEM I	1.54	3.746	0.001	2206	2205.00	1.41
MFP-CEM I	1.54	3.744	0.001	2204		
MFP-CEM I+P	1.54	3.731	0.001	2191	2186.00	7.07
MFP-CEM I+P	1.54	3.721	0.001	2181		

Tabla 16. Densidad de muestras con 2% de fibras

Muestra	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V _v (m ³)	ρ _m (kg/m ³)	ρ _M (kg/m ³)	Desviación
MFN-CEM I	1.54	3.743	0.001	2203	2204.00	1.41
MFN-CEM I	1.54	3.745	0.001	2205		
MFN-CEM I+P	1.54	3.711	0.001	2171	2177.00	8.49
MFN-CEM I+P	1.54	3.723	0.001	2183		
MFP-CEM I	1.54	3.747	0.001	2207	2210.00	4.24
MFP-CEM I	1.54	3.753	0.001	2213		
MFP-CEM I+P	1.54	3.725	0.001	2185	2185.50	0.71
MFP-CEM I+P	1.54	3.726	0.001	2186		

Tabla 17. Densidad de muestras con 4% de fibras

Muestra	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V _v (m ³)	ρ _m (kg/m ³)	ρ _M (kg/m ³)	Desviación
MFN-CEM I	1.54	3.607	0.001	2067	2071.50	6.36
MFN-CEM I	1.54	3.616	0.001	2076		
MFN-CEM I+P	1.54	3.672	0.001	2132	2145.00	18.38
MFN-CEM I+P	1.54	3.698	0.001	2158		
MFP-CEM I	1.54	3.73	0.001	2190	2193.00	4.24
MFP-CEM I	1.54	3.736	0.001	2196		
MFP-CEM I+P	1.54	3.747	0.001	2207	2207.50	0.71
MFP-CEM I+P	1.54	3.748	0.001	2208		

Tabla 18. Ecurrimiento de muestras de referencia y con 1% de fibras.

Muestra	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	Esc. (mm)	Ecurrimiento (mm)
M _{Ref} -CEM I	171	175	173.0	174.00
M _{Ref} -CEM I	175	175	175.0	
M _{Ref} -CEM I+P	158	160	159.0	160.50
M _{Ref} -CEM I+P	163	161	162.0	
MFN-CEM I	160	155	157.5	157.00
MFN-CEM I	155	158	156.5	
MFN-CEM I+P	168	167	167.5	168.25
MFN-CEM I+P	170	168	169.0	
MFP-CEM I	172	176	174.0	173.00
MFP-CEM I	174	170	172.0	
MFP-CEM I+P	158	156	157.0	158.25
MFP-CEM I+P	160	159	159.5	

Tabla 19. Ecurrimiento de muestras con 2% de fibras.

Muestra	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	Esc. (mm)	Ecurrimiento (mm)
MFN-CEM I	162	156	159	158.25
MFN-CEM I	157	158	157.5	
MFN-CEM I+P	154	157	155.5	155.00
MFN-CEM I+P	153	156	154.5	
MFP-CEM I	164	166	165.0	165.00
MFP-CEM I	166	164	165.0	
MFP-CEM I+P	168	166	167.0	167.25
MFP-CEM I+P	168	167	167.5	

Tabla 20. Ecurrimiento de muestras con 4% de fibras.

Muestra	Ø1 (mm)	Ø2 (mm)	Esc. (mm)	Ecurrimiento (mm)
MFN-CEM I	126	128	127	131.00
MFN-CEM I	135	135	135	
MFN-CEM I+P	145	150	147.5	150.25
MFN-CEM I+P	152	154	153	
MFP-CEM I	145	146	145.5	143.25
MFP-CEM I	141	141	141	
MFP-CEM I+P	154	157	155.5	159.25
MFP-CEM I+P	161	165	163	

ANEJO C: Datos y resultados de indicadores de sostenibilidad en MIVES

En este anejo se expresa de manera detallada la cuantificación de cada uno de los indicadores tomados en cuenta en el árbol de decisión de uso de fibras en matrices cementicias.

El análisis se ha hecho de los 14 indicadores. Los pertenecientes al criterio *Propiedades* del requerimiento *Funcionalidad* fueron evaluados directamente con la campaña experimental de los especímenes de mortero y fibras; mientras que los siguientes fueron determinados por medio de la bibliografía y análisis de precios (costos), que será descritos de manera detallada a continuación.

Cuantificación del indicador Generación de puestos de trabajo.

Para ejecutar una obra de ingeniería se requiere de contratar personal encargado, pero de igual manera se considera que para la obtención y producción de los diferentes materiales es necesario la intervención de la mano del hombre.

El indicador “puestos de trabajo (R1C2|1)” evalúa el porcentaje de mano de obra total que podrá intervenir en las diferentes soluciones, generando beneficios a la sociedad que habita en la zona de emplazamiento del proyecto.

Cuanto mayor es el porcentaje de mano de obra expuesto, mayor será el valor de la alternativa. Por lo tanto, la función de valor seleccionada es lineal con una tendencia creciente. En la Tabla 21 se muestran las cuantificaciones de puestos de trabajo para la fabricación de materias primas, previas al proceso de mezclado.

Tabla 21. Cuantificación de generación de puestos de trabajo de la fabricación de materias primas de morteros

Producto	Fabricación Materias Primas				
	Cemento	Puzolana	Arena	Aditivo	Fibras
M _{REF} -CEM I	3 personas	0	3 personas	0	0
M _{REF} -CEM I+P	3 personas	2 personas	3 personas	1 persona	0
MFN-CEM I	3 personas	0	3 personas	1 persona	3 personas
MFN-CEM I+P	3 personas	2 personas	3 personas	1 persona	3 personas
MFP-CEM I	3 personas	0	3 personas	1 persona	2 personas
MFP-CEM I+P	3 personas	2 personas	3 personas	1 persona	2 personas

Para la fase de Producción del cemento se ha considerado que, en el proceso de Obtención y preparación de materias primas, interviene 1 persona, en los procesos de Trituración, Prehomogeneización, Molienda de crudo, Precalentador de ciclones, una segunda persona encargada de la supervisión de los equipos y finalmente una tercera persona en los procesos de Fabricación y Molienda de Clinker y la fabricación y almacenamiento del cemento. Obteniéndose un estimado aproximado de tres personas. Sin tomar en cuenta los altos mandos.

En la fabricación del Metacaolín se ha considerado a una persona para la extracción de la arcilla blanca (caolina) y una segunda persona encargada de la calcinación.

Para la obtención de arena normalizada, se planteó una persona encargada de la explotación del suelo, una segunda persona encargada de la supervisión de lavado y preclasificación y clasificación de las arenas y una tercera persona encargada del proceso de secado, cribado y separación por granulometría en los depósitos.

Para la obtención de fibras sintéticas, se consideró a una persona encargada en la producción de monofibras de PVA y una segunda persona encargada de la gestión distribución y empaquetado de fibras.

En la obtención de los linters de algodón, se estimó 1 persona encargada de la siembra, cultivo y cosecha de algodón, una segunda persona encargada del manejo de máquinas desbarradoras para la obtención de la nano fibra y una tercera persona encargada de la gestión de distribución y formato de presentación de fibras.

En la Tabla 22 se muestran las cuantificaciones de puestos de trabajo para la fabricación de las mezclas en laboratorio y la cantidad total del Indicador.

Tabla 22. Cuantificación del indicador Generación de puestos de trabajo.

Producto	Proceso de fabricación de mezclas			Total (personas)
	Transporte	Tratamiento	Mezclado	
M_{REF}-CEM I	2 personas	0	1 persona	9
M_{REF}-CEM I+P	4 personas	0	1 persona	14
MFN-CEM I	4 personas	1 persona	1 persona	16
MFN-CEM I+P	5 personas	1 persona	1 persona	19
MFP-CEM I	4 personas	0	1 persona	14
MFP-CEM I+P	5 personas	0	1 persona	17

En el proceso de fabricación de las mezclas se ha considerado las acciones previas a la fabricación, transporte de todos los materiales al laboratorio (1 persona por material) y las acciones propias a la fabricación de las mezclas.

El proceso Tratamiento corresponde a la generación de puestos de trabajo para el pretratamiento de las fibras naturales antes del amasado, por eso las mezclas de referencia y mezclas con fibras de PVA tienen cero en este indicador. En el proceso de mezclado se consideró una persona encargada del pesado, correcciones y ensayos de las mezclas obtenidas en el laboratorio. Este

Cuantificación del indicador Seguridad durante construcción.

Con este indicador representamos la seguridad que tienen los trabajadores al ejecutar la construcción del material, en función de los riesgos en los distintos procesos. En este trabaja se han considerado tres tipos de riesgos: Altos, medios y tolerables. En la Tabla 23 se indican las ponderaciones y definiciones de cada uno. Asignando la función lineal decreciente para este indicador, de tal manera que se obtiene el máximo valor para la evaluación del riesgo que tiene menos puntos. El objetivo es favorecer alternativas con los riesgos laborales menores.

Tabla 23. Ponderación del indicador Seguridad durante la construcción.

Indicador	Atributo	Definición	Puntos
Seguridad durante construcción.	Medio	Riesgos que podrían ocasionar lesiones permanentes en los trabajadores.	1
	Tolerable	Riesgos de incidentes con consecuencias físicas bajas (lesiones, cortes, heridas menores).	0.5
	Bajo/Nulo	Riesgos de incidentes sin consecuencias físicas (confort, ruido, vibraciones, etc.)	0

El riesgo considerado para fabricar los morteros en laboratorio en su mayoría fue Bajo/Nulo. Los únicos indicadores que tienen un riesgo tolerable de seguridad durante la construcción son los que tienen cantidades del 4% de fibras de PVA, debido a las fibras pueden incrustarse en la piel, y un posible riesgo en los ojos.

Cuantificación de indicadores del criterio Consumo de Recursos.

Para cuantificar los consumos de todos los materiales para la fabricación de morteros con fibras, se consideraron las cantidades empleadas en el laboratorio y las modificaciones para mejorar la trabajabilidad del material, con respecto a morteros de referencia. La Tabla 24 el total de recursos utilizadas en las mezclas.

Tabla 24. Cuantificación de indicadores del criterio Consumo de Recursos.

Muestras	Fibra	Aglomerante		Aditivo (kg)	Fibras (kg)	Agua (m3)
		Cemento (kg)	Mk (kg)			
M _{REF} - CEM I	0	0.900	0.000	0.0000	0.000	0.00045
M _{REF} - CEM I+P	0	0.765	0.135	0.0002	0.000	0.00045
MFN-CEM I	1%	0.900	0.000	0.0090	0.009	0.00045
MFN-CEM I	2%	0.900	0.000	0.0225	0.018	0.00045
MFN-CEM I	4%	0.900	0.000	0.0180	0.036	0.00045
MFN-CEM I+P	1%	0.765	0.135	0.0045	0.009	0.00045
MFN-CEM I+P	2%	0.765	0.135	0.0090	0.018	0.00045
MFN-CEM I+P	4%	0.765	0.135	0.0225	0.036	0.00045
MFP-CEM I	1%	0.900	0.000	0.0000	0.009	0.00045
MFP-CEM I	2%	0.900	0.000	0.0045	0.018	0.00045
MFP-CEM I	4%	0.900	0.000	0.0180	0.036	0.00042
MFP-CEM I+P	1%	0.765	0.135	0.0045	0.009	0.00045
MFP-CEM I+P	2%	0.765	0.135	0.0090	0.018	0.00045
MFP-CEM I+P	4%	0.765	0.135	0.0225	0.036	0.00045

La cuantificación de estos recursos no incluye al material desechado en la búsqueda de mezclas óptimas. El indicador de consumo de áridos no ha sido considerado porque la metodología recomienda descartar aquellos indicadores que tengan la misma cuantificación (cantidad).

✚ Cuantificación del indicador *Consumo de Energía*.

Para la cuantificación del consumo energético fue necesario investigar la potencia de cada maquinaria para la fabricación de las mezclas. Se incluyeron las actividades de pretratamiento de fibras naturales, de mezclado y fabricación de probetas.

En la Tabla 25 se tiene de manera detallada los equipos, potencia, tiempo y consumo de energía del pretratamiento de fibras naturales y de 1 mezcla promedio.

Tabla 25. Indicador de Consumo energético.

Pretratamiento de fibras			
Equipo	Potencia (W)	Tiempo (h)	Consumo (kWh)
Balanza	220	0.13	0.03
Amasadora	900	9	8.10
Refrigerador	70	24	1.68
TOTAL		9.81	
Fabricación de mezcla			
Balanza	220	0.33	0.07
Amasadora	500	0.07	0.03
Máquina de sacudidas	220	0.08	0.02
TOTAL		0.125	

Para los morteros con fibras de PVA se omiten los consumos por pretratamiento de fibras.

✚ Cuantificación del indicador *Emisiones de CO₂*.

Para este cálculo de este indicador se han tomado solamente las emisiones generadas por el consumo de energía del proceso de fabricación de las probetas, omitiendo los procesos de producción de las materias primas.

Para el cálculo de las emisiones se consideró el factor de emisión de CO₂ de 0.357 kg CO₂/kWh, emitido en un boletín nacional de España [70].

Tabla 26. Indicadores de emisiones de CO₂.

Muestra	Consumo (kWh)	Factor de emisión (CO ₂ /kWh)	Emisiones (kg CO ₂ /mezcla)
M _{REF} -CEM I	0.125	0.357	0.045
M _{REF} -CEM I+P	0.127	0.357	0.045
MFN-CEM I	9.93	0.357	3.547
MFN-CEM I+P	9.95	0.357	3.552
MFP-CEM I	0.126	0.357	0.045
MFP-CEM I+P	0.129	0.357	0.046

✚ Cuantificación del indicador *Generación de residuos sólidos*.

Este indicador fue cuantificado con los datos descritos en el apartado *Características de mezclas fabricadas en laboratorio*.

Tabla 27. Indicadores de generación de residuos sólidos.

Muestra	Desechadas (mezclas)	Peso desperdicio (kg)
MRef - CEM I	0	0.01
MRef - CEM I+P	1	2.03
MFN-CEM I 4% fibra	3	6.12
MFN-CEM I 2% fibra	0	0.01
MFN-CEM I 1% fibra	0	0.01
MFN-CEM I+P 4% fibra	2	4.08
MFN-CEM I+P 2% fibra	0	0.01
MFN-CEM I+P 1% fibra	0	0.01
MFP-CEM I 4% fibra	1	2.03
MFP-CEM I 2% fibra	0	0.01
MFP-CEM I 1% fibra	0	0.01
MFP-CEM I+P 4% fibra	1	2.04
MFP-CEM I+P 2% fibra	0	0.01
MFP-CEM I+P 1% fibra	0	0.01

✚ Cuantificación del indicador *Costos Directos de construcción*

En la Tabla 28 se describe los costos del indicador de cada alternativa, se puede desprestigiar el costo de agua y aditivo por las proporciones de mezcla.

Tabla 28. Cuantificación del indicador *Costos directos de construcción*.

Muestra	Cemento (€)	Mk (€)	Arena (€)	Fibras (€)	Agua (€)	Aditivo (€)	Energía (€)	Total
MRef - CEM I	0.09	0.00	0.02	0.00	0.0003	0.0000	0.02	0.14 €
MRef - CEM I+P	0.08	1.00	0.02	0.00	0.0003	0.0000	0.02	1.12 €
MFN-CEM I 1% fibra	0.09	0.00	0.02	0.01	0.0003	0.0000	1.49	1.61 €
MFN-CEM I 2% fibra	0.09	0.00	0.02	0.02	0.0003	0.0001	1.49	1.62 €
MFN-CEM I 4% fibra	0.09	0.00	0.02	0.01	0.0003	0.0001	1.49	1.62 €
MFN-CEM I+P 1% fibra	0.08	1.00	0.02	0.00	0.0003	0.0000	1.49	2.60 €
MFN-CEM I+P 2% fibra	0.08	1.00	0.02	0.01	0.0003	0.0000	1.49	2.60 €
MFN-CEM I+P 4% fibra	0.08	1.00	0.02	0.02	0.0003	0.0001	1.49	2.61 €
MFP-CEM I 1% fibra	0.09	0.00	0.02	0.00	0.0003	0.0000	1.49	1.61 €
MFP-CEM I 2% fibra	0.09	0.00	0.02	0.01	0.0003	0.0000	0.02	0.14 €
MFP-CEM I 4% fibra	0.09	0.00	0.02	0.03	0.0003	0.0001	0.02	0.17 €
MFP-CEM I+P 1% fibra	0.08	1.00	0.02	0.01	0.0003	0.0000	0.02	1.13 €
MFP-CEM I+P 2% fibra	0.08	1.00	0.02	0.02	0.0003	0.0000	0.02	1.14 €
MFP-CEM I+P 4% fibra	0.08	1.00	0.02	0.04	0.0003	0.0001	0.02	1.16 €

El indicador se obtuvo multiplicando las cantidades de materiales necesarias para 1 mezcla por el precio del material. Se tomaron en cuenta los precios descritos en el iTeC, los precios de aquellos materiales que no se encontraban en esta base de datos (metacaolín, fibras) se dan obtenido de la web. En el caso del agua se consideró la tarifa de *Aigües de Barcelona*. También se consideró el consumo de energía de los equipos para la fabricación de mezclas.

Cuantificación del indicador Tiempo de Ejecución

Para el desarrollo de este indicador se tomaron los datos descritos en el apartado *Características de mezclas fabricadas en laboratorio*. Se han tomado en cuenta las mezclas desechadas.

Tabla 29. Cuantificación de indicador Tiempo de Ejecución de mezclas.

Muestra	Cantidad fabricada (mezclas)	Coefficiente fabricación (min/mez.)	Total (min)
M _{REF} - CEM I	2	15	30
M _{REF} - CEM I+P	3	16	48
MFN-CEM I 4% fibra	5	19	95
MFN-CEM I 2% fibra	2	16	32
MFN-CEM I 1% fibra	2	15.5	31
MFN-CEM I+P 4% fibra	4	21	84
MFN-CEM I+P 2% fibra	2	17	34
MFN-CEM I+P 1% fibra	2	16	32
MFP-CEM I 4% fibra	3	22	66
MFP-CEM I 2% fibra	2	17	34
MFP-CEM I 1% fibra	2	17	34
MFP-CEM I+P 4% fibra	3	22	66
MFP-CEM I+P 2% fibra	2	16	32
MFP-CEM I+P 1% fibra	2	15	30

• RESULTADOS DE INDICADORES

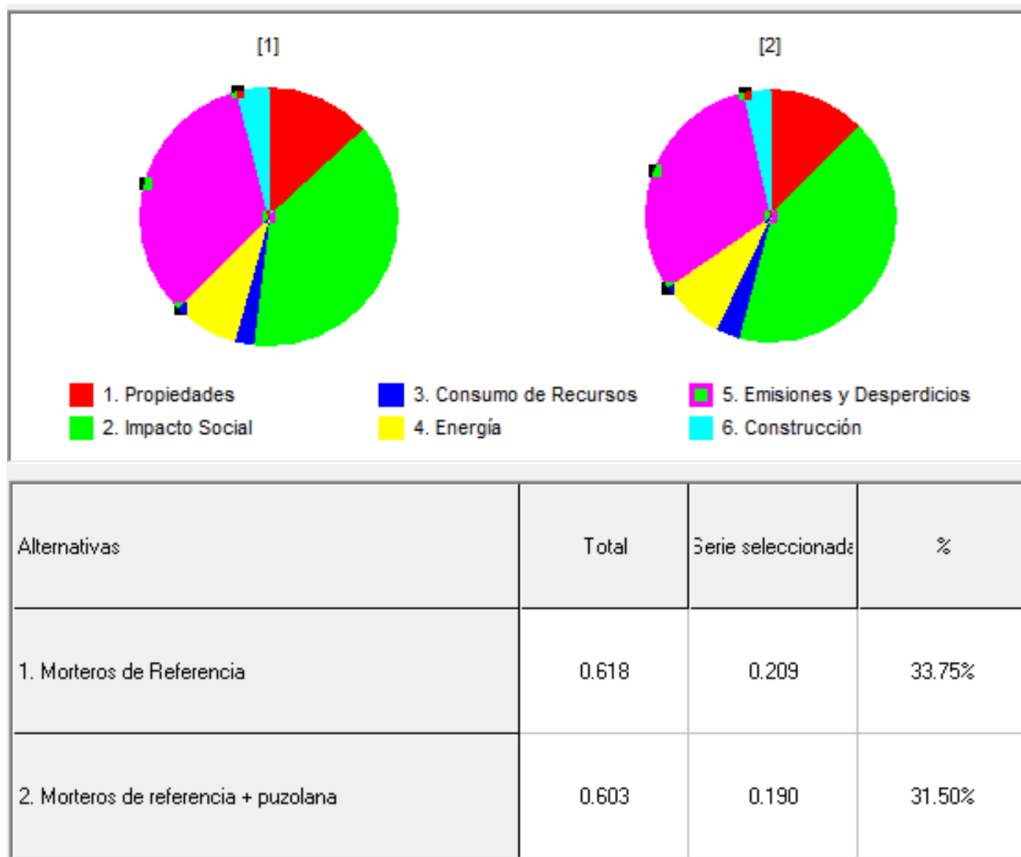


Figura 29. Comparación de Criterios de Morteros de Referencia.

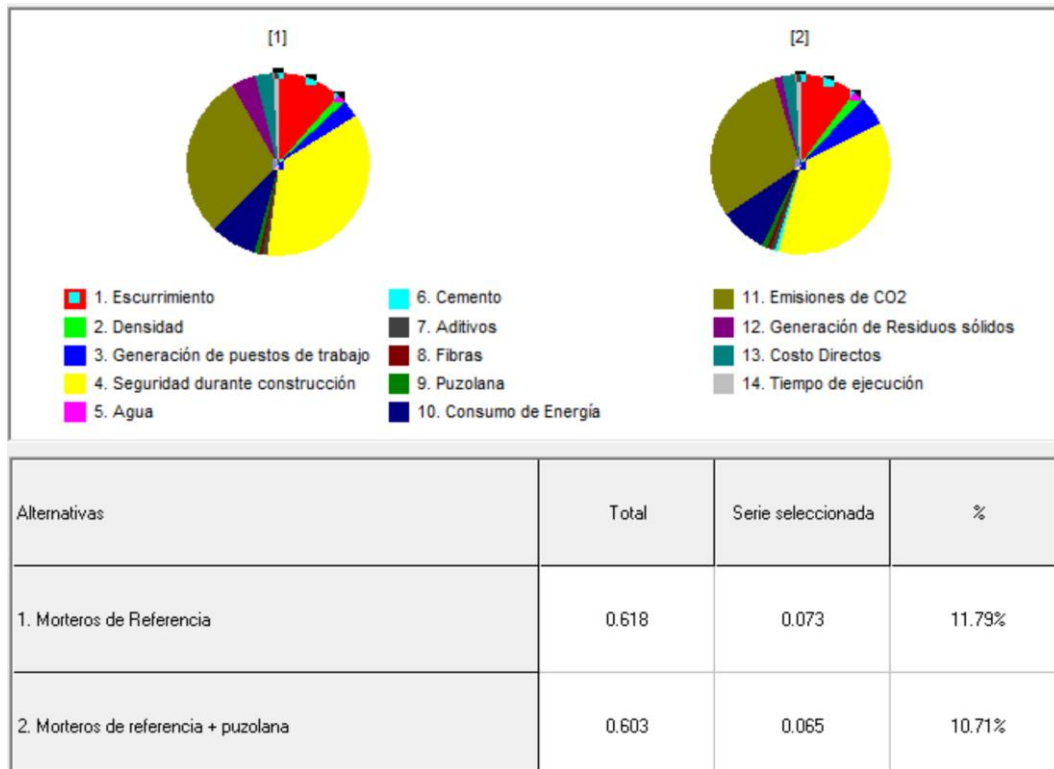


Figura 30. Comparación de Indicadores de Morteros de Referencia.

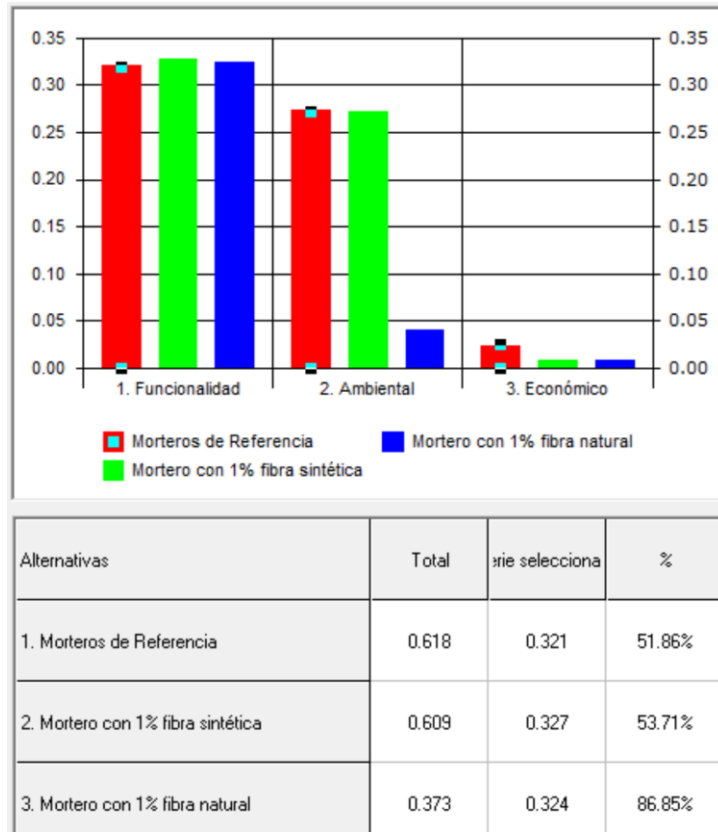


Figura 31. Comparación de los requerimientos de Morteros y 1% de fibras

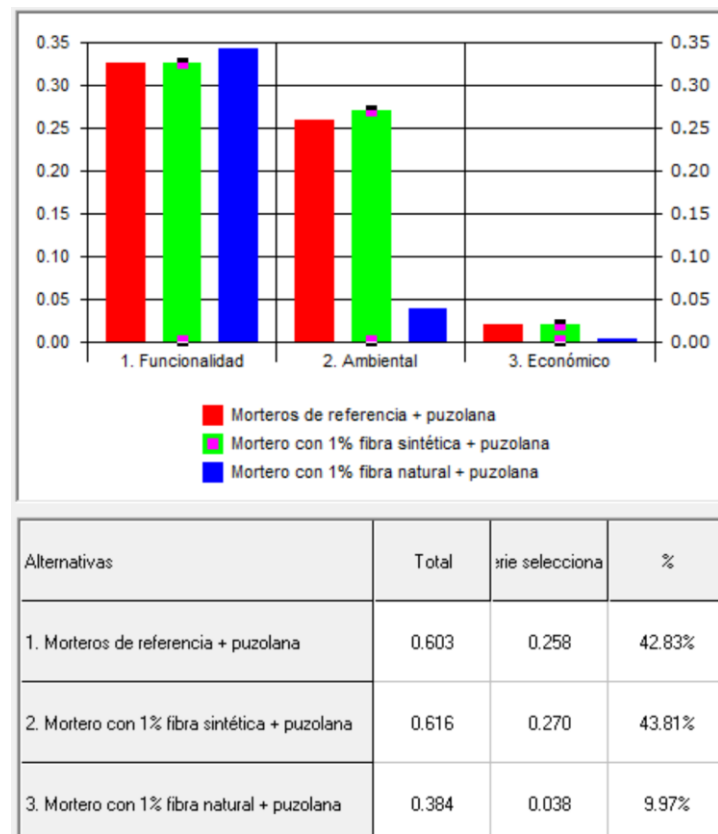


Figura 32. Comparación de los requerimientos de Morteros con puzolana y 1% de fibras.

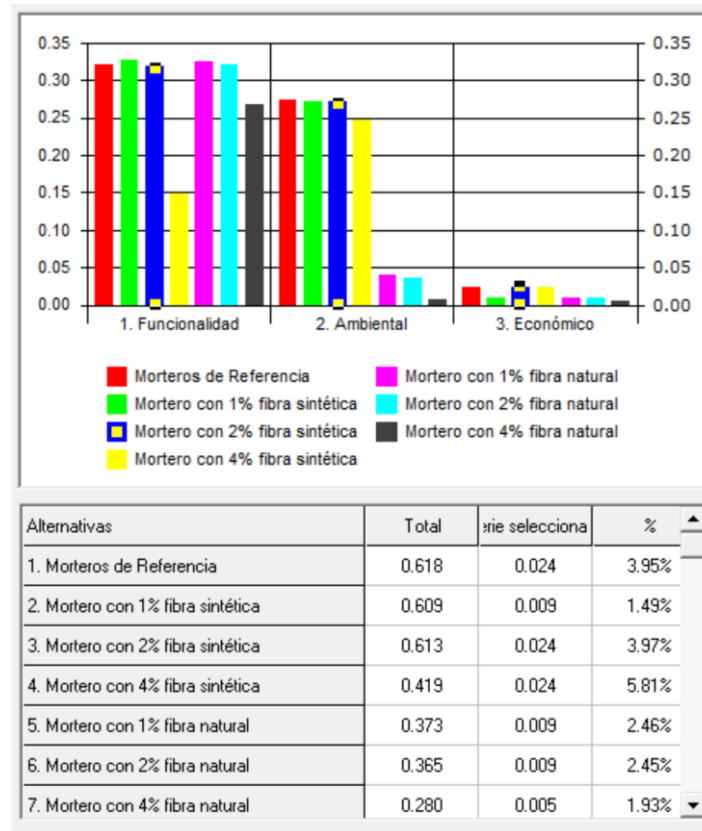


Figura 33. Comparación Requerimientos de Morteros de cemento con fibras.

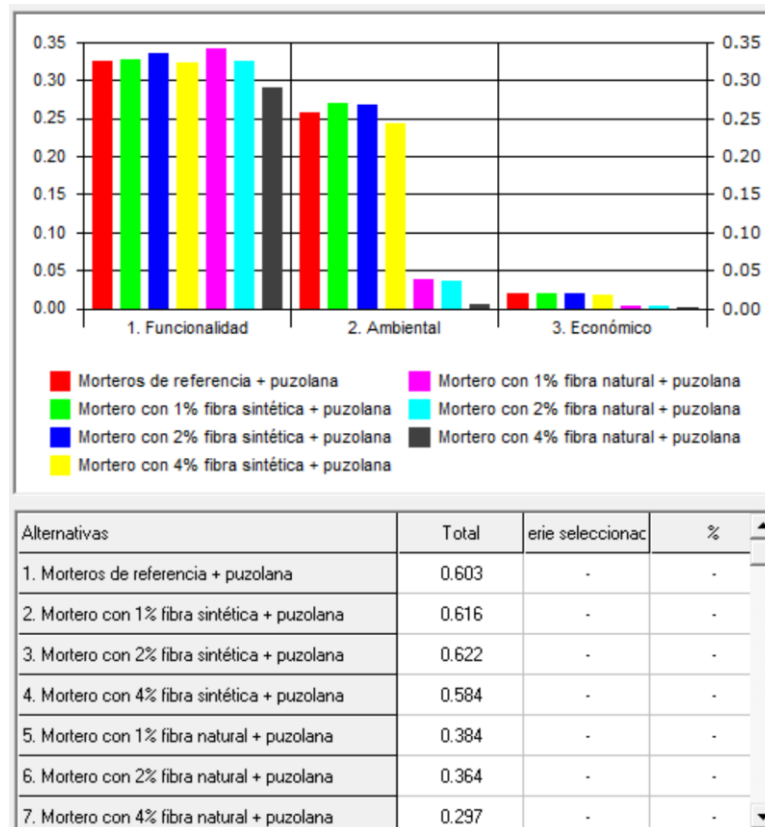


Figura 34. Comparación Requerimientos de Morteros de cemento + puzolana con fibras.