



UPCT



ETSAB

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

PROYECTO FINAL DE MÁSTER

MÁSTER CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN EN ARQUITECTURA

**ADICIÓN DE MICROCRITALES DE CELULOSA
AL COMPUESTO DE CEMENTO.**

Autor: Iván Terrero

Director: D. Carlos Parra Costa

D.: Isabel Miñano Belmonte

D.: Francisco Javier Benito Saorín

AGRADECIMIENTOS

A Dios sobre todas las cosas...

A mis padres; Mercedes Laura Jiménez y Luis Teófilo Terrero por su apoyo incondicional, mis hermanos Mario Terrero y Renata Terrero por acompañarme, inspirarme y fortalecerme en este camino de la vida, a Diana Fernández, Guido Guerrero, Esther Cervantes y Malgorzata Rozmus, por ser pilares.

Al Programa de la MESCyT-2017-2018- Por el Apoyo proporcionado para realizar esta meta.

A los profesores del Máster CYTEA - Javier Prior, Adolfo Pérez, Eusebio Conesa, Gemma Vázquez, Mariano Calabuig, Juan José Jorquera, María Jesús Peñalver, María del Carmen Bueso, Marcos Lanzón, Josefa García, por compartir sus conocimientos y ser personas de calidad humana inagotable.

Mención Espacial, Isabel Miñano Belmonte por su guía en el desarrollo análisis de los experimentos y trabajos en el laboratorio.

Mención Espacial, Francisco Javier Benito Saorín. Por dar seguimiento y ser un excelente guía para la resolución de este TFM.

Mención Espacial, por su apoyo, seguimiento y dedicación, al director de este proyecto, D. Carlos Parra Costa.

GRACIAS.

RESUMEN DEL TRABAJO

La reducción o sustitución del Clinker en el compuesto de cemento representa una alternativa para la reducción de emisiones de CO₂ al ambiente, por parte de la industria del cemento y la construcción. El cuidado, protección y preservación del medio ambiente ha sido una palanca motivadora para crear soluciones innovadoras en el campo de la ciencias y tecnologías, tomando un camino para desarrollar alternativas de producción de energía limpia o renovable, desarrollando procesos de ahorro en consumo energético, aprovechamiento de los recursos y creación de materiales no contaminantes conocidos como materiales verdes o materiales ecológicos.

En los últimos años el avance tecnológico en el campo de los materiales ha estudiado la posibilidad de brindar a los materiales tradicionales, la capacidad de ser un material con propiedades ecológicas y/o sostenible, la combinación de materiales [inorgánicos ↔ orgánicos] en su composición a escalas nanométricas ha sido un tema de interés de estudio, estas combinaciones han sido denominadas **“compuestos verdes”** o **“bionanocomposites”**, (Brinchi et al., 2013), (González del Campo, 2017).

Este trabajo presenta la **“nanotecnología”** un campo emergente en el estudio de los materiales, haciendo un recorrido por su historia, desarrollo y métodos de aplicación. También presenta los materiales derivados a escala nanométrica de la **celulosa**, que ha sido un objeto de investigaciones para el desarrollo de materiales bio-nano-compuesto, debido a su capacidad de renovación, disponibilidad, biocompatibilidad, propiedades mecánicas y una amplia variedad de campos de aplicación (Brinchi et al., 2013), se presenta las características de los materiales **puzolánicos** tomando estas de referencia para la evaluar el comportamiento “puzolánico” de la nanocelulosa y la capacidad de otorgarle mejoras mecánicas al compuesto de cemento.

Se expone la planta del **“esparto”** como una fuente potencial de fibra de celulosa y sus derivados nanométricos, describiendo sus características, uso y procesos de transformación, ya que en su historia se representa como fuente obtención de materia prima “fibra celulosa”, utilizada para distintos tipos de aplicaciones y fue de vital importancia para la industria del siglo XX en la economía española.

Para el inicio de la elaboración a la fase experimental se realizó una de revisión de artículos científicos seleccionados, para adquirir un conocimiento previo de como interactúa la nanocelulosa en la pasta de cemento y los mecanismos de interacción identificados. También las oportunidades que ofrecen los materiales nanoreforzados para reducir el impacto medioambiental de los materiales de base de cemento.

La adición de nanocristales de celulosa de fibra de esparto u otras fibras, al compuesto de cementoso, con el enfoque de aumentar la resistencia mecánica, reduciendo el

volumen de utilidad y demanda de cemento, principal objetivo de este Proyecto Final de Máster.

- ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.2	OBJETIVOS GENERALES	11
1.3	ANTECEDENTES	12
1.4	INTRODUCCIÓN.....	13
1.5	RESUMEN POR CAPÍTULO.....	14
2.	SOSTENIBILIDAD	17
2.1	MATERIALES ECOLÓGICOS	20
2.1.1	<i>CRITERIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ECOLÓGICOS</i>	20
2.2	INICIATIVA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL CEMENTO	21
3.	NANOTECNOLOGÍA	26
3.1	NANOMATERIALES.....	27
3.2	TIPO DE NANOMATERIALES Y NANOESTRUCTURAS	28
3.3	SÍNTESIS DE NANOMATERIALES	29
3.4	LA SÍNTESIS VERDE	29
3.5	CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA.....	30
4.	LA CELULOSA Y EL ESPARTO	32
4.1	LA CELULOSA	32
4.2	ESTRUCTURA DE LA CELULOSA.....	33
4.3	NANOCELULOSA.....	34
4.4	PROPIEDADES DE LA NANOCELULOSA.....	36
4.5	APLICACIONES DE LA NANOCELULOSA.....	37
4.6	FUENTES DE ORIGEN DE NANOFIBRA DE CELULOSA.....	38
4.7	METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA.....	40
4.8	ESPARTO.....	42
4.8.1	<i>BREVE HISTORIA</i>	43
4.8.2	<i>Descripción y características</i>	44
4.8.3	<i>EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN</i>	45
4.8.4	<i>USO Y APLICACIONES</i>	46
4.8.5	<i>ESPARTO FUENTE POTENCIAL DE FIBRA DE CELULOSA</i>	46
5.	CEMENTO	48
5.1	COMPOSICIÓN DEL CEMENTO.....	48
5.2	PROPIEDADES DEL CEMENTO	49
5.3	TIPO DE CEMENTOS.....	49
5.4	HORMIGÓN	50
5.4.1	<i>COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN</i>	50
5.4.2	<i>PROPIEDADES DEL HORMIGÓN</i>	51
5.4.3	<i>TIPOS DE HORMIGÓN EN LA CONSTRUCCIÓN</i>	52

6.	PUZOLANA.....	54
6.1	BREVE HISTORIA	54
6.2	CLASIFICACIÓN DE LA PUZOLANA.....	55
6.3	COMPORTAMIENTO PUZOLANICO	56
6.3.1	<i>EFFECTO PUZOLANICO.....</i>	56
6.3.2	<i>PROPIEDADES PARA EVALUAR LA PUZOLANA</i>	56
7.	NORMAS - DURABILIDAD DEL HORMIGÓN	60
7.1	ADECUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO	62
7.2	MATERIAS PRIMAS	62
7.3	DOSIFICACIÓN ADECUADA	62
7.4	RECUBRIMIENTOS ADECUADOS	62
7.5	VALORES MÁXIMOS DE LA ABERTURA DE FISURA	63
7.6	MEDIDAS ESPECIALES DE PROTECCIÓN	63
8.	ESTUDIOS ADICION DE NANOMATERIALES DE CELULOSA EN LA PASTA CEMENTO.....	66
8.1	INTRODUCCIÓN	66
8.2	MATERIALES COMPUESTOS NANOREFORZADOS.....	67
8.3	CARACTERÍSTICAS DE LA NANOCELULOSA	68
8.3.1	<i>CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA CELULOSA</i>	68
8.3.2	<i>MICROFIBRILLAS DE CELULOSA / NANOFIBRILLAS DE CELULOSA.....</i>	69
8.3.3	<i>CELULOSA NANOCRISTALINA.....</i>	70
8.3.4	<i>CARACTERÍSTICAS DE LOS NANOCRISTALES DE CELULOSA.....</i>	70
8.4	INTERACCIÓN DE LA CELULOSA NANOCRISTALINA CON EL CEMENTO	71
9.	FACE EXPERIMENTAL	76
9.1	INTRODUCCIÓN	76
9.2	MATERIALES Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL	77
9.2.1	<i>MATERIALES.....</i>	77
9.2.2	<i>ANÁLISIS FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)</i>	78
9.2.3	<i>ANÁLISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....</i>	79
9.2.4	<i>ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO.....</i>	80
9.2.5	<i>DOSIFICACIONES</i>	81
9.2.6	<i>PREPARACIÓN DE LA PASTA.....</i>	81
9.2.7	<i>PRUEBA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN</i>	82
10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	84
10.1	FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	84
10.2	ANÁLISIS DE RESULTADO DE FLUORESCENCIA DE MICROCRISTALES DE CELULOSA	85
10.3	DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	87
10.4	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	88
10.5	COMPRESIÓN.....	90

11. CONCLUSIÓN.....	94
11.1 TRABAJOS FUTUROS	95
12. BIBLIOGRAFÍA.	98
13. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	103
13.1 ÍNDICE DE TABLAS	103
13.2 ÍNDICE DE FIGURAS	104

A photograph of an industrial facility, likely a refinery or chemical plant. The image shows a complex network of large, silver-colored pipes and machinery. In the foreground, there are several large, cylindrical tanks or vessels. The background features a multi-story building with windows and more industrial structures. The overall scene is brightly lit, suggesting a sunny day.

1. INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es obtener el título de Máster en Ciencia y Tecnología de Edificación en Arquitectura (CYTEA), en la especialidad de investigación. Este trabajo está realizado por Arq. Iván Alberto Terrero Jiménez y Dirigido por los Dr. Carlos José Parra Coste, Isabel Miñano Belmonte, Francisco Javier Benito Saorín.

Este trabajo final de máster se titula **“ADICIÓN DE MICROCRISTALES DE CELULOSA AL COMPUESTO DE CEMENTO”**, con la finalidad de evaluar la capacidad puzolánica de los microcristales de celulosa, Estudia los procesos de obtención y el potencial del nanomaterial procedente del Esparto como fuente, la posibilidad de uso la nanocelulosa como un aditivo que le brinda la característica de material ecológico y sostenible al compuesto de cemento.

1.2 OBJETIVOS GENERALES

Trata de enriquecer el conocimiento de los materiales utilizados en infraestructura en el sector de la construcción, específicamente el cemento, con un enfoque de reducir el consumo energético y emisión de CO₂ por la industria de la construcción, mostrando posibilidades y alternativas para la sostenibilidad del cemento aquí algunas de ellos:

- Determinando las prestaciones adquiridas por la pasta de cemento a través de la adición de la nanocelulosa.
- El empleo de materiales ecológicos como la nanocelulosa, obtenido de plantas como el esparto y otras fuentes, por su enorme disponibilidad y potencial para mejorar los materiales de construcción y desarrollo de materiales ecológicos.
- También se busca expandir el conocimiento de la aplicación de nanotecnología en los materiales tradicionales de la construcción y arquitectura.



1.3 ANTECEDENTES

La adición de fibra a mortero para mejorar sus propiedades constructivas y reforzar el compuesto sucede desde la antigüedad. En Egipto los ladrillos de abobe eran elaborados con **lodo** extraído del río Nilo, que mezclado con **fibras** de paja y **arena** daba resultado a ladrillos muy resistentes (Gonzalo Sánchez, 2012), donde la fibra de paja controla la tensión por el secado y reduce el agrietamiento (Juárez Alvarado, 2002).



Fig. 1 - Recinto amurallado de adobe de Khasekhemwy en Abidos , Egipto , Egypt , Abydos.

En el paso de tiempo, ya en la época moderna se utilizaron las fibras de asbesto, un material de tipo mineral como refuerzo para el hormigón, dado que este material presenta un riesgo para la salud, la demanda de su uso disminuyó, provocando a la industria de la construcción la necesidad de encontrar un sustituto para este material, que brinde las mismas propiedades mecánicas, dándole cavidad a las fibras artificiales como; las fibras metálicas, de vidrio y plásticas (Salcedo, 2012), (Juárez Alvarado, 2002) a partir de esto surgen los concepto de **materiales compuestos y hormigones compuesto**.

En los materiales compuestos de matrices bases en cerámicas, plásticos y cemento incorporan fibras para mejorar sus **propiedades físicas y mecánicas**, tales como la resistencia a la tensión, a la compresión, al agrietamiento, al impacto, a la abrasión y la tenacidad (Shah et al., 1988).

Existen en la industria varios tipos de fibras las ya antes mencionadas y las **fibras de origen vegetal** más bien conocidas como **fibras naturales**, estas últimas son estudiadas para su posible aplicación, su principal ventaja es la amplia disponibilidad.

En la actualidad las ciencias y tecnologías emergentes como la **“Nanotecnología”** bajo el contexto de sostenibilidad, estudia la composición del hormigón con fibras de origen natural a escala nanométricas, en la mejora de las propiedades químicas y mecánicas.



1.4 INTRODUCCIÓN

Este trabajo final de máster estudia las posibilidades de utilizar en el compuesto de hormigón, materiales procedentes de vegetales, investigando las mejoras que este proporciona y evaluando la capacidad puzolánica de este material, **microcristales de celulosa**, bajo el contexto de protección ambiental, durabilidad y sostenibilidad.

Para ello, a los materiales empleados, **microcristales de celulosa y el cemento portland (CEM I 52,5R)**, se realiza un estudio de caracterización para tener conocimiento previo de su composición elemental y establecer una compatibilidad química entre los elementos, luego realizar dosificaciones con adiciones de microcristales de celulosa en la pasta de cemento. Para esto hemos procedido previamente a recopilar información de estudios anteriores y contemporáneos respecto al tema, para conocer el estado actual del tema y desarrollar un proyecto en orden al mismo.

Después de realizar los estudios previos, procedemos a realizar experimentos en el laboratorio, para determinar las características que los microcristales de celulosa aportan a la pasta de cemento, también identificar las propiedades (químicas y mecánicas) que este adquiere luego de los *7, 28 a 90 días* de curado, bajo las comprobaciones de esfuerzo a compresión, y así determinar sus prestaciones.

Del mismo modo bajo las observaciones realizadas y obteniendo los resultados experimentales, procedemos a realizar nuestras conclusiones y determinar líneas de investigaciones para trabajos futuros.



1.5 RESUMEN POR CAPÍTULO

El presente trabajo se divide en 11 capítulos:

El Capítulo 1. Es la Introducción que glosa los fundamentos del trabajo, objetivos, antecedentes históricos de adiciones fibra vegetal a compuestos y a mortero de cemento.

El Capítulo 2. Expone el estado medio ambiental y climático del planeta por acción del ser humano, que da origen a las iniciativas de desarrollo sostenible en el sector de la construcción, el uso las nuevas tecnologías de investigación aplicadas a materiales del sector industrial de construcción.

El Capítulo 3. Trata de la nanotecnología, breve historia, definición y como se desarrolla, Mencionando los campos de aplicación.

El Capítulo 4. Define la celulosa y la nanocelulosa, su estructura química, fuentes de origen y métodos de obtención, sus propiedades y aplicaciones potenciales para crear materiales ecológicos. También habla del **esparto** sus aplicaciones y el potencial para generar nanocelulosa.

EL Capítulo 5. Habla de cemento y el hormigón, define los componen y propiedades, su clasificación según su utilidad y su tipología en base a su composición química y modo de empleo.

EL Capítulo 6. Define que es la puzolana y sus características, describe los métodos de evaluación para determinar si un material tiene comportamiento puzolánico.

EL Capítulo 7. Versa sobre los principales criterios normalizados para la durabilidad de los elementos de base de cemento.

EL Capítulo 8. Trata de investigaciones realizados, base a artículos científicos que han sido seleccionados, con el tema de nanocelulosa en el compuesto de cemento.

EL Capítulo 9. Describe el procedimiento aplicado del método científico y Análisis de los resultados obtenidos en laboratorio.

EL Capítulo 10. Trata de los resultados y discusiones de la fase experimental.

EL Capítulo 11. Las conclusiones determinadas en base a los análisis y discusiones y de las posibles líneas de investigaciones futuras.

EL Capítulo 12. Fuente de datos que avalan el desarrollo de este trabajo "Bibliografía". Índice de **Tablas** eh índice de **Figuras**.



2. SOSTENIBILIDAD



2. SOSTENIBILIDAD

Ya que la industria de la construcción y producción de cemento, tienen una alta participación en los efectos que provocan los cambios climáticos (“Battelle Scoping Study,” 2018), cabe destacar la necesidad de este trabajo hablar de **sostenibilidad**, un término ligado a la acción del ser humano en relación con su entorno, refiriéndose al equilibrio que existe en una especie basándose en su entorno y todos los factores o recursos que tiene para hacer posible el funcionamiento de todas sus partes, sin necesidad de dañar o sacrificar las capacidades de otro entorno (Wadel et al., 2010).

El cambio climático amenaza al ecosistema y la preservación de la vida en el planeta, ocasionado por el aumento de la temperatura global, siendo una de las causas el alto consumo energético y emisiones de CO₂ al ambiente por acción humana ver **Figura 2** (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).

Cambio de temperatura global observado y modelo.
Respuestas a la emisión antropogénica estilizada y realimentación positiva.

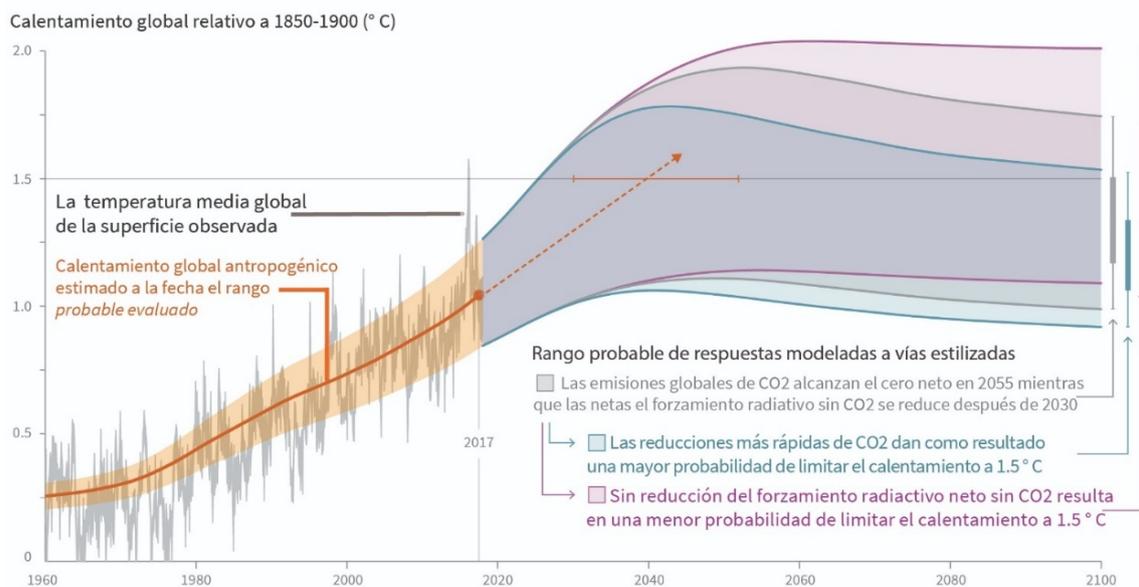


Fig. 2 - Cambio de temperatura Global Observado y Modelo.

Se estima que las actividades humanas causaron aproximadamente 1.0 ° C de calentamiento global Por encima de los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8 ° C a 1.2 ° C. Es probable que el calentamiento global alcance 1.5 ° C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual.



La industria de la construcción de infraestructura, edificaciones y su operación representaron 36% del consumo de energía final global y produjeron 39% del dióxido de carbono (CO₂) relacionado con la energía durante el año 2017, ver **Figura 3**. El sector de los edificios y de la construcción tiene la mayor participación tanto en el uso de energía como de las emisiones asociadas a la producción de energía, incluso si se excluyera el uso de energía relacionada con el transporte de los materiales de construcción a los sitios de construcción (“2018 Global Status Report,” n.d.).

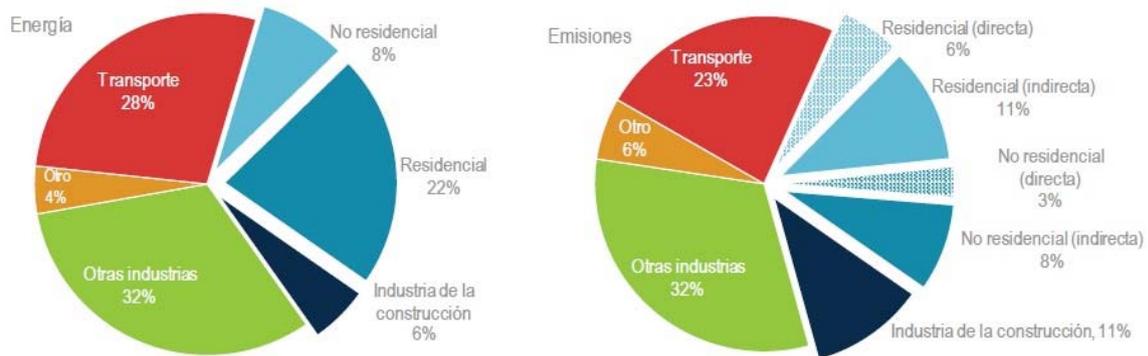


Fig. 3 - Participación global de edificios y construcción, energía y emisiones finales, 2017

Nota: La industria de la construcción es una estimación de la porción del sector industrial general que se aplica a la fabricación de materiales para la construcción de edificios, como el acero, el cemento y el vidrio.

Fuente: Derivado de IEA (2018h), *World Energy Statistics and Balances 2018*, www.iea.org/statistics y *IEA Energy Technology Perspectives modelo de edificios*, www.iea.org/buildings.

Según el informe, “**Hacia una Industria Cementera Sostenible**” elaborado por Battelle Memorial Institute, se proyecta el aumento de la producción de cemento cerca a los 3mil millones de toneladas a nivel mundial ver **Figura 4** (“Battelle Scoping Study,” 2018). Donde la producción de cemento es responsable del 5% de las emisiones de CO₂ producidas por la acción humana en el mundo, y esto significa que la industria del cemento tiene un papel importante que jugar en la **reducción** de la intensidad de sus emisiones (Consejo Mundial Empresarial Para and El Desarrollo Sostenible – WBCSD, 2009).

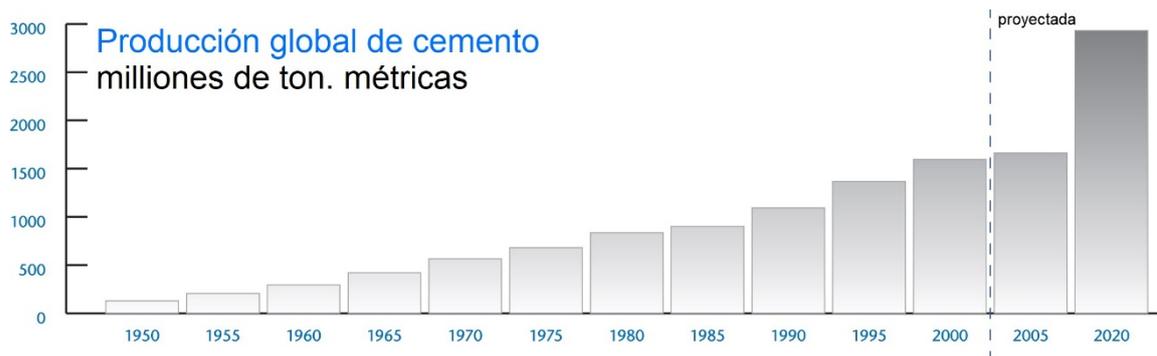


Fig. 4 - Proyección de aumento de producción de cemento.

A partir de estos datos surge una búsqueda de soluciones a problemas interconectados que amenazan la supervivencia de la especie humana y vida del planeta dando nacimiento al movimiento de **“desarrollo sostenible”**.

El movimiento **“desarrollo sostenible”**, en la industria de la construcción promueve el uso de los recursos materiales de manera eficiente y optimizada, la protección del clima con la reducción de emisiones de CO₂, y la innovación de procesos y productos, garantizando la calidad de vida de presentes y futuras generaciones.

La arquitectura, ingeniería y construcción, como industria de la ciencia de la construcción y el diseño estudia los materiales desde su origen, composición, obtención, fabricación y aplicación final.

Aquellos materiales que, en los parámetros mencionados anteriormente, tengan bajo impacto ambiental, sean responsables con el medio ambiente, utilizados de manera eficiente, sean sostenibles y duraderos, han sido denominados; **materiales ecológicos**, materiales verdes o materiales sustentables.



Fig. 5 - Técnicas para el cuidado del Medio ambiente.



2.1 MATERIALES ECOLÓGICOS

Mencionando una de las causas el cambio climático, El sector industrial y la comunidad científica toman la iniciativa de buscar alternativas para hacer de “**el cemento**” un material ecológico y sostenible.

2.1.1 CRITERIOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ECOLÓGICOS

El hormigón es el segundo elemento más utilizado en la Tierra después del agua (WBCSD et al., 2009). Se prevé que la demanda de cemento crecerá de manera significativa **Figura 4**, debido a la necesidad permanente de construcción, así como a la creciente demanda de infraestructuras en los países en vías de desarrollo, por ello es imprescindible conocer los criterios y características que se le otorga a un material ecológico para evaluar la sostenibilidad del cemento.

Los materiales ecológicos son aquellos cuyo proceso de extracción, manufactura, operación y disposición final tienen un impacto ambiental bajo, durante su vida útil no deben comprometer la calidad de vida de los seres vivos (Borsani and Silvia, 2011), (Gutiérrez, 2017) a continuación presentamos algunos criterios a considerar para materiales ecológicos:

- Menor impacto medioambiental.
- Menor coste de la materia prima.
- Materiales obtenidos a partir de recursos renovables.
- Potencial utilización de recursos locales.
- Valoración de residuos.
- Contribución al concepto de economía circular.
- Prestaciones mecánicas similares.
- Con alto Valor estético añadido.

A partir de estos criterios surgen líneas de investigación, una de estas líneas de investigación es la combinación de materiales modernos y de alta tecnología (nanotecnología) en busca de otorgarle la característica de sostenibilidad los materiales tradicionales como el cemento.

La adición de nanopartículas de celulosa en la composición del hormigón es una de las combinaciones mencionadas con gran potencial para agregar la característica de sostenibilidad al cemento y hace del hormigón un material ecológico.



2.2 INICIATIVA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL CEMENTO

El esfuerzo global por parte de 24 importantes productores de cemento con operaciones en más de 100 países. para acelerar el desarrollo de tecnologías bajas en carbono y aumentar su implementación con el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de los 2° C, (el Acuerdo de París, 2015) por parte de la industria de la construcción. Dan iniciativa a diversos programas y enfoques para la sostenibilidad del cemento “CSI” por sus siglas en inglés, donde se cree que existe un sólido argumento comercial para la búsqueda del desarrollo sostenible del cemento.

En los informes elaborados por Consejo Empresarial Mundial para el desarrollo Sostenible “WBCS por sus siglas en inglés”, nos dan un panorama donde relaciona la producción del cemento con las emisiones CO₂, tanto por regiones como a nivel global. Figura 6,7 y 8.

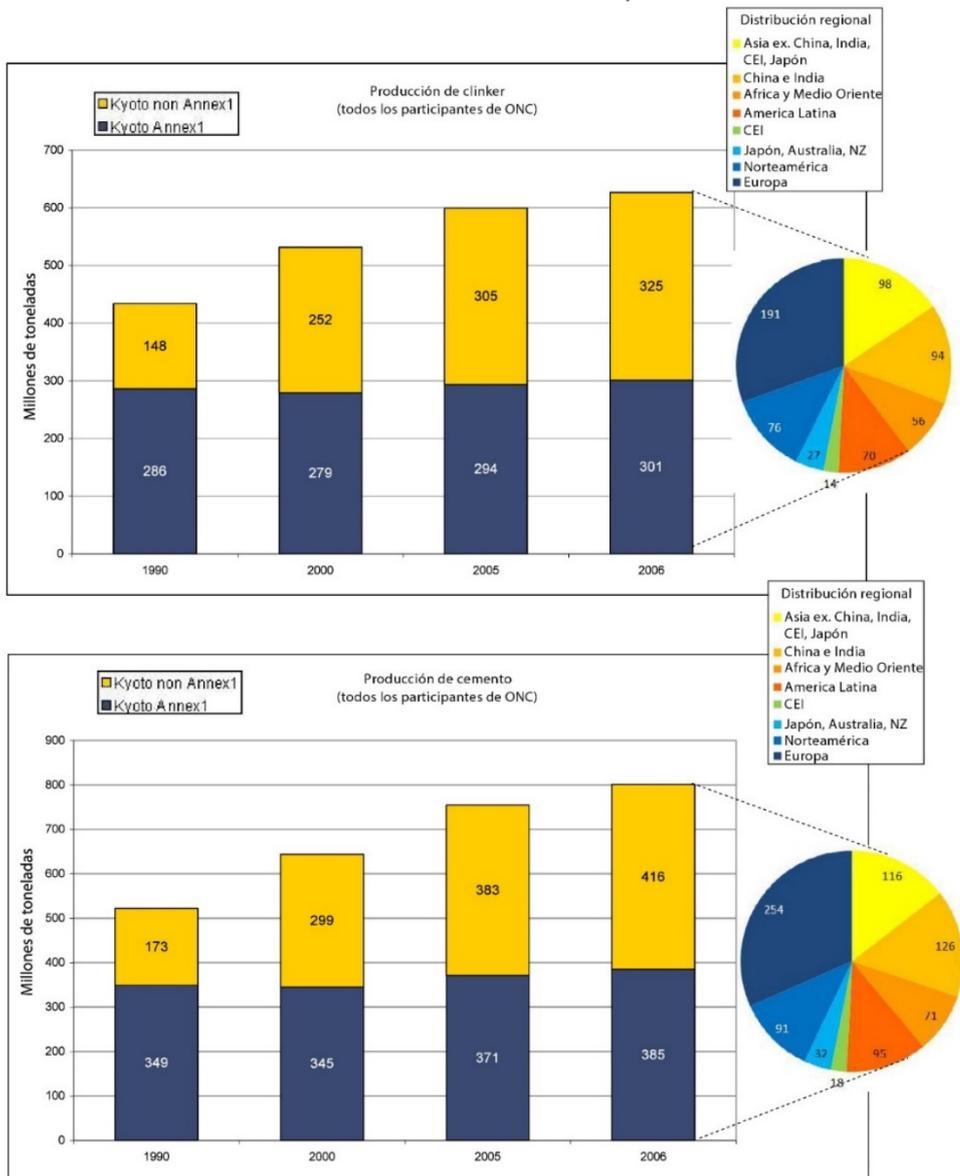


Fig. 6 - volúmenes de producción de clinker y producto de cementos, países participantes de (ONC)

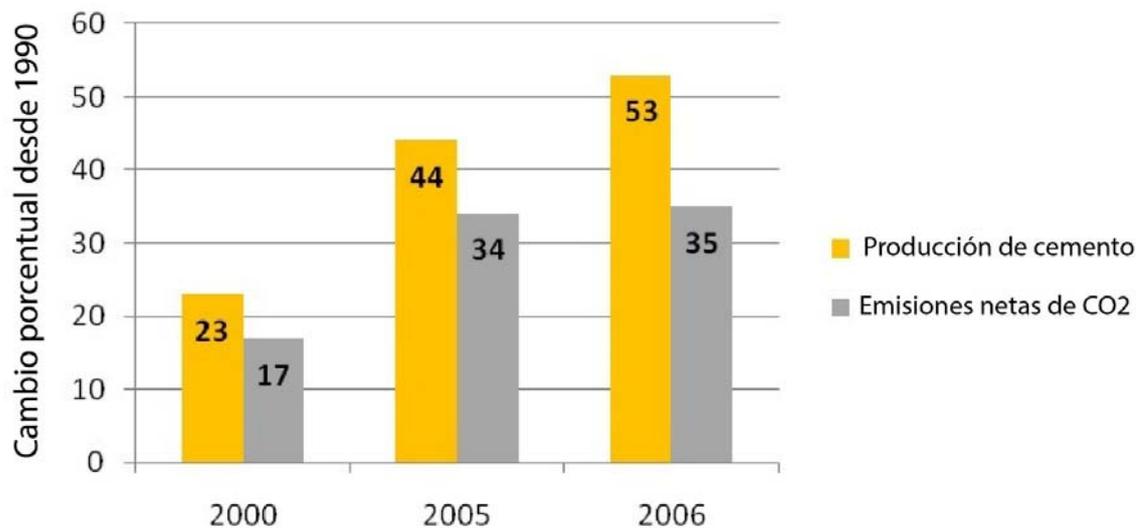


Fig. 7 - Desacoplamiento Parcial de la Producción de cemento de las emisiones neta de CO₂ en el tiempo.

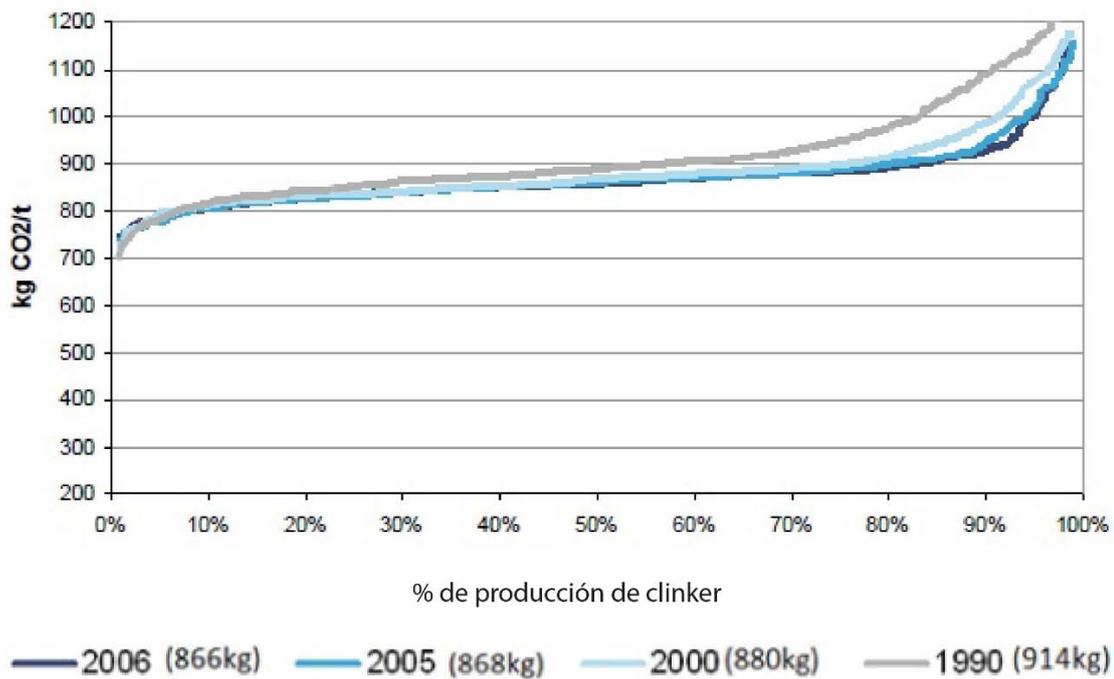


Fig. 8 - Emisiones brutas de CO₂ por tonelada de Clinker al paso del tiempo



En las industrias, el proceso de producción del Clinker y Cemento crea (alrededor del 60%) de emisiones directas de CO₂, las emisiones directas restantes se originan de la combustión de combustible durante el proceso de fabricación para alcanzar las altas temperaturas necesarias para la formación del Clinker (“Industria del cemento Energía y rendimiento de CO₂,” 2009). Las emisiones indirectas de consumo de energía eléctrica contribuyen otro 10% de emisiones.

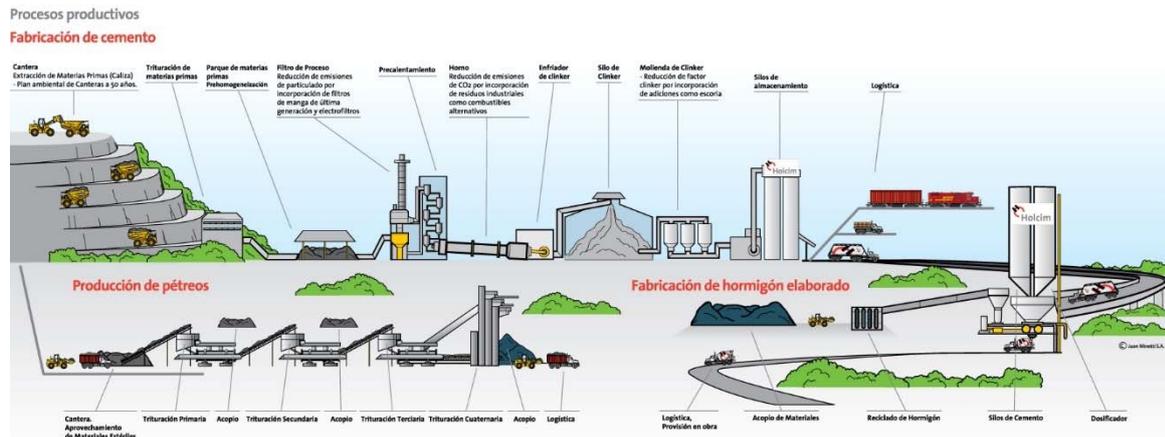


Fig. 9 -Procesos de Fabricación de Clinker y Cemento.

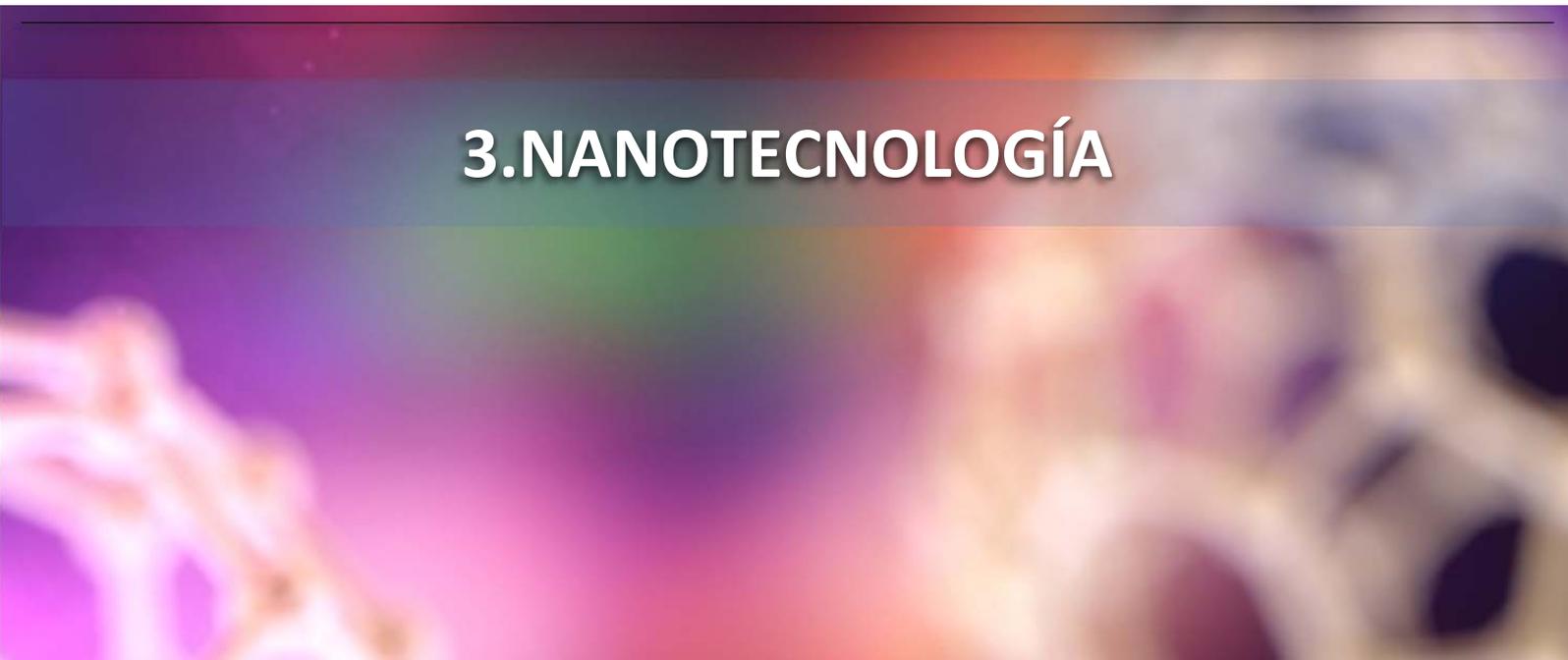
Una palanca para mejorar la eficiencia es hacer frente a la composición del producto - un proceso llamado “**sustitución de Clinker**”, Esto implica el mezclando materiales con cemento para reducir el volumen de Clinker utilizado. Tales materiales incluyen escoria de alto horno y cenizas de carbón de otras industrias, piedra caliza natural de material volcánico, El producto resultante se compone de varios minerales y es llamado a menudo Cemento Portland compuesto o cemento mezclado.

Para este trabajo la sustitución de Clinker con la adición de nanopartículas de celulosa en el cemento es una combinación potencial para reducir las emisiones de CO₂, y consumo energético en el sector industrial, también proporciona la característica de sostenibilidad al cemento.



Fig. 10 - Ilustración de hormigón compuesto con fibras vegetales.

3.NANOTECNOLOGÍA





3. NANOTECNOLOGÍA

En el área de la ingeniería de los materiales, la nanotecnología es una ciencia emergente que nos pone a disponibilidad el estudio los materiales en su composición elemental a escala nanométricas y nos otorga la capacidad de modificar los materiales tradicionales y evolucionar su desarrollo.

Las primeras ideas sobre nanotecnología fueron del físico Richard Feynman (premio Nobel de física 1965). La palabra nanotecnología fue usada por primera vez por Norio Taniguchi en 1974, para designar una técnica de producción a escala nanométrica. Pero realmente hasta 1986 fue difundida por Eric Drexler en su libro “Maquinas de creación”, en el que describió las bases para la construcción de materiales átomo por átomo (Garzón, 2018), (Allevato, 2007).

Louis Brus trabajando en AT&T Bell Laboratorios, descubrió unos nanocristales semiconductores coloidales, llamados puntos cuánticos, que lo llevaron a ser reconocido como uno de los principales investigadores en el campo de la nanociencia a principios de la década de 1980.

En 1985 sir Harold W. Kroto, Richard E. Smalley y Robert F. Curl, Jr. (premio Nobel de química 1996) al utilizar un láser para vaporizar varillas de grafito en una atmósfera de helio gaseoso obtuvieron moléculas huecas de carbono que formaron una jaula cerrada, este tipo de nanopartículas se denominan fullerenos.

El físico japonés Sumio Iijima en 1991 descubrió y detalló la estructura atómica y la forma helicoidal de los nanotubos de carbono de paredes simples y múltiples.

Moungi Bawendi y col. en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, 1993, desarrollaron una síntesis de nanocristales obteniendo los puntos cuánticos coloidales semiconductores (quantum dots), siendo esta nanotecnología una de las primeras en integrarse con las ciencias biológicas.

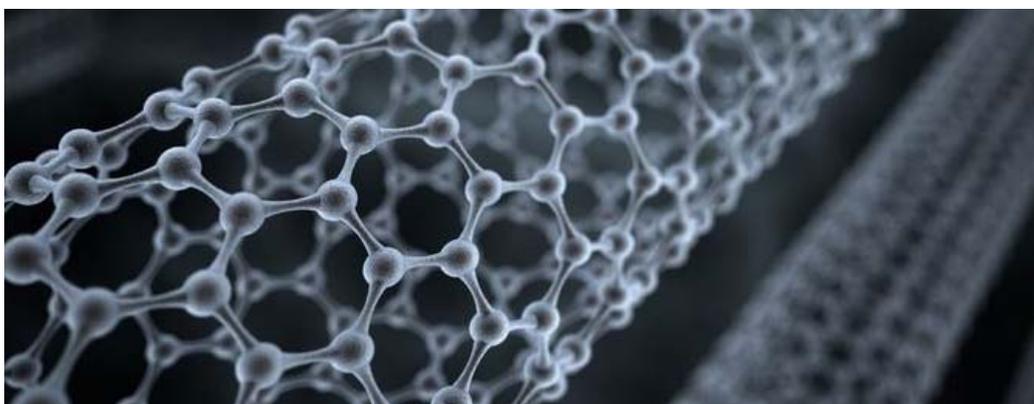


Fig. 11- Ilustración Nanotubos de Carbono, Nanotecnología



3.1 NANOMATERIALES

Podríamos definir la nanotecnología como el estudio y creación de materiales utilizando equipos y aparatos con la capacidad de observar, identificar y cuantificar la materia a escalas nanométricas (Serena Domingo, 2002), (Allevato, 2007), (Rogers et al., 2014).

El nanómetro marca el límite de reducción a que se puede llegar cuando se habla de objetos materiales **Figura 12**. En un nanómetro caben entre tres y cinco átomos. La manipulación artificial de estos átomos permite fabricar estructuras a escala nanométrica, atómica o molecular y hasta objetos de composición definida con gran precisión y con funciones extraordinarias (Allevato, 2007).

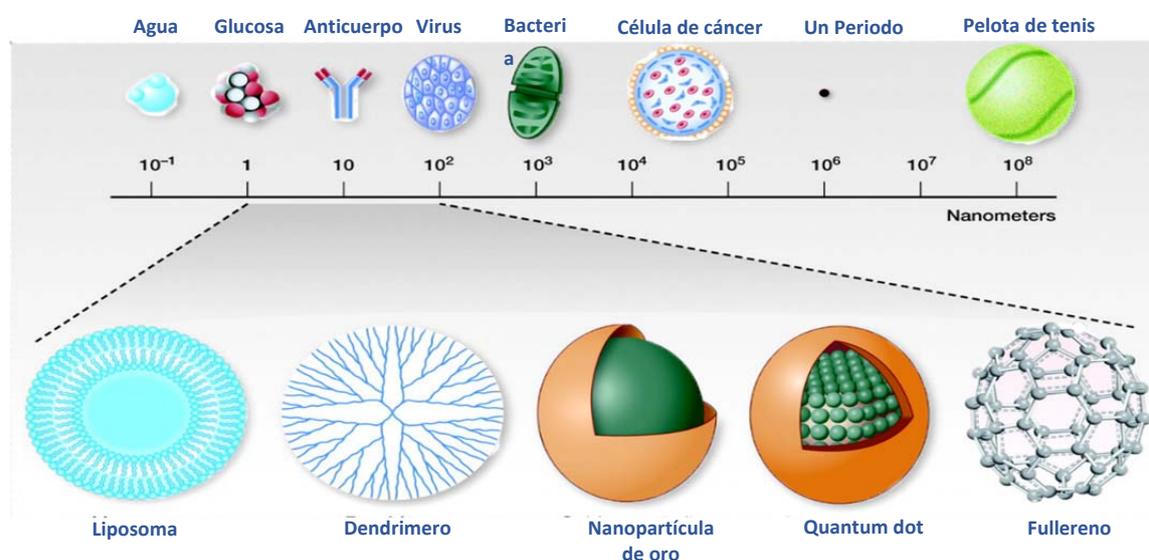


Fig. 12 - Tamaño de las nanopartículas en comparación con las entidades biológicas y otros elementos familiares.

Con la nanotecnología se logra hacer análisis, estructuración, formación y diseño operando la materia a escalas moleculares, esta materia a pequeñas escalas se le denomina “**nanomateriales**” (Garzón, 2018). La nanotecnología también podría definirse como la disciplina centrada en la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala.

Las nanopartículas (NPs) son estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros (es decir $1 \cdot 10^{-7}$ metros) ver **Figura 12**, que pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, incluyendo metales (Garzón, 2018). Para observarlas se requieren microscopios de alta resolución, como son el electrónico de barrido (SEM) o el electrónico de transmisión (TEM).

En la actualidad es común encontrar aplicaciones de las nanopartículas en diferentes áreas como la salud, cosmética, textil y en materiales de la industria de la construcción.

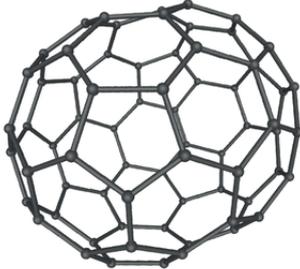
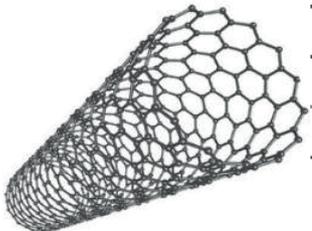
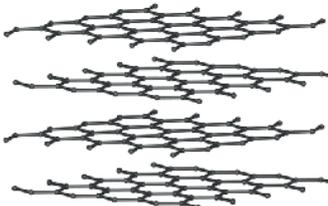
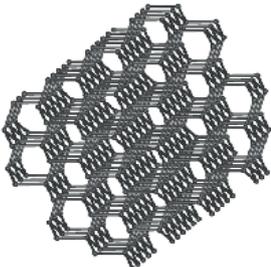


3.2 TIPO DE NANOMATERIALES Y NANOESTRUCTURAS

La Agencia del Medioambiente de los EE. UU. ha clasificado los nanomateriales en cuatro tipos de acuerdo con su componente principal. Los basados en **carbono**, Los basados en **metales**, Los **dendrímetros** y Los **compuestos combinados**, con otras nanopartículas o con materiales de mayor tamaño.

Se debe aclarar que los nanomateriales son tanto las nanopartículas individuales como un conjunto de nanopartículas que forman nanoestructuras. Las nanoestructuras son más fuertes y estables, **Tabla 1**, tienen una mayor superficie por unidad de masa comparadas con las estructuras estándar, aquellas de menos de 10 nanómetros pueden controlar la conductividad, longitud de onda de la luz emitida, transparencia y capacidad catalítica.

Tabla 1. Nanoestructuras

ESTRUCTURA	NANOMATERIAL
	<ul style="list-style-type: none">- Fullerenos- Partículas coloidales- Puntos cuánticos (Qdots)- Nanoclusters- Nanopartículas de Au y Ag
	<ul style="list-style-type: none">- Nanocables y nanofibras- Nanotubos- Nanovarillas- Fibras poliméricas
	<ul style="list-style-type: none">- Monocapas- Nanorrecubrimiento- Películas poliméricas (nano)- Superficies espesor <100nm- Películas multicapa
	<ul style="list-style-type: none">- Materiales nanoestructurales- Policristales- Nanobolas- Nanobobinas- Nanoflores



3.3 SÍNTESIS DE NANOMATERIALES

Los nano materiales también se pueden clasificar de acuerdo con su procedencia. Los nanomateriales de origen *natural* son producidos por aboles, plantas, volcanes o espacios marinas. Los de origen *incidental* producidos de combustión en vehículos y procesos industriales y los de origen *artificial* producidos por procesos de fabricación (Garzón, 2018). La sinterización de los nanomateriales se realiza dependiendo de su procedencia y se realiza por los métodos *ascendente* (bottom-up) o *descendente* (top-down), como se muestra en la **Figura 13**.

Las técnicas ascendentes (bottom-up) consisten en la fabricación de nanopartículas con capacidad de autoensamblarse o autoorganizarse a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en solución.

Las técnicas descendentes (top-down) consisten en la división de material macroscópico o grupo de materiales sólidos hasta llegar al tamaño nanométrico. Se usan métodos físicos como la molienda o el desgaste, métodos químicos y la volatilización de un sólido seguido por la condensación de los componentes volatilizados, hasta obtener una serie de ensambles que van siendo controlados con precisión hasta llegar al tamaño deseado.

3.4 LA SÍNTESIS VERDE

La síntesis verde es una técnica alternativa de bioproducción de material nanoparticulado junto con material metálico (oro, plata, hierro y óxidos metálicos), que busca ser amigable con el medioambiente.

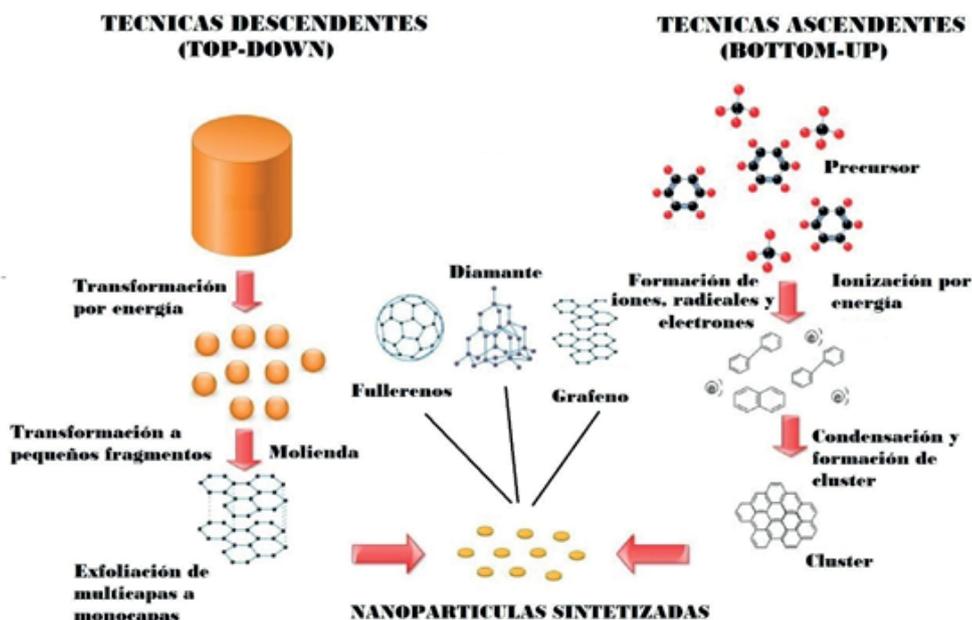


Fig. 13 – Técnica de Síntesis de Nanomateriales



3.5 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA

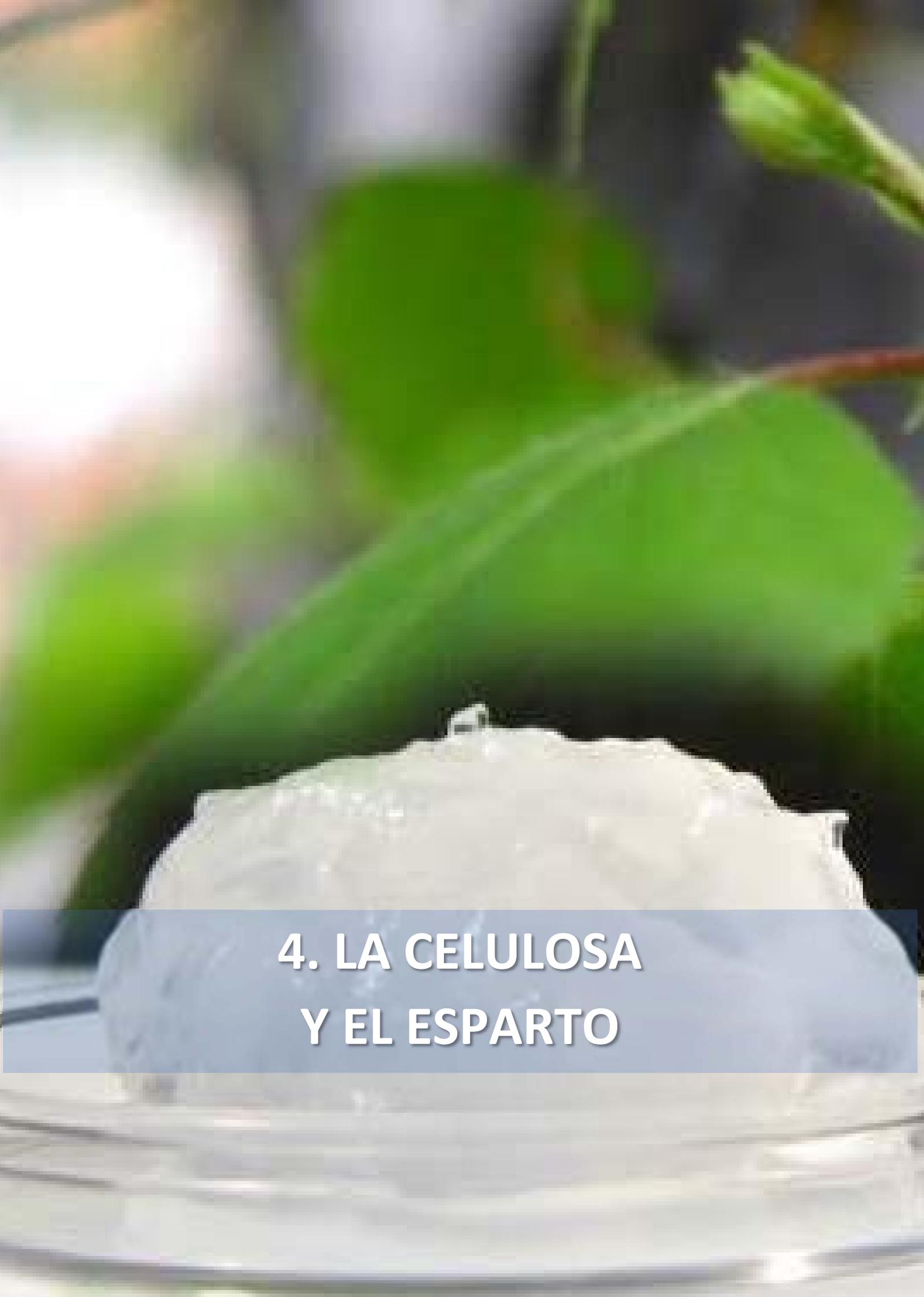
La nanotecnología es una ciencia que tiene un amplio terreno de aplicación ligada a procesos productivos donde la cantidad de materiales para construir objetos es mínima, construyendo componentes indispensables dando paso a métodos de producción de menor impacto ambiental (Serena Domingo, 2002), ahorrando materia prima y recursos energéticos lo que da paso a una amplia área de actuación y campos industriales como:

- Exploración espacial.
- Tecnología de la comunicación e informática.
- Sector energético.
- Medicina y farmacia.
- Medioambiente.
- Industria textil.
- Construcción y arquitectura.
- Agricultura.
- Ganadería.
- Electrónica.
- Cosmética.
- Entre otros más.

La nanotecnología en el área de **construcción y arquitectura** se aplicaría en la rama sus materiales, buscando hacer de estos sostenibles y duraderos, estudiando y modificando su estructura nanométrica obteniendo elementos constructivos más ligeros y mejorando sus propiedades mecánicas, también en la reducción del consumo energético y emisión de CO₂ en su fabricación y producción.

En este campo de la construcción encontramos nanotecnología empleada en pinturas para hacerlas especiales, vidrios que repelen la humedad, el polvo y suciedad, hormigones “inteligentes”, como materiales autorreparables y superficies antihumedad y creando ambientes más saludables para su uso.

También se involucran el desarrollo de materiales, energías y procesos no contaminantes, tratamiento de aguas residuales, desalinización de agua, descontaminación de suelos, tratamiento de residuos, reciclaje de sustancias, nanosensores para la detección de sustancias químicas dañinas o gases tóxicos (Serena Domingo, 2002).

A petri dish containing a white, fibrous substance, likely cellulose, with a large green leaf in the background.

4. LA CELULOSA Y EL ESPARTO



4. LA CELULOSA Y EL ESPARTO

Este capítulo trata de la peculiaridad del material de origen vegetal “*celulosa*” y de los procesos a someterse para obtener nanomateriales de celulosa “*nanocelulosa*”, también hablaremos del “*Esparto*”, una planta que en el transcurso de la historia se ha utilizado como fuente de obtención de fibras de celulosa colocándola como una fuente para obtener nanocelulosa.

4.1 LA CELULOSA

La celulosa fue identificada por primera vez por el químico francés Anselme Payen en 1838 que aisló la celulosa de varias plantas y determinó su fórmula molecular ($C_6H_{10}O_5$), mediante análisis elemental (Morales, 2015). Los vegetales están constituidos por células entrematadas formando capas donde la *celulosa* constituye el principal soporte y proporciona resistencia a la estructura de las plantas, ver **Figura 16**, (H.P.S. et al., 2017),(González del Campo, 2017). También está presente en la composición de especies vivas diferentes a las plantas tales como bacterias y tunicados (Brinchi et al., 2013),

Para un mejor entendimiento, se deben conocer cuáles son los componentes principales de la pared vegetal **Figura 14**, donde la celulosa se encuentra asociada con otras dos fracciones poliméricas, la *hemicelulosa* y la *lignina*.

La hemicelulosa es un heteropolímero compuesto principalmente por los azúcares xilosa y arabinosa, aunque también presenta en su composición glucosa, manosa, galactosa y algunos ácidos glucurónicos(Saha, 2003). **La lignina** es una macromolécula polifenólica compuesta por diferentes unidades de compuestos fenólicos y aromáticos, y que tiene como función proporcionar rigidez a la pared celular del material.

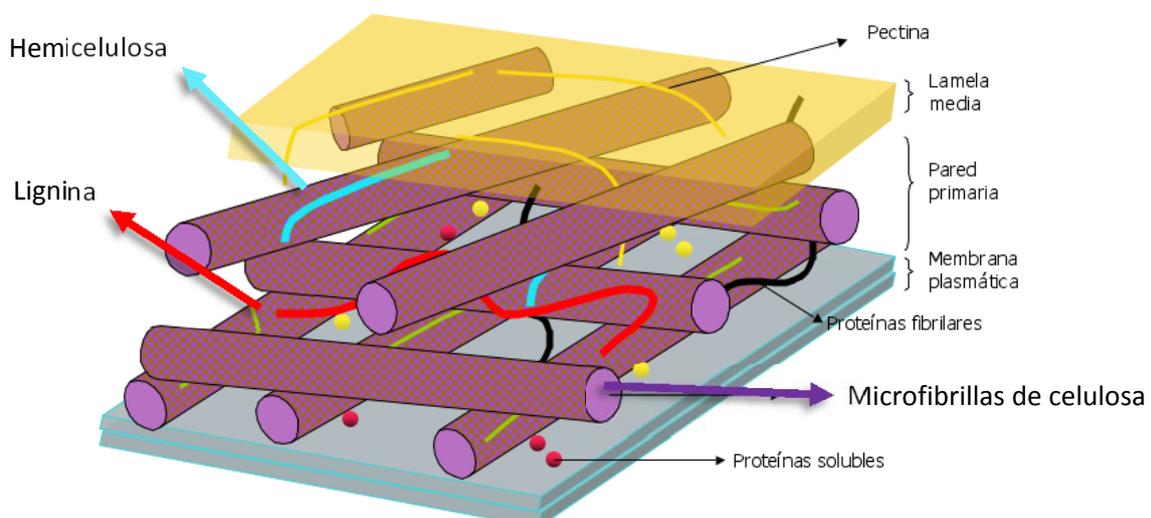


Fig. 14 – ilustración pared celular de una planta.



4.2 ESTRUCTURA DE LA CELULOSA

La celulosa conforma un sistema ordenado de - [**β -D (+)- anhidroglucosa**]- unidas entre sí a las interacciones por puentes de hidrógeno (1 \rightarrow 4) dando origen a un polímero lineal monosacárido, ver **Figura 15**, cada unidad monomérica lleva tres grupos hidroxilo, con propiedades similares al cristal. Una vez que las cadenas se ordenan en la cristalita, ellas se unen entre sí formando las micelas¹ las cuales originan la formación de las microfibrillas, macrofibrillas y fibras que forman la pared celular ver **Figura 16**.

En la formación de la molécula de celulosa, ocurren *reacciones* sucesivas entre grupos hidroxilos del **C1** de la β -D (+)- anhidroglucosa, con grupos hidroxilos del **C4** de otras unidades, eliminación de una molécula de agua por cada enlace formado.

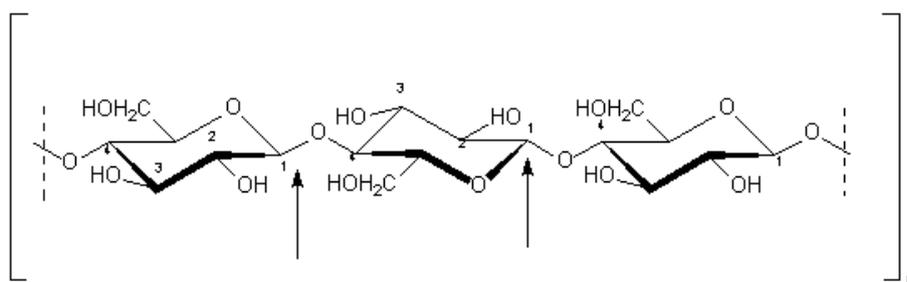


Fig. 15 - Celulosa [polímero 1,4-O- β -D-glucopiranosido]

Las cadenas de celulosa son largas y están ordenadas en un plano (forma planar). Existen tres razones para este ordenamiento.

- tipo de enlace
- conformación del anillo piranósico
- conformación axial ecuatorial

Las fibras de celulosa están constituidas de **regiones cristalinas** (altamente ordenadas) y de **regiones amorfas** (desordenadas). Estas regiones no poseen fronteras bien definidas, pero parece existir una transición de una zona ordenada de las cadenas de celulosa a un estado desordenado o amorfo, en la cual estas cadenas presentan una orientación menor. En las regiones cristalinas las cadenas de celulosa se ordenan en forma de microcristalitas y cristalita que forman las micelas¹.

1 - Micelas: Se denomina **micela** al conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides.



En el área de la ciencia y tecnología de materiales, la combinación de materiales orgánico-inorgánico (bio-híbrido, bio-compuesto) a escalas nanométricas (nano-compuesto) abre nuevas posibilidades para desarrollar materiales respetuosos con el medio ambiente (González del Campo, 2017).

4.3 NANOCELULOSA

El término microfibrilado (MFC) / nanocelulosa (NCC) se utilizó por primera vez a fines de la década de 1970 por Turbak, Snyder y Sandberg en el ITT Rayonier Labs, Nueva Jersey, Estados Unidos, para describir un producto preparado como un material de tipo gel al pasar la pasta de madera por un homogeneizador a alta temperatura y presión seguido de un impacto de expulsión contra una superficie dura.

Microfibras de Celulosa (MFC) es una **nanopartícula** larga y flexible y contiene microfibrillas de celulosa más o menos individualizadas con dominios alternos cristalinos y amorfos, que forman una estructura similar a una red. Sus dimensiones laterales son del orden de 10 a 20 nm, y la longitud generalmente está en la escala del micrómetro ver Figura 16.

Existen dos familias principales de materiales celulósicos nanométricos, a saber: **Celulosa nanocrystalina** (NCC) y **Celulosa microfibrilada** (MFC) respectivamente como podemos ver en la **Tabla 2**.

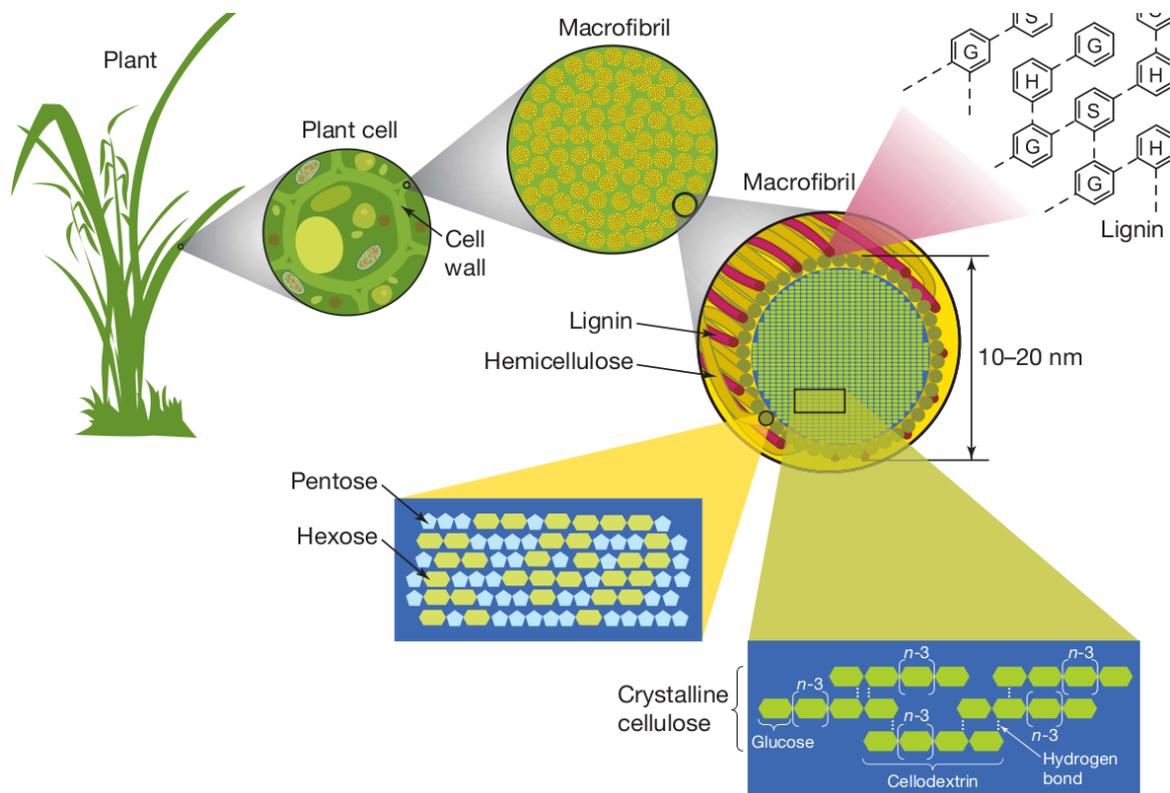


Fig. 16 - Estructura lignocelulósica de las plantas.



Las características morfológicas precisas de la nanocelulosa se estudian generalmente por microscopía, (microscopía electrónica de transmisión, TEM, microscopía electrónica de barrido, SEM, microscopía de fuerza atómica, AFM) ver **Figura 17** o técnicas de dispersión de luz, incluida la dispersión de neutrones de ángulo pequeño (SANS) y dispersión dinámica de luz polarizada o despolarizada (DLS y DDLS respectivamente) (Brinchi et al., 2013).

Tabla 2. Tipos de Nanocelulosas.

Tipo de nanocelulosa	Sinónimos	Fuente típica	Tamaño promedio
Celulosa nanocristalina, NCC	Nanocristales de celulosa, cristalitas, bigotes, microcristales de celulosa.	Madera, algodón, cáñamo, lino, paja de trigo, paja de arroz, corteza de morera, ramio, MCC, Avicel, túnica, algas, bacterias	Diámetro: 5–70 nm Longitud: 100–250 nm (de la planta); 100 nm: varios micrómetros (de celulosa de tunicados, algas, bacterias)
Celulosa microfibrilada, MFC	Celulosa microfibrilada, nanofibrillas, microfibrillas, celulosa nanofibrilada	Madera, remolacha azucarera, tubérculo de patata, cáñamo, lino.	Diámetro: 5–60 nm Longitud: varios micrómetros

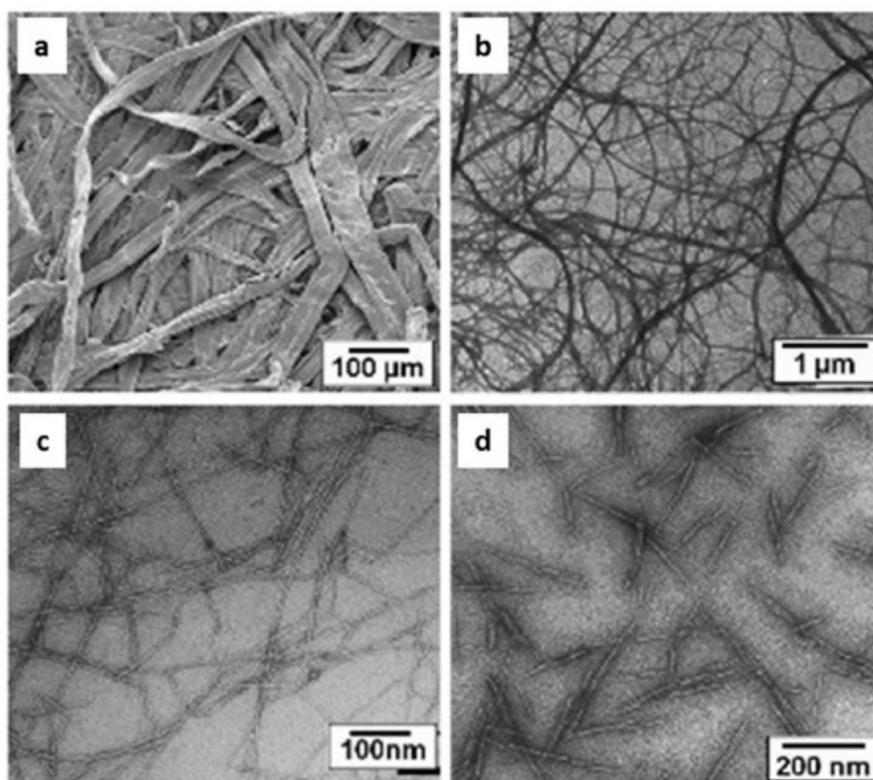


Fig. 17- Aspecto de diferentes tipos de celulosas: a) imagen SEM de fibras procedentes de pulpa Kraft e imágenes TEM de b) MFC, c) CNF obtenida utilizando TEMPO y d) CNC procedente de fibras de madera.



4.4 PROPIEDADES DE LA NANOCELULOSA

Las propiedades mecánicas de las nanopartículas de celulosa pueden caracterizarse en términos de las propiedades de las regiones ordenadas (***cristalinas***) y desordenadas (***amorfas***) que constituyen la nanopartícula. Las regiones desordenadas contribuyen a la flexibilidad y plasticidad del material a granel. Las regiones ordenadas contribuyen a la rigidez y elasticidad del material (Khattab et al., 2017a).

Los nanocristales de celulosa son materiales altamente cristalinos, por lo que tienen propiedades mecánicas altas, el módulo de Young de la nanocelulosa es de 100 - 130 GPa, mientras que la densidad de este material es de 1.6 g/cm³, lo que significa que es un material muy resistente y a la vez ligero, tiene propiedades dieléctricas (García et al., 2016a).

La celulosa nanocristalina puede ser un material útil en el que basar una nueva industria de compuestos su eje axial y el módulo, cercano al derivado de la química teórica y potencialmente más fuerte que el Kevlar, y dentro del rango de otros materiales de refuerzo, como se muestra en la **Tabla 3**. La celulosa nanocristalina también tiene propiedades tales como baja densidad, alta relación de aspecto, alta área de superficie y propiedades de superficie modificables debido a ___grupos laterales reactivos de OH (Brinchi et al., 2013).

Tabla 3. Propiedades mecánicas de diversos materiales.

Materiales	σ, MPa	E, GPa	Densidad, g /cm³	Referencias
Celulosa cristalina	7500–7700	110-220	1.6	Moon et al. (2011)
Acero inoxidable 302	1280	210	7.8	Hamad (2006)
Aluminio	330	71	2.7	Ashby (1989)
Pulpa Kraft De Madera Suave	700	20	1.5	Hamad (2006)
Fibra Kevlar KM2	3880	88	1.4	Cheng, Chen y Weerasooriya (2004)



4.5 APLICACIONES DE LA NANOCELULOSA

La celulosa ha sido utilizada por nuestra sociedad como material de ingeniería durante miles de años y es prolífica dentro de nuestra sociedad, como lo demuestra la enormidad de las industrias mundiales en derivados de celulosa como el papel, embalajes, textiles y productos forestales.

La nanocelulosa mostró un potencial considerable como material de refuerzo para matrices de polímeros bio-basados y biodegradables. ofrecen una nueva combinación de morfología de partículas, propiedades y funcionalidades químicas que permiten su uso en aplicaciones que antes se creían imposibles para los materiales celulósicos (Moon et al., 2011). Los nanocristales de celulosa han demostrado utilidad en muchas aplicaciones de ingeniería, por ejemplo, biomédico, nanocompuestos, membranas de barrera/separación y materiales cementosos donde los nanocristales de celulosa son coloidalmente estables antes de su incorporación debido al procesamiento que tiene lugar en el agua.

Al contener propiedades dieléctricas, por lo que son buenos candidatos para ser usados en transformadores eléctricos, donde tendrán mejores propiedades mecánicas que el papel usado actualmente y serán más estables químicamente.(Moon et al., 2011).



Fig. 18 - Clasificación de las fuentes de celulosa según la actividad de la que se obtiene



4.6 FUENTES DE ORIGEN DE NANOFIBRA DE CELULOSA.

Como hemos mencionado antes la celulosa es un polímero que puede derivar de una variedad de fuentes, como las plantas, animales y microbios. Estos incluyen fibras de semillas (algodón), fibras de madera (maderas duras y blandas), fibras de hilaza (lino, cáñamo, yute, ramio), pasto (bagazo, bambú), animales marinos simples, como tunicados, que también pueden depositar celulosa en sus paredes celulares, algas (Valonica, Ventricosa) y bacterias (García et al., 2016a),(Khattab et al., 2017a).

Vale la pena mencionar que la celulosa producida a partir de plantas sirve como material estructural dentro de la compleja arquitectura de las paredes celulares de las plantas. Generalmente es impuro y contiene hemicelulosas y una cantidad relativamente pequeña de lignina como se muestra en la **Tabla 4**. Los pelos de semilla de algodón, la fuente más pura, contienen de 90% a 99% de celulosa (Khattab et al., 2017a).

Tabla 4. Contenidos de celulosa y lignina en varios tipos de biomasa.

Tipos de Biomasa	Celulosa, % en Peso.	Lignina, % en Peso
Las fibras de coco	43	45
Talón de maíz ^b	33	14
Mazorca de maíz ^b	70	20
Tallo de algodón ^b	65	18
La fibra de lino ^{tiene}	60-81	2-3
La fibra de cáñamo ^{tiene}	70-78	3.7-5
La fibra de kenaf ^{tiene}	36	18
Fibra de hojas de piña ^c	79-83	4-3
Aserrín de pino ^b	60	30
Ramie ^d	76	1
Cascara de arroz ^b	55	35
Arroz-paja ^b	62	18
Fibra de sisal ^{tiene}	43-88	4-12
Bagazo de caña de azúcar ^{una}	40	20
Sunn ^d	80	6
Paja de trigo ^d	30	15
Madera ^e	40-60	10-35

a-Desde la ref. Biagiotti et al. (2004b). **b**-Desde la ref. Gani y Narus (2007). **c**-Desde la ref. Cherian et al. (2010). **re**-Desde la ref. Mohanty, Misra y Drzal (2002). **y** - Desde la ref. Hamelinck, van Hooijdonk y Faaij (2005).



Clasificación la fuente de origen de celulosa desde un punto de vista ambiental es importante. En este sentido, las fuentes de celulosa se pueden clasificar como, primarios secundarios y terciarios(García et al., 2016b).

Las fuentes primarias para la producción de fibra de celulosa como producto principal: fibras para uso textil o papel, madera para construcción, cultivos industriales para bioetanol (García et al., 2016b). **Las secundarias** de subproductos no procesados de un proceso de transformación en la industria alimentaria o como residuos de actividades agrícolas / forestales: corteza, paja, hojas, cáscaras. **Las Terciarias** (residuos del uso, transformación) y conversión de biomasa celulósica: pulpa, bagazo, residuos de alimentos ...).

El aislamiento de la celulosa nanocrystalina a partir de materiales de origen celulósico se produce en dos etapas, como se muestra en la **Figura 19**. El primero es un tratamiento previo del material de origen. Para la madera y las plantas implica la eliminación completa o parcial de los materiales de la matriz (hemicelulosas, lignina, etc.) y el aislamiento de las fibras celulósicas. El segundo es un tratamiento químico controlado, generalmente hidrólisis, para eliminar las regiones amorfas del polímero de celulosa.

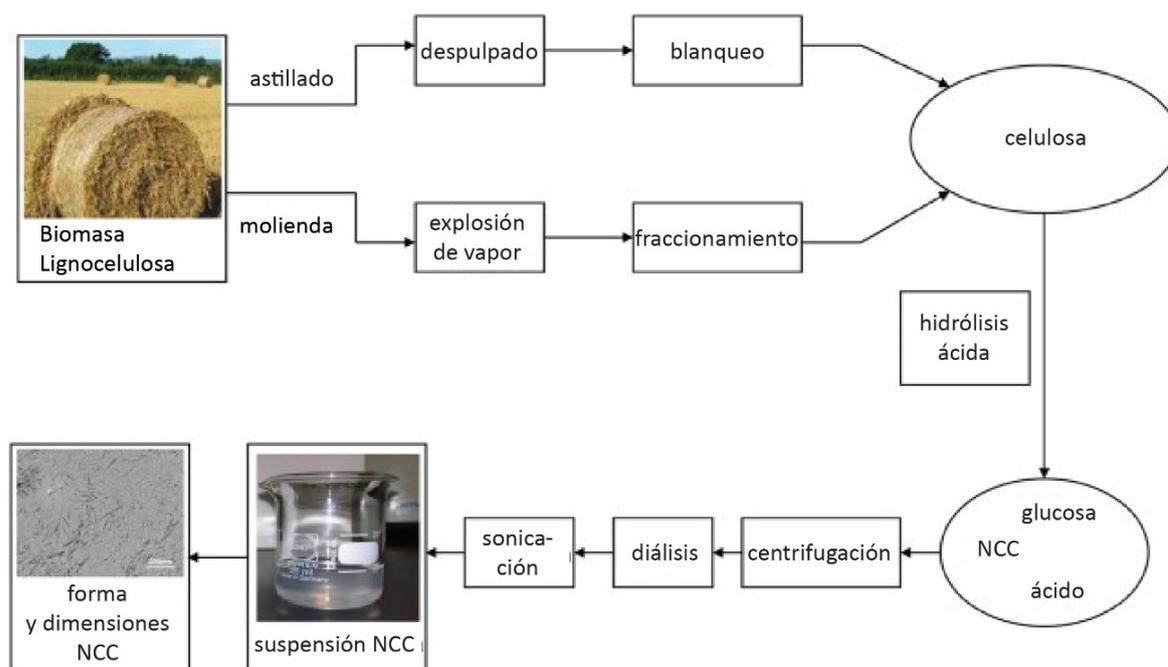


Fig. 19 - Esquema de pasos principales necesarios para preparar NCC a partir de biomasa lignocelulósica.



4.7 METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA

La nanocelulosa se puede aislar de materiales celulósicos utilizando una amplia variedad de métodos que incluyen tratamiento **químico**, tratamiento **enzimático** y tratamiento **mecánico** (Bhatnagar A and Sain M, 2005), (Alemdar and Sain, 2008), El tratamiento previo de las fibras de celulosa o una combinación de dos o más métodos se utilizan normalmente para obtener las características deseadas de Nanocelulosa junto con una fibrilación y rendimiento eficientes, así como también para minimizar el consumo de energía (H.P.S. et al., 2017), (Ek, 2009), (Chen et al., 2011), (Cheng et al., 2009), (Johnson et al., 2009).

Es favorable subdividir las nanocelulosas en tres categorías: nanocelulosa bacteriana (BNC, también conocida como celulosa o biocelulosa microbiana), nanofibrillas de celulosa (CNF, también llamada celulosa nano / microfibrilada) y nanocristales de celulosa (CNC), también conocidos como celulosa nanocrystalina) como se revisó anteriormente. La producción de los tres tipos de nanocelulosas tiene lugar de diferentes maneras; BNC se produce biotecnológicamente por bacterias, los CNF se producen mecánicamente deslaminado celulosa de origen vegetal y los CNC se aíslan por hidrólisis química u oxidación **Figura 20** (Mondal, 2017).

OBTENCIÓN DE NANO-PARTÍCULAS DE CELULOSA

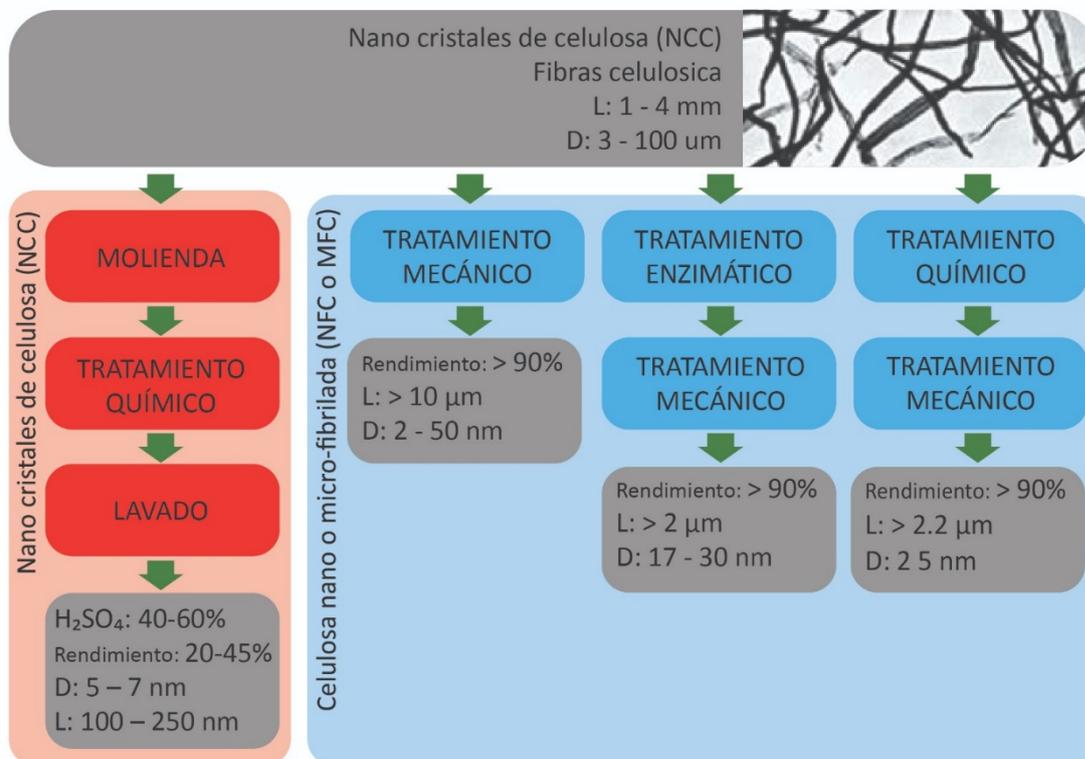


Fig. 20 Obtención de nanopartículas de celulosa



Las partículas cristalinas resultantes al ataque con ácido eh hidrolizadas a las regiones amorfas de las microfibrillas, con una dimensión de 5 a 20 nm de diámetro y 50 a 500 nm de longitud se denominan “**Nanocristales de Celulosa**” ver **Figura 21** (Khattab et al., 2017b).

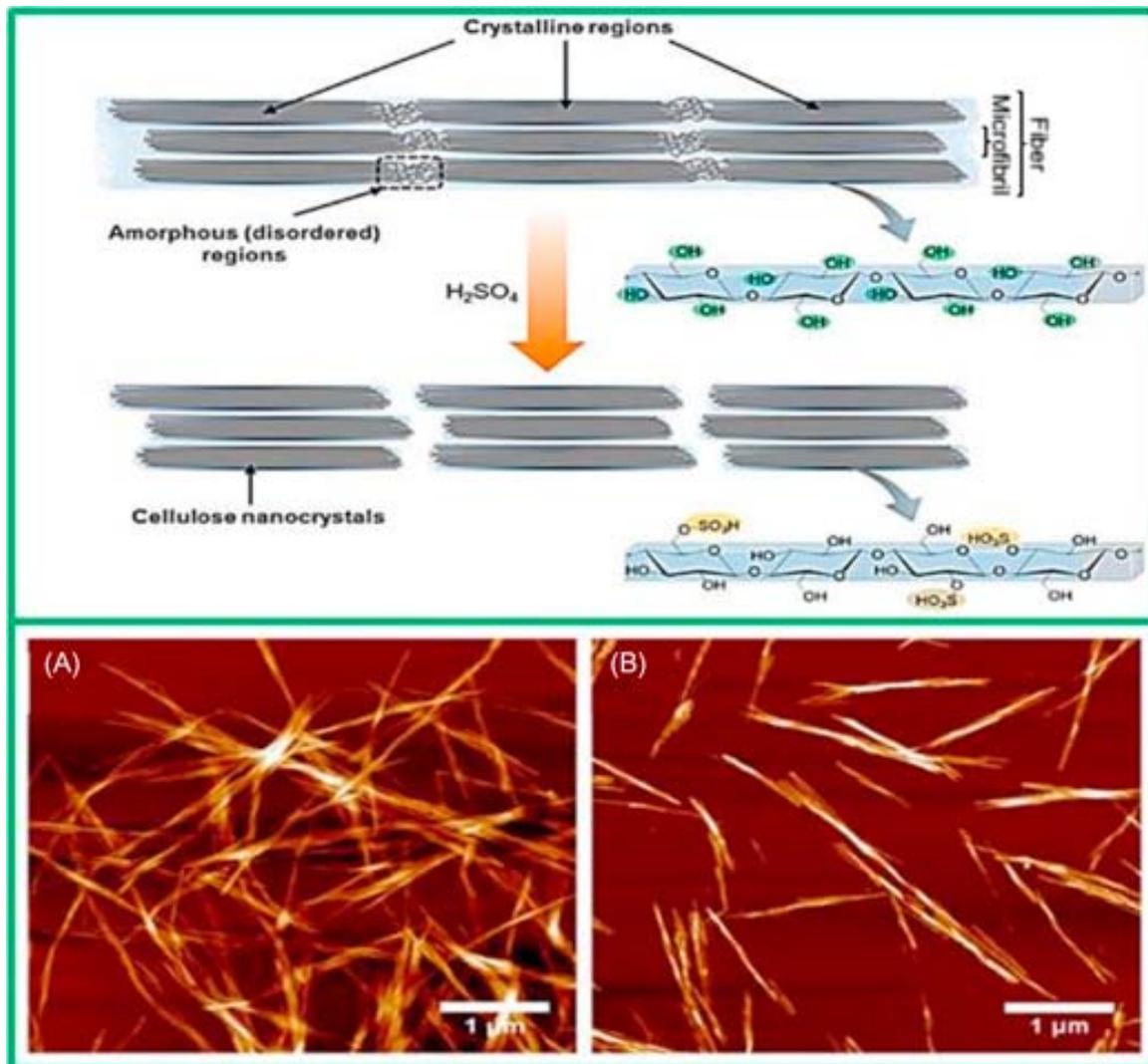


Fig. 21- Proceso descomposición Nanocristales celulosa (Khattab et al., 2017a)

(Parte superior) muestra la presentación esquemática de la hidrólisis ácida de las regiones amorfas y la formación de CNC. (Parte inferior) muestra imágenes de AFM de nanohiskers de celulosa producidos a partir de BC utilizando (A) hidrólisis con HCl e (B) hidrólisis con H₂SO₄.



4.8 ESPARTO

El “esparto” o “atocha” (*Stipa tenacissima* L.) es una gramínea perenne con forma de mata, compuesta por un conjunto de macollas de crecimiento radial **Figura 22**. El esparto es una planta vivaz provista de rizomas y que posee numerosas raíces superficiales (Maestre et al., 2007).

El término de esparto se suele utilizar para nombrar las hojas; mientras que a la planta en general se le denomina Atocha o Espartera (“El Esparto - Región de Murcia Digital,” n.d.).

El esparto es una planta herbácea y perenne de la familia de las gramíneas, de hojas lineales, fuertes y manejables, propia de ambientes esteparios, que puede alcanzar hasta un metro de altura, formando cepellones o macollas conocidas como atocha y que en España se extiende por el este, centro y sur de la Península, además de las Islas Baleares (“Esparto (*Stipa tenacissima*),” n.d.).



Fig. 22 - El Esparto (*Stipa tennacissima* L.)



4.8.1 BREVE HISTORIA.

El esparto es originario de la región irano-turaniana, es decir, de los desiertos ubicados entre el Mar Negro y el Mar Caspio, estimándose que llegó hasta el extremo occidental del Mediterráneo y a la Península Ibérica en el periodo Terciario, cuando los cambios climáticos provocaron una etapa de gran sequía y el Mediterráneo bajó de nivel, lo que facilitó la migración de algunas especies esteparias, entre ellas el esparto, al que se considera una especie termófila y propia de ambientes secos y esteparios.

Los espartales se distribuyen de manera natural por el Mediterráneo Occidental, y más concretamente en el Noroeste de África -Marruecos, Argelia, Túnez y Libia, donde ocupa entre 60.000 y 80.000 km² (Le Houérou, 1986)- y la Península Ibérica (Maestre et al., 2007).

Los Fenicios y especialmente los púnicos los comercializaban por todo el mediterráneo. En textos de Estrabón o Plinio, que hablaban del esparto encontrado por los romanos en la segunda guerra púnica y comercializado desde el año 500 a.C. por los cartagineses. En época romana, extensas zonas del Sureste de la península ibérica estaban denominada por el esparto como "Spartarion Pedion" o "Campos Spartarius", situada en las cercanas de la actual Cartagena.

Su uso fue especialmente intenso durante el siglo XIX, cuando se recolectaron grandes cantidades de esparto para la fabricación de pasta de papel (un uso que sigue siendo importante en el N de África), especialmente en el Reino Unido. La recolección de la fibra de esparto y el manejo de los espartales se mantuvo hasta la segunda mitad del siglo XX.

En la industria del siglo XX, Para el 1922 existía en la provincia de Murcia 110 establecimientos dedicados a la elaboración del Esparto. A ellos se le añaden 113 que fabrican alpargatas, concentrados en caravaca de la cruz-Cehegin y Lorca. En Murcia el calzado usado tradicionalmente por las clases menos acomodadas han sido las esparteñas y alpargatas realizadas con cáñamo y esparto.

El esparto fue de tal importancia en a la economía nacional español, que la administración tenía dedicado un servicio a su gestión, el llamado Servicio Nacional del Esparto, el que desde finales de los años cincuenta, con la práctica desaparición de estos aprovechamientos, también se extinguió, al ser sustituido el esparto por la cordelería de fibra sintética.

En la actualidad el principal valor del esparto es ecológico ya que es una especie protectora del suelo que impide la erosión de un ecosistema tan frágil como es la estepa ibérica y norteafricana, donde no prospera otro tipo de vegetación, dando cobijo a una importante comunidad faunística, entre las que destacan las llamadas aves esteparia.



4.8.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El esparto (*Stipa tenacissima*, L.) o (*Macrochloae tenacissima*, Kunth) pertenece al orden de las glumiflorales, familia de las gramináceas, tribu agrostídeas, subtribu estipeas. Presenta panoja contraída, glumilla externa bífida, con arista en la escotadura, hoja muy fuerte, larga y arrollada, que puede alcanzar un metro de altura, y por lo demás conserva las características del género *Stipa*, que comprende más de 100 especies de los trópicos y zonas templadas (Maestre et al., 2007).

Las hojas del esparto son filiformes, esclerófilas y tenacísimas, entre 30 y 100 cm de longitud y 1 a 4 mm de ancho.

Las hojas de esparto tardan unos 6 meses en completar su desarrollo, estando su longevidad comprendida entre los 12 y los 24 meses (Sánchez, 1995; Rejos, 2000). Su haz es pubescente con nervaduras prominentes de epidermis muy pilosa con surcos longitudinales donde se encuentran hundidos las estomas. Un conjunto de hojas se une a un tallo por medio de vainas formando el penacho. La edad de las hojas en dicho penacho va en aumento desde las interiores, desde donde se generan las hojas nuevas o rebrotes, hasta las exteriores muertas, **Figura 23**.

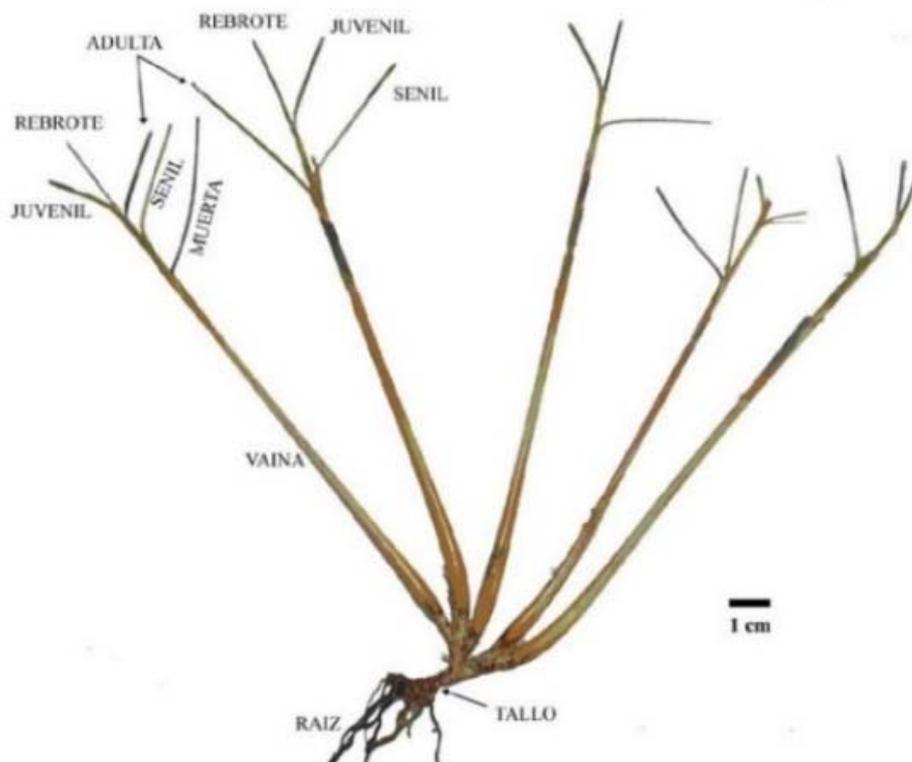


Fig. 23 - Módulo extraído de una macolla de esparto. Fotografía: David A. Ramírez.

Módulo extraído de una macolla de esparto. Las hojas fueron cortadas para una mejor apreciación de la estructura y disposición de estas en el penacho. Se resaltan las cohortes de hojas en las siguientes categorías: rebrote, hoja juvenil, hoja adulta, hoja senil y hoja muerta.

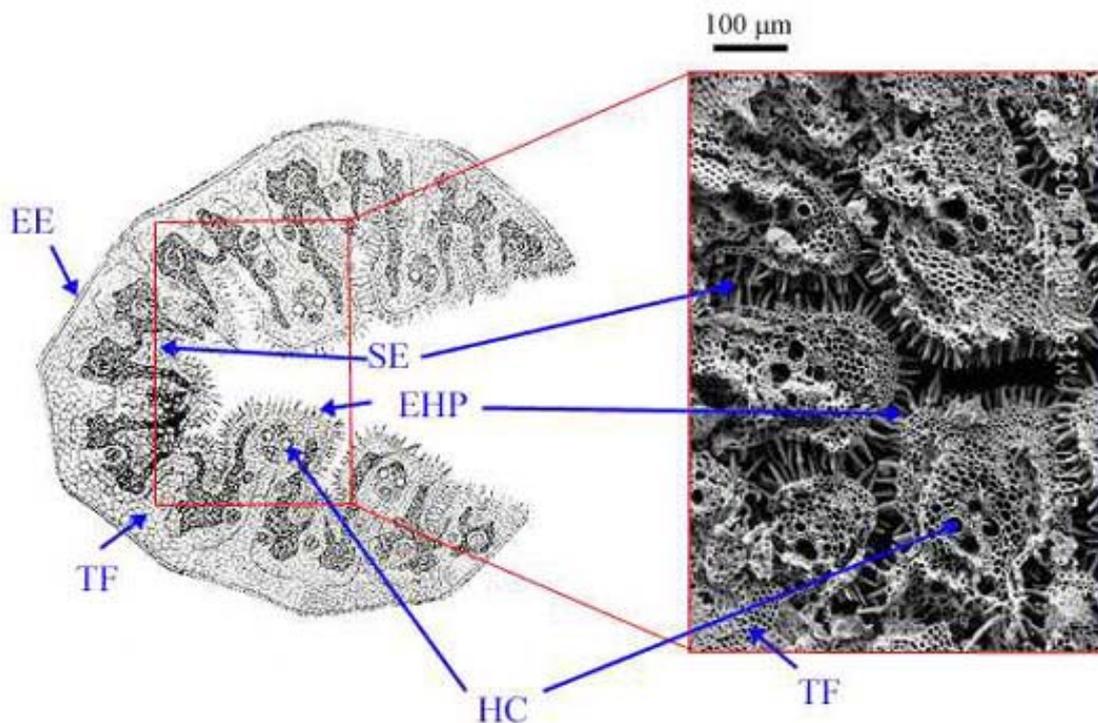


Fig. 24 - Esquema de un corte transversal de la hoja de Esparto. Fotografía: David A. Ramírez.

En la Figura 24. Una sección la hoja de esparto (izquierda) y micrografía detallando la estructura del haz de la hoja (derecha). SE = surcos donde se encuentran las estomas, EE = epidermis del envés de la hoja, EHP = epidermis pubescente del haz de la hoja, HC = haces conductores, TF = tiras de fibras esclerénquima). Fotografías: David A. Ramírez (Maestre et al., 2007).

4.8.3 EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN

Pasos para la transformación del esparto de la planta a la fibra: Arrancado, La Tendida, el esparto se extiende en el suelo para que se seque, Coció, se sumerge en balsas de agua para que las fibras se ablanden, por treinta o cuarenta días, luego se vuelve y se tiende para su secado, el Piacó, consiste en someter al esparto a un aplastamiento para desprender la parte leñosa de la fibra, Rastrillao, proceso por el cual se peinan las fibras de esparto con un rastrillo, que separa las haces de fibra de sus hojas, despojándolas de sus partes leñosas, Hilao, consiste en una ruada de madera movida, que hace girar unas carruchas donde se enganchaban las fibras de espartos. ("El Esparto - Región de Murcia Digital," n.d.).



4.8.4 USO Y APLICACIONES.

Son tres las aplicaciones más importantes dependientes del esparto: la producción de celulosa para la fabricación de papel; la obtención de saquerío y arpillera (Textil); o simplemente las industrias de preparación de la fibra (picado, raspillado, hilado)(Fernández Palazón, 1974).

Con dichas fibras se elaboran sogas, alpargatas, cestos y estropajos; la manufactura del esparto ha sido parte importante de la economía de muchos pueblos de España y, aunque ya poco importante, aún se sigue trabajando. En el ámbito de la construcción, se usa para armar la escayola, dotándola de una gran resistencia a tracción, sobre todo en la formación de sujeciones de placas de escayola armada con fibra de vidrio para la realización de falsos techos. La escayola: Es un material muy utilizado en construcción en España, de color blanco, grano muy fino, contiene muy pocas impurezas, menos que el yeso blanco, y se emplea en; falsos techos; y para acabados en los paramentos de las edificaciones.

4.8.5 ESPARTO FUENTE POTENCIAL DE FIBRA DE CELULOSA.

El Esparto es una planta que constituye una materia prima de gran interés tanto para la obtención de fibra celulosa para la fabricación de papel de gran calidad, como para la obtención de uno de los productos de mayor valor como materia prima, la celulosa Alfa.

La utilización del esparto desde un punto de vista industrial previene convertirse en una fuente importante de celulosa, la celulosa no es solo una sustancia orgánica más abundante, sino que es la mayor componente de las plantas leñosas y es constantemente renovable, la celulosa o sus derivados están a formar parte de la fabricación de papel, rayón, pólvora y otros explosivos, pintura, esmaltes, charral, plásticos, etc.

El Esparto es una planta con gran potencial para generar nanopartículas de celulosa de calidad para uso en componentes cementosos, es una planta utilizada principalmente para generar fibras para distintas aplicaciones. Las características y proceso de obtención de estas fibras y nanomateriales de celulosa a partir de estas hacen de esta planta un elemento de enfoque para generar materiales ecológicos y para la sostenibilidad.



5. CEMENTO Y HORMIGÓN



5. CEMENTO

El cemento es un polvo seco producido mediante la trituración y mezclado de caliza y arcilla (materiales que contienen óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro) **Figura 25**. Los materiales son fundidos a unos 1500°C en un horno, formando Clinker.

Una vez se produce el Clinker, los materiales están ligados de manera irreversible. Seguidamente, el Clinker se enfría y es molido con una pequeña parte de yeso y otros aditivos para producir cemento. Según el uso que se le quiera dar, los componentes en el cemento varían para mejorar propiedades como resistencia, tiempo de fraguado, trabajabilidad, durabilidad y color. En la producción del cemento también se utilizan materiales reciclados tales como escorias de alto horno y cenizas volantes.

5.1 COMPOSICIÓN DEL CEMENTO.

La pasta del cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas. El cemento Portland puede tener composiciones variables. Las materias primas básicas son (Stupenengo, 2011):

- 1) caliza (CaO),
- 2) arena (sílice, SiO_2);
- 3) alúmina (Al_2O_3);
- 4) óxido de hierro (Fe_2O_3)



Fig. 25 - Polvo de Cemento



5.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones – IECA, 2018).

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de silicatos de calcio, aunque también puede participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como, por ejemplo, los aluminatos (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones – IECA, 2018).

5.3 TIPO DE CEMENTOS

La forma más conocida de cemento es el cemento Portland, pero también existen muchos tipos distintos de cemento con diferentes propiedades. Cerca del 95% del cemento manufacturado es utilizado para hacer diferentes tipos de concreto.

CEMENTOS COMUNES - UNE-EN 197-1:2000:

- CEM I- Cementos Portland: H de resistencia alta / prefabricación.
- CEM II- Cementos Portland mixtos: H y M en general (no especiales).
- CEM III- Cemento de horno alto: H en masa y armados y M en general, ambientes agresivos.
- CEM IV- Cementos puzolánicos: ambientes agresivos por aguas puras/ácidas, áridos reactivos.
- CEM V- Cementos compuestos: estabilización, suelo cemento, carreteras, presas, macizos.

Los cementos especiales con propiedades particulares son comercializados para proyectos en ambientes marinos, construcción de presas y proyectos de diseño en construcción. Los usos y aplicaciones más comunes para el cemento que podemos encontrar:

- Cementos resistentes a los sulfatos (sr):** une 80303-1:2001 - aguas o terrenos con sulfatos, yesos.
- Cementos resistentes al agua de mar (mr):** une 80303-2:2001 - ambientes marinos.
- Cementos de bajo/muy bajo calor de hidratación (lh – vlh):** une 80303-3:2001 / une-en 14216:2005 - grandes masas, tiempo caluroso.
- Cementos blancos (bl):** une 80305:2005 – h. y m. blancos y colorados.
- Cementos para usos especiales (esp)une 80307:** 2001 - estabilización, sc y gc, subbases carreteras...
- Cementos de aluminato de calcio (cac):** une-en 14647: 2006 – h. y m. refractarios, medios agresivos, endurecimiento rápido, antiabrasión...



5.4 HORMIGÓN

El Hormigón es el material más importante y usado como componente estructural en la construcción. Tiene la ventaja de la flexibilidad de diseño puesto que, en su estado pastoso inicial, se puede verter y adquiere la forma que lo contiene es muy barato, posee alta dureza, resistencia al fuego y puede ser fabricado en el lugar. Los inconvenientes son su escasa resistencia a la tracción, baja ductilidad y sufre problemas de dilatación/contracción con las variaciones de temperatura.

El Hormigón es el segundo material más consumido en el mundo después del agua y constituye la base del entorno urbano. Se estima que en 2006 en el mundo se consumieron entre 21 y 31 billones de toneladas de concreto (conteniendo 2.54 billones de toneladas de cemento)³, a comparación de los menos de 2 – 2.5 billones de toneladas de concreto consumidas en 1950 (200 millones de toneladas de cemento) (Consejo Mundial Empresarial Para and El Desarrollo Sostenible – WBCSD, 2009).

5.4.1 COMPOSICIÓN DEL HORMIGÓN

El hormigón se compone de agregados gruesos y finos, cemento y agua, También se añaden otros materiales en menor cantidad para mejorar el desempeño. Cenizas volantes, humo de sílice y escorias pueden ser utilizados como materiales cementosos reduciendo así el contenido de cemento. Estos materiales pueden ser añadidos en la última etapa de la producción del cemento o cuando se prepara el concreto. Los agregados naturales pueden ser reemplazados por agregados recuperados a partir de concreto reciclado(Consejo Mundial Empresarial Para and El Desarrollo Sostenible – WBCSD, 2009).

El hormigón es un material compuesto formado por partículas dispersas (grava y arena) de gran tamaño (0.5 – 20 mm) generalmente SiO₂ (dióxido de silicio o sílice) en una matriz dura de silicatos y aluminatos (aglutinantes) que provienen de la hidratación del cemento(Stupenengo, 2011).

El hormigón es un material compuesto formado por cerámicos y tiene una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tracción (un orden de magnitud). La mejora de las propiedades de resistencia a la tracción se puede llevar a cabo mediante el refuerzo con barras de acero (que pueden estar pretensadas). Si las barras están tensadas en el momento del fraguado el hormigón aumenta más la resistencia. El hormigón reforzado con acero se conoce como hormigón armado y constituye la etapa de encofrado de un edificio para construir la estructura básica de pilares.

El hormigón armado es una mezcla compuesta por tres componentes fundamentales: cemento Portland, agua, áridos además del acero que forma las armaduras.



5.4.2 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Las propiedades del hormigón se clasifican según su estado fresco o endurecido y según resistencia.

HORMIGÓN FRESCO

Consistencia Facilidad que presenta el hormigón fresco para deformarse. Depende fundamentalmente del agua de amasado. **Docilidad** Aptitud del hormigón fresco para ser puesto en obra en condiciones normales. Relacionada con la consistencia. **Homogeneidad** Distribución regular de los diferentes componentes del hormigón en su seno. Requiere un buen amasado, un cuidadoso transporte y adecuado vertido para evitar segregación o decantación del árido. **Peso específico** Se emplea como indicador de la uniformidad de la mezcla, junto con la consistencia. Revela cambios en contenidos de agua, cemento o en la granulometría de los áridos.

HORMIGÓN ENDURECIDO

Densidad [Art. 10.2] Depende fundamentalmente del tipo de árido, del método de compactación y del aire ocluido. Se adopta un valor estándar de 25 kN/m³ en hormigón armado y de 23 kN/m³ si es en masa. **Compacidad** Valor ligado a la densidad. Depende sobre todo de la energía de compactación aplicada. Mejora la durabilidad de la estructura. **Permeabilidad** Define la facilidad de penetración del agua, por presión o por capilaridad. Muy ligada a la relación A/C. **Resistencia al desgaste** Característica exigible en hormigones empleados en zonas de elevada fricción mecánica (carreteras, soleras industriales, etc.)

RESISTENCIA MECANICA

Es la capacidad que tiene el Hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse.

La durabilidad, es la capacidad para resistir el paso del tiempo. La porosidad se considera la proporción de huecos, respecto de la masa total. Influye en la resistencia, la densidad, y la permeabilidad del hormigón.



5.4.3 TIPOS DE HORMIGÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Relacionado con la densidad, las proporciones y para qué son utilizados, existen distintas clases de hormigón o concreto que tienen usos específicos, como, por ejemplo:

ORDINARIO: Es el resultado de la mezcla entre cemento Portland, agua y elementos áridos de varios tamaños que sean superiores o inferiores a 5 mm, más grava y arena.

EN MASA: Esta clase no requiere de estructuras internas de acero y sólo aguanta esfuerzos relacionados con la compresión.

ARMADO: Es el más habitual por contener estructuras de acero en su interior que han sido debidamente dispuestas. Es ideal para resistir cargas de tracción y compresión.

PRETENSADO: Esta mezcla lleva en su interior una armadura de acero que está diseñada para ser tensionada en función de la tracción después de verterlo. La pretensada también puede ocurrir antes de colocar la mezcla fresca.

POSTENSADO: Parecido al anterior, la armadura de acero se tensa después de que el cemento haya fraguado y endurecido.

AUTOCOMPACTANTE: No precisa de compactación debido a una dosificación precisa de aditivos superplastificantes que facilitan que se compacte por su propio peso.

CICLÓPEO: Este tipo contiene en su interior piedras que superan los 30 cm.

SIN FINOS: Como lo indica su nombre, esta mezcla no contiene arena, pero sí árido grueso.

CELULAR O AIREADO: Para obtenerlo, hay que incorporar aire u otros gases a la mezcla, lo que produce un concreto de baja densidad.

DE ALTA DENSIDAD: Contrario al anterior, éste se fabrica con áridos de densidad superior como barita, hematita o magnetita.



6. PUZOLANA



6. PUZOLANA

La puzolana es aquel material que carece de propiedades cementicias, con constituyentes como la sílice – alúmina, que al combinarse con cal en presencia de agua a temperaturas ordinarias, da compuestos permanentemente insolubles y estables que se comporta como conglomerante hidráulico (Salazar, 2010), (Payá et al., 2002).

La reactividad de las puzolanas se atribuye, fundamentalmente en algunos casos, a la sílice activa que se encuentra en ellas formando compuestos mineralógicos silíceos (Salazar, 2010).

6.1 BREVE HISTORIA

En la historia por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, primeros en conocer “la cal”, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico, **Figuran 26**. Lo que da surgimiento en el paso de la historia a los “cementos y morteros romanos puzolánicos”, denominados de esta manera por la extracción del material volcánico se realizaban en las faldas del Vesubio de la población de puzzouli, que en tiempos romanos era explotada, para la fabricación de cemento.

Reconocer las propiedades mecánicas y de durabilidad que han otorgado a los elementos constructivos de obras antiguas realizadas con puzolanas que hasta hoy en día siguen en pie, como exponente de este material de la civilización romana tenemos el panteón de Roma, ver **Figura 27** dándole el vigor y con él la longevidad.



Fig. 26 – Roca de origen volcánica “Puzolana”

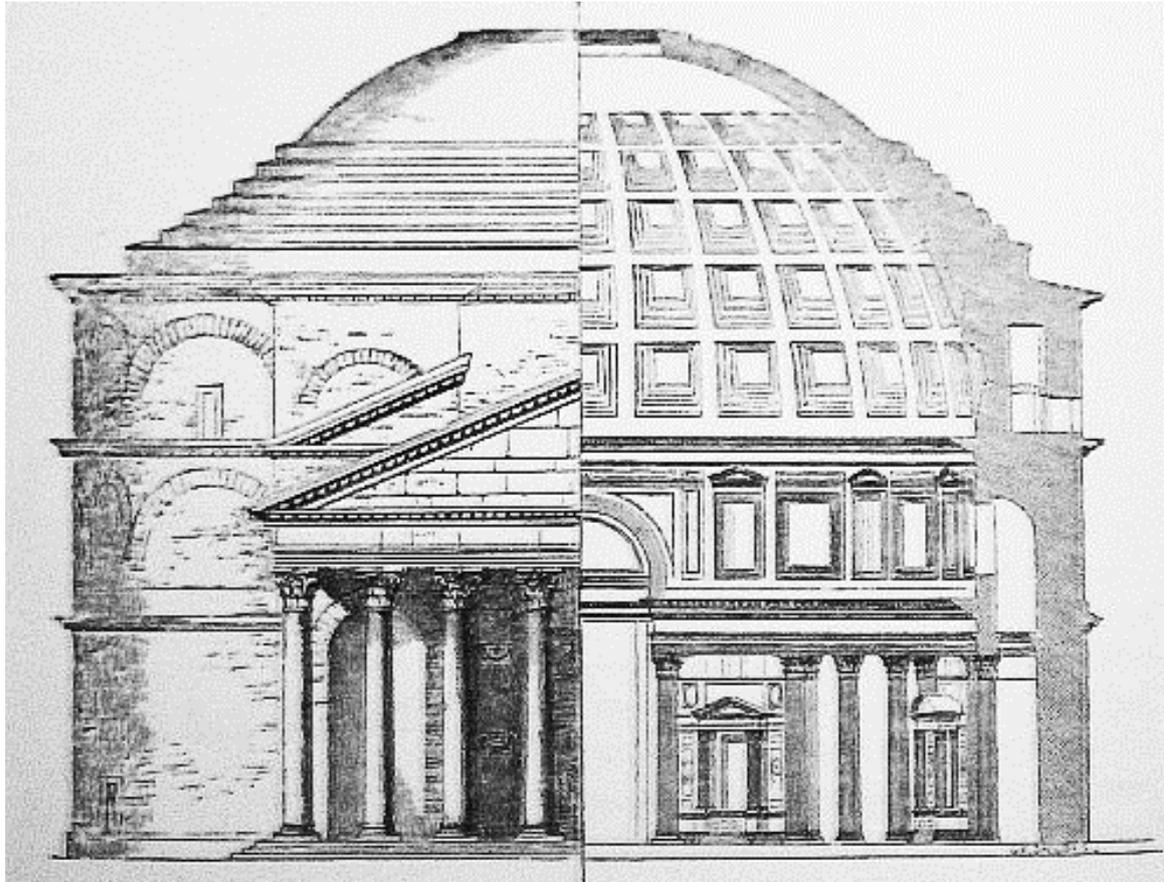


Fig. 27- Alzado y sección

La norma de recepción de cemento RC-08, enfatiza que las puzolanas deben ser seleccionadas, homogenizadas, secadas o tratadas térmicamente y pulverizadas, dependiendo de su estado de producción o suministro. También hace referencia a su estado de obtención (natural o natural calcinada).

6.2 CLASIFICACIÓN DE LA PUZOLANA

Las puzolanas, según su origen, se clasifican en dos grandes grupos; El de las **naturales** y el de las **artificiales**.

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos de origen submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales o plantas (Salazar, 2010).

Las puzolanas artificiales son aquellas como materiales que deben a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos uno, el formado por materiales naturales silíceo de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos “ex profeso”, y otro el constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales, que, en virtud de su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas (Salazar, 2010).



6.3 COMPORTAMIENTO PUZOLANICO

El comportamiento puzolánico se basa en que los componentes ácidos sílice y alúmina, reaccionan con la cal a condiciones (temperatura) de que sus uniones en dichos materiales sean frágiles. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, de su gran superficie reactiva (Salazar, 2010).

6.3.1 EFECTO PUZOLANICO

El efecto de la reacción puzolánica en morteros y hormigones de cemento/puzolana consiste fundamentalmente en que la resistencia mecánica desarrollada por dicho conglomerado es superior a la esperada debido a la relación agua/cemento existente en la dosificación de dicho conglomerado (Payá et al., 2002).

De ese modo, podemos decir que la presencia de puzolana realiza un papel equivalente a la reducción de la relación agua/cemento, que tiene como consecuencia el aumento en la resistencia mecánica. Por tanto, la adición de una puzolana en un conglomerante supone una reducción en la relación “agua/cemento efectivo” (Payá et al., 2002).

6.3.2 PROPIEDADES PARA EVALUAR LA PUZOLANA

En una puzolana es requisito indispensable evaluar sus características físicas y químicas y su efecto en las propiedades finales del cemento o del hormigón según el caso.

Se debe tener conocimientos de los siguientes aspectos:

- Composición química.
- Propiedades físicas.
- Microestructura (SEM).
- Espectroscopia IR y DRX.
- Actividad puzolánica.
- Requerimiento de agua.
- Efecto de contracción por secado.
- Efecto en las propiedades finales del cemento.
- Ensayos de durabilidad en concordancia con el medio de servicio.
- Proporción óptima de uso.

Especificación del producto y recomendaciones finales.



En general, se obtienen ventajas de todo de los cementos puzolánicos la cual señalamos en las propiedades siguientes:

A. En la resistencia mecánica

A.1 A largo plazo, al prolongar el período de endurecimiento

A.1.1 A tracción A.1.2 A compresión

A.1.3 Mejor relación tracción - compresión

B. En la estabilidad

B.1 Frente a la expansión por cal libre

B.2 Frente a la expansión por sulfatos

B.3 Frente a la expansión por la reacción álcalis – agregado

B.4 Frente a la retracción hidráulica de secado, por la menor relación a/c

B.5 Frente a la retracción térmica por enfriamiento

B.6 Frente a la fisuración

C. En la durabilidad

C.1 Frente a ataques por agua puras y ácidas

C.2 Frente a ataques por aguas y suelos sulfatados

C.3 Frente a ataques por agua de mar

C.4 Frente a ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas C.5 Frente a la desintegración por la reacción álcalis – agregado

D. En el rendimiento y la economía

D.1 Al corresponder a los cementos puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de peso

D.2 Al ser los cementos puzolánicos, en general, conglomerantes más baratos

E. En la plasticidad

E.1 Rebajando la relación a/c

E.2 Reduciendo la segregación

E.3 Evitando la exudación y el sangrado



F. En la impermeabilidad

- F.1 Reduciendo la porosidad
- F.2 Evitando la formación de eflorescencias
- F.3 Produciendo la mayor cantidad de Tobermorita

G. En la adherencia

- G.1 Del agregado a la pasta
- G.2 Del mortero a las armaduras

H. En el comportamiento térmico

- H.1 Al liberar menor calor de hidratación
- H.2 Al producir menor elevación de temperatura



7. NORMAS DURABILIDAD DEL HORMIGÓN



7. NORMAS - DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

En este trabajo se consideran la norma *EHE-08 de instrucción de Hormigón Estructural*, y la norma *R-033-Reglamento de Estructuras de Hormigón*. Tomando en cuenta principalmente los criterios de durabilidad del hormigón.

Según la norma EHE-08, apartado 37.3, la durabilidad del hormigón es la capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas o químicas agresivas de proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos metálicos embebidos en el hormigón durante la vida de servicio de la estructura.

La norma también recomienda una adecuada dosificación para conseguir una durabilidad adecuada presentando los siguientes requisitos:

a) Requisitos Generales:

- Máxima relación agua/cemento.
- Mínimo contenido de cemento.

b) Requisitos adicionales:

- mínimo contenido de aire incluido.
- utilización de un cemento resistente a los sulfatos.
- utilización de un cemento resistente al agua de mar.
- resistencia frente a erosión.
- resistencia frente a las reacciones álcali-árido.

Nota: cada uno en el caso, según **37.3- 2,3,6,7**.

Este trabajo se tratará las posibles causas de reducción de la durabilidad de los hormigones estructurales, en base a sus dosificaciones con adiciones de sustitución y relación Agua/Cemento.

Según la norma:

En el caso de que se utilicen adiciones en la fabricación del hormigón, se podrá tener en cuenta su empleo a los efectos del cálculo del contenido de cemento y de la relación Agua/cemento (A/C). A tales efectos se sustituirá para entrar en la **Tablas 5,6 37.3.2**. a el contenido de cemento C (Kg/m³) por C+KF, así como la relación de A/C por A(C+KF) siendo F(Kg/m³) el Contenido de la adición y K el coeficiente de eficiencia de esta.



Tabla 5 ---- 37.3.2.A Relación máxima agua/cemento y contenido mínimo de cemento

Parámetros de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Relación máxima a/c	masa	0,65	—	—	—	—	—	—	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	masa	200	—	—	—	—	—	—	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 6 ---- 37.3.2.B Resistencias mínimas recomendadas en función

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm ²)	masa	20	—	—	—	—	—	—	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

(*) Estos valores reflejan las resistencias que pueden esperarse a todos los efectos, cuando se emplean áridos de buena calidad y se respetan las especificaciones estrictas de durabilidad incluidas en esta Instrucción. Se trata de una tabla meramente orientativa, con el objetivo de fomentar la coherencia deseada entre las especificaciones de durabilidad y las especificaciones de resistencia. En este sentido, se recuerda que en algunas zonas geográficas en las cuales los áridos sólo pueden cumplir estrictamente las especificaciones definidas para estos en esta Instrucción, puede ser complicado obtener estos valores.

Una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, así como su colaboración en la protección a la armadura frente a corrosión, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Para obtenerla son decisivas la elección de una relación de agua/cemento suficientemente baja, la compactación idónea del hormigón, un contenido adecuado de cemento y la hidratación suficiente de este, conseguida por un cuidadoso curado. Los valores del contenido mínimo establecido por el artículo son mínimos absolutos. En ningún caso, las tolerancias de dosificaciones recogidas en 70.2.4.1 y 70.2.9.1 permitirán el incumplimiento de estos. Dado que la resistencia mecánica del hormigón que se obtiene con una relación agua/cemento y un contenido fijo, depende de las características del hormigón, y en especial a la naturaleza de los áridos,



pueden producirse variaciones en la resistencia mínima más compatibles con las prescripciones de durabilidad, dependiendo de las zonas geográficas.

7.1 ADECUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO

Se garantizará el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- *Materias primas que cumplan los requisitos de control de calidad.*
- *Dosificación adecuada.*
- *Puesta en obra y curado del concreto correctas.*
- *Curado del concreto.*
- *Resistencia de acuerdo con el comportamiento estructural y los requisitos de durabilidad.*

7.2 MATERIAS PRIMAS

Es importante para la durabilidad la selección del tipo de cemento más adecuado según las recomendaciones de la instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08).

7.3 DOSIFICACIÓN ADECUADA

Los requisitos de dosificación del concreto dependen del grado de agresividad ambiental a la que estará sometida la estructura:

- a) Máxima relación agua/cemento.
- b) Requisitos adicionales. (Impermeabilidad del hormigón)
- c) Resistencia del hormigón a las heladas.
- d) Resistencia del hormigón al ataque por sulfatos.
- e) Resistencia del hormigón al agua de mar.
- f) Por clase de exposición E, hormigón resistente a la erosión.
- g) Resistencia frente a la reactividad álcali-agregado.

7.4 RECUBRIMIENTOS ADECUADOS

El recubrimiento del concreto es la distancia entre la superficie exterior del refuerzo (incluyendo estribos) y la superficie del concreto más cercana.

$$R_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

donde:

r_{nom} : recubrimiento nominal: el que se especifica en planos y lo que sirve para definir los separadores.

r_{min} : recubrimiento mínimo: el que se debe cumplir en cualquier punto.

Δr : margen de recubrimiento en función del control de ejecución:

0 mm en elementos prefabricados con control intenso de ejecución

5 mm en elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución

10 mm en el resto de los casos.



7.5 VALORES MÁXIMOS DE LA ABERTURA DE FISURA

La durabilidad es, junto a consideraciones funcionales y de aspecto, uno de los criterios en los que se basa la necesidad de limitar la abertura de fisura. Los valores máximos para considerar, en función de la clase de exposición ambiental. Las NTC dan recomendaciones similares para concreto reforzado, pero no establecen valores máximos para el concreto pretensado.

7.6 MEDIDAS ESPECIALES DE PROTECCIÓN

En casos de agresividad especial, cuando las medidas normales de protección no se consideren suficientes, se podrá recurrir a la disposición de sistemas especiales de protección, como los siguientes:

- Aplicación de revestimientos superficiales con productos específicos para la protección del concreto (pinturas o revestimientos), conformes con las normas de la serie UNE-EN 1504 que les sean de aplicación.
- Protección del refuerzo mediante revestimientos (por ejemplo, refuerzo galvanizado).
- Protección catódica del refuerzo, mediante ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según UNE-EN 12696.
- Refuerzo de acero inoxidable, según UNE 36067.

Aditivos inhibidores de la corrosión.



**8. ESTUDIOS
DE NANOMATERIALES
DE CELULOSA
EN LA PASTA DE CEMENTO**



8. ESTUDIOS ADICION DE NANOMATERIALES DE CELULOSA EN LA PASTA CEMENTO

8.1 INTRODUCCIÓN

Con el avance de la nanociencia y las herramientas de la nanotecnología se han realizados diversos estudios a los materiales compuestos como el hormigón en su composición nanométrica, reacciones químicas y evolución mineralógica (Giraldo y Tobón, 2006), en busca de mejorar sus requerimientos (Mecánicos, químicos, electrónicos), este capítulo presenta una descripción de la nanocelulosa (nanofibras y nanocristales) y como interactúa con el cemento, las mejoras potenciales que estos aportan a la pasta de cemento, basadas en investigaciones y artículos científicos.

Se describe las propiedades físicas y químicas de la nanopartícula de celulosa y del cemento, también se presenta características puzolánicas de la nanopartícula de celulosa. Como también los posibles mecanismos que apoyan estos resultados que afirman a las nanopartículas de celulosa como un aditivo que mejora las propiedades del cemento, haciendo de este material más sostenible.

Las fibras naturales se utilizan cada vez más porque son renovables, económicas y abundantes y su utilidad en aplicaciones emergentes como agentes de curado internos y control del agrietamiento por contracción.



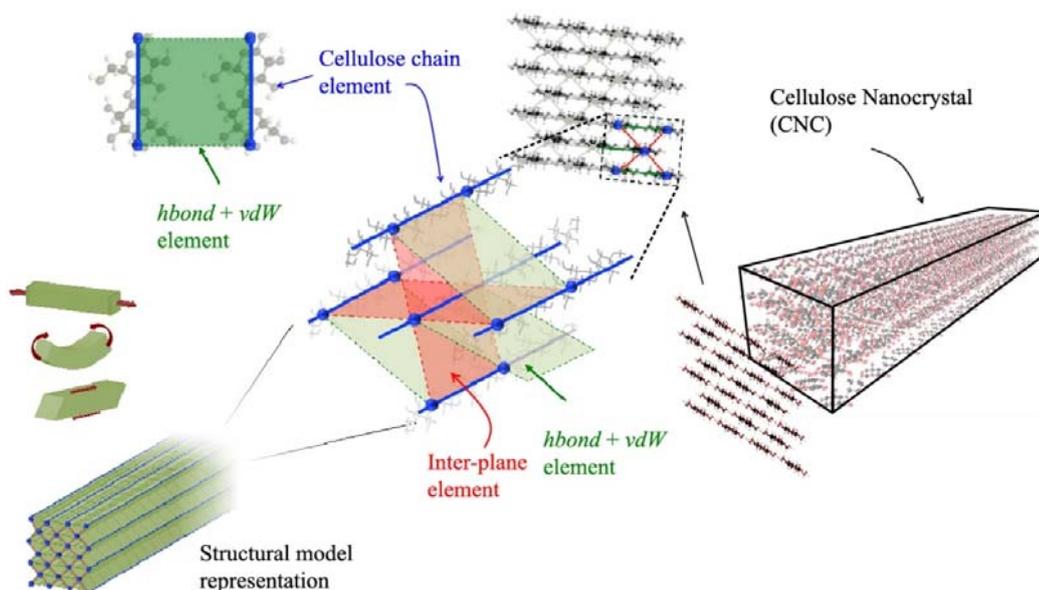
8.2 MATERIALES COMPUESTOS NANOREFORZADOS.

Los materiales nanoreforzados ofrecen oportunidades notables para adaptar las propiedades mecánicas, químicas y eléctricas. Como existe el objetivo de minimizar la huella de carbono de los materiales de infraestructura, estos generan un interés en los materiales biodegradables y de bajo impacto ambiental (nanocelulosa), el aumento del rendimiento de estos materiales de infraestructura, reduciendo el volumen en estos y reduciendo así la demanda de producción materia prima. El uso de materiales de mayor rendimiento es una forma de hacer más con menos (Fu et al., 2017).

Existe una amplia gama de aditivos, como los materiales de cemento suplementarios (SCM), los aditivos químicos y el refuerzo de fibra. Dentro de estos se está investigando los nanomateriales de celulosa y su utilidad en materiales cementosos. Los materiales cementosos nanoreforzados muestran mejoras en sus siguientes aspectos (Cao et al., 2016), (Cao et al., 2015), (Fu et al., 2017):

- Aumento del Grado de Hidratación DOH.
- Módulo de elasticidad.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la Tracción.
- Resistencia a la Flexión.
- Resistencia al Impacto.
- Energía de Fractura.

Las propiedades de la nanocelulosa hacen de esta un potencial material como nanoreforzador para materiales compuestos de cemento como el hormigón.





8.3 CARACTERÍSTICAS DE LA NANOCELULOSA

Estas partículas a base de celulosa nanométrica llenan un vacío único en el espectro de tamaño de partícula de fibra natural y celulosa. Tienen una alta relación de área superficial a volumen, lo que brinda el potencial de aumentar las reacciones químicas **Figura 28**, pero a diferencia de la celulosa molecular, pueden actuar como una partícula rígida en suspensiones y dentro de materiales compuestos (Fu et al., 2017).

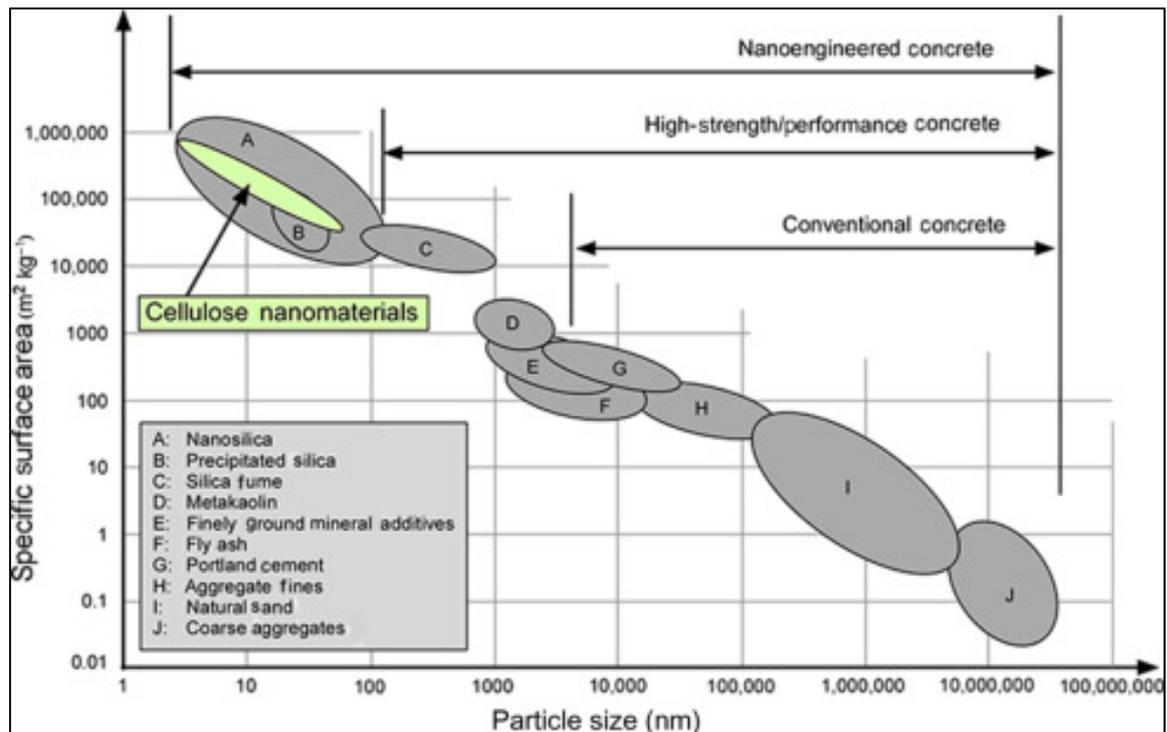


Fig. 28 - Relación de tamaño de nanocelulosa y partículas de hormigón

8.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA CELULOSA

La fibra celulosa tiene una longitud que varía entre 10 μm a unos pocos milímetros. Estas fibras de celulosa purificada tienen características tales como (1) propiedades mecánicas superiores con baja densidad (resistencia a la tracción de hasta 700 MPa); (2) alta retención de agua (capacidad de absorción superior al 300%) para uso como agente de curado interno; y (3) respetuoso con el medio ambiente debido a la abundancia de recursos, bajo costo y rápida renovación (Fu et al., 2017).



8.3.2 MICROFIBRILLAS DE CELULOSA / NANOFIBRILLAS DE CELULOSA.

Las microfibrillas de celulosa (CMF) y las nanofibrillas de celulosa (CNF) **Figura 29, 30.** son fibrillas de celulosa (aproximadamente 100% de celulosa) producidas a partir del refinado mecánico de fibra de madera altamente purificada y pulpas de fibra vegetal (Fu et al., 2017).

El procesamiento de CNF incorpora un paso de pretratamiento adicional a la fuente de celulosa, que facilita la fibrilación y da como resultado una partícula de tamaño mucho más fino. Para las CMF, las partículas tienen un ancho de 10 a 100 nm y una longitud de 0.5 a 10 μm , mientras que las partículas de CNF tienen un ancho de 4 a 20 nm y una longitud de 0.5 a 2 μm (Fu et al., 2017).

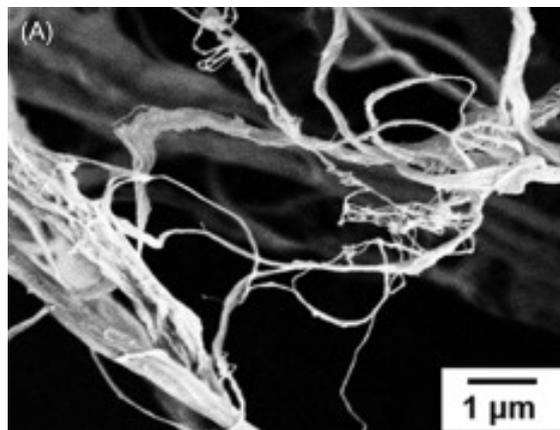


Fig. 29 Microfibras de celulosa.

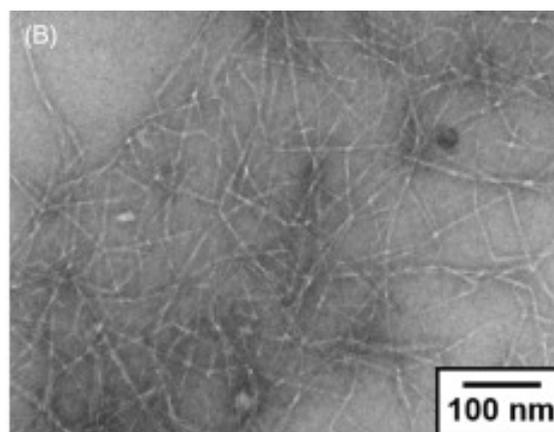


Fig. 30 Nanofibras de Celulosa.

Imagen TEM de (A) CMF, Los CNF utilizados fueron procedimientos en el laboratorio, y tenían un diámetro de 20 a 100 nm, una longitud de 600 a 1700 nm, con una alta retención de agua (capacidad de absorción aproximadamente 3700%) y grupos hidroxilo altos (1.85 mmol g⁻¹).



8.3.3 CELULOSA NANOCRISTALINA.

Los nanocristales de celulosa (CNC), **Figura 31**, son nanofibrillas en forma de varilla que permanecen después de la hidrólisis ácida de las fibras de celulosa. Típicamente 3–20 nm de ancho y 50–500 nm de longitud, que pueden extraerse de plantas y árboles.

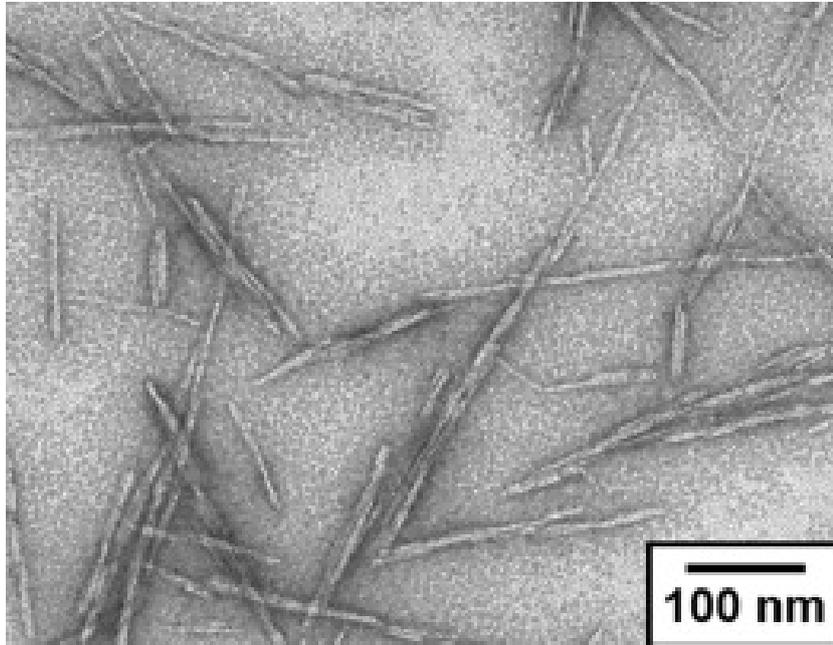


Fig. 31 Nanocristales de Celulosa ("Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials - ScienceDirect," n.d.)

8.3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS NANOCRISTALES DE CELULOSA.

Los nanocristales de celulosa se extraen de fuentes que son sustentables biodegradables, no tienen emisiones de carbono y los procesos de extracción tienen bajos riesgos ambientales de salud y seguridad.

- Alta Relación de Aspecto
- Alto módulo elástico y Resistencia
- Baja densidad
- Superficies reactivas que permiten la funcionalización.
- Hidrofílica Alta y son dispersables en agua.
- Higroscopicidad.



8.4 INTERACCIÓN DE LA CELULOSA NANOCRISTALINA CON EL CEMENTO

Se ha demostrado que las nanopartículas de celulosa tienen cierta afinidad con la partícula de cemento, adhiriéndose a esta por la intensidad del campo eléctrico estático (Potencial Zeta) que posee la partícula de cemento sobre la nanopartícula de celulosa, también por su propiedad higroscópica (absorción de humedad), y estas modifican propiedades reológicas (viscosidad, deformación, propiedades de flujo) en la pasta de cemento (Fu et al., 2017), (Cao et al., 2016), (Cao et al., 2015).

Las nanopartículas de celulosa tienen un potencial elemento de mejora dentro del compuesto de concreto, que por sus propiedades y características tiene la capacidad de modificar las propiedades de la pasta de cemento, modificando sus reacciones químicas en hidratación, por sus características mecánicas adicionarle un rendimiento mecánico, existen diversos mecanismos que apoyan estas conclusiones (Fu et al., 2017), (Cao et al., 2016), (Cao et al., 2015).

Las propiedades de la celulosa nanocrystalina ofrecen posibilidades para mejorar las propiedades de los materiales compuestos de cementos como:

- Rendimiento Mecánico.
- Reducción de porosidad.
- Capacidad de renovación.
- Sostenibilidad.
- Baja toxicidad
- Bajo costo.

Del mismo modo modificando la estructura de compuesto de la pasta de cemento en:

- Su microestructura
- Procesos de hidratación
- Propiedades reológicas
- Módulo de reducción C-S-H de alta densidad aumenta.
- Reducción del contenido de agua.



Los mecanismos que apoyan estos resultados y conclusiones, de que la nanopartícula de celulosa mejora a la pasta de cemento y a su vez al material concreto, en sus aspectos mecánicos, químicos y eléctricos son:

Calorimetría Isométrica (CI).

Las mediciones de CI muestran que DOH de la pasta de cemento aumento con la adición CNC, es preciso decir que el calor acumulativo muestra una tendencia opuesta, con más CNC, la mezcla tiene menos liberación de calor a una cierta edad. Este retraso puede ser causado por los CNC que se adhieren a las partículas de cemento y reducen el área de la superficie de reacción entre el cemento y el agua (Cao et al., 2015).

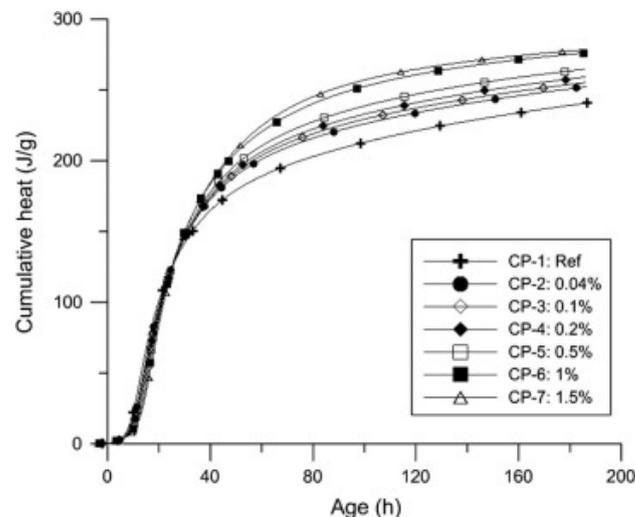


Fig. 32 - Calor acumulado de las pastas de cemento reforzado con CNC durante las primeras 200 h.

Análisis termogravimétrico (TGA).

Las pruebas de TGA muestran claramente que la pérdida de peso de la pasta CNC-cemento aumenta con las concentraciones crecientes del CNC. Esto significa que más agua reacciona con el cemento cuando los CNC están presentes a cualquier edad. Esta evidencia, junto con los resultados de IC, apoya la hipótesis de que los CNC ayudan a mejorar el DOH de las pastas de cemento (Cao et al., 2015).

Estabilización Estérica.

Es un mecanismo de estabilidad estérica indica que las partículas de CNC tienden adherirse sobre la superficie de la partícula de cemento. Lo que induce **impedimento estérico** entre las partículas de cemento y es responsable de dispersar las partículas de cemento, Pero este no es el mecanismo dominante (Cao et al., 2015).



Difusión en Cortocircuito (SCD).

En la difusión de corto circuito la nanocelulosa **transportan agua** a lo largo de su superficie hidrófila hacia los núcleos de cemento no hidratado para inducir una hidratación adicional. Esto es debido a la alta hidrofilia y higroscopicidad. También es probable que la SCD solo sea activada por una concentración crítica de CNC en la cubierta del producto de hidratación. Lo que concluye que los CNC mejoran la hidratación del CHS (Cao et al., 2015).

Potencial Zeta.

Esta medida demostró que la mayoría de los CNC son absorbidos (atraídos por la partícula de cemento y alojados en su superficie) por la partícula de cemento. Lo que muestra **cierta afinidad y como interactúan esta partícula**. Las afinidades entre las partículas tienen el siguiente orden: $F(\text{cemento-cemento}) > F(\text{cemento-CNC}) > F(\text{CNC-CNC})$, el potencial Zeta indica que la afinidad entre las partículas de cemento es más fuerte que la que existe entre CNC-Cemento (Cao et al., 2015).

Absorción de agua.

La cantidad de agua que absorben los CNC en la composición de la pasta de cemento es insignificante, esta cantidad absorbida podría ser despreciable para los efectos en los cambios reológicos en la pasta de cemento (Cao et al., 2016, 2015).

Mediciones Reológicas.

Se observa el rendimiento de tensión (deformación) disminuye en pocas cantidades de CNC en la pasta, esto puede suceder debido a la estabilización estérica, también se observa que a un aumento de cnc mayor, aumenta el rendimiento de tensión(deformación) de la pasta esto es debido a que los cnc forman una red y requieren de mayores fuerzas para romperlos o alinearlos (Cao et al., 2016).

Flexión en B sobre B (B3B).

La resistencia a la flexión de las pastas de cemento aumenta entre un 20 % y un 30% para cantidades modestas de concentración de CNC, en comparación con la pasta de cemento sin CNC, Es te aumento se puede atribuir al aumento de grado de hidratación del cemento (DOH) cuando se utiliza CNC. Destacando que a mayores concentraciones de CNC la fuerza disminuye (Cao et al., 2015).



Sonificación de CNC.

Influye en la distribución de lo CNC en la pasta de cemento fresco y endurecida logrando que partículas de CNC no se aglomeren, y reduciendo la porosidad en gran tamaño de la pasta endurecida (Cao et al., 2016).

Dispersión de Energía (EDX). Mapeo de Oxígeno.

Determina que los nanomateriales de celulosa (CNC) está más concentrado en el CSH de alta densidad, la distribución CNC en las pastas de cemento endurecido, Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los CNC se adsorben sobre la superficie del cemento en la pasta de cemento fresca algunos de los aCNCs están integrados en el CSH de alta densidad, mientras que otros se alejan de las partículas de cemento hacia la región de baja densidad (fase de matriz), que es similar con el caso de los fCNCs (Cao et al., 2016).

Nanoidentación

Muestran que el módulo reducido en la CSH de alta densidad aumenta con las adiciones de CNC, posiblemente debido al alto módulo de los CNC (Cao et al., 2016).

9. FACE EXPERIMENTAL



9. FACE EXPERIMENTAL

9.1 INTRODUCCIÓN

En ingeniería del diseño de materiales, los materiales nanoreforzados representan mejoras en sus resistencias mecánicas (elasticidad, tracción, flexión, fractura, impacto), químicas (reología, hidratación, etc....) y eléctricas (Conductividad).

Los nanomateriales de celulosa, son partículas de origen vegetal, que ofrecen nuevas posibilidades para la mejora en el diseño de los materiales tradicionales de base cementosa, también es un material con características sostenibles y renovables como; bajo costo en producción, biodegradable, no derivados del petróleo y con un bajo impacto ambiental y estudios demuestran que nanomateriales de celulosa tienen afinidad con la partícula de cemento y poseen propiedades físicas y químicas que promueven mejorar el rendimiento mecánico del hormigón, aumentando la resistencia del sistema de cemento (Ardanuy et al., n.d.).

La adición de nanocristales de celulosa de fibra de esparto u otras fibras, al compuesto de cementoso, con el enfoque de aumentar la resistencia mecánica, reduciendo el volumen de utilidad y demanda de cemento, es el principal objetivo de este trabajo.



9.2 MATERIALES Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para los estudios experimentales elaborados en este trabajo, se aplicaron técnicas como; fluorescencia de rayos X, la difracción de rayos X y análisis termogravimétrico, para determinar composiciones químicas elementales de los materiales, para determinar las propiedades mecánicas adquiridas por la pasta de cemento, se realiza un análisis compresión según la norma UNE-EN-196-1.

Con el objetivo determinar el potencial de los microcristales de celulosa, para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento y a su vez del hormigón.

9.2.1 MATERIALES

Los materiales utilizados en la fase experimental de este trabajo fueron: cemento portland CEM 52.5R - Tipo I y Microcristales de celulosa de dos marcas que denominaremos A y C.

Se elaboran diferentes mezclas de compuesto de cementos, preparados con microcristales de celulosa (en diferentes concentraciones), agua y polvo de cemento, del producto de estas mezclas, se investiga los aspectos principales; propiedad mecánica, composición química.

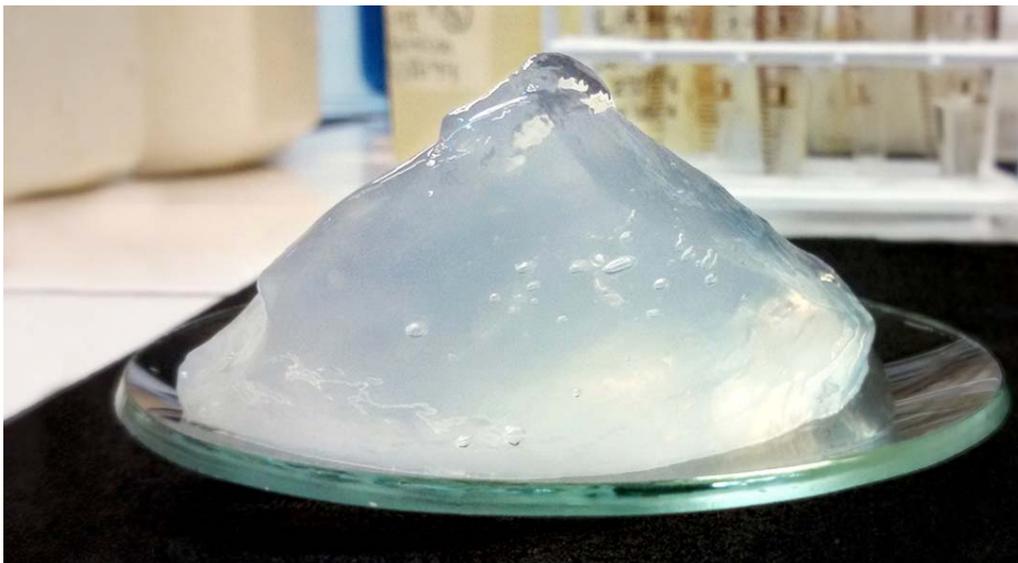


Fig. 33 - Nanocelulosa Cristalina



9.2.2 ANÁLISIS FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

Para el análisis **químico cuantitativo** de los elementos que constituyen la matriz del cemento portland CEM 52.5R - Tipo I y los nanocristales de celulosa de esparto, se lleva a cabo mediante los métodos la fluorescencia de rayos X.

Las muestras en polvo de los microcristales de celulosa y cemento fueron colocadas sobre una membrana de proleno respectivamente, las muestras de humo de sílice y grafito se molieron a mano en un mortero ágata, las otras muestras llegaron molidas y fueron desecadas a 60 °C, hasta lograr un peso constante, se utilizó un espectrofotométrico Bruker S4 Pioneer XRF, del Servicio de Apoyo investigación a la Tecnología de la Universidad Politécnica de Cartagena (SAIT-UPCT), las muestras se colocaron en cámara del equipo a temperatura ambiente.

Se utilizó el método de medida MultiRes-He34 ver **Figura 34**, predefinido en el instrumento y procesando los datos con la herramienta S4 Software utilizado en los Óxidos como matriz de cálculo para evaluar su composición elemental. Los valores de la **Tabla 7** de resultados han sido corregidos de un blanco, para los siguientes elementos;

Tabla 7. Valores de corrección en blanco.

Elemento	Concentración (%)	Posible origen
Cl	0.0060	Porta-muestras
Ca	0.0016	membrana
Cr	0.0004	copa
Fe	0.0020	membrana y copa
Cu	0.0011	colimador



Fig. 34 espectrofotométrico Bruker S4 Pioneer XRF



9.2.3 ANÁLISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).

Para el análisis **caracterización estructural de la parte cristalina** de los elementos que constituyen la matriz del cemento portland CEM 52.5R - Tipo I y los nanocristales de celulosa de esparto, se lleva a cabo mediante los métodos difracción de rayos X.

Para la identificación de la estructura cristalina y cuantificar los elementos que componen este material, se utilizó un Bruker D8 , del Servicio de Apoyo investigación a la Tecnología de la Universidad Politécnica de Cartagena (SAIT-UPCT) **Figura 35**.



Fig. 35 Bruker D8



9.2.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

Para la determinación de los componentes volátiles como H₂O, grupos OH y CO₂, que componen los elementos que constituyen la matriz del cemento portland CEM 52.5R - Tipo I y los microcristales de celulosa se determinaron utilizando un analizador termogravimétrico de Mettler Toledo (TGA / DSC), del Servicio de Apoyo Investigación Tecnológico de la Universidad Politécnica de Cartagena (SATI-UPCT) **Figura 36**.

Este instrumento realiza una medida de variación de la masa con una atmosfera controlada, los resultados son expresados en un termograma o curva de descomposición térmica, también realiza medidas simultaneas de flujo de calor y pérdida de peso, a escalas Ultra y micrométricas. Las muestras se analizaron en un cambio de temperatura iniciando en 30 °C a 1100 °C, en atmosfera con un flujo de O₂ a 50ml/m, en un incremento de temperatura de 20 °C/min.



Fig. 36 Mettler Toledo (TGA / DSC)



9.2.5 DOSIFICACIONES

En este trabajo se realiza dosificaciones adoptadas para evaluar la capacidad puzolánica de los microcristales de celulosa a través del aumento de la resistencia según la norma UNE-EN-196-1, a lo largo del tiempo 7, 28, 90 días, en morteros elaborados con nanocristales de celulosa en concentraciones de 1.5 y 3% en sustitución de peso, comparando con un mortero de referencia sin nanocristales.

La composición normalizada de estos morteros comprende: Árido natural de silíceo (1.350gramos), agua (225gramos) y cemento de referencia CEM I – 52.5R (450gramos), para la elaboración de los morteros a partir de las mezclas de microcristales con cemento portland, se preparó la siguiente proporción: cemento portland (97% = 436.5 gramos) y 98.5-% = 443.25g) y microcristales de celulosa a (1.5%= 6.75g y 3%=13.5g) como se muestra en la **Tabla 8**. Se elaboraron muestras con distintas marcas de microcristales para diferenciar los morteros los denominamos mortero A y mortero C.

9.2.6 PREPARACIÓN DE LA PASTA

Para el mezclado de la pasta de cemento utilizamos un mezclador, -marca, modeolo, y que proporciona-, realizamos las mezcla siguiendo el siguiente procedimiento;

1. Colocamos las proporciones del cemento, nanocristales de celulosa y agua.
2. El mezclador se ajusta a una velocidad de 400rpm durante 90s.
3. Se utiliza una espátula para raspar las paredes y fondo del recipiente.
4. Se mezcla otros 90s a una velocidad de 400rpm.

Luego del mezclado, la pasta se moldea en cilindro de plástico, de diámetro 15, a 10.5 centímetro de altura, y sellado a $23 \pm 1^\circ \text{c}$ para el curado.

Tabla 8. Dosificaciones adoptadas de mortero de cemento.

Componentes Mortero	Mortero de Ref.	Mortero A		Mortero C	
concentraciones de microcristales	0%	1.5%	3%	1.5%	3%
agua (g)	225	225	225	225	225
arena normalizada(g)	1.350	1.350	1.350	1.350	1.350
CEM I 42,5 (g) dg	450	436.5	443.25	436.5	443.25
microcristales de celulosa (g)	0	6.75	13.5	6.75	13.5



9.2.7 PRUEBA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La caracterización de la compresión se realizó según las pruebas de ensayo de la norma UNE-EN-196-1, donde la muestra se centra lateralmente con relación a los platos de la máquina y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos. **Figura 37**, Se aumenta la carga uniformemente a una velocidad de (2400 ± 200) N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

Se calcula la resistencia a compresión R_c (en megapascales) mediante la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde:

R_c es la resistencia a compresión (en megapascales);

F_c es la carga máxima de rotura (en newtons);

1600 = 40 mm x 40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (en mm²).

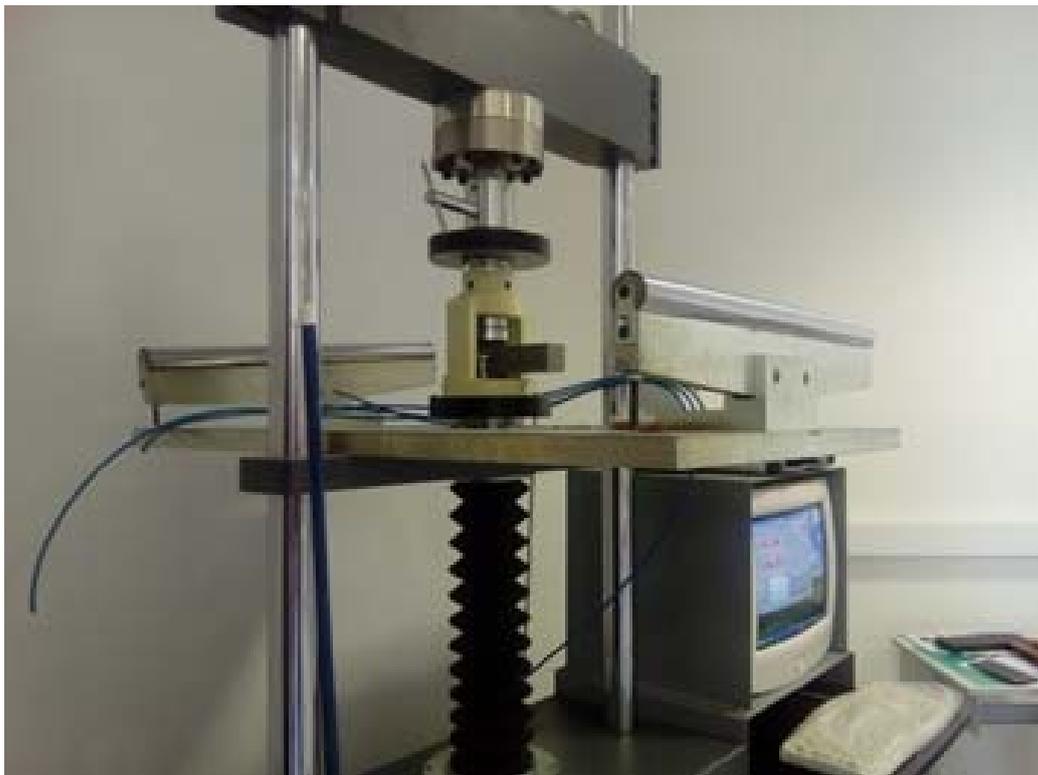


Fig. 37 Dispositivo de ensayo a compresión



10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

10.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

Las muestras de polvo se colocan sobre una membrana de prolono, y se utiliza el método de medida; MultiRes-He34, y un modelo de evaluación; Oxides, en la **Tabla 9**, se muestra la composición química para los microcristales de celulosa y en la **Tabla 10**, se muestra la composición química para matriz del cemento. Los resultados son expresados en % en peso de los elementos presentes en las muestras.

Tabla 9. Análisis químico de fluorescencia de rayos X.

Microcristales de Celulosa

Concentraciones en % en peso

Elementos	Microcristales celulosa
C6H10O5	96.7900
H2O	3.0900
Al	0.0110
Si	0.0233
S	0.0029
Cl	0.0035
Ca	0.0013
Fe	0.0004
Cu	0.0002
Br	0.0007

Los valores en rojo provienen del análisis térmico. PF es la pérdida al fuego en el rango 30–1100 °C.

O es el oxígeno estequiométrico de los elementos en el rango Na–Ba.

Los valores en verde provienen de la introducción de C y de C6H10O5 como matriz, cuyo % ajusta el programa automáticamente.

n.d.: no detectado



10.2 ANÁLISIS DE RESULTADO DE FLUORESCENCIA DE MICROCRISTALES DE CELULOSA

A partir de los datos reflejados en la **Tabla 9**, observamos el agua representa el 3.09% en peso para una muestra de 7gr de masa de microcristales de celulosa, seguido de sílice y aluminio con un 0.0233 y 0.0110% en peso respectivamente, siendo estos los componentes mayoritarios, mientras que los demás componentes se encuentran en escalas de valores más o menos significativos.

La presencia de los Óxidos como el SiO_2 y Al_2O_3 y su alto contenido de agua, nos da a entender que los microcristales de celulosa tienen el potencial de reaccionar como un material puzolánico en presencia del cemento o Cal (Salazar, 2010).

En los datos reflejados en la **Tabla 10**, observamos las propiedades químicas del cemento, los componentes mayoritarios son Ca (46.26 %), Si (7.89%), Fe (2.45%), y los siguientes elementos con valores significativos como el Al (2.17%), S (1.16%), Mg (1.52%), K (46.26%), Na (46.26%), Ti (46.26%) y otros componentes que no fueron detectados.

A partir de los datos estimamos que, en el proceso de hidratación del cemento, al ser una reacción exotérmica, donde los microcristales reaccionan a estas temperaturas liberando su contenido de agua y aumentando la hidratación de la partícula de cemento, y al aumentar la hidratación aumenta la resistencia de compuesto, también que los microcristales son capaces de transportar agua al centro de la partícula de cemento no hidratado, este proceso descrito por Yizheng Cao en (Cao et al., 2015) como difusión de cortocircuito, también estimamos que la sílice-alúmina presentes en la composición de los microcristales de celulosa a temperaturas ordinarias son capaces de fijar al hidróxido de cal liberado por la partícula de cemento hidratada, para generar compuestos estables con propiedades hidráulicas (Salazar, 2010),(Silva et al., 2018).

Las propiedades para evaluar una puzolana descritas por Salazar en (Salazar, 2010), observamos que los microcristales de celulosa cumplen las propiedades de requerimiento de agua, y composición química con contenidos de óxidos de Sílice y Aluminio, y es capaz de afectar las propiedades finales del cemento.



Tabla 10. Análisis químico de fluorescencia de rayos X.

Cemento Tipo I

Concentraciones en %

Elementos	Cemento I
C	—
PF	1.4600
O	34.5134
Na	0.2760
Mg	1.5200
Al	2.1700
Si	7.8940
P	0.0769
S	1.6260
Cl	0.1360
K	1.1000
Ca	46.2684
Ti	0.1550
V	0.0120
Cr	0.0075
Mn	0.0280
Fe	2.4510
Co	0.0008
Ni	0.0070
Cu	0.0708
Zn	0.0614
Ga	n.d.
Se	n.d.
Br	0.0017
Rb	0.0045
Sr	0.0879
Y	n.d.
Zr	0.0020
Nb	n.d.
Mo	0.0077
Ba	0.0480
Pb	0.0140
Bi	n.d.
Suma (%)	100.0000
Masa (g)	10.00



10.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).

La caracterización estructural cristalina de ambas composiciones para el cemento y los nanocristales de celulosa de esparto se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Análisis estructural por difracción de rayos X de la parte cristalina.

Concentraciones en % en peso		
Fases	Cemento I	Celulosa
Silicatos	79	0
Silicato de calcio	79	
Moscovita		
Caolinita		
Óxidos	11	0
Cuarzo		
Magnetita		
Goethita		
Rutilo		
Mullita		
Corindón		
Óxido de Ca, Mn, Fe y Al	9	
Óxido de Ca y Al	2	
Carbonatos	0	0
Calcita		
Dolomita		
Carbonato de K y Ca		
Otros	10	100
Anhidrita	10	
Yeso	<1	
Moissanita		
Celulosa		100
Grafito		
Cristalinidad (%)	78	66
Suma (%)	100	100

Los resultados del Análisis de difracción mostrados en la **Tabla 11** muestran que el cemento posee un grado de cristalinidad de 78%, donde el compuesto de **silicato cálcico** (Ca_3SiO_5) con un 79% en peso donde representa la mayor parte de estructura de cristalinidad de orden **monoclínico**, del Cemento.

Mientras que los microcristales de celulosa poseen una estructura cristalina de orden estructural **monoclínica** con un grado de cristalinidad de 65.5%. y está compuesta de un 100% en peso por **I β - Celulosa** ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$).



10.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

La curva termogravimétrica que presenta las reacciones de los componentes volátiles que constituyen los microcristales de celulosa, se muestra en la **Figura 38**. Donde podemos observar un primer salto de pérdida de peso a partir de una temperatura de 37.93 °C que representa de separación del agua (H₂O) de cristalización que componen los microcristales de celulosa y termina en una temperatura de 130 °C con una pérdida de peso de 3.09 %, respaldando los resultados de fluorescencia rayos x donde el agua representa el 3.09% de la composición química de los microcristales de celulosa. también podemos observar un salto en el intervalo 130 a 560 °C donde presenta la descomposición total o reducción de óxidos de los demás elementos que los componen, en la curva de DSC podemos observar que los óxidos la muestra de microcristales de celulosa Funden a una temperatura de 300 °C.

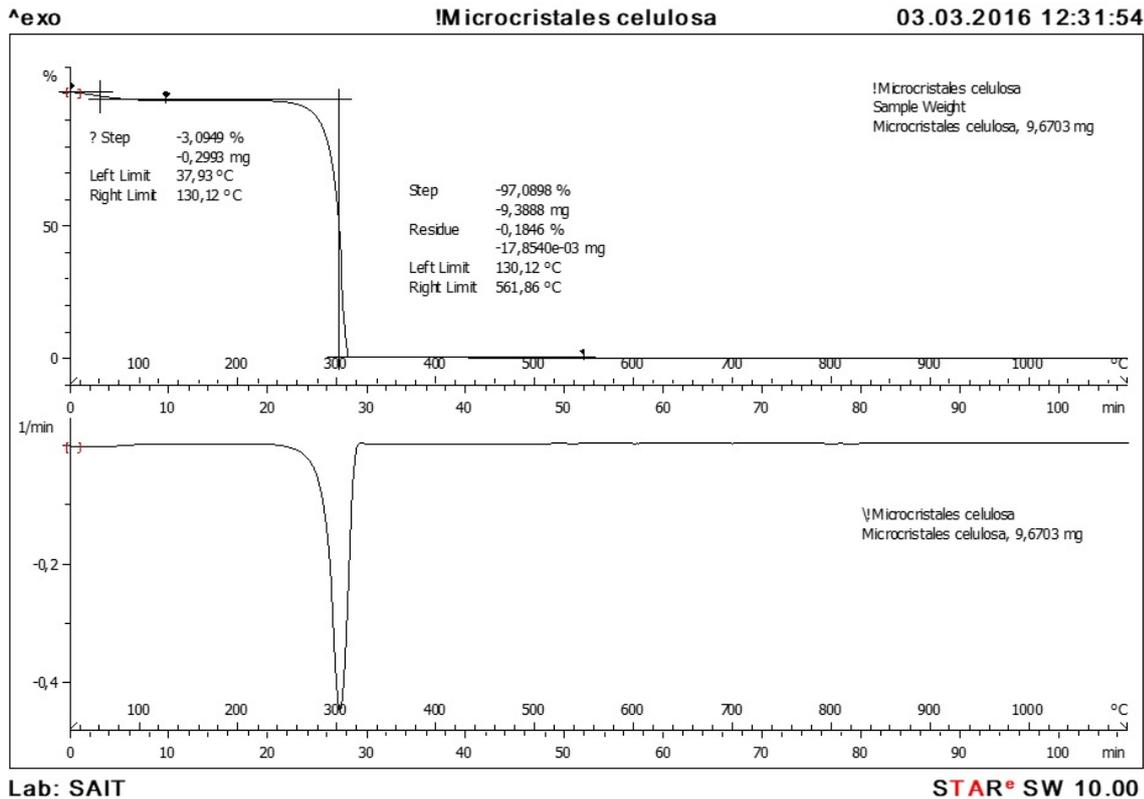


Fig. 38 Análisis termogravimétrico de Microcristales de celulosa

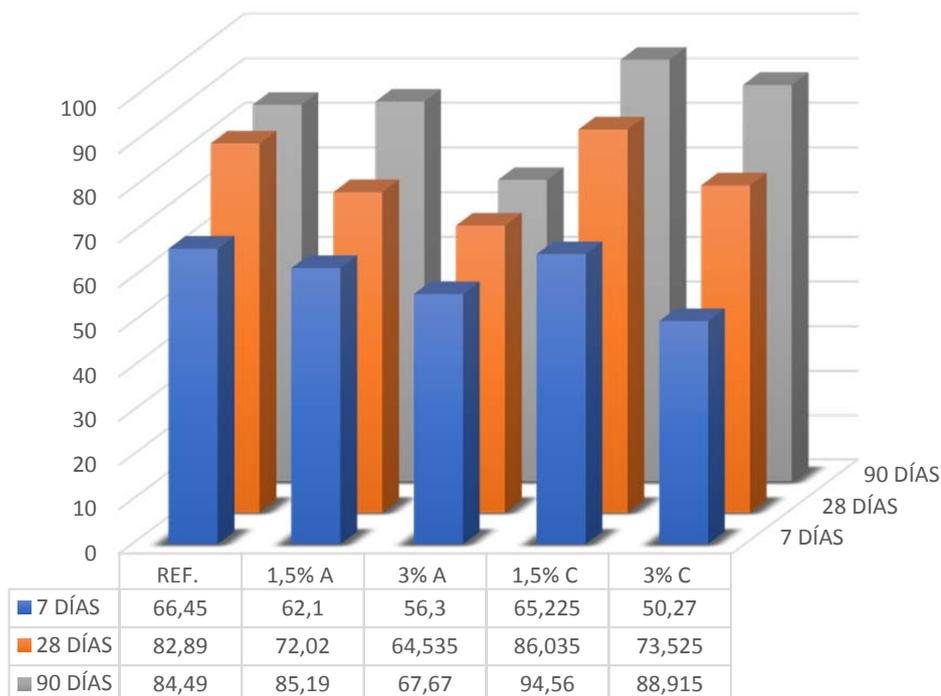


10.5 COMPRESIÓN

Los resultados a la resistencia a compresión de la pasta de cemento de referencia junto con la pasta de cemento con microcristales de celulosa de ambas marcas (A y C) y a concentraciones 1.5 y 3% a las edades de 7, 28, 90 días, se muestran en la **Figura 40**.

Podemos observar que, a edad de 7 días, las muestras que contienen microcristales de celulosa, muestra una resistencia a compresión en (MPa) inferior que la muestra de referencia, pero a edad de 28 días, la muestra con concentración de microcristales de celulosa 1.5%C de concentración muestra una resistencia de 86.05 MPa superior a la 82.89MPa de la referencia, también a edad de 90 días, las muestras con contenido de microcristales de celulosa de 1.5% (A y C) de ambas marcas y la muestra de 3%C de concentración, presentan una resistencia mayor que a la de referencia, mostrando un incremento a la resistencia a compresión al paso del tiempo.

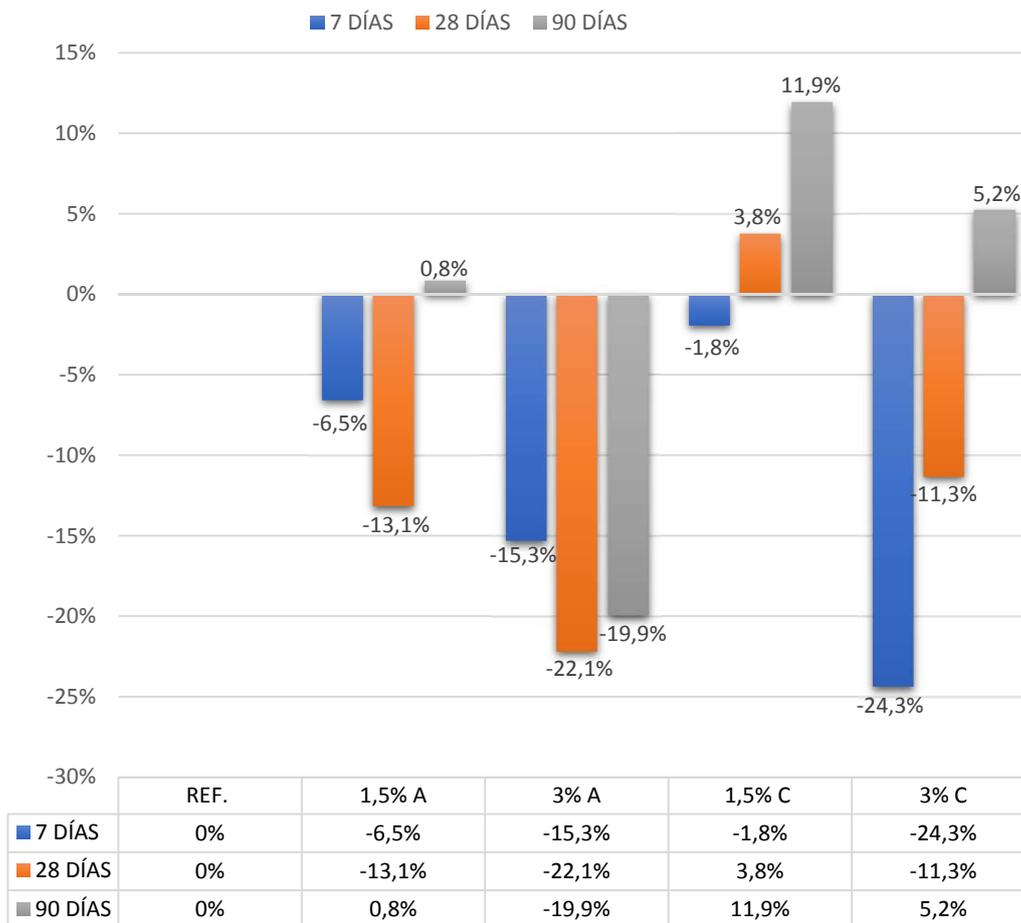
Fig. 40 Resistencia a la compresión (MPa) de la pasta de cemento con concentraciones de CNC 1.5 y 3% de A y C marcas a edades diferentes de 7,28,90 días.





En la **Figura 41**. Podemos observar incremento de la resistencia en diferencia de porcentajes, tomando los resultados de la muestra de referencia como el punto cero de partida, observamos que, al paso del tiempo, a la edad de 7 a los 28 días las muestras con contenido de 1.5%C de concentración de microcristales de celulosa, muestran un incremento a la resistencia en compresión de 3.8% superior en comparación a la referencia. Y a la edad de 90 días las muestras con contenido de nanocristales de celulosa con concentraciones 1.5% (A, C) en ambas marcas y un contenido de 3%C en la marca china, presentan un incremento de 0.8%, 11.9% y 5.2% respectivamente superior que la muestra referencia sin contenido de microcristales, mostrando que la adición de microcristales de celulosa mejora la resistencia a edades tardía.

Fig. 41 Diferencia de porcentaje a la Resistencia a la compresión de la pasta de cemento con concentraciones de CNC 1.5 y 3% de A y C marcas a edades diferentes de 7, 28, 90 días.



A close-up photograph of a hand holding a silver pen, poised to write on a document. The document features a blue bar chart. The background is softly blurred, showing what appears to be a desk or office environment.

**11. CONCLUSIÓN
Y
TRABAJOS FUTUROS**



11. CONCLUSIÓN

- El contenido de Ca (46.26 %) del cemento, y la presencia de Sílice (0.0233) y Alúmina (0.0110%) en la composición de microcristales de celulosa nos da a entender que, a temperatura de reacción curado, los microcristales pueden adquirir un comportamiento puzolánico que le agregue resistencia a la pasta de cemento y a su vez al compuesto de hormigón.
- Los microcristales de celulosa muestran una mejora a la resistencia a compresión que la muestra de referencia en un 0.8 %, 11.9 %, 5.2 %, para adiciones de 1.5% de (A), y adiciones 1.5 y 3% de (C) respectivamente, a edades de 90 días, mejorando la propiedad mecánica del cemento.
- La adición de microcristales de celulosa mejora la resistencia a compresión, Se observó también que la mejor propiedad de compresión ha sido en la mezcla que con adiciones de 1.5% de C, dando a esta la calificación proporción óptima de adición de microcristales de celulosa, adquiriendo la mayor resistencia a compresión una edad de 90 días, eso nos da a entender que la adición mejora la propiedad del cemento.
- En los resultados a compresión, observamos que las muestras con adiciones en un inicio no presentan mejoras, pero a edades más tardías presentan un incremento a la resistencia, lo que aparenta una reducción a la relación agua/cemento, retardando la reacción de hidratación y adicionándole un aumento a la resistencia mecánica.
- El incremento de la resistencia podría ser dado por la relación entre los componentes químicos Sílice (0.0233) y Alúmina (0.0110%) de los microcristales de celulosa y el calcio liberado por la hidratación del cemento generando un producto igual a: Silicatos Cálcidos Hidratados (CSH), Aluminatos Cálcidos Hidratados (CAH) y Sílice - Aluminatos Cálcidos Hidratados (CSAH).



11.1 TRABAJOS FUTUROS

- En base a las observaciones experimentales y los criterios de durabilidad donde los microcristales de celulosa alteran las condiciones físicas y composición química de la pasta de cemento, se propone realizar un estudio de vida útil y la conservación de su estado físico y químico, de este compuesto.
- También se propone un estudio de nanomateriales de celulosa adicionado a compuestos cementosos con árido y cemento reciclado, con el objetivo de aumentar sus prestaciones químicas y mecánicas, optimizar los requerimientos de estos materiales, eficientizar su reutilización y sostenibilidad, donde los nanomateriales de celulosa interactúan con el compuesto aumentando el grado de hidratación de la partícula de cemento, y reducir la adición de cemento a este tipo de composición.

A stack of several books is shown, with the spines of some books visible in the foreground. The books are stacked on a dark, textured surface. The text "12. BIBLIOGRAFÍA" is overlaid on the image in a bold, black font.

12. BIBLIOGRAFÍA



12. BIBLIOGRAFÍA.

1. 2018 Global Status Report [WWW Document], n.d. . IEA Webstore. URL <https://webstore.iea.org/2018-global-status-report> (accessed 2.8.19).
2. Alemdar, A., Sain, M., 2008. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – Wheat straw and soy hulls. *Bioresour. Technol.* 99, 1664–1671. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.029>
3. Allevato, D.M.A., 2007. la ciencia de la miniaturización extrema 11.
4. Ardanuy, M., Claramunt, J., Arévalo, R., Parés, F., Aracri, E., Vidal, T., n.d. NANOFIBRILLATED CELLULOSE (NFC) AS A POTENTIAL REINFORCEMENT FOR HIGH PERFORMANCE CEMENT MORTAR COMPOSITES 12.
5. Battelle Scoping Study: Toward a Sustainable Cement Industry [WWW Document], 2018. . World Bus. Counc. Sustain. Dev. URL <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Toward-a-Sustainable-Cement-Industry> (accessed 2.8.19).
6. Bhatnagar A, Sain M, 2005. Processing of Cellulose Nanofiber-reinforced Composites. August 1 2005 24 (12), 1259–1268.
7. Borsani, A., Silvia, M., 2011. ESTRATEGIAS, ALCANCE Y APLICACIÓN DE LOS MATERIALES ECOLÓGICOS COMO GENERADORES DE HÁBITATS URBANOS SOSTENIBLES 30.
8. Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E., Kenny, J.M., 2013. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. *Carbohydr. Polym.* 94, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.033>
9. Cao, Y., Tian, N., Bahr, D., Zavattieri, P.D., Youngblood, J., Moon, R.J., Weiss, J., 2016. The influence of cellulose nanocrystals on the microstructure of cement paste. *Cem. Concr. Compos.* 74, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.008>
10. Cao, Y., Zaverri, P., Youngblood, J., Moon, R., Weiss, J., 2015. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. *Cem. Concr. Compos.* 56, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.008>
11. Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials - ScienceDirect [WWW Document], n.d. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081009574000206#f0060> (accessed 1.7.19).
12. Chen, W., Yu, H., Liu, Y., Hai, Y., Zhang, M., Chen, P., 2011. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process. *Cellulose* 18, 433–442. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9497-z>
13. Cheng, Q., Wang, S., Rials, T.G., 2009. Poly(vinyl alcohol) nanocomposites reinforced with cellulose fibrils isolated by high intensity ultrasonication. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 40, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.11.009>



14. Consejo Mundial Empresarial Para, El Desarrollo Sostenible – WBCSD, 2009. INICIATIVA POR LA SOSTENIBILIDAD DEL CEMENTO.
15. Ek, M., 2009. Pulping chemistry and technology. Walter de Gruyter.
16. El Esparto - Región de Murcia Digital [WWW Document], n.d. URL http://www.regmurcia.com/servlet/s.S1?sit=c,24,m,3120&r=ReP-1834-DETALLE_REPORTAJES (accessed 11.8.18).
17. Esparto (Stipa tenacissima) [WWW Document], n.d. URL <http://www.sierradebaza.org/index.php/mapa-web/82-principal/fichas-tecnicas/fichas-flora/409-esparto-stipa-tenacissima> (accessed 11.16.18).
18. Fernández Palazón, G., 1974. Aspectos socioeconómicos de la explotación del esparto en España.
19. Fu, T., Moon, R.J., Zavattieri, P., Youngblood, J., Weiss, W.J., 2017. Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials, in: Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites. Elsevier, pp. 455–482. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00020-6>
20. García, A., Gandini, A., Labidi, J., Belgacem, N., Bras, J., 2016a. Industrial and crop wastes: A new source for nanocellulose biorefinery. Ind. Crops Prod., Nanocellulose: production, functionalisation and applications 93, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.004>
21. García, A., Gandini, A., Labidi, J., Belgacem, N., Bras, J., 2016b. Industrial and crop wastes: A new source for nanocellulose biorefinery. Ind. Crops Prod. 93, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.004>
22. Garzón, M.G., 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde 6.
23. Giraldo y Tobón, G. y T., 2006. EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN. MANUEL ALEJANDRO GIRALDO M. 14.
24. González del Campo, M. del M., 2017. Desarrollo de materiales biohíbridos funcionales mediante ensamblado de nanofibras de celulosa y sepiolita.
25. Gonzalo Sánchez, V., 2012. Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos.
26. Gutiérrez, L.M.D., 2017. DEFINICIÓN DE CRITERIOS SOSTENIBLES PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES DE VIVIENDAS EN BOGOTÁ 85.
27. H.P.S., A.K., Saurabh, C.K., Asniza, M., Tye, Y.Y., Nurul Fazita, M.R., Syakir, M.I., Fizree, H.M., Yusra, A.F.I., Haafiz, M.K.M., Kassim, M.A., Suraya, N.L.M., 2017. Nanofibrillated cellulose reinforcement in thermoset polymer composites, in: Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites. Elsevier, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00001-2>



28. Industria del cemento Energía y rendimiento de CO₂ [WWW Document], 2009. . World Bus. Counc. Sustain. Dev. URL <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Getting-the-Numbers-Right> (accessed 2.8.19).
29. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones – IECA, 2018. Componentes y propiedades del cemento | Características. ieca. URL <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/> (accessed 11.5.18).
30. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. Global warming of 1.5°C.
31. Johnson, R.K., Zink-Sharp, A., Renneckar, S.H., Glasser, W.G., 2009. A new bio-based nanocomposite: fibrillated TEMPO-oxidized celluloses in hydroxypropylcellulose matrix. *Cellulose* 16, 227–238. <https://doi.org/10.1007/s10570-008-9269-6>
32. Juárez Alvarado, C.A., 2002. Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lechugilla), como materiales para construcción en México.
33. Khattab, M.M., Abdel-Hady, N.A., Dahman, Y., 2017a. 21 - Cellulose nanocomposites: Opportunities, challenges, and applications, in: Jawaid, M., Boufi, S., H.p.s., A.K. (Eds.), *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, pp. 483–516. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00021-8>
34. Khattab, M.M., Abdel-Hady, N.A., Dahman, Y., 2017b. Cellulose nanocomposites, in: *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites*. Elsevier, pp. 483–516. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00021-8>
35. Maestre, F.T., Ramírez, D.A., Cortina, J., 2007. Ecología del esparto (*Stipa tenacissima* L.) y los espartales de la Península Ibérica 20.
36. Mondal, S., 2017. Preparation, properties and applications of nanocellulosic materials. *Carbohydr. Polym.* 163, 301–316. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.050>
37. Moon, R.J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., Youngblood, J., 2011. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chem. Soc. Rev.* 40, 3941–3994.
38. Morales, S., 2015. Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos. *Inst. Catálisis Pet.* 40.
39. Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Serna, P., Velázquez, S., Ordóñez, L.M., 2002. EL FACTOR DE EFICACIA CEMENTANTE DE PUZOLANAS SILÍCEAS Y SILICOALUMINOSAS MUY REACTIVAS. 10.
40. Rogers, B., Adams, J., Pennathur, S., 2014. *Nanotechnology: understanding small systems*. Crc Press.
41. Saha, B.C., 2003. Hemicellulose bioconversion. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 30, 279–291. <https://doi.org/10.1007/s10295-003-0049-x>



42. Salazar, A., 2010. ¿Qué es una puzolana? Recuperado el.
43. Salcedo, H.R., 2012. Aplicación de Fibras Estructurales a los Pilotes tipo CPI 8 81.
44. Serena Domingo, P.A., 2002. Nanociencia y nanotecnología: aspectos generales. Encuentros Multidiscip.
45. Shah, S.P., Daniel, J.I., Ahmad, S.H., Arockiasamy, M., Balaguru, P., Ball, C.G., Ball, H.P., Batson, G.B., Bentur, A., Craig, R.J., 1988. Measurement of properties of fiber reinforced concrete. *ACI Mater. J.* 85, 583–593.
46. Silva, L., Parveen, S., Filho, A., Zottis, A., Rana, S., Vanderlei, R., Figueiro, R., 2018. A facile approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with improved microstructure and mechanical performance. *Powder Technol.* 338, 654–663. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.076>
47. Stupenengo, F., 2011. Materiales y materias primas. Materiales compuestos.
48. Wadel, G., Avellaneda, J., Cuchí, A., 2010. La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Inf. Constr.* 62, 37–51. <https://doi.org/10.3989/ic.09.067>
49. WBCSD, Consejo Mundial Empresarial Para, Consejo Empresarial para El Desarrollo Sostenible – WBCSD, 2009. Cement Sustainability Initiative (CSI)-INICIATIVA POR LA SOSTENIBILIDAD DEL CEMENTO 42.

13. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS



13. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

13.1 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Nanoestructuras.....	28
Tabla 2 Tipos de Nanocelulosa.....	35
Tabla 3 Propiedades mecánicas de diversos materiales.....	36
Tabla 4 Contenidos de celulosa y lignina en varios tipos de biomasa.....	38
Tabla 5 Relación máxima de agua y cemento y contenidos mínimo de cemento.....	61
Tabla 6 Resistencia mínima recomendadas en función.....	61
Tabla 7 Valores de corrección en blanco.....	78
Tabla 8 Dosificaciones adoptadas de mortero de cemento.....	81
Tabla 9 Análisis químico de Fluorescencia de rayos X Microcristales de Celulosa.....	84
Tabla 10 Análisis químico de Fluorescencia de rayos X Microcristales de Celulosa...	86
Tabla 11 Análisis de estructural por distracción de rayos X.....	87



13.2 ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Recinto amurallado de adobe de Khasekhemwy en Abidos , Egipto , Egypt , Abydos.	12
Fig. 2 - Cambio de temperatura Global Observado y Modelo.	17
Fig. 3 - Participación global de edificios y construcción, energía y emisiones finales, 2017	18
Fig. 4 - Proyección de aumento de producción de cemento.	19
Fig. 5 - Técnicas para el cuidado del Medio ambiente.....	19
Fig. 6 - volúmenes de producción de clinker y producto de cementos, países participantes de (ONC)	22
Fig. 7 - Desacoplamiento Parcial de la Producción de cemento de las emisiones neta de CO ₂ en el tiempo.....	23
Fig. 8 - Emisiones brutas de CO ₂ por tonelada de Clinker al paso del tiempo	23
Fig. 9 -Procesos de Fabricación de Clinker y Cemento.	24
Fig. 10 - Ilustración de hormigón compuesto con fibras vegetales.	24
Fig. 11- Ilustración Nanotubos de Carbono, Nanotecnología	26
Fig. 12 - Tamaño de las nanopartículas en comparación con las entidades biológicas y otros elementos familiares.	27
Fig. 13 – Técnica de Síntesis de Nanomateriales.....	29
Fig. 14 – ilustración pared celular de una planta.....	32
Fig. 15 - Celulosa [polímero 1,4-O-β-D-glucopiranosido].....	33
Fig. 16 - Estructura lignocelulósica de las plantas.....	34
Fig. 17- Aspecto de diferentes tipos de celulosas: a) imagen SEM de fibras procedentes de pulpa Kraft e imágenes TEM de b) MFC, c) CNF obtenida utilizando TEMPO y d) CNC procedente de fibras de madera.	35
Fig. 18 - Clasificación de las fuentes de celulosa según la actividad de la que se obtiene	37
Fig. 19 - Esquema de pasos principales necesarios para preparar NCC a partir de biomasa lignocelulósica.....	39
Fig. 20 Obtención de nanopartículas de celulosa	40
Fig. 21- Proceso descomposición Nanocristales celulosa (Khattab et al., 2017a)	41
Fig. 22 - El Esparto (Stipa tennacissima L.).....	42
Fig. 23 - Módulo extraído de una macolla de esparto. Fotografía: David A. Ramírez.	44
Fig. 24 - Esquema de un corte transversal de la hoja de Esparto. Fotografía: David A. Ramírez.	45
Fig. 25 - Polvo de Cemento	48
Fig. 26 – Roca de origen volcánica “Puzolana”	54
Fig. 27- Alzado y sección	55
Fig. 28 - Relación de tamaño de nanocelulosa y partículas de hormigón	68
Fig. 29 Microfibras de celulosa.	69
Fig. 30 Nanofibras de Celulosa.....	69
Fig. 31 Nanocristales de Celulosa (“Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials - ScienceDirect,” n.d.)	70
Fig. 32 - Calor acumulado de las pastas de cemento reforzado con CNC durante las primeras 200 h.	72
Fig. 33 - Nanocelulosa Cristalina	77
Fig. 34 espectrofotométrico Bruker S4 Pioneer XRF.....	78
Fig. 35 Bruker D8.....	79



Fig. 36 Mettler Toledo (TGA / DSC)	80
Fig. 37 Dispositivo de ensayo a compresión	82
Fig. 38 Análisis termogravimétrico de Microcristales de celulosa	88
Fig. 39 Análisis termogravimétrico de Cemento I	89
Fig. 40 Resistencia a la compresión (MPa) de la pasta de cemento con concentraciones de CNC 1.5 y 3% de A y C marcas a edades diferentes de 7,28,90 días.	90
Fig. 41 Diferencia de porcentaje a la Resistencia a la compresión de la pasta de cemento con concentraciones de CNC 1.5 y 3% de A y C marcas a edades diferentes de 7, 28, 90 días.....	91