



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

PROYECTO FÍN DE GRADO

**Materiales para Arquitectura Sostenible. Participación de los Materiales
 en la Sostenibilidad de la Arquitectura**

Por:

Ribera Pastor, Ana

Dirigida por:

D. Javier Orozco Messana

Valencia, mayo 2011

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA DE EDIFICACIÓN

Índice

1. Objetivo.....	3
2. Introducción.....	3
2.1 Sostenibilidad en la edificación.	
2.2 Criterios para el análisis de la sostenibilidad.	
2.3 Propiedades ecológicas de los materiales.	
2.4 Tabla Homogeneización como herramienta para el estudio de la sostenibilidad.	
2.5 Base de datos, constructor	
3. Base de datos como herramienta para la elección de materiales sostenibles.....	6
3.1 Estudio de la sostenibilidad de los materiales.	
4. Relación entre las características geométricas y la sostenibilidad: Aumento del rendimiento del material.....	29
5. Estudio del PYKRETE como alternativa sostenible en climas fríos.....	29
5.1 Introducción a los materiales compuestos.	
5.2 Materiales compuestos reforzados con partículas.	
5.3 Materiales compuestos reforzados con fibras.	
5.4 Historia del Pykrete	
5.5 Características del Pykrete	
6. Estado del arte.....	36
7. Memoria de laboratorio.....	41
8. Resultados y análisis.....	70
9. Determinación de las restricciones de proyecto, esfuerzos y restricciones, ponderar soluciones.....	74
9.1 Restricciones de proyecto	
9.1.1 Entorno	
9.1.2 Normativa	
9.1.3 Presupuesto	
10. Futuras líneas de investigación.....	76
11. Bibliografía.....	76

1. Objetivo

El objetivo de la realización de este estudio es la investigación sobre materiales sostenibles para la edificación cuyo impacto ambiental sea relativamente bajo y cuyas características, propiedades mecánicas y medio ambientales cumplan con las prescripciones de calidad, seguridad y habitabilidad deseadas.

Por ello estudiaremos dentro de la problemática de las estructuras, que materiales son los que confieren mejores propiedades mecánicas con un coste aceptable y una mejor asignación de recursos. Para ello dispondremos de múltiples herramientas, como son bases de datos creadas por nosotros que nos aportará el motor de búsqueda que necesitamos para obtener objetivamente los materiales deseados, hojas de cálculo, investigaciones propias...

Dentro de este estudio realizaremos un proceso de investigación de un material poco conocido y que hemos considerado muy importante, no porque sea extraordinariamente resistente, sino porque es un material que existe en abundancia en la naturaleza, es económico, no contamina, es duradero y capaz de transmitir cargas estructurales.

La investigación la vamos a realizar sobre el Pykrete (una mezcla de hielo y serrín) y estudiaremos y compararemos con la resistencia del hielo en masa y del hormigón. Se estudiará como afecta a las propiedades mecánicas la adición de fibras de bambú, fibras de esparto y fibras de madera, y ver en general como afectan éstas a las propiedades del Pykrete y si se producen mejoras en las propiedades resistentes de éste.

Se estudiará el efecto del serrín en la durabilidad, la segregación, la compactación. Para ello se estudiará el Pykrete con diferentes dosificaciones para obtener una dosificación óptima.

Además se estudiará las propiedades mecánicas del Pykrete tras la introducción de fibras de madera de diferentes clases y observaremos cual es la idónea para su utilización.

Se hablará también de los diferentes tipos de fibras, las características de cada una y las mejoras aportadas a la probeta objeto de estudio, intentando incorporar la dosificación más adecuada para obtener el resultado deseado.

Todo esto lo comprobaremos realizando los ensayos necesarios de compresión y flexotracción, descritos en el apartado 7.

En resumen, encontrar un Pykrete que sea lo más homogéneo posible, con una resistencia comparable al hormigón con una propiedad fundamental y que es objeto de este estudio, la sostenibilidad.

2. Introducción

2.1 Sostenibilidad en la edificación.

La construcción sostenible es un concepto global que identifica un proceso completo en el que influyen numerosos factores como el proceso de fabricación, el tratamiento, el transporte y

puesta en obra que, apoyados unos sobre otros, tienen como consecuencia productos eficientes y respetuosos con el Medio Ambiente.

Como para dogma de la sostenibilidad sería una edificación que no consumiera energía para su construcción, mantenimiento y demolición y que para poder llevarla a cabo no se produjera contaminación ambiental de ningún tipo. Debido a que actualmente esto no es viable podemos acercarnos lo más posible para crear viviendas respetuosas con el medio ambiente y por tanto sostenibles.

Actualmente uno de los mayores problemas medioambientales y económicos son la contaminación y la energía. Por ello podremos decir que una edificación es sostenible cuando sea viable de hacer (cueste una cantidad de dinero razonable), cuando realizar el proceso constructivo más todos los procesos industriales para la fabricación o transformación de los materiales no se consuma una cantidad de energía excesiva (energía embebida por los materiales) ni se emita una cantidad excesiva de CO₂ y al finalizar la vida útil de la edificación se pueda reciclar el producto existente para crear otro igual o un producto distinto pero con valor en el mercado.

El objetivo general de actuación dentro del área de los materiales es reducir al máximo la huella ecológica producida por la extracción, producción, uso y desecho de los materiales y productos de la construcción, así como de los procesos asociados a ellos, tales como la obtención y transformación de las materias primas empleadas y la generación de emisiones y vertidos consecuencia de las diferentes formas de transformación, industrialización y puesta en obra y expresada en forma de su contribución a los Impactos Medioambientales Globales.

2.2 Criterios para el análisis de la sostenibilidad.

La sostenibilidad de la edificación depende de múltiples parámetros, como las propiedades de los materiales, los procesos de producción, fabricación, transporte, seguridad de utilización, calidad de lo ejecutado, junto a los procesos de puesta en obra.

Por ello es importante definir que parámetros van a ser importante para la sostenibilidad y que criterios vamos a adoptar para delimitar que propiedades necesitamos de los materiales.

2.3 Propiedades ecológicas de los materiales.

Vamos a definir que parámetros van a ser importantes para analizar la sostenibilidad y que propiedades necesitamos de los materiales.

La energía embebida (producción primaria) es la energía necesaria para hacer 1 kg de material, los datos son aproximados pero son de gran importancia para saber la energía que necesita un material antes de poder ser utilizado. Estos datos son aproximados debido a que dependen en gran medida del rendimiento de las máquinas que los producen, de la reutilización de fuentes energéticas en el proceso de fabricación y a los requerimientos medioambientales existentes en la zona de producción. En zonas donde la legislación ambiental es poco restrictiva, el

proceso de manufactura del material es más barato debido a que no se gastan recursos en la separación de residuos. Se mide en MJ/kg o en Kcal/lb.

La huella de CO₂ es la cantidad de CO₂ en kg producidos y liberados a la atmósfera como consecuencia de la producción de un kilogramo de materia. Se mide en Kg/Kg o en Lb/lb.

La reciclabilidad del material, es el proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto.

Si el material es biodegradable, es decir, si el material puede descomponerse en sus elementos químicos que los conforman, debida a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.

Posibilidad de recuperación de energía por combustión, si se permite el procesado del material en vertederos...

Estas propiedades son básicas a la hora de analizar la sostenibilidad de una construcción, pero no son las únicas, también son de gran importancia los procesos de producción y fabricación, los procesos de puesta en obra, su durabilidad, la conductividad térmica del material, su resistencia (Compresión, Tracción, módulo de Young...), precio, toxicidad, resistividad eléctrica, si es abundante en la naturaleza o no, propiedades térmicas y acústicas...

Puede pensarse que la resistencia o la conductividad térmica no es un parámetro que condicione la sostenibilidad de la edificación pero es tan importante como los demás ya que nos va a condicionar la cantidad de material que debemos disponer para la ejecución de la obra con los mismos requisitos de habitabilidad, durabilidad y resistencia exigidos.

Todas estas propiedades se ponderan en una escala de valores en donde veremos que material nos aporta mayor satisfacción con las exigencias y requisitos con unos aportes de energía menores y con una durabilidad y precio aceptables en un mercado libre y sin subvenciones estatales.

2.4 Tabla Homogeneización como herramienta para el estudio de la sostenibilidad.

Para ponderar todas estas propiedades de los materiales de forma global hemos creado una tabla de homogeneización. El objetivo de la utilización de esta herramienta es comparar muchas propiedades distintas y obtener un resultado fiable y objetivo para obtener un material idóneo. Por ello la tabla homogeneiza, es decir, pondera numéricamente cada propiedad para obtener una solución única y global.

Consta de dos tablas.

En la primera tabla lo que se introducen es una lista de materiales junto a las propiedades que vamos a utilizar para la homogeneización. En donde se introducen las propiedades para cada material.

En la segunda tabla lo que se hace es comparar, para una misma propiedad, todos los materiales a estudio. Se le asigna una escala de valores dependiendo en gran medida cual sea el estudio final que queramos obtener, por ejemplo, en nuestro caso queremos obtener un material que sea sostenible, resistente y duradero. Por ello debemos de asignar que peso se le asigna a cada propiedad para poder obtener un resultado fiable. Esta asignación no es gratuita ni tampoco fija y estará fundamentada en una memoria justificativa. Está basada en datos bibliográficos.

Así obtenemos un valor homogeneizado.

2.5 Base de datos, constructor

La primera parte del estudio ha sido la creación de una base de datos, en donde hemos introducido los materiales con cada una de sus propiedades, descripciones... En nuestro caso hemos aportado los materiales más significativos en estructuras para la edificación como el hormigón, acero...

El objetivo es la aportación de una base de datos fiable y de libre distribución, cuyo propósito se ha conseguido. Sin embargo, se ha utilizado una base de datos de GRANTA para el estudio de la sostenibilidad en nuestro proyecto para otorgarle una mayor fiabilidad de los datos aportados.

En la base de datos del CES Edu Pack podemos conseguir datos sobre las propiedades de los materiales objeto de estudio, así como comparar las propiedades con otros materiales de la misma familia o de otras para poder decidir cuál es mejor o cuál se ajusta más a las necesidades planteadas en el proyecto. Para el análisis de la sostenibilidad ha sido de gran ayuda para la determinación de los materiales con mejores propiedades.

3. Base de datos como herramienta para la elección de materiales sostenibles

Una base de datos o banco de datos (en ocasiones abreviada con la sigla BD o con la abreviatura b. d.) es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso.

Existen programas denominados sistema gestor de bases de datos, abreviado SGBD, que permiten almacenar y posteriormente acceder a los datos de forma rápida y estructurada. Las propiedades de estos SGBD, así como su utilización y administración, se estudian dentro del ámbito de la informática.

En nuestro proyecto el programa encargado de encontrar, procesar y comparar la información en el CES CONSTRUCTOR y la base de datos que vamos a utilizar es la CES SELECTOR.

El CES SELECTOR es una potente aplicación que ayuda a los usuarios a buscar, ver y analizar información contenida en la base de datos y aplicar una metodología sistemática para seleccionar entidades y optimizar rendimientos y especificaciones de diseño.

El CES SELECTOR puede ser usado para ver y analizar bases de datos provenientes de Granta Design Limited, o como en nuestro caso, de la base de datos creada por nosotros mediante el CES CONSTRUCTOR.

CES CONSTRUCTOR es una herramienta para hacer y editar bases de datos para usar en el CES SELECTOR.

La estrategia que seguiremos a la hora de la elección de los materiales óptimos será igual, lo único que podrá variar es la forma de mostrar las gráficas. Para entender esto primero vamos a explicar cómo vamos a realizar la búsqueda y qué tipo de variables podemos encontrarnos.

Cuando realizamos una búsqueda, una de las opciones que tenemos es que nos compare dos propiedades de los materiales, como por ejemplo que nos compare el precio con la resistencia, y el programa nos devolverá una gráfica donde nos dibujara cada material como elipses, una tabla de abscisas y ordenadas donde un eje de la elipse corresponderá a la diferencia de precios que podemos encontrar en el mercado y el otro eje corresponde a la diferencia de resistencia que el material es capaz de aportar dependiendo de la calidad, estado...

En la base de datos podemos encontrar diferentes tipos de datos, por ejemplo, datos donde sea un valor comprendido entre dos números, datos que sea pasa o no pasa o datos como en la conductividad térmica en donde puede ser muy aislante, aislante pobre, conductor pobre o muy conductor. Dependiendo que datos comparemos en la tabla nos saldrán un tipo de grafica u otra.

Otra de las estrategias de búsqueda de materiales que nos permite el programa es la de condicionar propiedad por propiedad el rango en el que nos queremos mover, mediante límites, por ejemplo indicarle al programa que nos busque que materiales cumplen con la condición de que el módulo de Young sea mayor de 400 y simplemente dando a Apply nos devuelve automáticamente que materiales cumple con la condición, estos son por ejemplo: el carburo de boro, el carburo de silicio y el carburo de tungsteno.

3.1 Estudio de la sostenibilidad de los materiales.

Para comenzar con la búsqueda de los materiales sostenibles centrándonos en el apartado estructural, vamos a realizar primeramente una búsqueda comparando su precio en €/kg y su resistencia a compresión y se condiciona al software que devuelva materiales aptos estructuralmente, el precio del material es importante para la viabilidad de los proyectos ejecutados con él, al hacer la selección el programa pasa de mostrarnos 127 materiales que nos mostraba inicialmente a 77 aptos para ser usados estructuralmente. El resultado de esta búsqueda tiene como finalidad la búsqueda de materiales que sean económicos y que sean capaces de transmitir los esfuerzos. El resultado de esta búsqueda dará una idea de materiales

sostenibles debido a que el precio condiciona el costo de los procesos industriales, la energía embebida del material, su transporte...

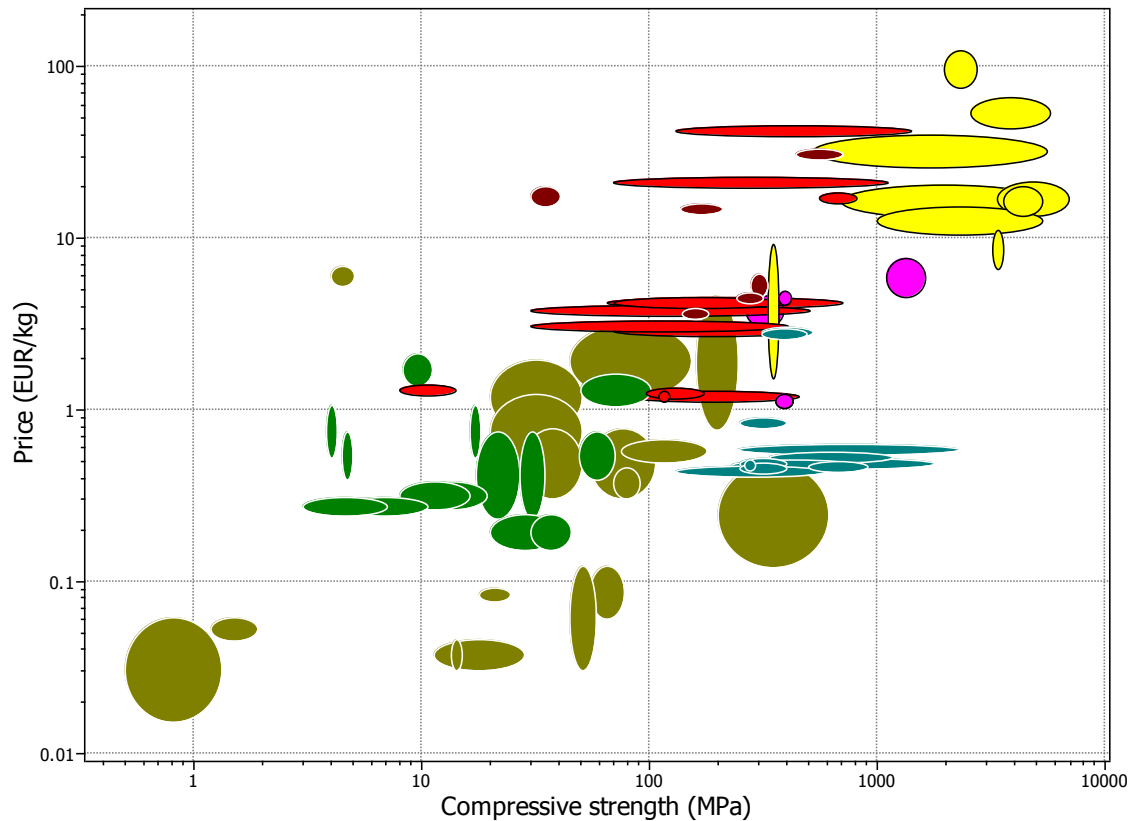


Fig. 3.1 Resistencia Compresión – Precio

El programa nos devuelve para cada material una elipse, que es el área barrida por los rangos aceptables para las propiedades graficadas, lo que indica es la variación que existe entre sus variables, que diferencia de resistencia a compresión puede haber en un material dependiendo de su puesta en obra, de su curado, de tratamientos térmicos que se le aplique al material, de dosificaciones distintas, adiciones, aleaciones e igualmente para el otro eje de la elipse que nos indica que diferencia de precios puede haber dependiendo del país donde se adquiriera, la calidad que posea, etc...

El gráfico muestra como a medida que los materiales son capaces de absorber mayores esfuerzos también aumentan su precio, esto no implica necesariamente que su implantación sea más cara, ya que la cantidad de material para transmitir las mismas cargas es menor conforme aumenta su resistencia y el precio global puede ser menor.

También se han obtenido las gráficas comparativas de módulo resistente a compresión comparándolo con la resistencia a compresión.

El módulo de compresibilidad mide la resistencia del material a comprimirse para causar una disminución unitaria de volumen. Por lo tanto se comparan dos propiedades fundamentales para la comparación de materiales resistentes a compresión.

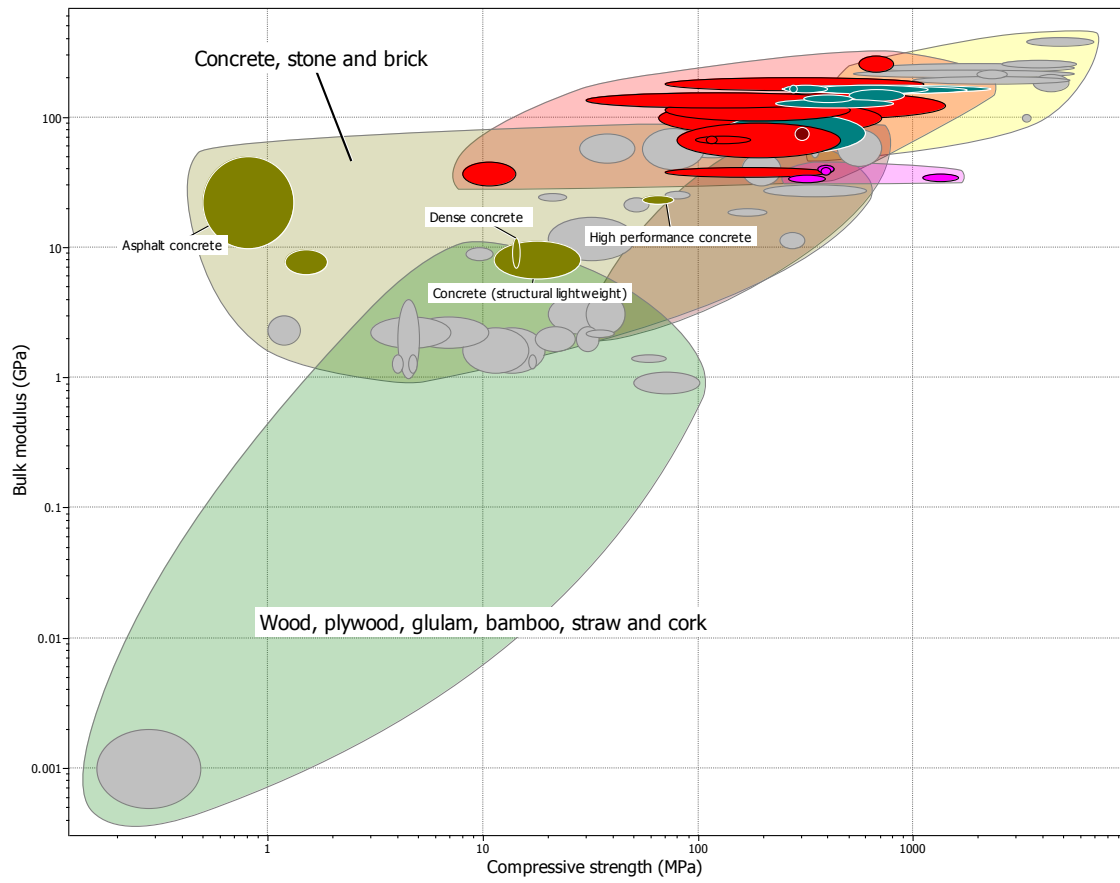


Fig. 3.2 Módulo compresibilidad – Resistencia a compresión

Análisis de las propiedades según familias.

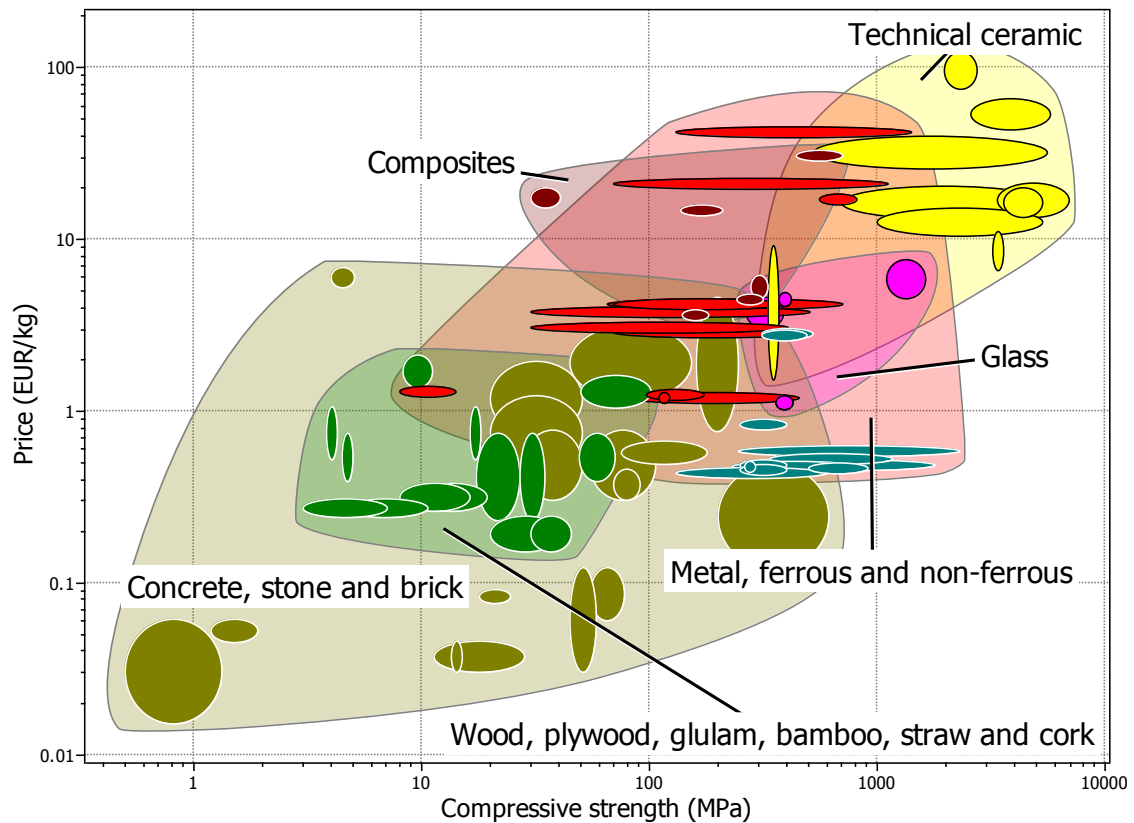


Fig. 3.3 Resistencia Compresión – precio por familias

En la gráfica de la figura 3.3 se observa una gráfica por familias de materiales, el objetivo es buscar materiales que se encuentren en la zona media-inferior, es decir que su precio sea bueno y que posean gran resistencia a compresión.

Debemos de ser conscientes que la tabla se encuentra en formato logarítmico para que se pueda ver con claridad.

Se aprecia fácilmente como en la familia de los pétreos naturales y artificiales hay una gran variedad de resistencias y de precios. Vemos que a priori es la familia que ofrece una resistencia a compresión elevada con un precio bajo. También hay que destacar la familia de los metales férricos y no férricos ya que tienen gran capacidad de transmisión de cargas (mayor que los pétreos) pero el precio también es superior.

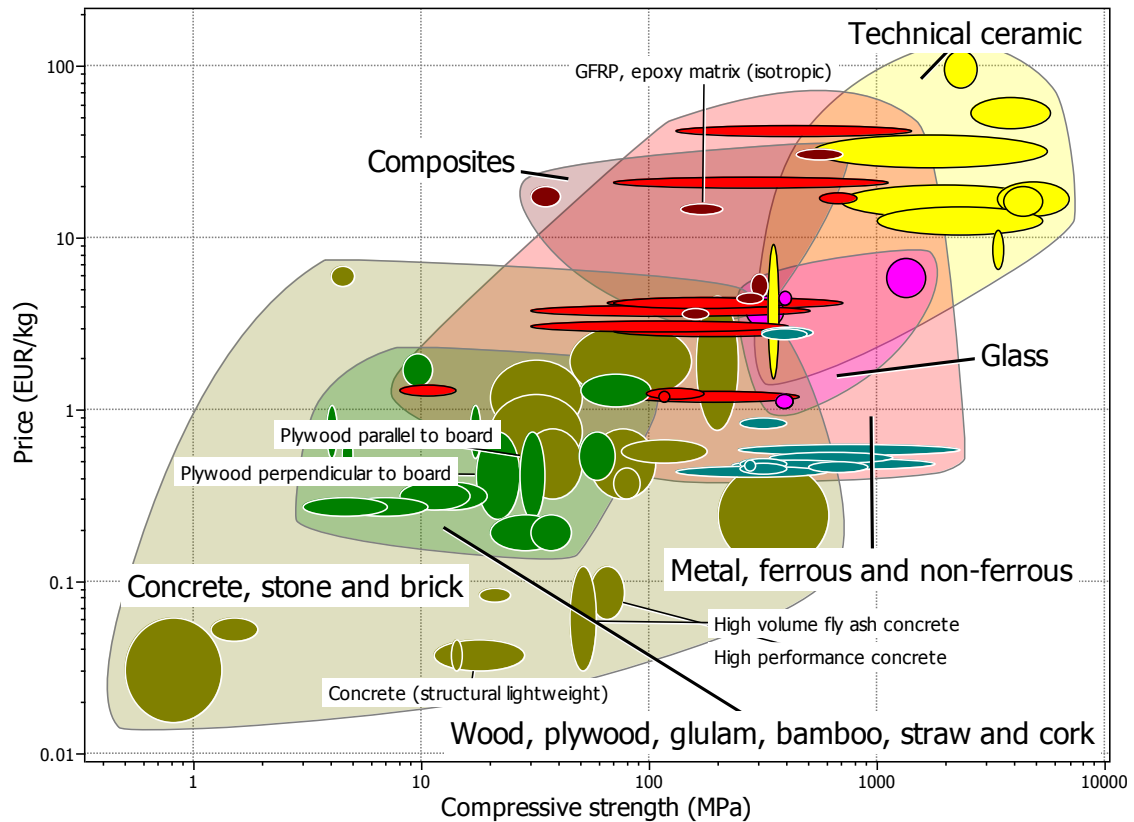


Fig. 3.4 Resistencia Compresión – Precio

También vemos que la familia de las maderas ofrece una resistencia a compresión similar algunos pétreos comunes en la edificación a un precio muy superior.

El precio del kilogramo de acero es similar a la media del precio de la madera con unas resistencias abrumadoramente mayores.

Vemos las altísimas resistencias que se alcanzan con las cerámicas técnicas y composites, utilizados frecuentemente en reparaciones...

Las altísimas resistencias de los composites se logran gracias a la sinergia de sus componentes.

La sinergia es la acción de coordinación de dos o más causas o partes (elementos) cuyo efecto es superior a la suma de efectos individuales.

O lo que es lo mismo, sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes.

Para continuar con el estudio vemos que es necesaria la misma comparación con esfuerzos de tracción debido a la insuficiencia del hormigón para transmitir estas fuerzas.

Por tanto obtenemos la tabla donde se compara la resistencia a tracción con el precio.

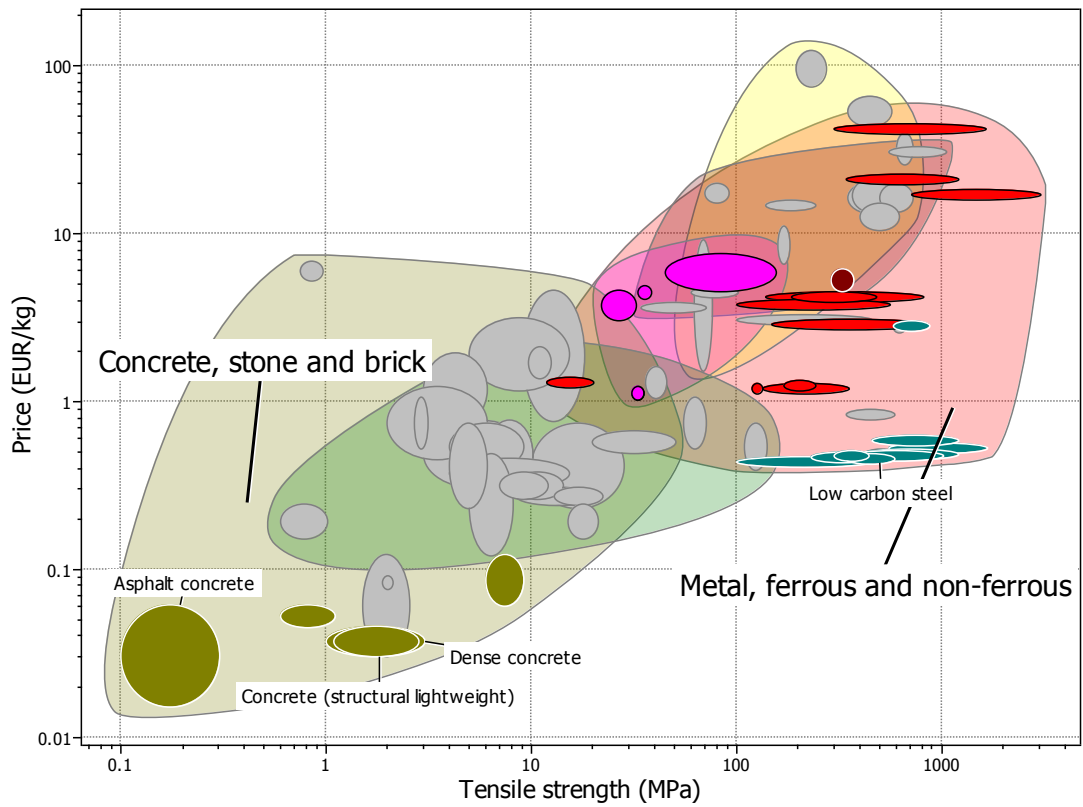


Fig 3.5 Precio – Resistencia a tracción. Escala logarítmica.

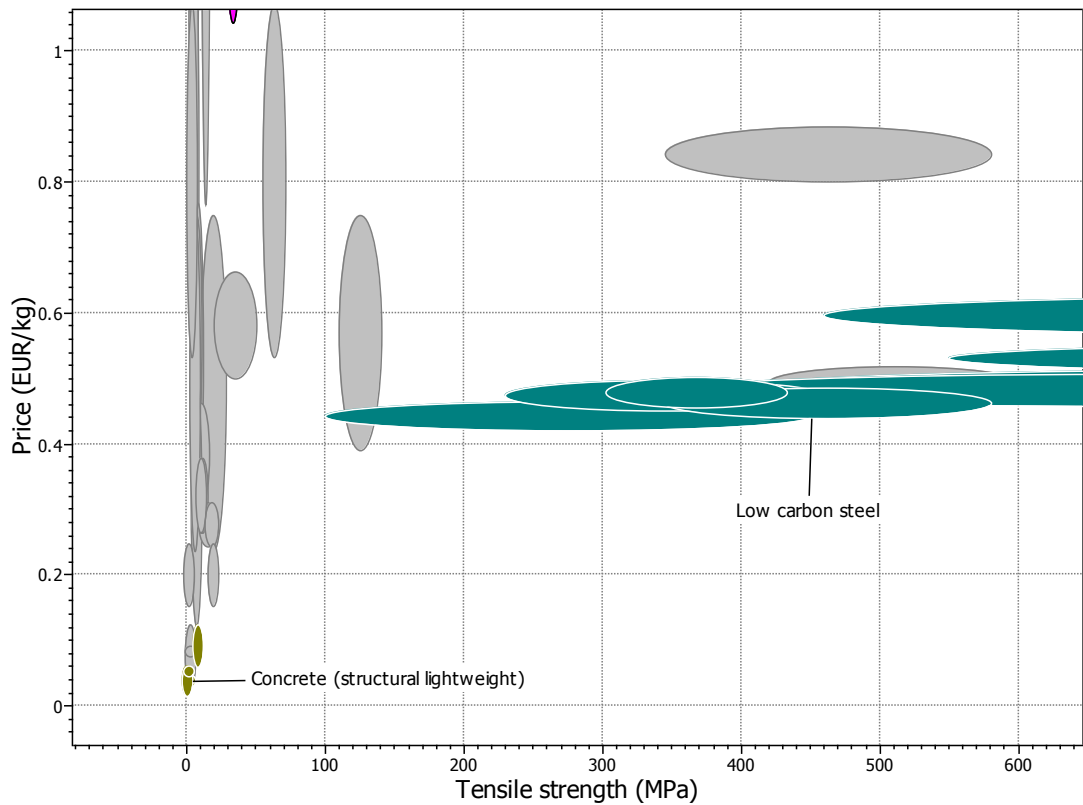


Fig 3.6 Precio – Resistencia a tracción. Escala porcentual.

Como vemos en la gráfica, observamos que la capacidad de resistir tensiones del hormigón es muy baja, tan baja que se desprecia en los cálculos estructurales. La capacidad de transmisión de cargas del hormigón a tracción es de 2.8 MPa como máximo en comparación con el acero que es capaz de aguantar 580. Son 207 veces más que el hormigón. Sin embargo el precio aproximado por Kg para el hormigón es de 0,0461 €/kg y para el acero es de 0,485 €/kg. Es 10 veces más caro.

El acero cuesta 10 veces más pero es capaz de transmitir las cargas 200 veces mejor que el hormigón.

Es probable que utilizar el acero como refuerzo de estructuras de hormigón sea una solución sostenible ya que existe una reducción de utilización de materiales mucho mayor que la diferencia de precio, contaminación...

Además existe solo la problemática del precio sino también en el dimensionamiento de elementos estructurales. Las dimensiones de los elementos estructurales serían de dimensiones muchísimo mayores lo que perjudicaría la viabilidad de cualquier proyecto. Por ello es imprescindible la utilización del acero para absorber las sollicitaciones a tracción.

El acero nos aporta unos valores añadidos a nuestros elementos estructurales muy importantes como son la seguridad de utilización. El acero bajo en carbono utilizado en construcción es capaz de tener una gran deformación y absorber una gran cantidad de energía por encima del valor de cálculo (límite elástico) antes de romper.

Es importante señalar que hoy en día es bastante inusual que las viviendas de obra nueva colapsen, esto es debido a que existen coeficientes de seguridad muy altos, pero no es tan inusual que, debido a la deformación excesiva de elementos estructurales causen patologías en la edificación, como grietas y fisuras en particiones interiores, fachadas... El acero permite el refuerzo de la estructura limitando la deformación, aumentando la rigidez y disminuyendo la flecha de elementos constructivos.

Como conclusión de esta primera parte del análisis podríamos decir que para una construcción económica (que no necesariamente sostenible), con los estándares de seguridad y habitabilidad exigidos, se optaría por resolver las sollicitaciones de compresión mediante hormigón y las de tracción mediante acero bajo en carbono.

Una vez obtenidos los primeros resultados vamos a comparar la durabilidad con el precio. La durabilidad del material es un aspecto importante dentro del estudio de la sostenibilidad.

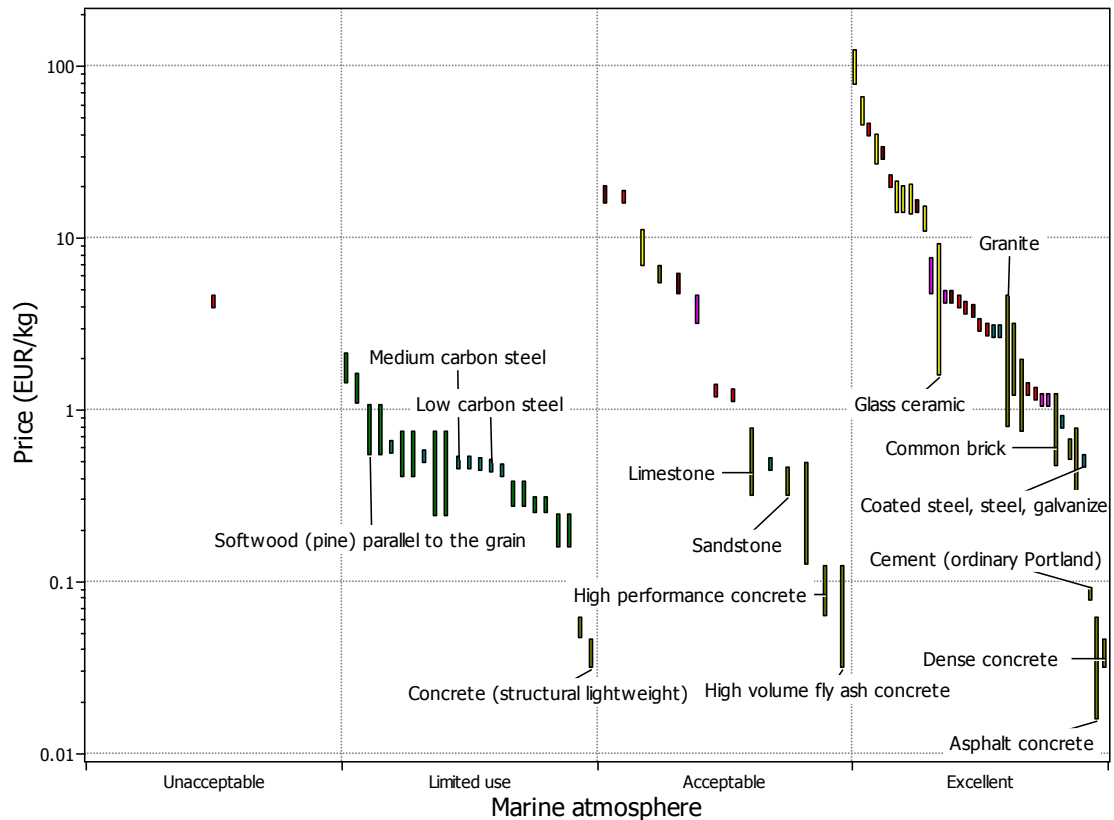


Fig. 3.7 Precio – Atmosfera Marina

En la Fig. 3.7 vemos una comparación entre el precio y su durabilidad en atmosfera marina. Se ha comparado con una atmosfera marina (una atmosfera muy perjudicial) para que existan datos y gráficas de durabilidad más exigentes. Pensemos que queremos materiales económicos y que dispongan de unas buenas propiedades de durabilidad. Por lo tanto buscaremos en el cuadrante inferior derecho.

Vemos que los ladrillos cara vista junto a hormigones disponen de buenas cualidades de durabilidad en atmósfera marina sobre todos aquellos con dosificaciones altas de cementos, buenas compacidades y granulometrías cuidadas. Vemos que los aceros disponen de baja durabilidad menos los aceros galvanizados los cuales poseen características de durabilidad excelentes. La familia con mejores propiedades de durabilidad con un precio menor es la familia de los pétreos artificiales de características superiores junto a pétreos naturales como el granito que pose características excelentes en cuanto a durabilidad o aplacados de arenisca y caliza con unas cualidades aceptables.

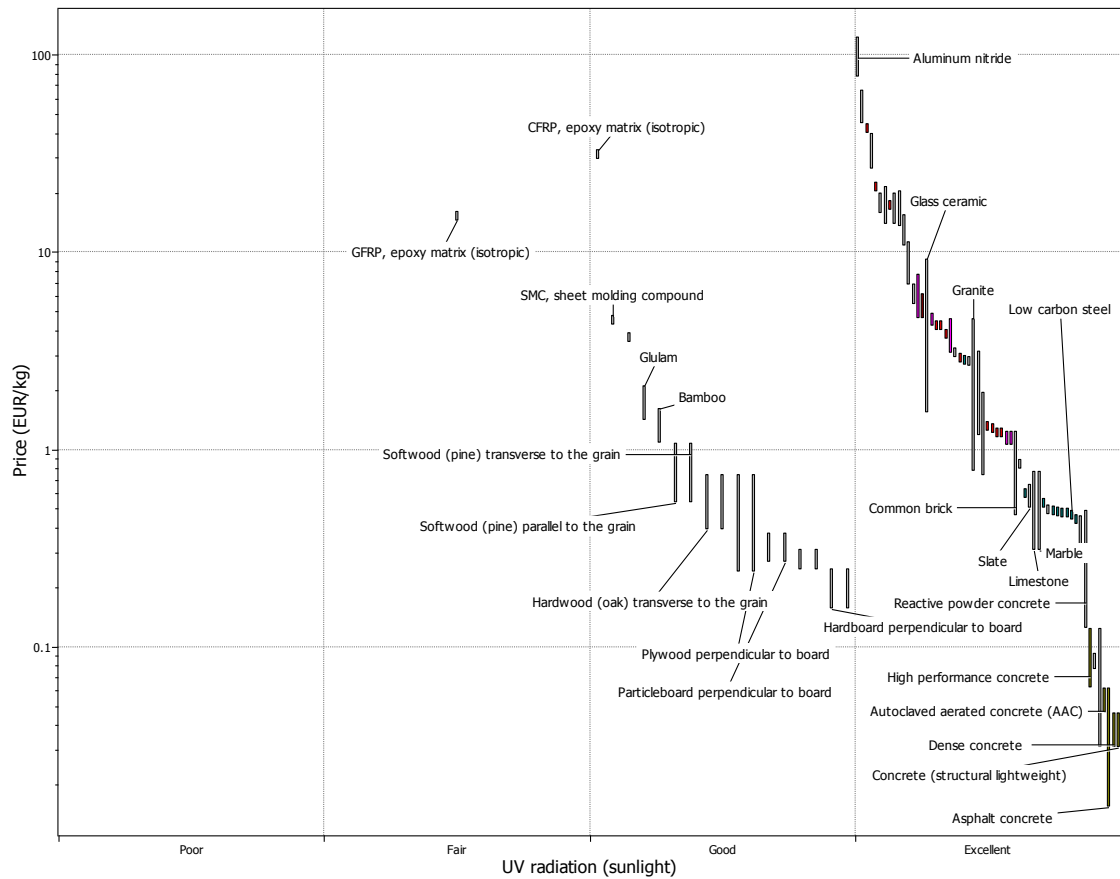


Fig. 3.8 Precio – Radiación Ultravioleta (Luz Solar)

En la figura 3.8 se compara el precio con la durabilidad a la radiación ultravioleta (Luz Solar). Vemos que los pétreos artificiales en concreto hormigones disponen de las mejores características en cuanto a durabilidad a la radiación solar con un coste menor. Otros materiales como son metales como el acero bajo en carbono y alto en carbono junto a pétreos naturales como el granito, el mármol, calizas y pizarras disponen de buenas características de durabilidad. Sin embargo las maderas en general disponen de unas características inferiores en cuanto a durabilidad. Materiales compuestos como resinas epoxy deben de protegerse de la radiación solar.

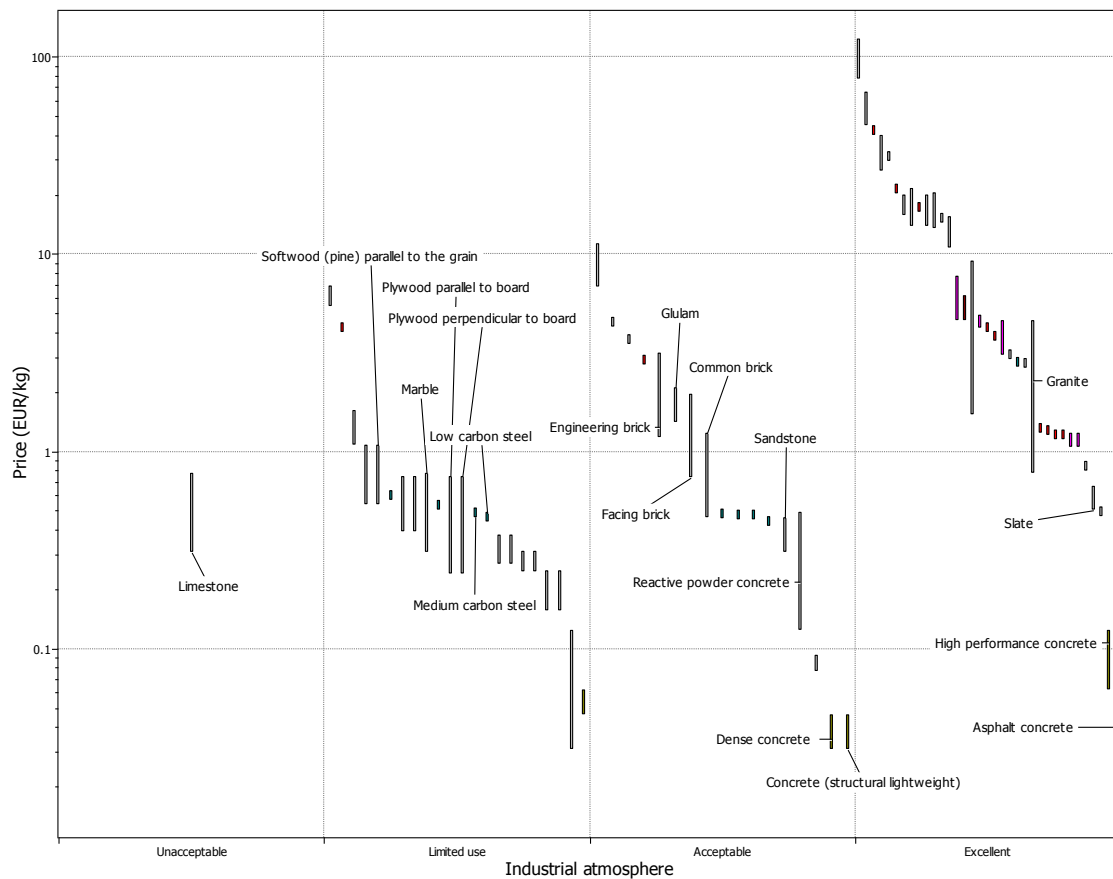


Fig. 3.9 Precio – Atmosfera industrial.

En la comparación de durabilidad en atmosferas industriales vemos que los pétreos artificiales como los hormigones tienen muy buenas características. Sobre todo aquellos con dosificaciones cuidadas y con gran cantidad de cemento, los cuales tienen características excelentes al igual que pétreos naturales como granitos, pizarras...

Los ladrillos cara vista y cerámica en general disponen de características aceptables.

Como se observa maderas y pétreos con resistencias químicas menores deben de limitar su uso en estos ambientes.

Sin embargo vemos un dato que nos llama la atención, y es que el acero bajo en carbono dispone de una calificación de uso limitado, nos llama la atención debido a que la mayoría de naves industriales son, hablando estructuralmente y sin contar la cimentación, totalmente en hechas en acero. Esto es debido a que existe la necesidad de formar grandes luces dentro de las naves industriales, sin pilares por medio del espacio de trabajo, y la solución más viable son estructuras aligeradas mediante cerchas metálicas. A estas estructuras se les aporta de un revestimiento anticorrosión.

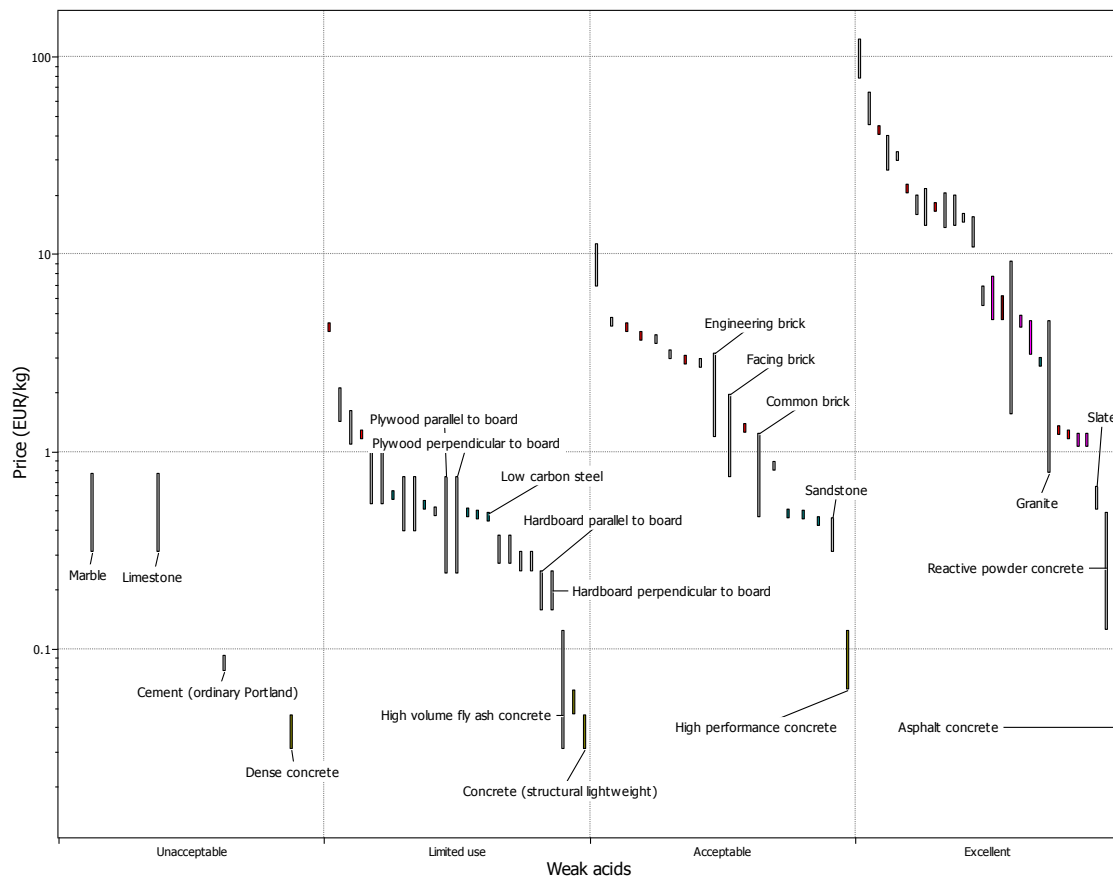


Fig. 3.10 Precio – Ácidos débiles.

En la gráfica de la fig. 3.10 donde se comparan los materiales según su durabilidad a ácidos débiles vemos que existen hormigones con buenas características aunque la mayoría bajan un escalón, asfaltos continúan con excelentes características de durabilidad aunque hormigones de alta resistencia tienen características aceptables. Para estas solicitudes se debe estudiar muy bien la viabilidad de los materiales utilizados.

Se deben estudiar la posibilidad según proyecto de ejecutar una estructura con hormigón armado y realizar un revestimiento de granito o pizarra, pudiendo plantearse la utilización de estructura de muros de carga con ladrillos para estas solicitudes ya que disponen de características aceptables. Son soluciones específicas para proyectos muy característicos que pudieran darse.

En el siguiente gráfico se ha comparado dos propiedades fundamentales de la sostenibilidad, la energía embebida y la huella de Co2, estos parámetros son claves para obtener la energía que debemos de utilizar desde que se extrae la materia prima y se procesa para obtener un producto útil para la construcción.

El resultado es una gráfica bastante lineal. Es un resultado obvio ya que son características diferentes pero están relacionadas entre sí, ya que al fabricar un material necesitamos una cantidad de energía específica, y esta produce una cantidad de co2 que sigue una cierta proporción a la cantidad de energía embebida del material.

En aplicación a materiales compuestos, la cantidad de energía embebida y huella de CO₂ dispondrá de la misma relación en peso que disponga el material. Así, por ejemplo para obtener la cantidad de energía embebida (o huella de CO₂) que gasta un material bastará con obtener la relación existente entre los distintos materiales en peso y sumar los valores para cada material de la cantidad de energía multiplicado por la dosificación.

Basta con sumar el porcentaje existente de cada material por su energía embebida.

$$E_{\text{embebida Mat Compuesto}} = (E_{\text{embebida Mat Constituyente 1}} \times D_{\text{osificación en peso material. 1}}) + (E_{\text{embebida Mat Constituyente 2}} \times D_{\text{osificación en peso material. 2}}) + (E_{\text{embebida Mat Constituyente N}} \times D_{\text{osificación en peso material. N}}).$$

Siendo N el número de materiales constituyentes del material compuesto.

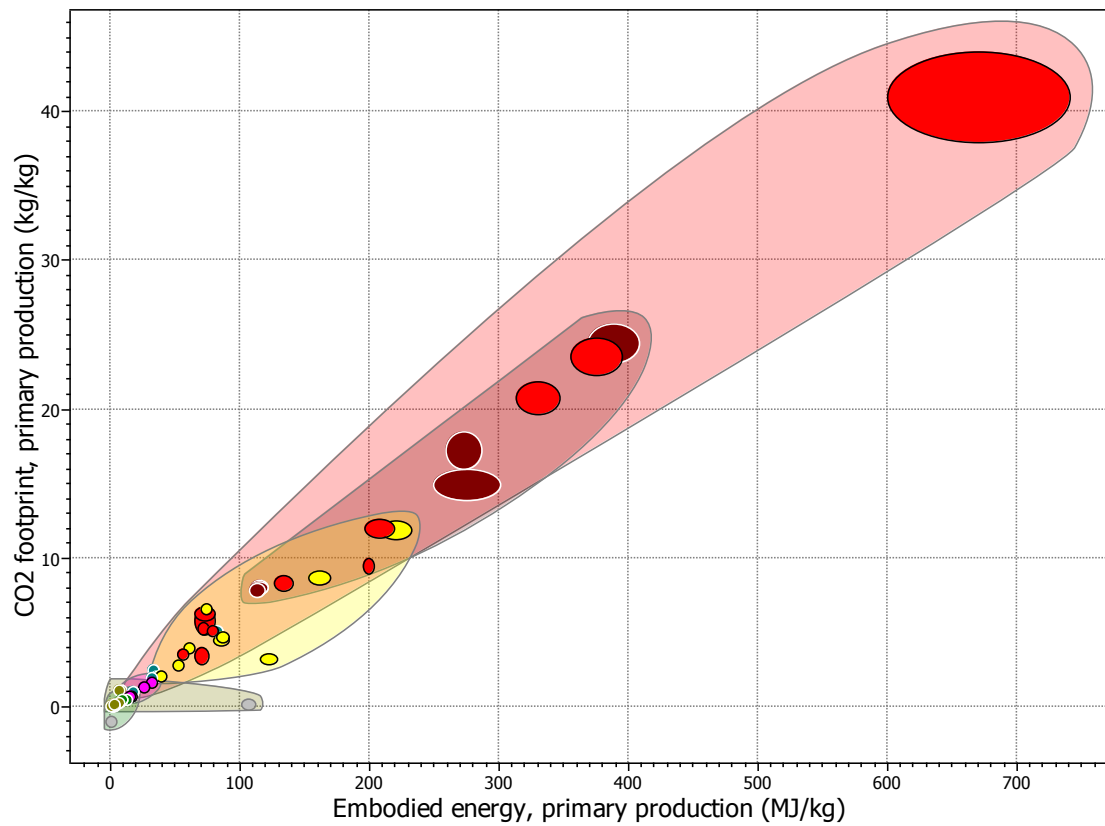


Fig 3.11 Energía embebida – Huella de CO₂

Se observa la cantidad de energía embebida de los materiales y su huella de CO₂.

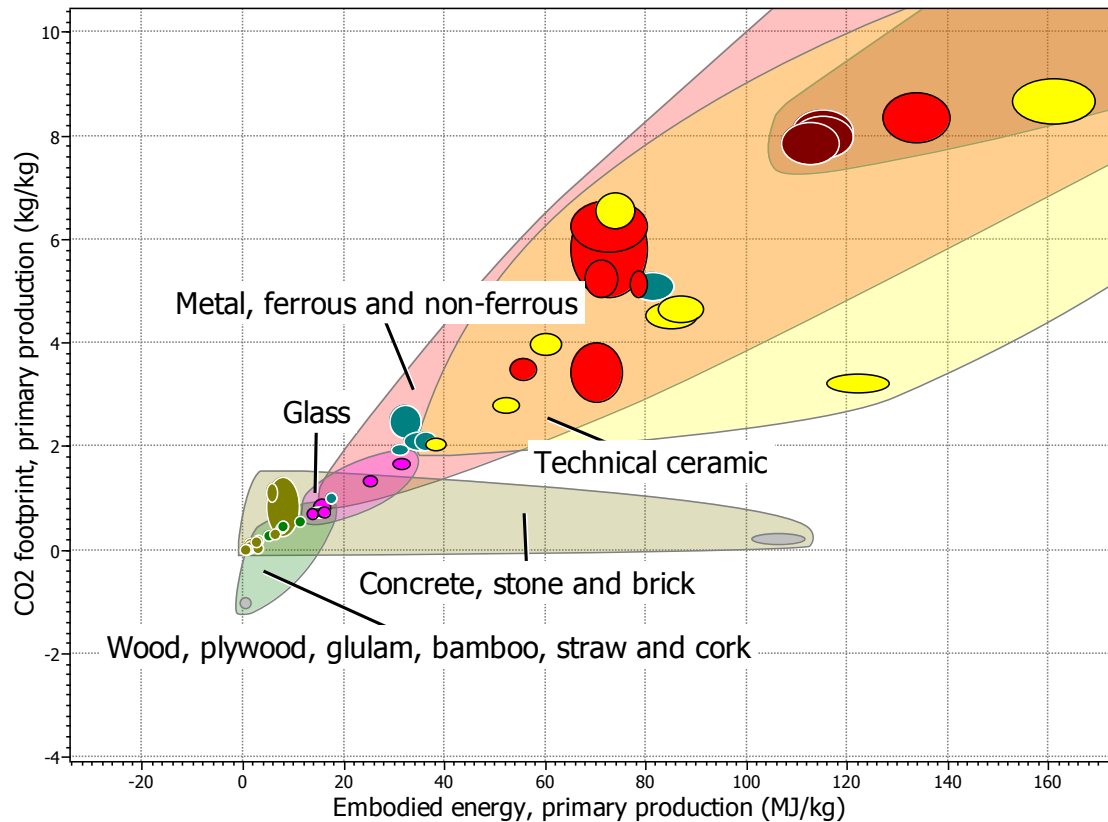


Fig. 3.12 Energía embebida – Huella de CO₂

Como se observa en la Fig. 3.12 la familia de materiales que menor energía embebida y menor huella de CO₂ tienen son, dentro de la familia de las maderas, la paja. Si nos fijamos vemos que la energía embebida es 0 o incluso negativa y que la huella de CO₂ es negativa. Esto es debido a que la materia vegetal durante su vida consume gran cantidad de CO₂ lo que produce que al sumar la huella de CO₂ que se produce con la producción y el transporte sea menor que la que la planta ha producido lo que provoca que sea negativa la huella de CO₂. La energía embebida puede ser 0 debido a que, como en el caso de las balas de paja, no precisa de ninguna transformación para su utilización. ¿Cuándo puede ser negativa? cuando el material pueda ser utilizado como combustible para la recuperación de energía se producirá más energía que la que el mismo material necesita para su utilización como material para la construcción.

Como se ve en la gráfica el hormigón dispone de buenas características medio ambientales (mejores que la mayoría de materiales de la familia de las maderas), ya que es la familia con mejores índices de huella de CO₂ y una baja energía embebida para la mayoría de los materiales de la familia.

Adicionalmente vemos a la familia de los metales muy por encima en los índices de formación de CO₂ en su proceso de fabricación y una cantidad de energía embebida muy grande en comparación de los materiales pétreos y los provenientes de la madera.

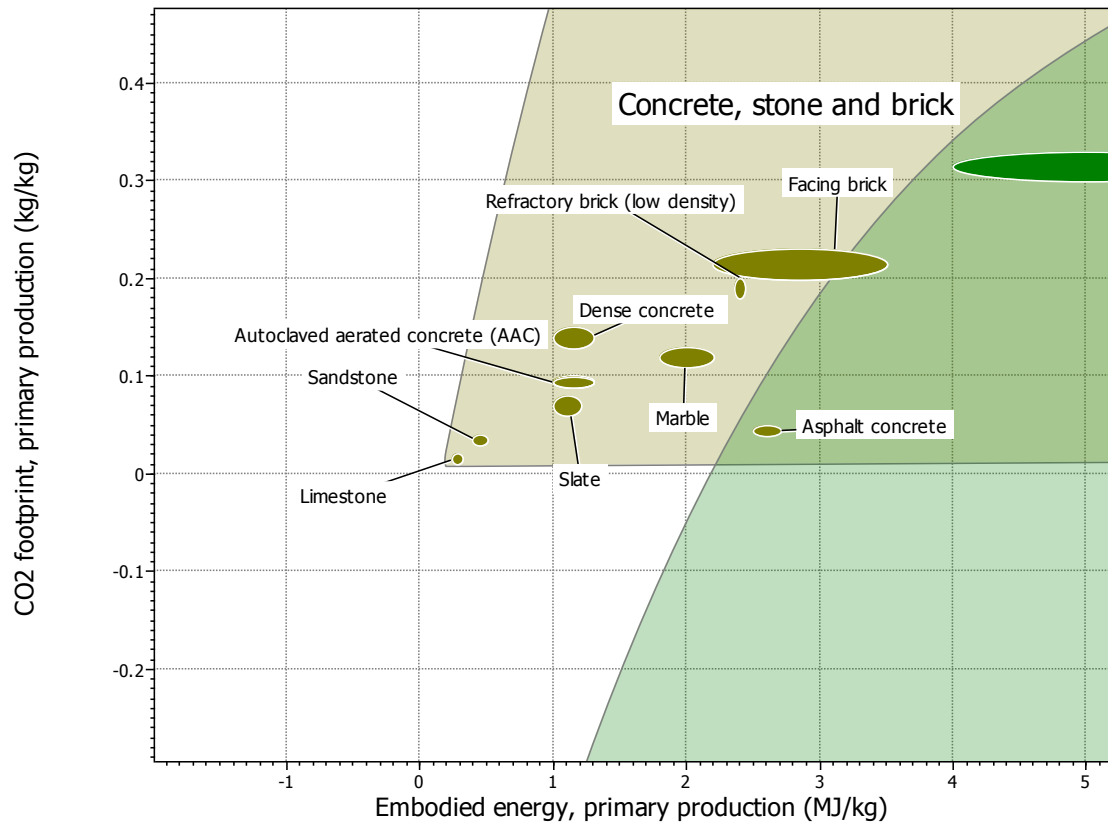


Fig. 3.13 Energía embebida – Huella de CO₂

Observamos en la fig. 3.7 que los pétreos con una cantidad de energía embebida baja y una menor huella de CO₂ son los pétreos naturales que se extraen directamente de la naturaleza y no necesitan de prácticamente ningún proceso para poder ser utilizados. Vemos que hormigones de alta densidad junto a ladrillos cara vista poseen buenas características medioambientales.

Seguidamente se analiza un gráfico que nos compara la huella de CO₂ del material en producción primaria con la huella de CO₂ del proceso de reciclado. El programa selecciona los materiales que son capaces de ser reciclados y nos vuelca la información de estos.

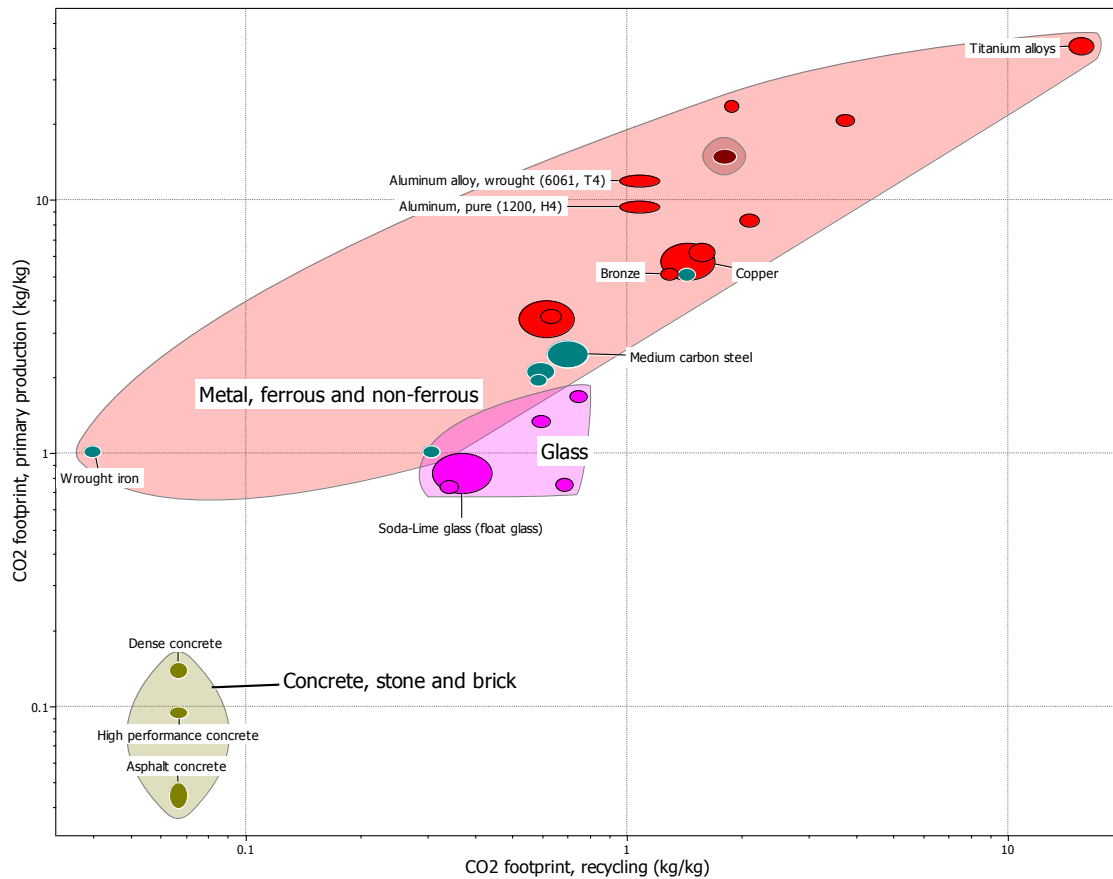


Fig.3.14 Huella de CO₂ de la producción primaria – Huella de CO₂ de su reciclaje

El programa nos devuelve 31 resultados de materiales que son reciclables entre los cuales se encuentran la mayoría de los materiales de la familia de los pétreos artificiales (hormigones) y gran parte de los de la familia de los metálicos. También son reciclables materiales usados en la construcción como son vidrios y la forja. Es de destacar la huella de CO₂ que se produce la forja en su producción primaria y la poca que consume en su reciclado.

Ahora vamos a comparar la energía embebida del material con el módulo de Young o módulo elástico

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico. Para un material elástico lineal, el módulo de Young tiene el mismo valor siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico.

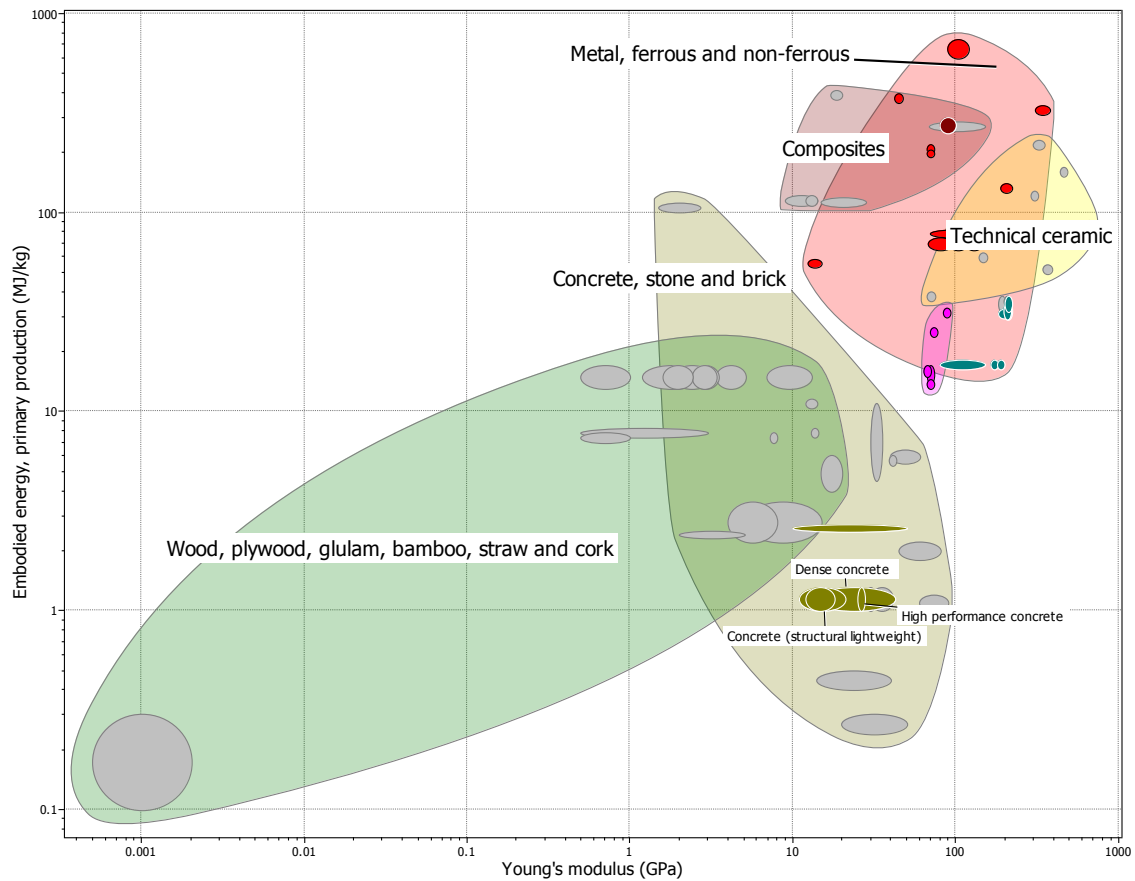


Fig.3.15 Energía embebida en producción primaria – Módulo de Young

La zona de la gráfica más interesante para nuestro estudio de sostenibilidad en la edificación se encuentra en la zona inferior derecha. Donde existen materiales con mucho módulo elástico y una energía embebida baja. En esta zona se encuentran de nuevo los materiales pétreos como los que observamos con mayor claridad que adquieren buenas características mecánicas con energías embebidas bajas. Sin embargo como se observa los materiales metálicos adquieren propiedades mecánicas mejores aumentando significativamente la energía embebida del material. Explicaremos esto exponiendo un ejemplo: Un hormigón denso puede adquirir un módulo de young de 42 GPa con 1,3 MJ/kg, sin embargo un acero bajo en carbono posee un módulo de young de 215 GPa con una energía embebida del material de 35 MJ/kg.

El módulo de Young es 5 veces mayor pero ha producido que la energía embebida y por tanto la contaminación ser multiplique 27 veces.

Las maderas tampoco adquieren buenos resultados, vemos necesitan de una energía embebida de en torno a 10 veces más con unas características resistentes muy por debajo de los hormigones.

Para nuestro objetivo de viviendas sostenibles es importante que los materiales dispongan de una alta resistividad térmica o lo que es lo mismo una baja conductividad térmica. Lo que mide esta propiedad es la capacidad de conducción del calor. Si comparamos resistividad térmica con la energía embebida obtenemos la siguiente tabla.

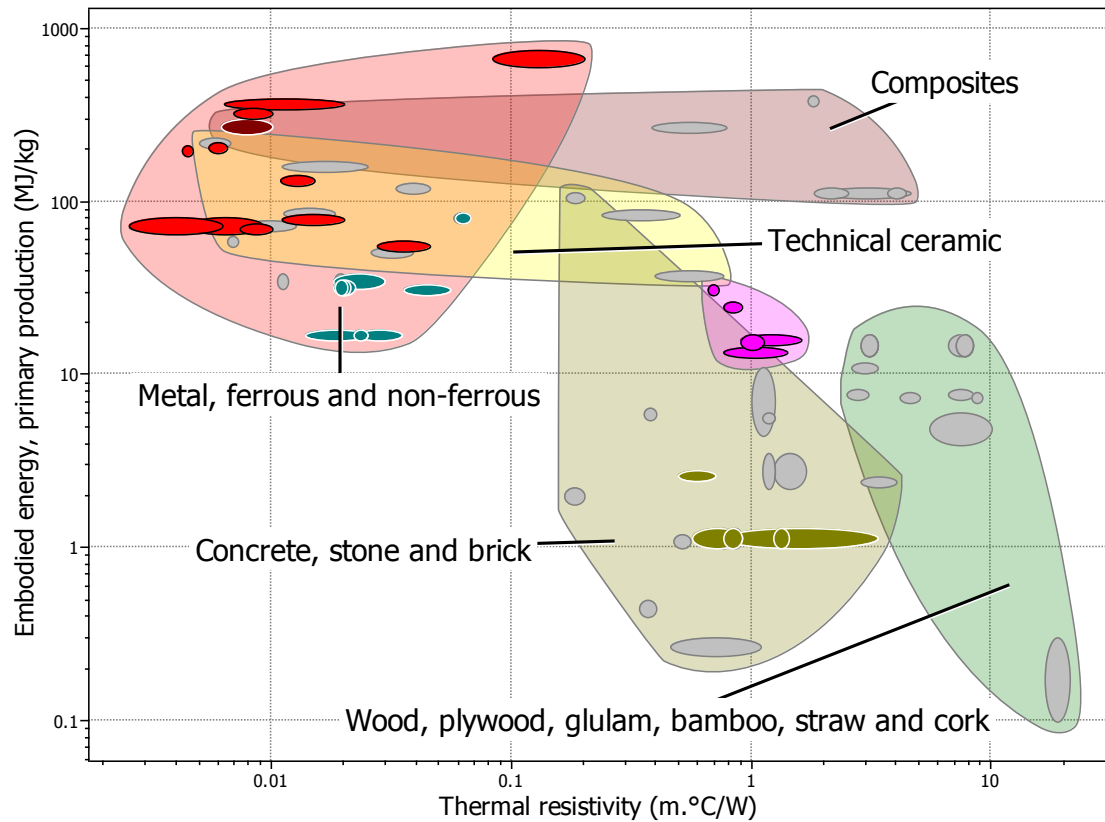


Fig. 3.16 Energía embebida – Resistividad térmica.

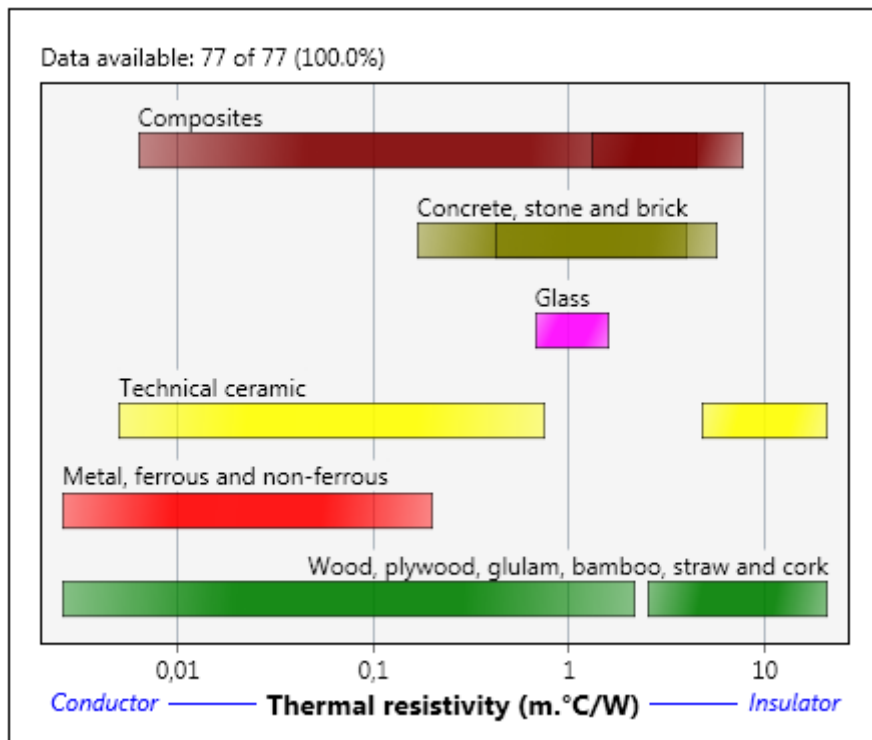


Fig.3.17

Como se observa la familia de los metales tienen baja resistividad térmica (alta conductividad térmica). Sin embargo los de la familia de las maderas disponen de buenas características en cuanto a resistividad térmica.

En una posición intermedia están los pétreos, los cuales disponen de unas características inferiores a la de las maderas pero muy superiores a los metales en cuanto a resistividad térmica se refiere.

Para la ejecución de elementos estructurales, la resistividad térmica no es una característica decisiva a la hora de la elección del material, ya que podemos suplir carencias mediante la protección de estos elementos utilizando materiales con mejores comportamientos térmicos aunque sí que debe ser motivo de estudio.

A continuación se ve una lista de materiales que cumplen la condición de ser resistentes estructuralmente y reciclables. Se encuentran ordenados por resistencia a compresión.

Name	Compressive strength (MPa)	
Low alloy steel	245 - 2.26e3	
Medium carbon steel	305 - 1.76e3	
Silica glass (Vycor)	1.1e3 - 1.6e3	
Titanium alloys	130 - 1.4e3	
High carbon steel	335 - 1.16e3	
Nickel alloys	70 - 1.1e3	
Cast iron, white	500 – 900	Hierro fundido
Tungsten alloys	555 - 800	
Cast iron, nodular (spheroidal, ductile)	229 - 799	
Bronze	65 - 700	
Cast iron, gray (flake graphite)	130 - 590	
Stainless steel	310 – 515	Acero Inoxidable
Brass	70 - 500	
Copper	30 - 500	
Zinc alloys	80 - 450	
Low-e glass	360 - 420	
Soda-Lime glass (float glass)	360 - 420	
Laminated glass	370 - 410	
Magnesium alloys	70 - 400	
Low carbon steel	250 – 395	Acero bajo en carbono
Borosilicate glass (Pyrex)	264 - 384	
Aluminum/silicon carbide composite	280 - 325	
Wrought iron	270 - 280	
Aluminum alloy, wrought (6061, T4)	97 - 172	
Aluminum, pure (1200, H4)	109 - 121	
High performance concrete	55.2 - 75.8	Hormigón alta resistencia
Concrete (structural lightweight)	11.3 - 28	
Dense concrete	14 - 14.4	Hormigón de alta densidad
Lead alloys	8 - 14	
Autoclaved aerated concrete (AAC)	1.2 - 1.87	
Asphalt concrete	0.5 - 1.3	Asfalto

Observamos que materiales comúnmente utilizados en la edificación poseen estas propiedades ecológicas.

Como principales ventajas que poseen los pétreos artificiales es que disponen de una buena resistencia a compresión lo que permite su utilización para la transmisión de cargas, en cerramientos y en multitud de aplicaciones tanto estructurales como no estructurales. Los hormigones son los más económicos y tienen una gran durabilidad hasta en atmosferas exigentes como la marina, la energía embebida del material junto a la huella de CO₂ es la más baja, es decir, son respetuosos con el medio ambiente, son materiales reciclables y son los que

menor huella de CO₂ producen en su reciclado exceptuando un material de la familia de los metálicos (la forja), disponen de una buena relación módulo elástico - energía embebida.

Las principales desventajas es la incapacidad de trabajar a tracción y por ello a flexión.

Las ventajas de los materiales metálicos son principalmente las resistencias tanto a compresión, a flexión, módulo de Young... Son materiales muy resistentes que pueden absorber gran cantidad de tensión antes de romper (Aceros bajos en carbono) y por lo tanto que ofrecen coeficientes de seguridad muy altos.

Desventajas tienen bastantes, sobre todo en el ámbito de nuestro estudio de sostenibilidad. Los materiales de la familia de los metálicos que utilizamos en la construcción de estructuras son abundantes en la naturaleza pero debido a los procesos de transformación para su utilización requieren de gran cantidad de energía y producen mucho CO₂. Por lo tanto no son respetuosos con el medio ambiente por lo que debemos limitar su uso. Al necesitar de gran cantidad de energía tanto para su fabricación, como para su montaje y transporte produce que el precio de este material sea muy superior a otros, lo que puede provocar que un proyecto deje de ser viable. Su durabilidad está muy comprometida a la protección que se le aplique y a un correcto mantenimiento, lo que perjudica su utilización. Su conductividad térmica y eléctrica son muy altas lo que no beneficia su uso en la construcción.

La familia de las maderas tampoco adquiere un buen resultado medioambiental, las maderas tienen una energía embebida y una huella de CO₂ mayor que los pétreos aunque menor que los metales. Disponen de una resistencia media-baja en comparación con pétreos y metales aunque son capaces de trabajar tanto a compresión como a tracción. Son biodegradables y renovables. Por ello la durabilidad de la madera es menor a otros materiales.

La solución medioambiental óptima parece estar en la utilización de estructuras de hormigón armado. Solución óptima porque:

Solución con baja energía embebida y baja huella de CO₂ (mayor que en el hormigón en masa)

Durable. Hormigón como pasivador de armaduras.

Resistente a todo tipo de sollicitaciones gracias al acero.

Económico gracias a la sección de hormigón.

Conductividad térmica aceptable y no conductor de la electricidad.

Por tanto los materiales de la familia de los pétreos son las que mejores propiedades nos ofrecen, por ello vamos a seguir estudiando dentro de esta familia que materiales específicos son los que nos aportan mejores características.

Teniendo en cuenta que los pétreos naturales no se suelen reforzar debido a numerosos problemas en cuanto a la utilización de productos carísimos y contaminantes (resinas epoxi), técnicas de rehabilitación complejas y a los problemas de transporte que supondría la utilización de pétreos naturales para la estructura (propias de otras civilizaciones) pasamos a comparar dos tipologías frecuentes edificatorias. Las estructuras de hormigón armado y las estructuras de muros de carga de ladrillo.

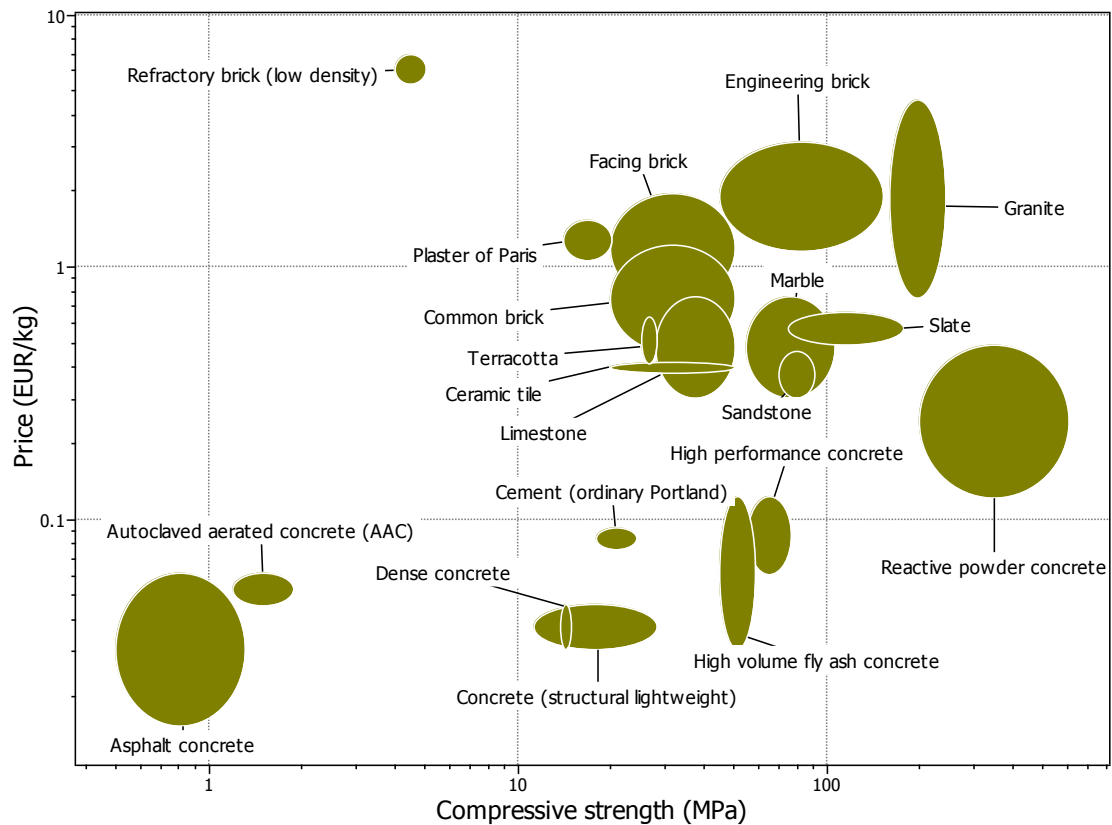


Fig. 3.18 Precio – Resistencia compresión

En la Fig. 3.10 se comparan la resistencia a compresión con el precio. En donde observamos que los pétreos artificiales de naturaleza cementosa son los que llegan a adquirir unas resistencias iguales o incluso mayores a unos precios bastante inferiores.

Los pétreos naturales son los que adquieren unos precios medios exceptuando el granito con unos precios superiores a la media. Como se observan los materiales pétreos provenientes de la cerámica son los más costosos debido a que para su formación necesitan de procesos industriales térmicos en el cien por cien del material.

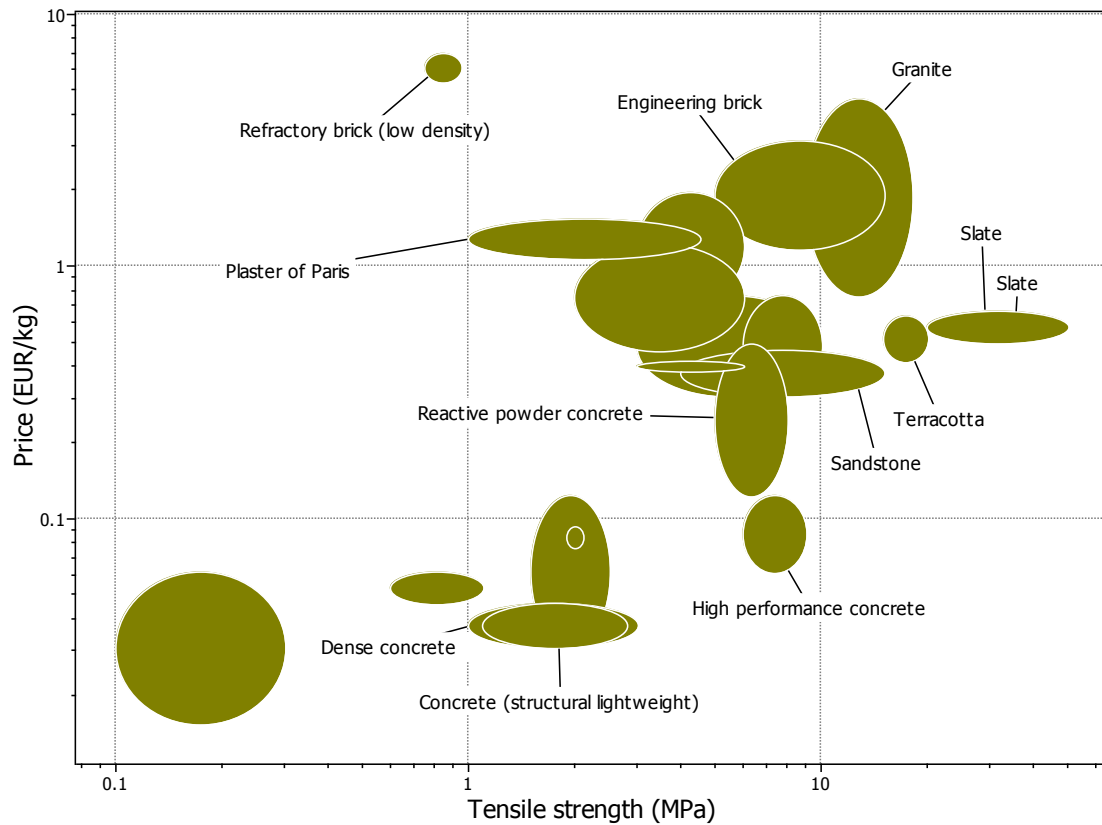


Fig. 3.19 Precio – Resistencia tracción

En la gráfica de tensión a tracción - precio vemos pétreos que mejoran bastante las resistencias de hormigones utilizados en la construcción pero no aportan resistencias significativas para el cálculo de estructuras con estos materiales y debido al comportamiento frágil que por naturaleza poseen estos materiales (admiten poca deformación antes de la rotura) no son aptos para la transmisión de este tipo de esfuerzos.

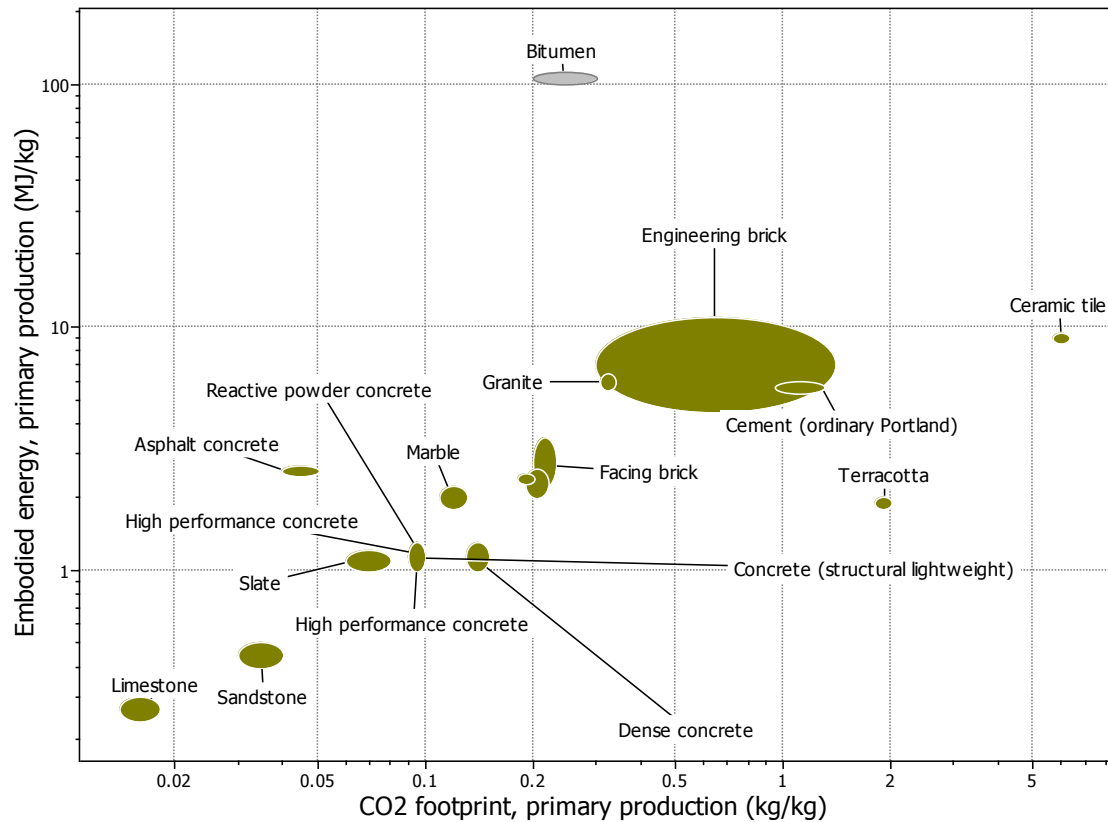


Fig. 3.20 Energía embebida – Huella de CO₂

En la fig.3.20 vemos como pétreos naturales como areniscas y calizas son las que menos energía embebida y menor índice de huella de CO₂ poseen, seguidas por hormigones y pizarras. Los pétreos con mayor consumo de energía y una mayor producción de CO₂ son los pétreos artificiales provenientes de arcillas como ladrillos caravista y piedras naturales como el mármol y el granito.

Tiene la ventaja de la flexibilidad de diseño puesto que en su estado inicial se puede verter y adquiere la forma que lo contiene, es muy económico, alta dureza, resistencia al fuego, y puede ser fabricado en el lugar. Los inconvenientes son escasa resistencia a la tensión, baja ductilidad y sufre problemas de dilatación/contracción con las variaciones de temperatura.

4. Relación entre las características geométricas y la sostenibilidad: Aumento del rendimiento del material.

Actualmente la disminución de los recursos naturales y la deforestación es un problema acuciante. Por ello cada vez se apuesta más por buscar soluciones para un diseño más sostenible.

La relación entre la geometría y la sostenibilidad es otra medida a fomentar como forma de ahorro de material. Fomentar el diseño sostenible, mediante una utilización racional de los materiales como una mejor adaptación y una mejor asignación de recursos.

Por ello es necesario el estudio de la geometría del elemento para ahorrar en consumo de material y la selección de los materiales para ser mucho más eficientes y más respetuosos con el medio ambiente.

Un ejemplo de una vivienda más sostenible es la utilización de cantos de forjados mayores para absorber la misma sollicitación. La capacidad de carga aumenta en relación $B \propto H^3$, por ello aumentando el canto de forjado en una proporción pequeña podemos aumentar significativamente la capacidad portante lo que nos repercutirá en una menor cantidad de acero aumentando levemente la cantidad de hormigón.

Como se demuestra en el resultado de este estudio el hormigón es una buena alternativa como material constructivo para la sostenibilidad a sollicitaciones estructurales. El problema es que es incapaz de utilizarse en la mayoría de sollicitaciones estructurales si no se encuentra combinado con el acero. El acero en sí no podemos considerarlo que sea un material sostenible pero si lo consideramos en su utilización conjunta con el hormigón se convierte en una opción muy sostenible. Por ello debemos de adecuar el uso del acero al máximo para disminuir su consumo y que el resultado global tenga mayor grado de satisfacción en cuanto a sostenibilidad.

5. Estudio del PYKRETE como alternativa sostenible en climas fríos.

5.1 Introducción a los materiales compuestos.

Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

Es importante destacar la escala de longitudes donde se trata la microestructura ($0.1 \mu\text{m}$ y $100 \mu\text{m}$), macroestructura $>1 \text{ mm}$) y la nanoestructura (o estructura atómica) $\approx < 10 \text{ nm} \approx < 100 \text{ \AA}$.

La importancia ingenieril de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están

formados por dos o más fases, una matriz continúa que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría.

La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes.

Un ejemplo de material compuesto conocido por todos y presente universalmente en la naturaleza es la madera. Aunque hay maderas muy diferentes y con propiedades mecánicas y de conducción de fluidos muy variadas tienen en común una matriz celulósica reforzada con fibras de lignina (y otros compuestos orgánicos) que le dan las buenas propiedades de elasticidad y deformación sin ruptura, típica de la madera.

En un sentido amplio, los aceros con microestructura perlítica (p. ej. matriz de ferrita proeutectoide con perlita) o las fundiciones grises (escamas de grafito en una matriz de ferrita y perlita) se pueden considerar como materiales compuestos.

Para dar una idea del uso cada vez mayor de los materiales compuestos ligeros basta decir que el avión de combate F-14 construido en 1970 tenía un 4 % en peso de materiales compuestos mientras que el jet comercial Avtek 400, de 1985, tenía un 80 % en peso de materiales compuestos.

5.2 Materiales compuestos reforzados con partículas.

A los materiales compuestos reforzados con partículas se clasifican en materiales reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión. El término "grande" se utiliza para indicar las interacciones entre la matriz y las partículas a un nivel macroscópico. El material compuesto reforzado con partículas grandes más común es el hormigón. Las partículas son la arena o grava en una matriz cerámica compuesto por silicatos y aluminatos hidratados.

Algunos materiales poliméricos a los que se les ha añadido un aditivo de relleno se comportan como materiales compuestos reforzados con partículas grandes. Las partículas pueden tener una gran variedad de geometría pero suelen tener aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones (equiaxiales) lo cual es la gran diferencia con las fibras. El reforzamiento es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz. Las propiedades mecánicas mejoran con el contenido en partículas.

5.3 Materiales compuestos reforzados con fibras.

Estos son los materiales compuestos más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final.

La fase dispersa consta de fibras que es una microestructura muy anisotrópica, fibras de 2-10 μm de diámetro y 1 mm de longitud. Por tanto, tienen una longitud de tres órdenes de magnitud mayor que el diámetro.

Sin embargo el módulo de elasticidad no cambia con el tamaño del material, solo depende de la naturaleza de las fuerzas que unen los átomos pero la resistencia mecánica si cambia con la forma de la muestra. Probetas de menor tamaño (más estrechas) presentan resistencias comparativamente más altas. La explicación se debe a que disminuye la probabilidad de encontrar defectos en la escala macro-microscópica que son principales responsables que aparezca la grieta y la fractura.

Esto fue demostrado en 1920 por Griffith al ensayar con barras de vidrio de diámetro progresivamente inferior. Por esto las fibras presentan mejores prestaciones mecánicas porque la probabilidad de encontrar defectos disminuye y además se anclan en la matriz que rodea uniformemente a las fibras. Por esto, desde el punto de vista de las propiedades mecánicas son aconsejables las fibras de diámetro lo menor posible.

Sin embargo, por razones de coste y de seguridad se limita a 1 μm de diámetro porque fibras menores (con longitudes también menores) son más caras y se pueden liberar en el mecanizado de las piezas originando partículas fibrosas en suspensión (como los asbestos) que pueden causar problemas de salud.

De forma general las matrices son matrices cementosas, resinas epoxi o poliéster. Las propiedades mecánicas son generalmente anisotrópicas y varían mucho según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material: ordenadas uniaxialmente, parcialmente ordenadas y desordenadas.

Las matrices poliméricas para los materiales compuestos reforzados con fibras suelen ser plásticos termoestables del tipo resinas de poliéster insaturadas o resinas epoxi. Las primeras fueron las que se comenzaron a utilizar hace unos 40 años, son más baratas, fáciles de maquinar, fáciles de curar a temperatura. Las resinas epoxi son ahora más comunes por las ventajas que presentan: mayor resistencia, menores modificaciones en la etapa de curado, mejor adherencia a las fibras, y se pueden utilizar a temperaturas más altas que las resinas de

poliéster. Las resinas epoxi son la base de los materiales compuestos basados en fibra de carbono o de poliaramida.

Actualmente, cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más baratos y de menor impacto medioambiental. Para ello se están reforzando muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco.

Cada vez se utilizan más en la industria del automóvil donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95 % de la masa de un coche debe ser reutilizable. Además, si las fibras de refuerzo vienen de vegetales, el impacto medioambiental total en la fabricación de las piezas es mucho menor.

Table 1 *Properties of some natural fibers.*

Fiber	Density (g/cm ³)	Moisture content (wt. %)	Elongation at break (%)	Fracture stress (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Cotton	1.5	–	7.0-8.0	287-597	5.5-12
Jute	1.3	12.6	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	10.0	2.7-3.2	345-1035	27.6
Hemp	–	10.8	1.6	690.0	–
Sisal	1.5	11.0	2.0-2.5	511-635	9.4-22
Coir (fruit)	1.2	8.0	30.0	175.0	4.0-6.0
Bamboo	0.8	–	–	391-1000	48-89
Soft wood	1.5	–	–	1000.0	40.0
Pineapple	–	11.8	1.6	413-1627	34.5-8
Ramie	1.5	8.0	3.6-3.8	400-938	61.4-1

Tabla 5.1. Propiedades de algunas fibras naturales que se utilizan en materiales compuestos.

En la tabla 5.1 se dan los valores de la densidad, contenido de humedad, elongación antes de la ruptura, resistencia a la ruptura y módulo de Young de diferentes fibras naturales.

Se está dedicando mucho esfuerzo de investigación en la fabricación de materiales compuestos completamente “ecológicos” o “verdes”. En ellos se refuerza la matriz del polímero natural (p. Ej. celulosa) con fibras de origen vegetal (p. Ej. fibra de lino). Ya existen polímeros comerciales completamente “verdes” y se prevé que su producción aumente en el futuro (aunque actualmente los precios son mayores que los análogos obtenidos del petróleo).

Hay varios tipos de materiales compuestos para la construcción y desde el tiempo de los egipcios se conocía el adobe que consiste en una mezcla de fibra de paja en una matriz de arcilla (con agua) para dar una pasta moldeable de la que se hacían ladrillos (con la forma deseada) y que se ha utilizado como cemento en construcciones. Actualmente, el hormigón es un material más importante y más usado como componente estructural en la construcción.

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

hay otros como los de alto contenido en aluminio). La pasta moldeable original se forma por la agitación física de las cantidades adecuadas de cemento Portland, agua, aditivos, adiciones, agregado fino y grueso. La pasta del cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas.

El hormigón es un material compuesto y tiene una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tensión. 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).

5.4 Historia del Pykrete

En 1942, Geoffrey Pyke logró convencer a Lord Mountbatten de su proyecto, un barco de hielo. La idea de un barco de hielo impresionó a los Estados Unidos y Canadá. El buque de 18 m de largo y 1000 toneladas fue construido en un mes en el lago Patricia en las montañas rocosas canadienses. Sin embargo fue construido con hielo normal y no con Pykrete. El barco le costó poco más de un verano en derretirse, pero el hielo normal había demostrado ser lo suficientemente fuerte.

Más tarde Pyke aprendió de un informe de Herman Mark, el cual afirmaba que el hielo hecho con agua mezclada con fibras de madera formaba un conglomerado mucho más fuerte que con agua pura.

Entonces, un día, Pyke entregó un informe que decía le resulta difícil de entender, redactado por Herman Mark, antiguo profesor de química física en Viena, que había perdido su puesto allí cuando los nazis invadieron Austria, y encontró un refugio en el Instituto Politécnico de Brooklyn. Como experto en plásticos, sabía que muchos de ellos eran frágiles en estado puro, pero pueden ser endurecidos por las fibras de inserción, tales como la celulosa en ellos, así como de concreto puede ser reforzada con alambres de acero. Mark y su asistente, Walter P. Hohenstein, agitaron un poco de algodón o pulpa de madera en agua y encontraron que estas adiciones habían fortalecido el hielo de forma espectacular.

Cuando se leyó su informe, se paralizaron todos los experimentos con hielo puro y se estableció un laboratorio para la fabricación y las pruebas de hielo reforzado. Operaciones Combinadas requirió una gran tienda de carne de cinco pisos subterráneos debajo de mercado de Smithfield y se construyó un túnel de viento grande para congelar la pasta de madera húmeda. Las pruebas pronto confirmaron los resultados de Mark y Hohenstein. Los bloques de hielo que contienen fibras de madera fueron tan fuerte como el hormigón. Por ello en honor del iniciador del proyecto, llamamos a este hielo reforzado "Pykrete".

La primera prueba a la que fue sometido el Pykrete fue el de impacto. Le dispararon una bala de fusil en un bloque vertical de hielo puro, el bloque se desmenuzó en pedazos, en el bloque de Pykrete la bala hizo un pequeño cráter y se incrustó sin causar ningún daño.

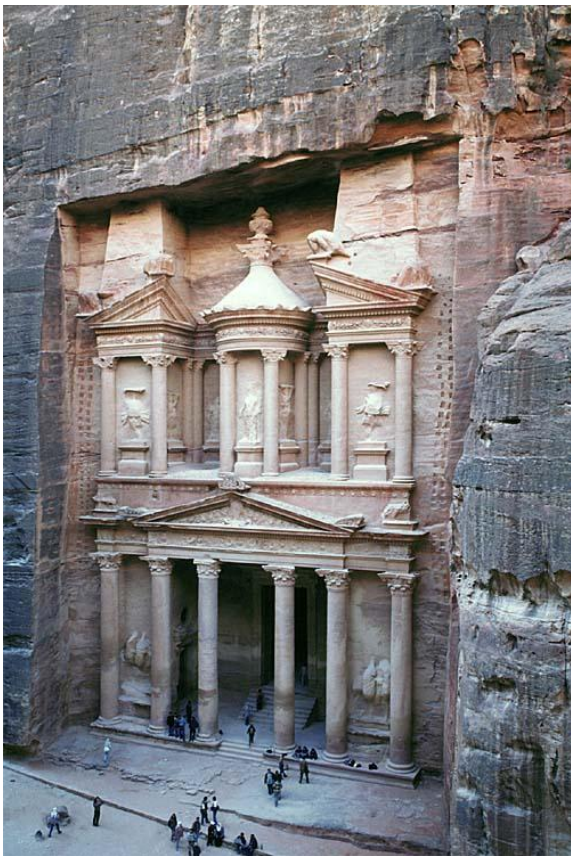
El Pykrete tenía una finalidad, construir un portaaviones enorme, en realidad se parecía más a una isla flotante, por ello los experimentos de Perutz y sus colaboradores en el mercado de

carne de Smithfield en la ciudad de Londres se llevó a cabo con gran secreto. Las pruebas confirmaron que Pykrete era mucho más fuerte que el hielo puro.

A pesar de estas pruebas, el proyecto Habacuc nunca se puso en marcha debido a las limitaciones de fondos.

5.5 Características del Pykrete.

Durante la historia se han utilizado los materiales abundantes en la naturaleza para utilizarlos para la construcción. Un claro ejemplo lo encontramos en una de las siete maravillas del mundo, en Petra, donde se ha esculpido en la propia montaña.



El PYKRETE es un material compuesto formado por una matriz continua formada por hielo en un 86% que rodea una fase dispersa a base de fibras de madera (serrín) en un 14% en peso.

Basado en criterios de la microestructura, el Pykrete es un material compuesto reforzado con fibras.

El Pykrete tiene algunas propiedades interesantes, en particular, su tasa de fusión relativamente lenta (debido a la baja conductividad térmica), su resistencia y dureza.

El Pykrete lo podemos considerar un material compuesto, puesto que está formado por dos materiales diferentes que presentan algunas propiedades físicas determinadas en su conjunto superiores a las de los materiales que lo constituyen. Un ejemplo es el adobe reforzado con paja, la misión de ésta en el adobe es reducir el agrietamiento interno del barro producido por

su secado al sol. Por tanto la paja no tiene una misión resistente estructural dentro del adobe, sino, disminuir su agrietamiento con el consiguiente aumento de la resistencia mecánica.

Otro ejemplo sería el hormigón armado, el hormigón, por sí solo resiste bien las compresiones pero tiene un mal comportamiento en los esfuerzos de tracción, sin embargo, el hormigón armado, gracias a las propiedades resistentes del acero ante los esfuerzos de tracción, hace que se puedan realizar elementos estructurales que se encuentren sometidos a flexión, y por tanto, traccionados en alguna zona.

Un ejemplo que ilustra lo anterior: consideramos una probeta paralelepédica de 100x100x400 mm como se indica en la figura 5.2.

La resistencia a flexión ensayado en cuatro puntos para el hielo es 1,37 MPa

Sin embargo para una probeta hecha de Pykrete (hielo y serrín) obtendríamos un material compuesto capaz de soportar 4,34 MPa a flexión, se incrementaría unas tres veces la resistencia que del hielo. Mediante otras adiciones de fibras naturales como fibras de bambú, la carga a flexión que resiste es de 11,30 MPa, se observa que se incrementa ocho veces la resistencia del hielo y entorno a dos o tres veces la que resiste el Pykrete.

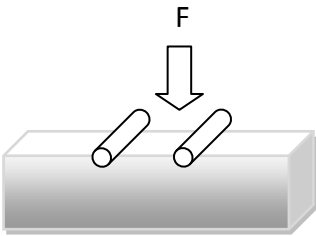
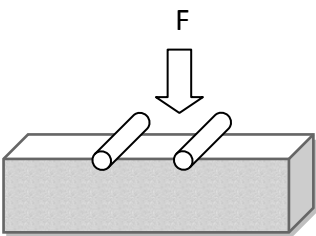
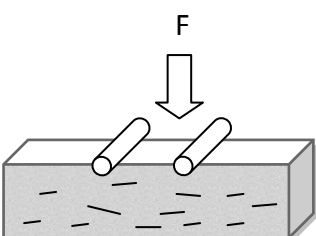
	$\frac{4550 \text{ N} \times 300 \text{ mm}}{100^3} = \mathbf{1,37 \text{ MPa}}$ $F_{\text{máxima}} = 4,55 \text{ KN}$
	$\frac{14480 \text{ N} \times 300 \text{ mm}}{100^3} = \mathbf{4,34 \text{ MPa}}$ $F_{\text{máxima}} = 14,48 \text{ KN}$
	$\frac{37680 \text{ N} \times 300 \text{ mm}}{100^3} = \mathbf{11,30 \text{ MPa}}$ $F_{\text{máxima}} = 37,68 \text{ KN}$

Fig.5.2 Resultados ensayos flexión.

Su resistencia a compresión es de **15,50 MPa** aunque sabemos que es mayor.

Su resistencia a flexión es de **4,34 MPa**. (1,37 MPa Hielo puro)

Su densidad 960 kg/m³

Gran facilidad de reparación de fisuras y grietas.

Resistencia a las heladas: MUY BUENA

Moldeabilidad: BUENA

Baja energía embebida

Baja huella de CO₂

Muy económico.

6. Estado del arte

6.1 Materiales

Los materiales utilizados en la fabricación del Pykrete son agua y fibras de madera básicamente, en nuestro caso hemos utilizado agua potable con bajo contenido en sodio y serrín utilizando dosificaciones distintas.

6.1.1 Agua

El agua es el componente principal del Pykrete, empleándose desde el amasado del mismo como para su vinculación con las fibras de madera y su objetivo final de transmisión de cargas.

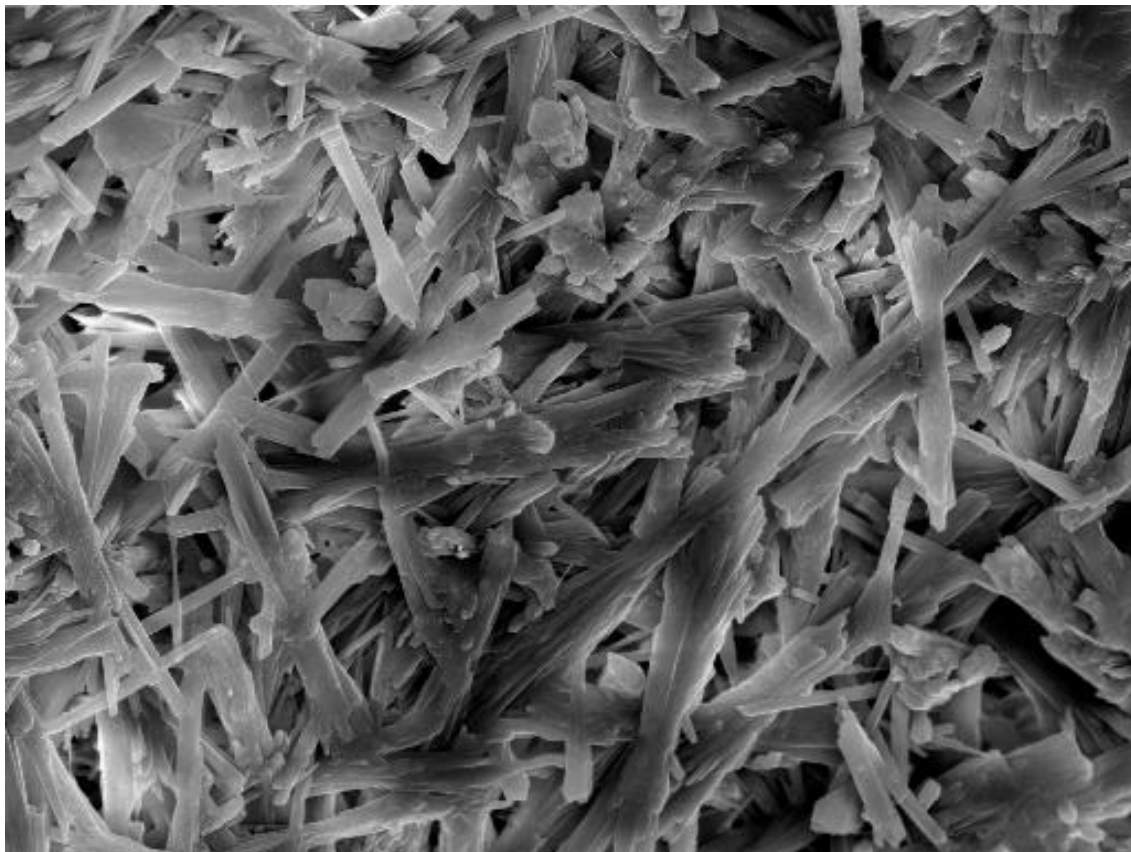
El agua en el Pykrete tiene las siguientes misiones: la primera es la de hidratar y saturar las fibras de madera para que exista una unión entre el hielo y las fibras y la segunda es actuar como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable.

El agua debe encontrarse limpia de impurezas con el fin de no exista ningún vínculo que impida la adherencia de las partículas de serrín con la masa de hielo. El agua de mar en ningún caso podrá ser utilizada para tal fin siempre que se acredite su viabilidad en laboratorio o proceda de desaladora con capacidad para producir agua potable con baja cantidad en sodio.

6.1.2 Fibras de madera

Las fibras son elementos de diferentes longitudes dependiendo de la granulometría, largas si las comparamos con su sección que se incorporan para darle unas determinadas propiedades.

Estas fibras en el caso del Pykrete deben ser consideradas en el cálculo debido a que proporcionan una resistencia extra a la masa ante sollicitaciones pero también debe de considerarse por aportar una mejor relación de propiedades como evitar la fisuración por el aumento de volumen experimentado por la masa, incremento de la resistencia a la abrasión, al impacto...



40µm

Se pueden utilizar todos los tipos de fibras existentes, la utilización de uno u otro debe estar asociada a la resistencia que deba aportar, a la economía, a la disponibilidad...

Se podrán disponer de fibras de distinta naturaleza y dimensiones siempre que exista adherencia entre las fibras y el hielo. Se debe realizar un ensayo del laboratorio que nos indique si la adherencia es buena y si la resistencia de las fibras también lo es para unas sollicitaciones determinadas.

6.1.2.1 Bamboo

El bambú es uno de los materiales usados desde más remota antigüedad por el hombre para aumentar su comodidad y bienestar. En el mundo de plástico y acero de hoy, el bambú continúa aportando su centenaria contribución y aun crece en importancia.

La variedad en las características mecánicas del bambú como cilindro hueco sigue siendo tan grande por la densidad del material dentro de las paredes del tubo y los discos del nudo perpendicular.

La sección transversal de bambú se diferencia en una zona oscura exterior de aproximadamente el 30% y una zona blanca porosa interior del 70%. La acumulación de fibras de alta resistencia en la zona externa hace que sea efectivo a las fuerzas de tracción, flexión y cortante, teniendo gran elasticidad. Al igual que la madera, al aumentar la carga, se reduce el módulo de la elasticidad (5-10%). Para el cálculo en construcciones se puede utilizar un módulo de elasticidad de 2.000 kN/cm².

La zona exterior tiene una firmeza a la tracción de dos a tres veces más que el interior. En los nudos esta firmeza es moderada, puesto que las fibras se cruzan, teniendo que los nudos disminuyen la firmeza a la tracción. También con palos de más de 5 años su firmeza a tracción se reduce.

Sin embargo, la fuerza de compresión aumenta con la edad. Los resultados de una prueba determinaron que: las cañas de bamboo de 6 años tienen una resistencia de compresión 2,5 veces más, que una de un año. Las secciones de un tubo con nudos tienen unas características mecánicas sobre el 8% más altas que los que no tienen nudo, al aplicarle cargas de compresión paralelas a las fibras. Con la presión perpendicular a las fibras los nudos absorben la fuerza hasta en un 45%, comparándolos con los que no tienen nudo. Los aspectos que influyen en la densidad de los vasos para aumentar la firmeza a la presión son la altitud de la zona y la edad de los tallos.

La firmeza a las acciones de la fuerza cortante es más alta con los tallos delgados que con los gruesos, debido a la proporción de fibras de alta resistencia por la sección transversal. Las secciones con nudos tienen una firmeza a las fuerzas cortante 50% más alta que las intersecciones.

El bamboo demuestra una eficiente capacidad de carga a las fuerzas de compresión. En este material no ocurre un rompimiento sorpresivo de sus paredes por efecto de las sobrecargas de compresión. En las pruebas, es más frecuente que ocurran fisuras por el efecto de corte. En las secciones del bamboo que resisten altas cargas de las fuerzas de corte, se rellenan con hormigón para su refuerzo.

Debido al alto grado de ácido silícico de la corteza y a su alta densidad, se puede clasificar al bambú en como un material poco inflamable. La susceptibilidad al fuego depende en particular de las posiciones de las unidades de la construcción, las dispuestas en horizontal son menos susceptibles que las verticales o las diagonales. Con un palo de bambú horizontal las llamas se extienden como anillo al nudo siguiente. Allí el fuego se apaga, ya que la llama no puede conseguir el nudo ni el diafragma al próximo entrenudo.

Si el entrenudo estalla en grietas transversales o longitudinales, el oxígeno entrante contribuye con la combustión, con las grietas transversales se reduce la capacidad de carga.

Si uno llena un palo de bambú con agua y se coloca fuego debajo de ella, esta puede llegar a hervir, debido a que el palo de bamboo puede resistir temperaturas de 400°C.

Algunas de las características más destacadas del bamboo son:

- Es ligero y flexible
- Tiene un bajo costo
- Tiene una buena resistencia sísmica
- Tiene una baja resistencia a los huracanes
- Tiene una baja resistencia a la lluvia
- Tiene una baja resistencia a los insectos

6.1.2.2 Madera de níspero

La madera del níspero es fuerte y duradera, los dinteles de madera que formaron el apoyo de las vigas en los templos mayas se han encontrado intactos en las ruinas. También se ha utilizado para traviesas de ferrocarril, pisos, carretas nativas, mangos de herramientas, lanzaderas y gobernantes.

Entre las propiedades de la madera existen ventajas como la facilidad de labrado, la baja densidad, su resistencia mecánica, sus propiedades térmicas y acústicas, y su belleza.

Los inconvenientes son la alta combustibilidad, la inestabilidad volumétrica, y su putrefacción

Propiedades físicas:

Anisotropía: la madera es un material anisótropo, o sea que se comporta diferente según la dirección de las fibras. Es más fácil cepillarla en el sentido de las fibras que transversalmente. Con el corte sucede lo opuesto.

Resistencia: la madera posee excelentes cualidades para el trabajo a tracción, debido a su estructura de fibras direccionales. Alcanza el máximo de resistencia cuando la tracción tiene dirección paralela al sentido de las fibras, pero cuando es perpendicular a las fibras, presenta una resistencia mínima. La flexión es un esfuerzo compuesto por dos fuerzas, una de tracción y otra de compresión. En este caso, la madera tiene una resistencia máxima cuando la fuerza actuando es perpendicular a la fibra, y la resistencia mínima es cuando los esfuerzos son paralelos al hilo.

Flexibilidad: la madera acepta ser curvada o doblada mediante calor, humedad, o presión. Es más fácil doblar una madera verde que una seca. Las maderas blandas son más flexibles que las duras.

Dureza: es una de las propiedades de la madera por la cual, la dureza se relaciona directamente con la densidad, a mayor densidad, mayor dureza.

Peso específico o densidad: depende del contenido de agua de la madera.

Conductividad térmica: en la madera seca, quedan células que perdieron el agua y encierran burbujas de aire que hacen que se comporte como aislante térmico. Es más aislante en el sentido de la fibra, que en el sentido perpendicular a la fibra.

Propiedades térmicas:

Como todos los materiales, la madera dilata con el calor y contrae al descender la temperatura, pero este efecto no suele notarse pues la elevación de temperatura lleva consigo una disminución de la humedad, como esto último es mayor, lo otro es inapreciable. También son mayores los movimientos en la dirección perpendicular a las fibras.

La transmisión de calor dependerá de la humedad, del peso específico y de la especie. No obstante, se efectúa mejor la transmisión en la dirección de las fibras que en las direcciones perpendiculares a ésta

Propiedades eléctricas:

La Madera seca es un buen aislante eléctrico, su resistividad decrece rápidamente si aumenta la humedad. Para un grado de humedad determinado la resistividad depende de la dirección (es menor en la dirección de las fibras), de la especie (es mayor en especies que contienen aceites y resinas) y del peso específico (crece al aumentar el mismo).

Propiedades mecánicas:

Dureza: es la resistencia opuesta por la madera a la penetración o rayado. Interesa por lo que se refiere a la facilidad de trabajo con las distintas herramientas y en el empleo de la madera en pavimentos. Es mayor la dureza del duramen que la de la albura y la de la madera vieja que la de la joven.

Resistencia a la Compresión: influyen varios factores: La humedad: en general, por debajo del punto de saturación de las fibras (30%), la resistencia a compresión aumenta al disminuir el grado de humedad, no obstante, a partir de ese % la resistencia es prácticamente constante. También la dirección del esfuerzo tiene una gran repercusión en la resistencia a compresión de la madera, la máxima corresponde al esfuerzo ejercido en la dirección de las fibras y va disminuyendo a medida que se aleja de esa dirección. Su resistencia a compresión paralela a la fibra es elevada, alcanzando valores característicos de 16 a 23 N/mm². Su resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la de la dirección paralela. Sus valores característicos varían entre 4,3 y 5,7 N/mm², lo que representa la cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra.

La rotura en compresión se verifica por separación de columnillas de madera y pandeo individual de éstas.

Cuanto mayor es el peso específico, mayor es su resistencia.

Resistencia a la Tracción: la madera es un material muy indicado para el trabajo a tracción, su uso en elementos sometidos a este esfuerzo sólo se ve limitado por la dificultad de transmitir a dichos elementos los esfuerzos de tracción.

También influye el carácter anisótropo de la madera, siendo mucho mayor la resistencia en dirección paralela (oscilan entre 8 y 18 N/mm²) que en perpendicular a las mismas (del orden de 30 a 70 veces menos que en la dirección paralela). La rotura en tracción se produce de forma súbita, comportándose la madera como un material frágil.

La resistencia no estará en función del peso específico.

Resistencia al Corte: es la capacidad de resistir fuerzas que tienden a que una parte del material se deslice sobre la parte adyacente a ella. Este deslizamiento, puede tener lugar paralelamente a las fibras; perpendicularmente a ellas no puede producirse la rotura, porque

la resistencia en esta dirección es alta y la madera se rompe antes por otro efecto que por éste. En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento. Sus valores característicos (por deslizamiento) varían entre 1,7 y 3,0 N/mm²

Resistencia a la Flexión: puede decirse que la madera no resiste nada al esfuerzo de flexión en dirección radial o tangencial. No ocurre lo mismo si está aplicado en la dirección perpendicular a las fibras.

Un elemento sometido a flexión se deforma, produciéndose un acortamiento de las fibras superiores y un alargamiento de las inferiores. Al proyectar un elemento de madera sometido a flexión no sólo ha de tenerse en cuenta que resista las cargas que sobre él actúan, es necesario evitar una deformación excesiva, que provoque un agrietamiento en el material de revestimiento o alguna incomodidad de cualquier otro tipo, bastaría con aumentar el canto de la pieza aumentando la rigidez.

Elasticidad: el módulo de elasticidad en tracción es más elevado que en compresión. Este valor varía con la especie, humedad, naturaleza de las solicitaciones, dirección del esfuerzo y con la duración de aplicación de las cargas. En la práctica se utiliza un único valor del módulo de elasticidad para la dirección paralela a la fibra. Su valor varía entre 7.000 y 12.000 N/mm².

Hendibilidad: propiedad que presenta la madera de poderse romper a lo largo de las fibras, por separación de éstas, mediante un esfuerzo de tracción transversal. Es una cualidad interesante cuando se trata de hacer leña, en cambio es perjudicial cuando la pieza ha de unirse por clavos o tornillos a otras adyacentes.

6.1.3 Aditivos

Como línea de trabajo futura se podrían estudiar sustancias que ayuden al agua a congelarse antes... que aporte un punto de fusión más bajo al hielo para que fragüe antes.

También se puede estudiar la posibilidad de añadir colorantes a las fibras y crear tonalidades diferentes.

Otro apartado muy interesante es la de añadir cohesionantes, que aportan cohesión a la mezcla cuando esta no dispone de los finos necesarios. Son derivados de la celulosa lo que nos aportará una cantidad extra de fibras de granulometría muy pequeña comparable a los finos en el hormigón.

7. Memoria de Laboratorio.

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de materiales del departamento de construcciones arquitectónicas de la escuela técnica superior de ingeniería de la edificación.

11/04/2011

El lunes 11 de abril se han realizado 4 probetas.

3 probetas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm.

- 1) En la primera se ha rellenado de agua (probeta patrón)
- 2) En la segunda se ha rellenado de agua y paja en una baja dosificación.
- 3) En la tercera probeta se ha llenado de agua y paja en una alta dosificación.

Por último se ha realizado una probeta de dimensiones 100x100x400mm donde nos disponemos a ensayar el material. Se han dispuesto fibras de madera de granulometría gruesa y agua.



12/04/2011

Como datos de partida obtenemos los datos característicos del hormigón en masa.

Hormigón convencional flexión = 1,1 – 2,8 MPa

Hormigón convencional compresión = 11,3 - 28 Mpa

Se ha realizado el ensayo de las probetas en el laboratorio, disponemos de una probeta prismática de dimensiones 100x100x400mm, el ensayo a flexión de dos puntos ha dado un resultado de tensión máxima a la rotura de 25.76KN, para saber que resistencia dispone nuestro material realizamos el cálculo correspondiente.

Los valores obtenidos en las 3 probetas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm no han sido valorados debido a que al realizar los ensayos, los rodillos de la máquina de ensayo producía

una disminución de la sección resistente debido a que disponían de gran conductividad térmica lo que no permitía realizar el ensayo con la precisión requerida.

Sin embargo si son de relevancia los resultados obtenidos en la probeta grande de dimensiones 100 x 100 x 400 mm.

HIELO REFORZADO CON FIBRAS DE MADERA DE NISPERERO.

Resistencia a flexión: $(25760 \text{ N} \times 330 \text{ mm}) / (100^3) = 8,5 \text{ N/mm}^2 = 8,5 \text{ MPa}$

NOTA: Como se observa la separación de los rodillos es 330mm debido a que la máquina de ensayo se encontraba mal configurada.

Resistencia a compresión: $91,4 \text{ KN} = 91400 \text{ N} / (100 \times 100) = 9,14 \text{ N/mm}^2 = 9,14 \text{ MPa}$





Hielo reforzado con fibras.



Tensión: MPa

Deformación: mm

Debemos ser críticos y decir que lo que hemos hecho no ha sido Pykrete, simplemente hemos hecho un hielo reforzado con fibras naturales, no significa que este mal simplemente vamos a seguir con el estudio para intentar aumentar las propiedades mecánicas de este material.

13/04/2011

El miércoles 13/04/2011 se han realizado las dosificaciones del Pykrete, cuyos componentes fundamentales son agua (que después se convertirá en hielo) y una matriz de naturaleza natural (serrín).

Adicionalmente la masa se refuerza con distintos tipos de fibras como podría ser esparto, fibras procedentes de la madera o bamboo. La dosificación en peso de la masa de Pykrete son un 14% de serrín y un 86% de agua.

Así para hacer 5kg de Pykrete se ha necesitado 0.700 kg de serrín y 4,3 kg de agua con un amasado intenso.





Se han realizado 3 probetas, una de Pykrete en masa, otra de Pykrete reforzado con fibras de madera y otra reforzada utilizando fibras procedente del bambú.





14/04/2011



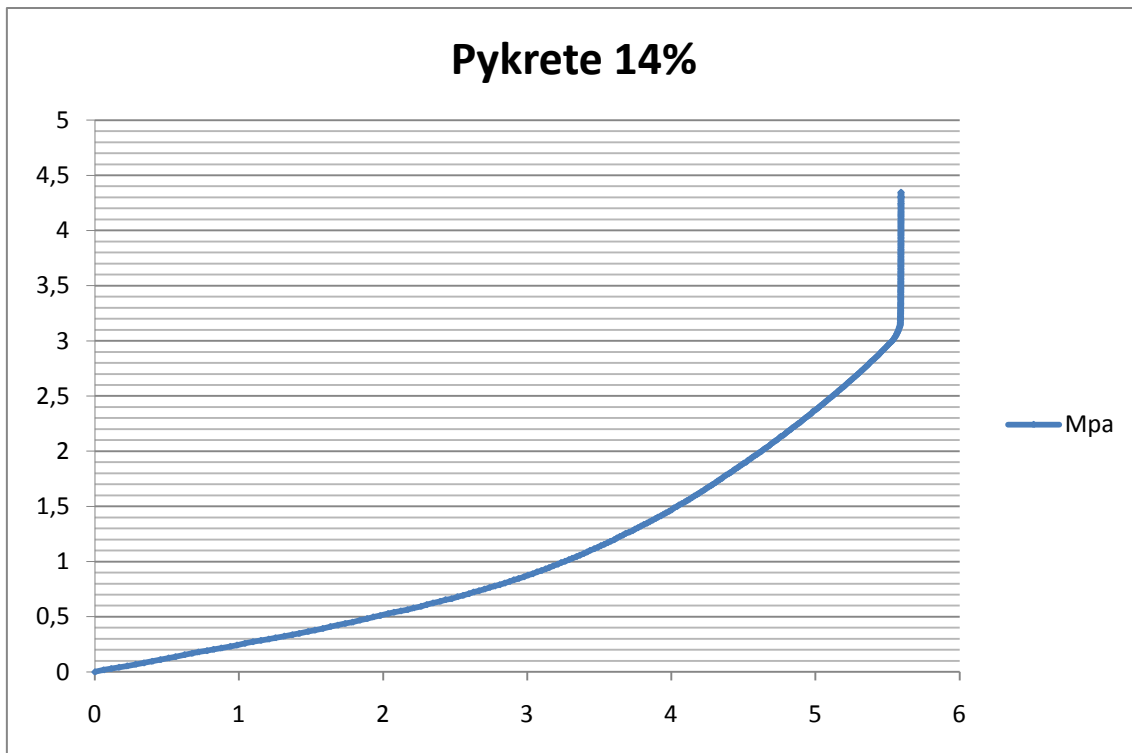
Se ha realizado las pruebas de carga a las probetas.

- 1) Se ha comenzado con la probeta hecha de Pykrete 14 (14% serrín, 86% agua). Los resultados han sido:

Resistencia a compresión 155,26 kN = 15,526 MPa

Resistencia a flexión 14,48 kN = 4,344 MPa

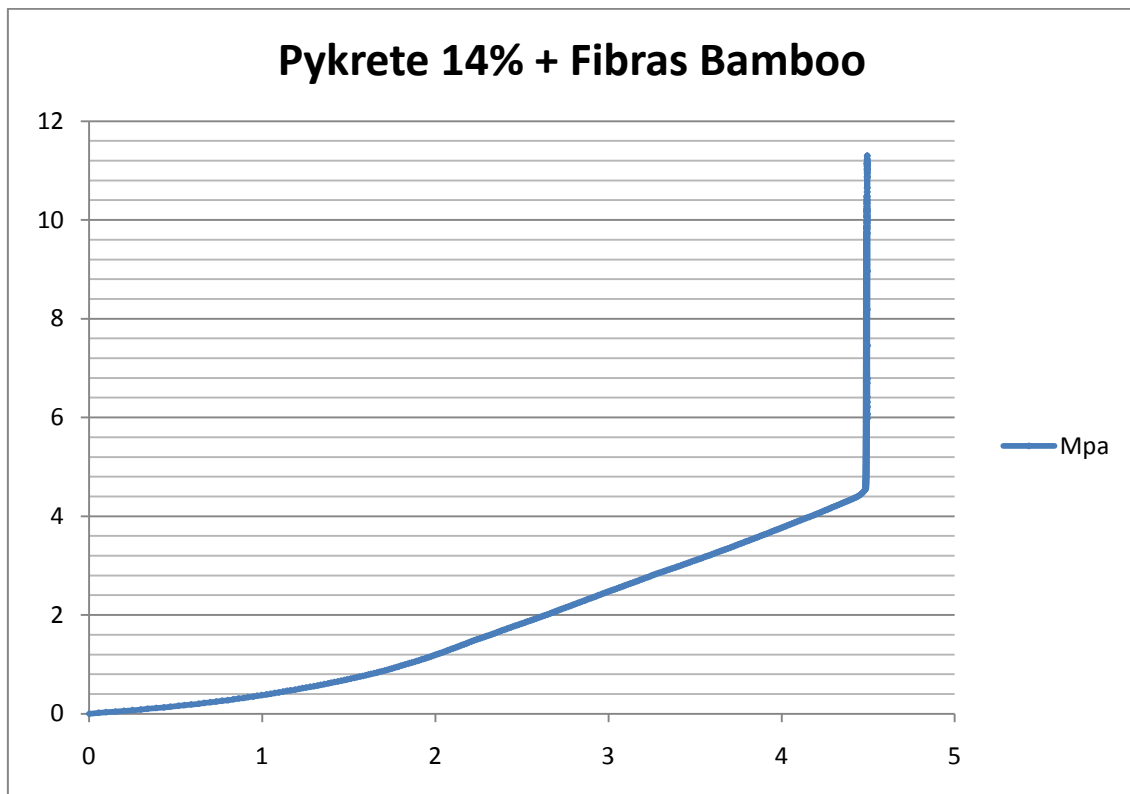




Observaciones: El material ha sufrido una rotura frágil.

- 2) Para la probeta realizada Pykrete14 + fibras de bamboo los resultados han sido:
Resistencia a compresión 153,9 kN = 15,39 MPa
Resistencia a flexión 37,68 kN = 11,304 MPa

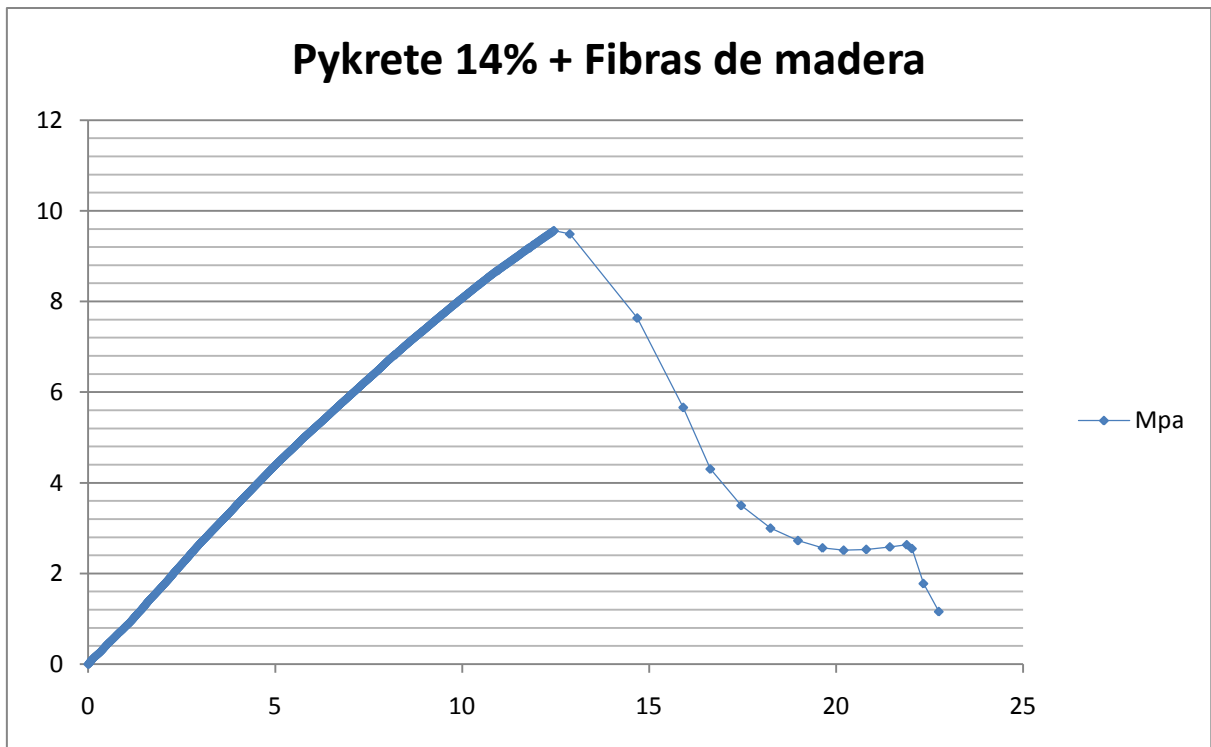




NOTA: El palpador se quedó corto para el ensayo.

- 3) Para la probeta realizada con Pykrete14 + fibras de madera los resultados han sido:
Resistencia a compresión 161,3 kN = 16,13 MPa
Resistencia a flexión 31,89 kN = 9,567 MPa





Probeta ensayada a compresión. Al ensayar la probeta a compresión, no hemos conseguido su rotura completa ya que al hacer presión con las planchas metálicas el hielo se convertía en agua lo que impidió efectuar el ensayo completo.

18/04/2011

Se ha realizado 4 probetas.

- 1) Probeta patrón sólo agua. (HIELO)
- 2) Probeta de PY 4. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 4 son un 4% de serrín y un 96% de agua.
- 3) Probeta de PY 4 + Fibras de esparto + Bamboo. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 4 son un 4% de serrín y un 96% de agua. Hemos añadido 30g de fibras de esparto y 80g de fibras de bamboo.
- 4) Probeta de PY 14 + Fibras de esparto + Bamboo. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 14 son un 14% de serrín y un 86% de agua. Hemos añadido 60g de fibras de esparto y 120g de fibras de bamboo.

19/04/11

Se ha realizado las pruebas de carga a las probetas.

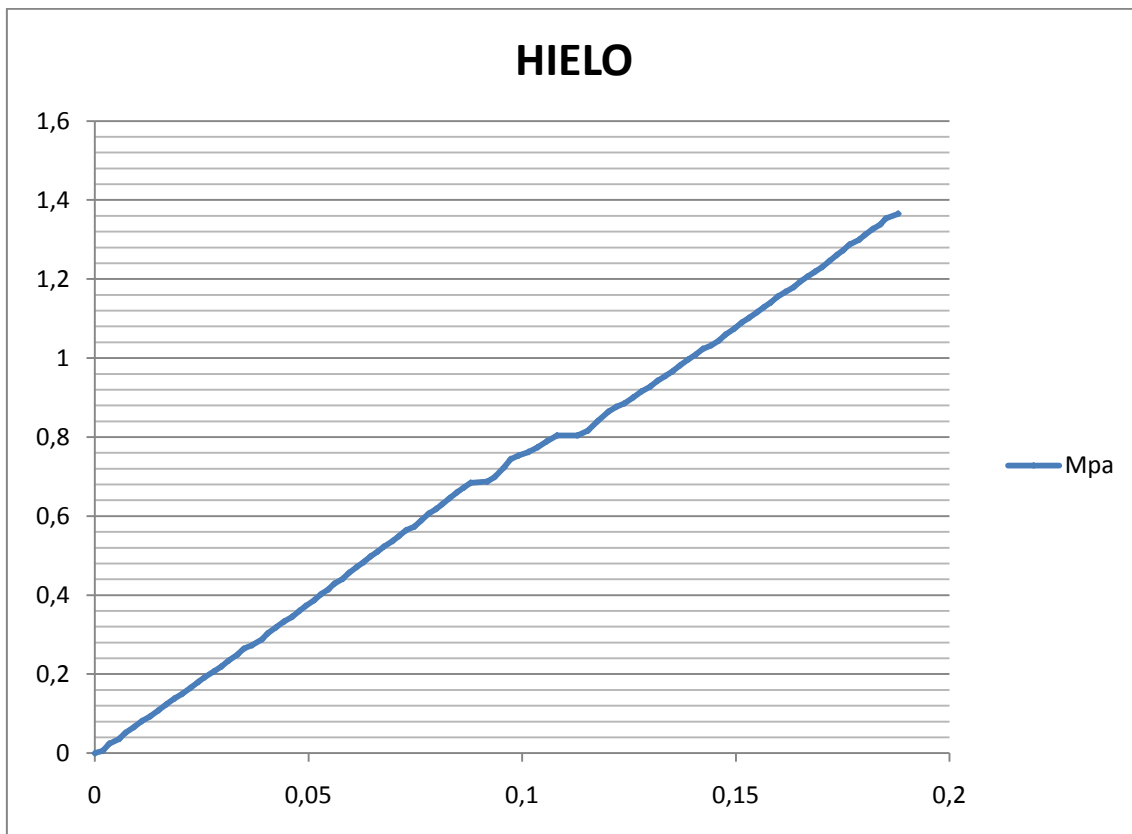
Se ha comenzado con la probeta patrón. (HIELO). Los resultados han sido:

- 1) Probeta patrón sólo agua. (HIELO)



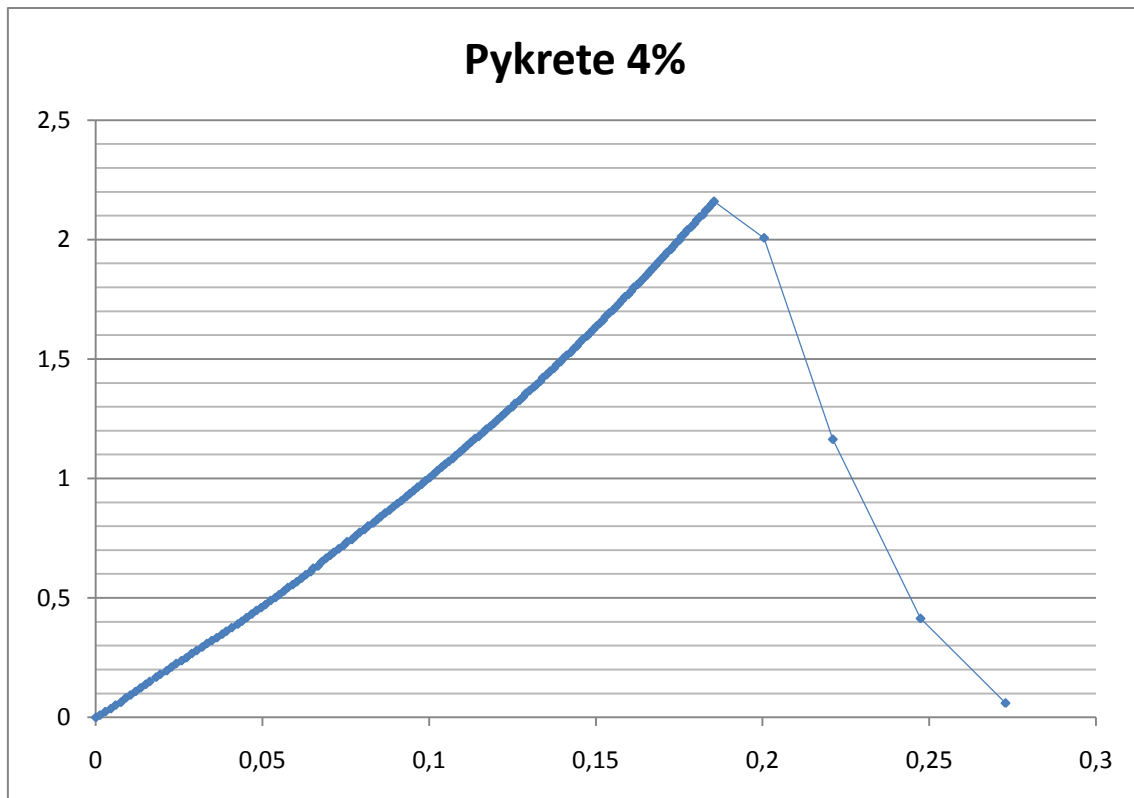


Resistencia a flexión 4,55 kN = 1,365 MPa
Observaciones: Rotura frágil



- 2) Probeta de PY 4. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 4 son un 4% de serrín y un 96% de agua.



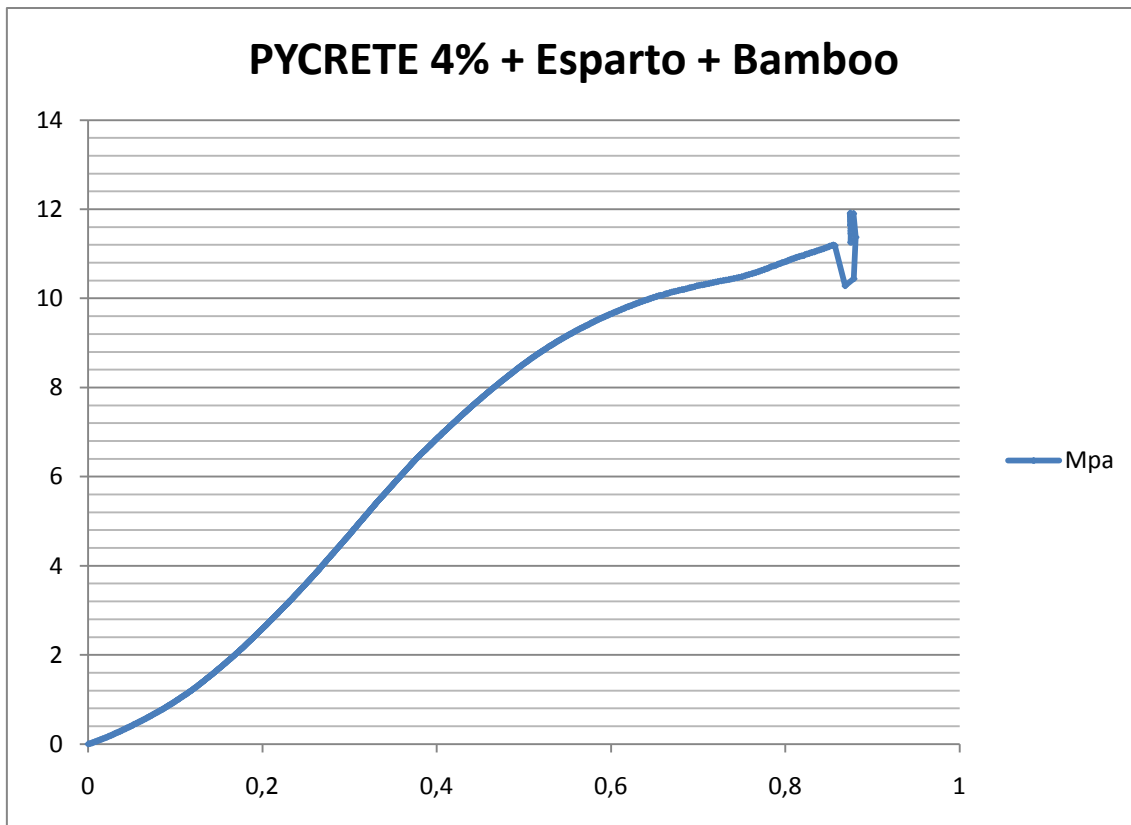


Resistencia a flexión 7,22 kN = 2,17 MPa

Observaciones: la dificultad de obtener un material homogéneo con dosificaciones menores a la saturación debido a que la solución precipita.

- 3) Probeta de PY 4 + Fibras de esparto + Bamboo. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 4 son un 4% de serrín y un 96% de agua. Hemos añadido 30g de fibras de esparto y 80g de fibras de bamboo.





Resistencia a flexión 39,72 kN = 11,916 MPa

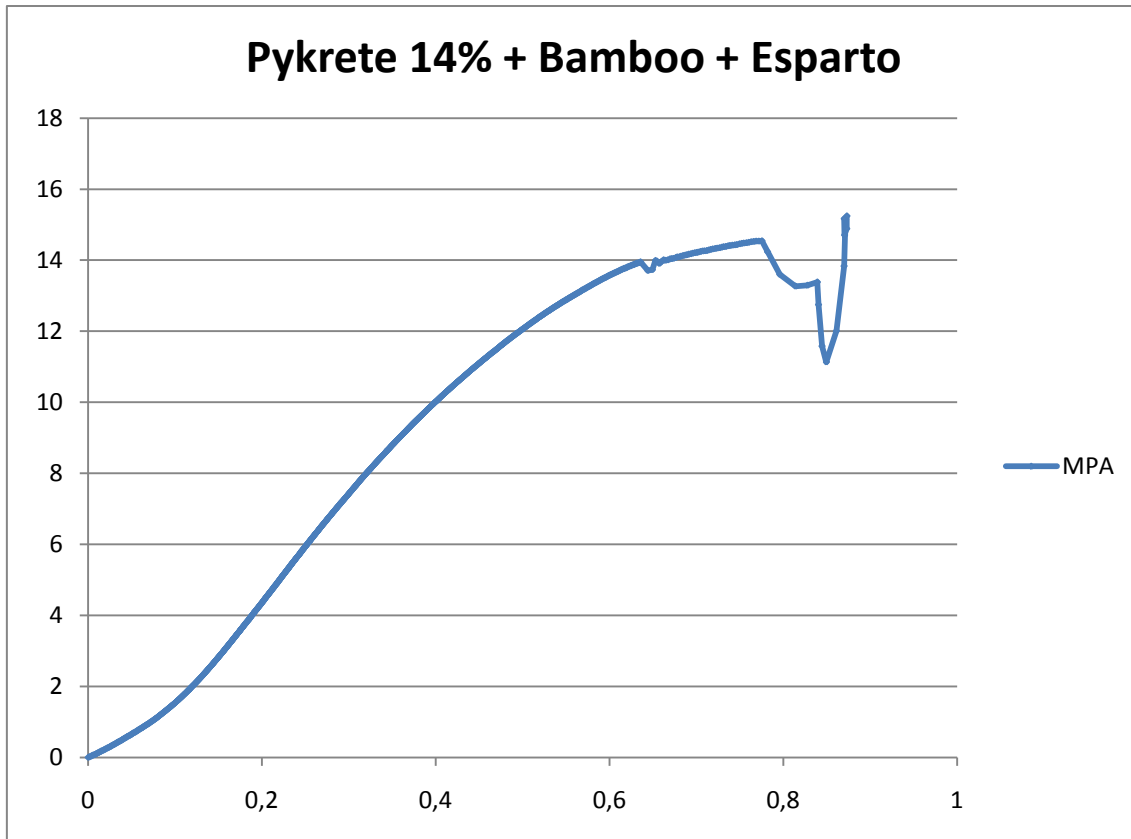
Observaciones: rotura dúctil, gran deformación antes de la rotura.

- 4) Probeta de PY 14 + Fibras de esparto + Bamboo. La dosificación en peso de la masa de Pykrete 14 son un 14% de serrín y un 86% de agua. Hemos añadido 60g de fibras de esparto y 120g de fibras de bamboo.

Resistencia a flexión 51,05 kN = 15,315 MPa







Observaciones: rotura dúctil, gran deformación antes de la rotura.

Resumen dosificaciones y valores obtenidos en los ensayos.

Pykrete 4%		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,200
Agua		4,800
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	7,22	2,17
Compr.		

Pykrete 14%		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,700
Agua		4,300
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	14,48	4,34
Compr.	155,26	15,526

Pykrete 14% + Fibra madera		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,700
Agua		4,300
Fibra madera		0,360
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	31,89	9,567
Compr.	161,3	16,13

Pykrete 14% + Fibra bamboo		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,700
Agua		4,300
Fibra bamboo		0,360
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	37,68	11,304
Compr.	153,9	15,39

Pykrete 4% + Esparto + Fibra bamboo		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,200
Agua		4,800
Esparto		0,030
Fibra bamboo		0,080
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	39,72	11,916
Compr.		

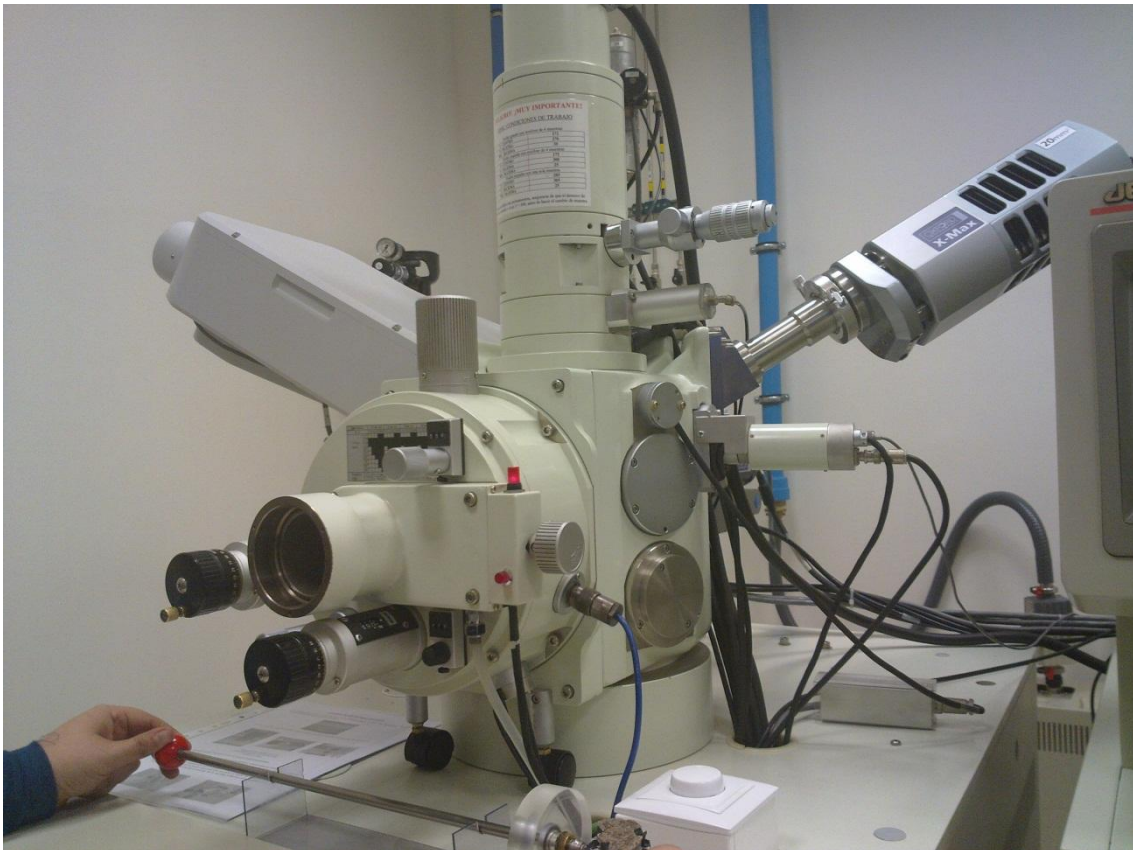
Pykrete 14% + Esparto + Fibra bamboo		
DOSIFICACIÓN		Kg/m3
Serrín		0,700
Agua		4,300
Esparto		0,060
Fibra bamboo		0,120
Estado endurecido		
24 h	Fuerza(KN)	Resistenc(Mpa)
Flexión	51,05	15,315
Compr.		

Se ha procedido a la extracción de un testigo para la obtención de una fotografía electrónica para ver cómo se encuentran unidas las partículas que componen el Pykrete. El procedimiento es sencillo, hemos vertido una lechada de escayola sobre la superficie del material y se ha contenido mediante un molde.

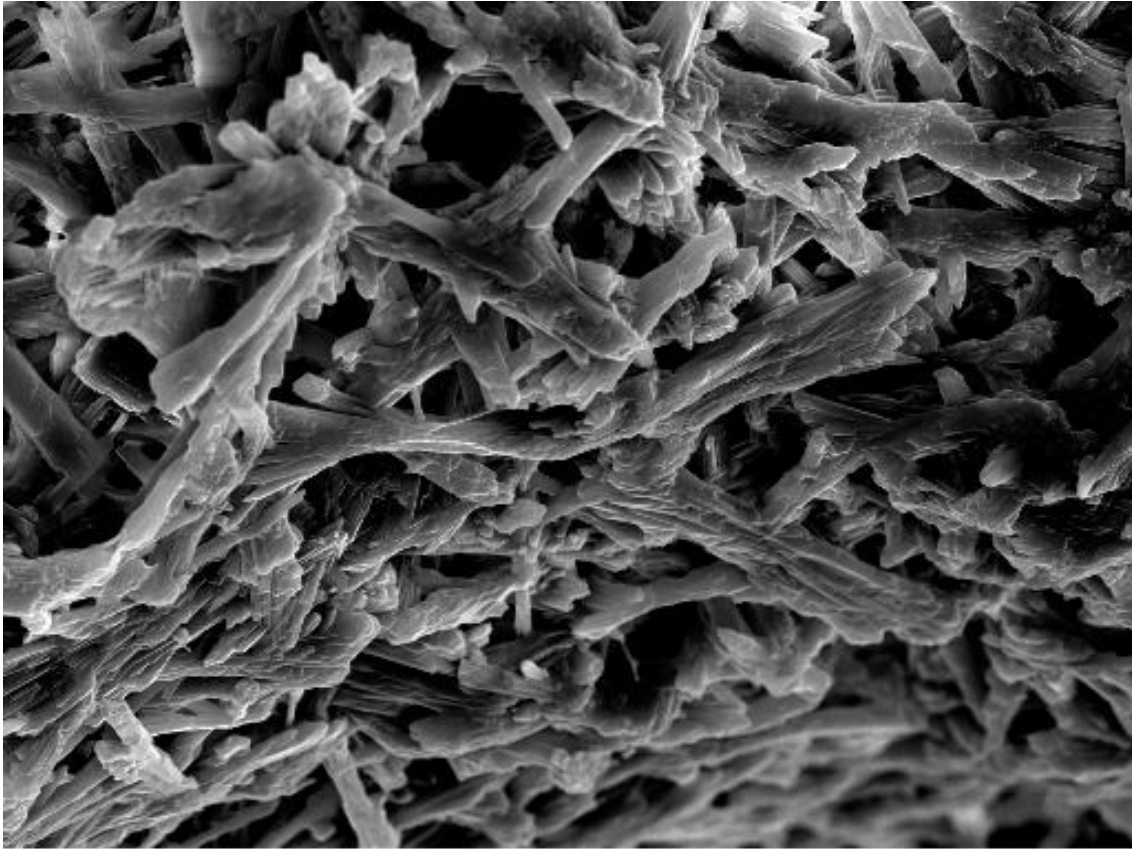


Más tarde hemos dejado descongelar la pieza y se ha obtenido el contra molde. Hemos llevado la muestra al laboratorio, en donde le han dado un baño de oro para que la muestra pueda ser utilizada en el microscopio electrónico ya que la superficie debe ser conductora de la electricidad.



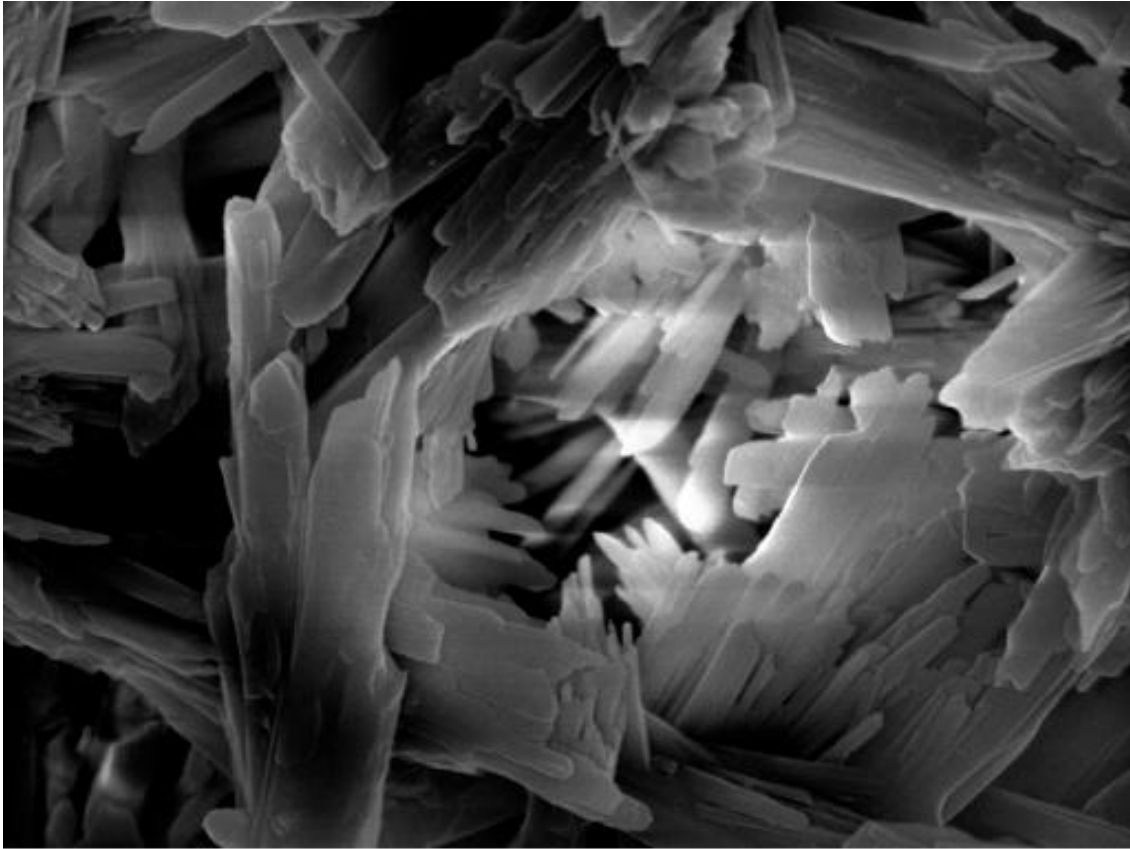


Los resultados en el laboratorio de la fotografía electrónica son las siguientes:

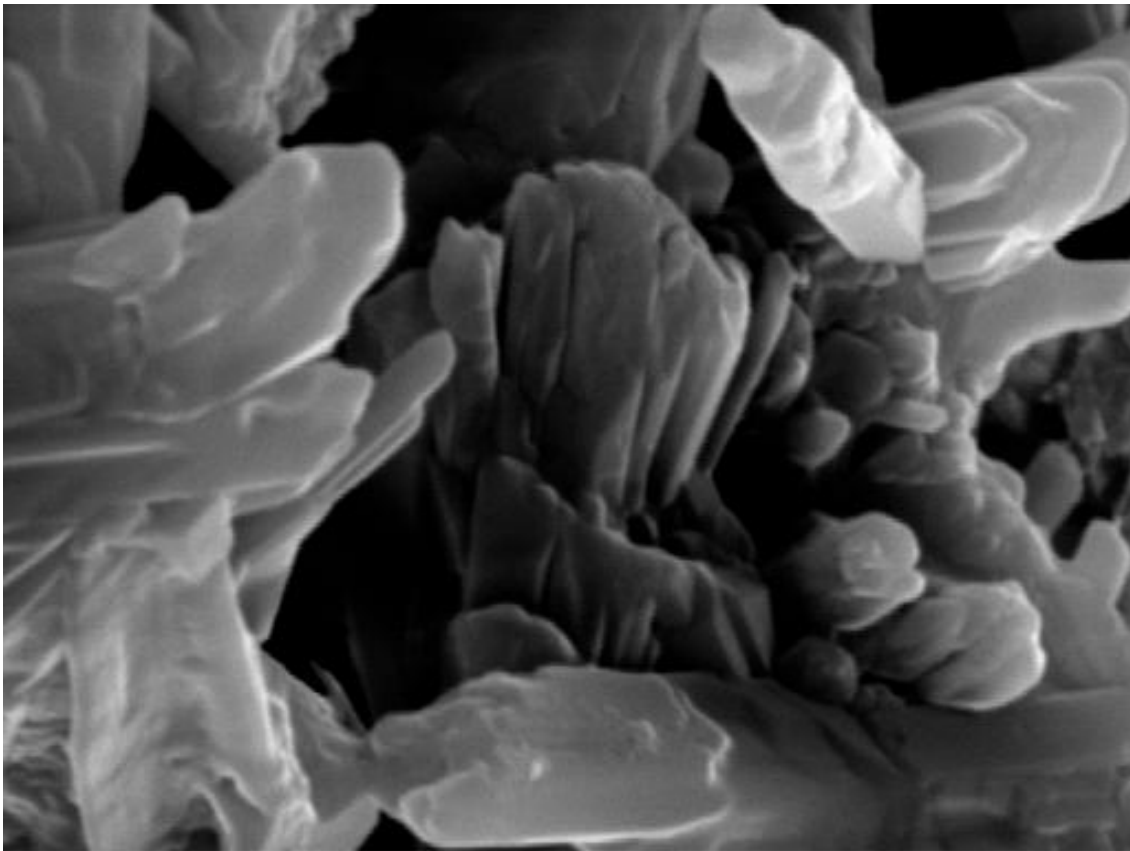


40µm

En esta fotografía podremos observar la gran cantidad de fibras dispuestas en todas las direcciones, de forma que estas partículas forman un encamisado interno que atan la masa en todas las direcciones

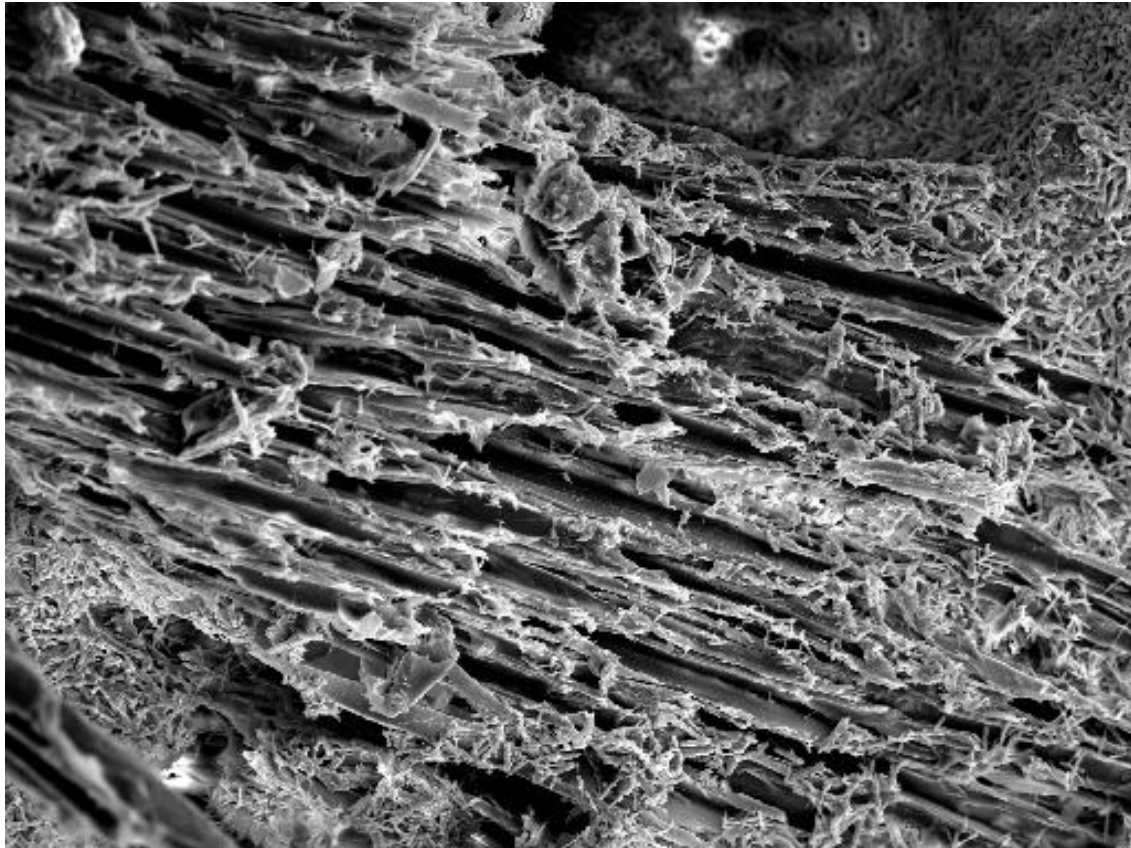


10µm

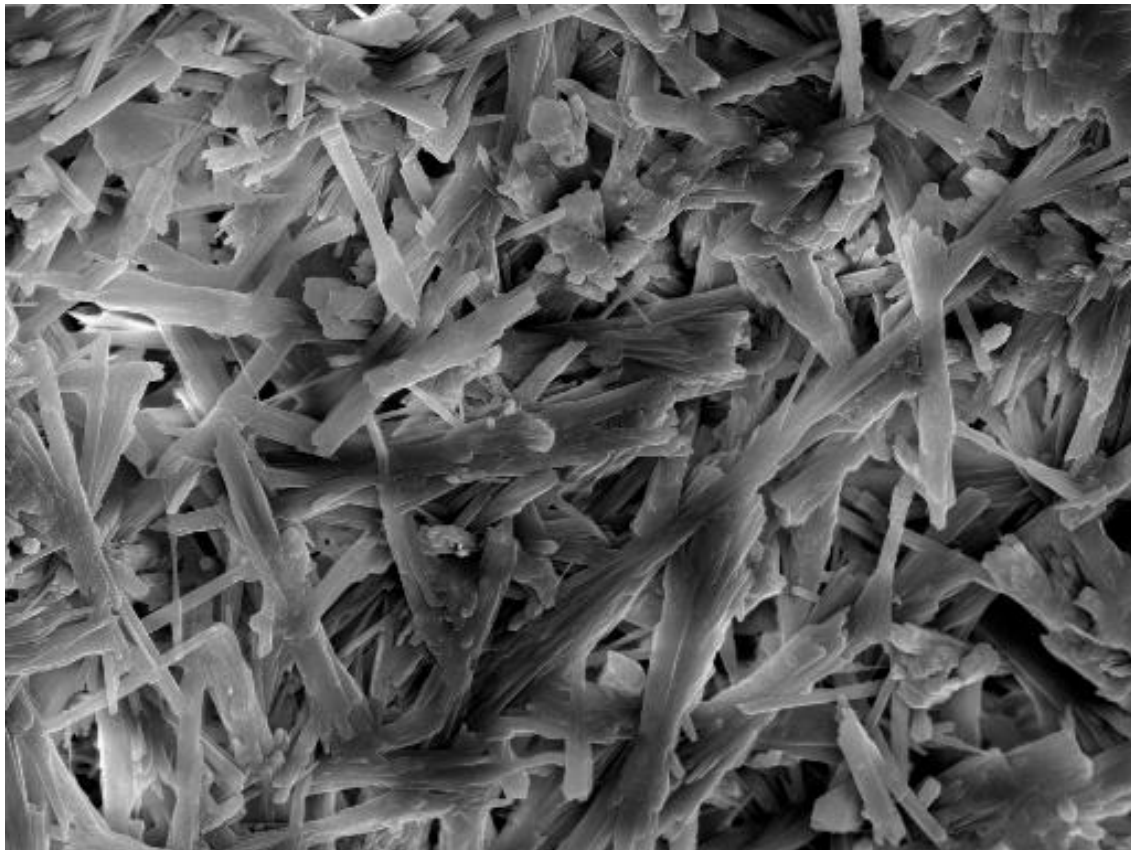


6µm

En las fotografías anteriores hemos obtenido un nivel de aumento mayor que la anterior donde se aprecia con claridad la rugosidad y su apariencia fibrosa dentro de la masa. La rugosidad aumenta la superficie de contacto lo que permite un aumento en las propiedades mecánicas del material compuesto. Dentro de cada estructura fibrosa vemos que existe una naturaleza laminar lo que produce mejoras en el comportamiento de estas fibras.



En la fotografía anterior vemos una zona del material en donde existe una dirección predominante. Esta zona podría estar situada en la zona de rotura del material, al producirse el colapso de la probeta a unas determinadas solicitaciones, se ha producido sobre el material unos cráteres característicos, también pensamos en la posibilidad de que estos cráteres sea consecuencia de una limpieza manual provocada en el laboratorio a la hora de la extracción de la probeta. Pensamos en esta posibilidad ya que aunque en la fotografía se observa una gran cantidad de cráteres en la misma dirección existen zonas como en la esquina superior derecha en donde no se observan estas características.



40 μ m

En esta fotografía se observan claramente la gran densidad de fibras y como se encuentran dispuestas en todas las direcciones, lo que ayuda a que trabaje toda la sección del material como una sola (un ejemplo para que se entienda sería como los cercos en vigas y pilares de hormigón armado, encargados de encamisar o comprimir la sección para que trabaje mejor a las solicitaciones de cortante fundamentalmente)

8. Resultados y análisis.

En este apartado se estudian las propiedades y características del Pycrete. Se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio así como otras propiedades obtenidas en bibliografía.

Día Ensayo	Compresión	Flexión	
1 Hielo+Fmadera	9,14	8,50	Mpa
2 Pycreto14	15,53	4,34	Mpa
2 Py14+Bamboo	15,39	11,30	Mpa
2 Py14+Madera	16,13	9,57	Mpa
3 Hielo	6,00	1,37	Mpa
3 PY4	-	2,17	Mpa
3 PY4+ESPART+BAMB	-	11,92	Mpa
3 PY14+ESPART+BAMB	-	15,32	Mpa

*Valor obtenido de bibliografía específica

La resistencia a compresión se ha duplicado gracias a la aplicación de agua con serrín. Y ha aumentado mucho la resistencia a flexión. La resistencia a compresión ha sido un valor difícil de probar ya que ninguna de las probetas llegó a romper simplemente se deshacía antes de romper.

La adherencia del bamboo es inferior pero su resistencia es la mayor de todas las fibras naturales, por ello el objetivo que nos hemos marcado ha sido conseguir fibras más finas para aumentar significativamente la adherencia y disminuir el grado de incertidumbre que disponíamos con fibras mayores ya que existía gran probabilidad de que no se encontraran en toda la pieza.

Resistencia a compresión.

En los ensayos se han obtenido unos resultados muy superiores gracias a la adición de fibras en la fase dispersa del Pykrete. Así, en los ensayos a compresión realizados con las probetas testigo de hielo se ha obtenido un resultado muy inferior a las probetas reforzadas con fibras a nivel microscópico. Además las probetas con fibras disponían de mejores características térmicas ya que (al igual que en las maderas cuando se produce un incendio la parte calcinada protege al interior de la pieza) en las probetas cuando la capa superficial se deshacía las partículas de fibras de madera protegían y aislaban térmicamente al resto de la masa lo que reducía drásticamente su transmisividad térmica.

En las probetas de hielo reforzadas con fibras de madera a nivel macroscópico han mejorado sustancialmente las propiedades mecánicas del hielo puro aunque sigue existiendo una gran diferencia a las reforzadas a nivel microscópico, las cuales disponen de características potencialmente buenas.

Resistencia a flexión.

Las mayores resistencias a flexión las aportan la dosificación adecuada de fibras, de tamaño microscópico y macroscópico. Como se observa en la tabla las mayores resistencias se han obtenido con una masa de Pykrete al 14%, fibras de bamboo y esparto.

Las fibras de bamboo y del esparto tienen una gran resistencia a tracción. Las fibras del esparto son finas, largas y muy resistentes lo que permiten que aguanten gran resistencia a flexión. El problema que hemos detectado es que son fibras muy resistentes y muy finas, cuando existe una deformación actúan a modo de cuchillos que ejercen una gran sollicitación a cortante intersticial que cortan la probeta. La adherencia de estas fibras ha sido magnífica debido a la gran longitud que tienen frente a su diámetro muy reducido.

Una de las ideas que hemos tenido a cerca de esto es diseñar una maya o cables con esparto a modo de armaduras a tracción que se dispongan dentro de la masa y le aporten de todas las ventajas del esparto reduciendo el efecto cortante sobre la masa de Pykrete.





9. Determinación de las restricciones de proyecto, esfuerzos y restricciones, ponderar soluciones.

9.1 Restricciones de proyecto

El Pykrete no es un material estándar y su aplicación está muy limitada por la naturaleza del propio material. Este material necesita de bajas temperaturas para que funcione correctamente pero esto no significa que sea un material que no debemos de utilizar, simplemente se debe de hacer un estudio de su viabilidad para un proyecto específico al igual que con el resto de materiales.

9.1.1 Entorno

Para el buen resultado del material elegido, como ya hemos resaltado antes debe de existir unas temperaturas eminentemente bajas. Dependiendo de la durabilidad que disponga el proyecto a ejecutar podremos elegir este material.

Así un proyecto ejecutado en Groenlandia podría funcionar bien por un tiempo ilimitado mientras que en países como Dinamarca podría ser una solución para proyectos temporales inferiores a un año.

9.1.2 Normativa

Debido a que es un material novedoso y desconocido no existe normativa de aplicación.

9.1.3 Presupuesto

Precio auxiliar descompuesto

Coste de unidad de mezcla o conjunto de materiales u operaciones que por sí mismas no constituyen una unidad de obra, en el que se especifica su descomposición.

Descripción

m3. Pykrete de hielo 14% de resistencia característica 15 MPa con serrín procedente de serrería de granulometría fina, confeccionado con hormigonera de 300l de capacidad.

Costes directos

Rendimiento	Descripción	Precio	Importe
0,1344	t. Serrín calidad	36 €/t	4,8384 €
0,8256	t. Agua potable	1.70 €/t	1,40 €
1	h. Hormigonera 300l.	1,24 €/h	1,24 €
1	h. Peón ordinario construcción	10,35 €/h	10,35 €
			17,828 €

Obtención de los rendimientos:

Datos: Densidad= 960 kg/m³ 14% Peso Serrín 86% Peso Agua

- 960 x 0,14= 0,1344 Kg de serrín/m³
- 960 x 0,86= 0,8256 Kg de agua/m³

Precios: Obtenidos de la base de datos del Instituto Valenciano de la Edificación a exceptuar el precio del serrín el cual lo hemos obtenido al pedir un presupuesto a un aserradero.

Este dato lo vamos a comparar con el que nos aporta la base de datos del instituto valenciano de la edificación el cual es:

PBPC.3abaa m3 H 25 plástica TM 20 IIa	72,66
Hormigón preparado de resistencia característica 25 N/mm ² , de consistencia plástica y tamaño máximo del árido 20 mm, en ambiente normal IIa , transportado a una distancia máxima de 10 km, contados desde la central suministradora. Se consideran cargas completas de 6 ó 9 m ³ y un tiempo máximo de descarga en obra de 45 minutos.	

La diferencia que existe en el precio es de 54,83€. Es una diferencia de 4 veces menor al precio del hormigón con características similares a compresión y mejores a tracción.

10. Futuras líneas de investigación

Pensamos que sería muy interesante seguir estudiando el Pykrete no solo como material estructural. Pensamos en el Pykrete como solución de futuro a numerosas soluciones constructivas.

Se ha realizado un arduo proceso de investigación, el cual ha sido limitado en recursos pero muy provechoso en resultados y valoraciones. Una de las primeras investigaciones que se debe realizar como apuesta de futuro por este material es el estudio de posibilidades para integrar otras armaduras en forma de cuerdas o mallas, al igual que las armaduras de acero en el hormigón, capaces de absorber mayor cantidad de esfuerzos a tracción y por tanto a flexión con la seguridad requerida.

Un ejemplo de investigación de futuro sería la de formalizar nuevos modelos constructivos los cuales dispongan de los elementos estructurales dispuestos al exterior y la formación de cámaras aisladas dentro de estas estructuras. Esto permite que en el interior de la edificación pueda existir una temperatura permanente mayor con el confort exigido.

11. Bibliografía

Fernandez, John. Material Architecture. Emergent materials for innovative buildings and ecological construction. USA. Architectural Press. 2006

Barnett, Diana. A primer on sustainable building. Rocky Mountain Institute. 1995

Olgyay, Victor. Design with climate: Bioclimate Approach to Architectural Regionalism. University Press, Princeton. 1963

Joseph A. Demkin. Environmental Resource Guide. The American Institute of Architects, John Wiley & Sons. New York. 1996.

James & James. A green vitruvius. Principles and practice of sustainable architectural design. The THERMIE programme of the comisión of the european communities. 1999. London.

Institut Cerdà. Guia de l'Edificació sostenible. Institut idelfons cerdà. 1999. Barcelona.

Mollison, Bill. Introduction to permaculture. Tagari Publications. 1991.

McDonough, William. Cradle to cradle. Remaking the way we make things. North Point Press. 2002.

Hawken, Paul. Ecology of commerce. Harperbusiness. 1994

Lynch, Kevin. Echar a perder. Un análisis del deterioro. GG. 2008

<http://www.wikipedia.org>

Ignacio de Oteiza San José. Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste. 1993.