



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

GRADO EN INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN PROYECTO FINAL DE GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y EL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE MORTEROS EPOXÍDICOS MODIFICADOS

Proyectistas: Castillo Bonilla, Ricardo

Milla Coronado, Laura

Directoras: Lacasta Palacio, Ana María

Haurie Ibarra, Laia

Convocatoria: Marzo 2010

RESUMEN

El objetivo de este Proyecto Final de Grado es mejorar el comportamiento de los morteros epoxídicos a altas temperaturas. Para ello se someten a estudio diferentes formulaciones de mortero epoxídico, partiendo de una base de mortero simple sin aditivos e incorporando diferentes retardantes de llama, con la finalidad de obtener morteros poliméricos con un mejor comportamiento al fuego sin que se vean afectadas las propiedades mecánicas de estos.

Con este fin se han realizado ensayos mecánicos y de reacción al fuego para así poder caracterizar el comportamiento de las diferentes probetas y estudiar los diferentes comportamientos según su formulación.

Para la caracterización mecánica, sometimos las diferentes probetas a flexotracción con carga puntual centrada y posteriormente, las mitades obtenidas a compresión. Para estudiar la adherencia del mortero epoxídico con el mortero de cemento portland, se prepararon probetas mixtas (mitad de mortero de cemento portland y la otra mitad de los diferentes morteros epoxídicos) a flexotracción con carga bipuntual. Los ensayos mecánicos se realizaron tanto a temperatura ambiente como a 80°C, ya que es alrededor de esta temperatura donde tiene lugar la transición vítrea y sufren un cambio viscoelástico pudiendo producir una disminución de las propiedades del mortero, así como la pérdida de adherencia a las superficies aplicadas.

En cuanto al estudio del comportamiento al fuego, sometimos probetas al cono calorimétrico y al ensayo de goteo, para poder observar los diferentes tiempos de ignición, así como la cantidad de calor liberada por éstas.

Tras estos ensayos, comprobamos cómo la presencia de retardantes de llama en los morteros epoxídicos no altera negativamente el comportamiento de este a temperatura ambiente y mejora las propiedades mecánicas del mortero epoxídico a la temperatura de transición vítrea. Además pudimos observar que se retrasa el tiempo de ignición y que la cantidad de calor liberada disminuye.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	CONOCIMIENTOS PREVIOS	5
2.1	Introducción a los morteros epoxi	5
2.2	Introducción a los retardantes de llama	8
3	PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	10
3.1	Introducción.....	10
3.2	Materiales utilizados.....	10
3.3	Tipo de probetas y su geometría.....	15
3.4	Fabricación de las probetas	16
3.4.1	Probetas de mortero de cemento portland.....	17
3.4.2	Probetas de mortero epoxi sin modificar	22
3.4.3	Probetas de mortero epoxi modificado.....	26
3.4.4	Probetas mixtas.....	32
4	ENSAYOS REALIZADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS DIFERENTES FORMULACIONES DE MORTERO EPOXI.....	35
4.1	Ensayos realizados a temperatura ambiente.....	37
4.1.1	Procedimiento de ensayo para probetas simples a flexotracción	37
4.1.2	Procedimiento de ensayo para probetas simples a compresión.....	48
4.1.3	Procedimiento de ensayo para probetas mixtas a flexotracción	50
4.2	Ensayos realizados a 80°C	52
4.2.1	Proceso de calentamiento.....	52
5	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	53
5.1	Flexotracción de probetas simples.....	53
5.1.1	Temperatura ambiente	53
5.1.2	Temperatura de 80°C	59
5.1.3	Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C	62
5.2	Compresión probetas simples.....	64
5.2.1	A temperatura ambiente.....	64
5.2.2	Temperatura de 80° C.....	68
5.2.3	Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C.....	71

5.3	Compresión vs flexotracción	72
5.4	Flexotracción probetas mixtas	73
5.4.1	A temperatura ambiente.....	73
5.4.2	Temperatura de 80° C.....	74
5.4.3	Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C	75
6	MICROSCOPIA ÓPTICA CON MICROSCOPIO PETROGRÁFICO	78
6.1	Funcionamiento y partes del Microscopio Petrográfico	78
6.2	Preparación de láminas finas para microscopía petrográfica	81
6.3	Resultados obtenidos	82
7	ENSAYOS RELIZADOS PARA DETERMINAR LA REACCIÓN AL FUEGO	84
7.1	Ensayo de Goteo	84
7.2	Ensayo del cono calorimétrico	89
8	RESULTADOS ENSAYO REACCIÓN AL FUEGO	91
8.1	Ensayo de Goteo	91
8.2	Ensayo del Cono Calorimétrico	92
9	Conclusiones	95
10	Bibliografía	97
11	Agradecimientos	99

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Proyecto Final de Grado, es mejorar el comportamiento de los morteros epoxídicos a altas temperaturas. Este tipo de morteros son de aplicación muy común en el mundo de la construcción debido a su baja retracción y su buena adherencia a la mayoría de materiales empleados en este sector.

A temperatura ambiente este tipo de morteros muestra un buen comportamiento mecánico, así como una buena adherencia y resistencia química. Pero sin embargo, este comportamiento se ve alterado con la temperatura, ya que a temperaturas comprendidas entre los 60 y 90 °C, se produce una transición vítrea que supone un cambio viscoelástico que puede producir una disminución de las propiedades del mortero, así como la pérdida de adherencia a las superficies aplicadas. Además, debido a la naturaleza orgánica del propio material, al alcanzar temperaturas superiores a los 400 °C, se produce la descomposición de la resina, acompañada de la aparición de la llama y una abundante cantidad de humo denso, pudiendo favorecer la propagación del incendio.

Para poder estudiar todas estas características, sometemos a estudio diferentes formulaciones de mortero epoxídico, partiendo de una base de mortero simple sin aditivos y incorporando diferentes retardantes de llama, con la finalidad de obtener morteros poliméricos con un mejor comportamiento a altas temperaturas.

Para ello se ha dividido el estudio en dos bloques:

- Un primero dedicado a la caracterización mecánica a compresión y flexotracción, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas relativamente altas, y la adherencia en función de la temperatura y la composición del mortero.

- Y un segundo bloque, enfocado a la reacción del mortero epoxídico modificado frente al fuego, para poder determinar los diferentes tiempos de ignición y extinción así como la cantidad de calor generada y la autoextinguibilidad de los materiales utilizados.

Por último, se analizan y comparan los resultados obtenidos de las diferentes formulaciones estudiadas, y se observan mediante microscopía petrográfica con el fin de evaluar las uniones entre el mortero epoxídico y el mortero de cemento portland.

2 CONOCIMIENTOS PREVIOS

2.1 *Introducción a los morteros epoxi*

El hormigón es vulnerable al entorno ya que sufre degradaciones como fisuras, grietas, carbonatación y oxidación del acero reforzante, todas ellas causadas por los agentes externos. Todas estas patologías pueden causar daños graves a la estructura. Para realizar este tipo de reparaciones, el hormigón convencional no es adecuado ya que no cumple los requisitos de curado rápido, poca retracción y resistencia química. Es por eso que en la década de los 50 se comenzaron a utilizar los morteros con resinas epoxi como reparadores.

La mejora de las propiedades para nuevas aplicaciones de estos morteros, ha llevado a desarrollar nuevas formulaciones resistentes a la humedad, la llama, mejorando las propiedades mecánicas, así como un sistema de curado rápido o la posibilidad de hacer uso tanto en vertical como en horizontal.

La mayoría de los morteros epoxi usados en la construcción están formados a base de mezclar áridos de granulometría especial con una formulación epoxi compuesta de polímeros termoestables resultantes de la reacción entre una resina epoxi líquida con curado a temperatura ambiente y un endurecedor que es el encargado de convertir los plásticos en compuestos termoestables. Durante esta reacción tiene lugar un entrecruzamiento entre cadenas con enlaces primarios. Este tipo de enlace, que se produce en la reacción, depende del agente utilizado, de forma que los endurecedores son los que determinan la resistencia mecánica, química y al calor así como las propiedades eléctricas del producto final.

Algunas de las aplicaciones de los morteros epoxi son:

- Reparaciones de hormigón expandido y de nido de abeja
- Recubrimientos para suelos de alta dureza y resistencia al agua, a productos químicos y a la abrasión
- Capas de fino espesor no resbaladizas para carreteras y puentes
- Morteros para rehabilitación, como por ejemplo inyecciones para la reparación de fisuras y grietas

- Anclajes de hormigón pretensado

Al ser morteros que contienen polímeros termoestables, no generan productos de reacción durante el curado y es por eso que tienen poca contracción al curar, además de aportar otras propiedades como:

- Adhesión

Tienen una buena adhesión con la mayor parte de los materiales de construcción: cemento en seco y húmedo, madera, metales, vidrios, cerámicas, etc. Hay que tener en cuenta que para obtener una buena adhesión es esencial preparar la superficie.

- Resistencia química

La resistencia química de las resinas epoxi depende del agente de curado y puede confeccionarse buscando un uso final determinado. Los sistemas con estructura molecular más complicada son los de mayor estabilidad térmica y poseen mayores resistencias químicas. La mayor parte son resistentes a las bases, disolventes y ácidos excepto los más oxidantes.

- Resistencia a la abrasión

Tienen una excelente resistencia a la abrasión; su valor puede variarse en función de la formulación y las condiciones de servicio que vaya a tener el producto.

- Resistencia mecánica

En general tienen buena resistencia mecánica a la compresión, flexión y tensión.

- Propiedades eléctricas

Son muy buenos aislantes eléctricos. Los aditivos no conductores aumentan la resistencia eléctrica y en cierta extensión la constante dieléctrica.

- Rápida puesta en servicio

Alcanza de manera muy rápida una resistencia mecánica adecuada para usarlo.

Cabe mencionar también que no todo son ventajas, ya que los sistemas epoxi frente a temperaturas altas acusan una disminución de sus propiedades mecánicas y un aumento muy importante de la deformabilidad, que da lugar a que el módulo de elasticidad decrezca considerablemente.

Estos fenómenos empiezan a presentarse entre los 60 y los 90 °C, ya que es en esta franja cuando se supera la temperatura de transición vítrea y sufren un cambio viscoelástico pudiendo producir una disminución de las propiedades del mortero, así como la pérdida de adherencia a las superficies aplicadas. Además, sobre los 300 °C, aproximadamente, las resinas comienzan a quemarse, produciéndose una volatilización de unos componentes y la carbonización de otros.

La diferencia entre el coeficiente de dilatación térmica del soporte y el de la resina epoxi no tiene mucha importancia en uniones y otras aplicaciones en las que el espesor de la capa es inferior a 5 mm., pero cuando nos encontramos en el caso que es superior, esta diferencia de coeficientes puede ser crítica y producir fallos en la interfase de unión entre el sistema epoxi y el hormigón, a menos que la resina tenga un módulo de elasticidad relativamente bajo.

2.2 Introducción a los retardantes de llama

La estrategia comúnmente más utilizada para minimizar la inflamabilidad de un material, es la incorporación de sustancias resistentes al fuego.

Un retardante al fuego puede definirse como una sustancia incorporada o un tratamiento aplicado a un material que suprime o retrasa la combustión del mismo bajo condiciones específicas.

Esta definición abarca todas las características de la combustión, es decir: ignición, combustión lenta, propagación de la llama, liberación de calor, de humo y de gases tóxicos y en consecuencia incluye acepciones más limitadas como retardante a la llama o supresor de humos. Ahora bien, la mayoría de retardantes al fuego son únicamente retardantes de llama que en la práctica reducen la facilidad de ignición y de propagación de la llama.

Los retardantes de llama interfieren en el proceso de combustión actuando física o químicamente en las fases sólida o gaseosa durante una o más etapas de la combustión. Un retardante puede presentar más de un modo de actuación y estos pueden variar de acuerdo a la naturaleza química del material, por lo que generalmente es difícil asegurar su forma de operar.

Los retardantes de llama pueden intervenir para reducir la ignición y la propagación asociada a la llama mediante la formación de restos carbonados o inhibiendo las reacciones de tipo autooxidante que pueden tener lugar en la zona de ignición. El resto carbonado actúa como una barrera física capaz no sólo de disminuir la masa de volátiles formados, sino también de obstruir el flujo de gases combustibles e impedir el acceso del oxígeno a la superficie. Además su baja conductividad térmica hace que actúe como aislante térmico, absorbiendo el calor generado y protegiendo al material de la degradación térmica. El desarrollo más significativo para este tipo de sistemas se refiere a los sistemas intumescentes que al ser calentados forman un resto carbonado espumoso de una mayor eficiencia como aislante térmico.

La importancia de estas sustancias ignífugas para la protección frente al fuego también debe cumplir los requisitos en las pruebas de protección ignífuga, además de la máxima efectividad, los sistemas ignífugos deben cumplir una serie de requisitos como:

- No deben ser tóxicos para las personas, los animales y la vegetación
- No deben ser liberados por el producto terminado y en caso de incendio no deben liberar gases de combustión tóxicos o corrosivos adicionales.
- No influenciar negativamente las propiedades mecánicas y de reciclaje de los productos
- Deben ser compatibles con el medio ambiente, es decir, neutrales o degradables en la naturaleza.

Entre los sistemas de protección ignífuga convencionales nos encontramos con:

- Los aditivos minerales, como el trihidrato de aluminio (ATH), que en caso de incendio el agua originariamente incorporada como hidrato, es liberada. Esta reacción tiene como consecuencia, por una parte, el efecto refrigerante y por otra, que los gases generados por el incendio son diluidos por el agua.
- Los basados en polifosfato amónico (AP), que presentan un mecanismo de funcionamiento completamente distinto, ya que en este caso obstaculizan el proceso de combustión principalmente a través de la fase sólida. En caso de incendio, el polifosfato amónico se descompone en ácido polifosfórico y provoca una carbonización de la superficie. Este carbón ligado por polifosfatos de apariencia vidriosa, protege la superficie del componente de los subsiguientes efectos del calor e interrumpe el suministro de oxígeno, de manera que interrumpe la propagación de las llamas. Este mecanismo es considerablemente más efectivo que la liberación de agua del ATH.

3 PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

3.1 Introducción

En este capítulo explicaremos todos los detalles del proceso de fabricación de las probetas tanto de cemento portland como de mortero epoxi destinadas a ser ensayadas para poder estudiar el comportamiento mecánico.

Para poder llevar a cabo este proceso, se han seguido las especificaciones indicadas en la norma española UNE 80-101-88 en cuanto a las dimensiones y las características de las probetas, así como la fabricación y conservación.

3.2 Materiales utilizados

Para la realización de las probetas de este proyecto, se han utilizado diferentes materiales, de los cuales se detallan sus características a continuación:

a. Mortero de cemento portland

Para la realización de las probetas de mortero de cemento portland utilizaremos un tipo de cemento de alta resistencia de tipo CEM-I y resistencia 52.5 R suministrado por Cementos Molins ® junto con un granulado natural de origen silíceo ajustado a la curva de Fuller, para así poder conseguir una mayor compacidad en el mortero y con esto una máxima resistencia.

La proporción de áridos utilizada y que mejor se ajusta a la curva de Fuller es la mostrada en la Tabla 3.1.

<u>Áridos</u>	<u>Porcentaje</u>
Arena ZF VGR 12 S	40%
Arena ZF L 105-115 S	35%
Arena ZF V 3040 S	10%
Quarfin	10%
Lordarog	5%

Tabla 3.1. Porcentaje de áridos silíceos

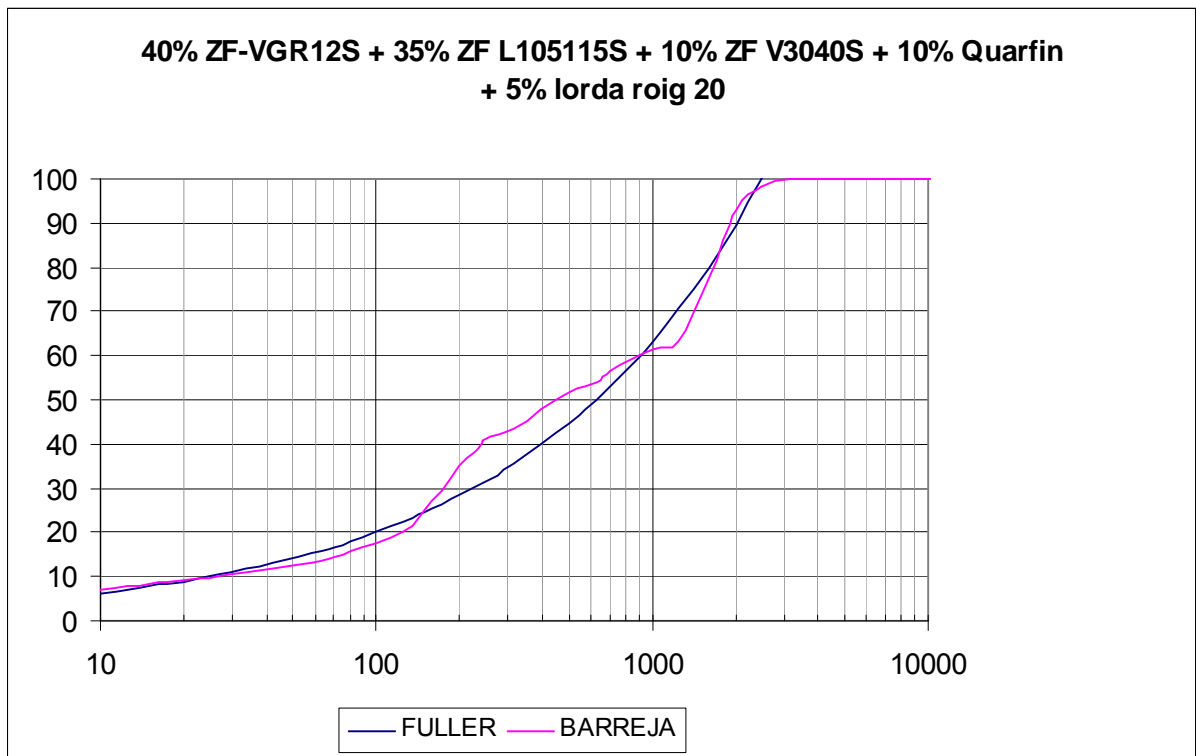


Figura 3.1. Curva granulométrica de los áridos seleccionados

A continuación, determinamos una relación de Agua/Cemento de 0,55 y una relación de Cemento/Árido de 1/3.

Hay que tener en cuenta que el agua utilizada esté libre de sustancias en suspensión como sales o gases o bien disueltas (arcilla, limos...) para no alterar el fraguado del cemento. Como norma general, si el agua es potable, es adecuada para el agua del amasado, es decir, si el agua no tiene ningún olor o color en particular, y no es gaseosa o espumosa cuando se agita, no hay que sospechar que podría dañar el mortero. De manera que el agua utilizada será la del propio laboratorio de materiales.

b. Mortero epoxídico

Para la realización de las probetas de mortero epoxídico, hemos utilizado un mortero predosificado de tres componentes suministrado por la marca comercial Sika ®.

Sikadur 42 Anclajes® es un mortero de altas resistencias mecánicas, de tres componentes, a base de resinas epoxi sin disolventes y cargas de granulometría especial, para colocar por vertido, dada su fluidez y facilidad de colocación.

Este mortero posee las siguientes propiedades:

- Muy buena adherencia sobre la mayoría de los materiales de construcción: hormigón, mortero, piedra, ladrillo, fibrocemento, acero, cristal, resinas de poliéster o epoxi.
- No contiene disolventes.
- Fácil mezclado, buena fluidez y colocación.
- Endurece rápidamente sin retracción.
- La humedad no afecta al endurecimiento.
- Tiene altas resistencias mecánicas. Duro y resistente a vibraciones.
- Impermeable al vapor de agua.
- Posee altas resistencias a temperatura ambiente a agentes químicos como: ácidos diluidos, bases, sales y salmueras, aguas muy puras, aguas residuales, aceites y carburantes.
- Se puede utilizar sobre soportes secos o ligeramente húmedos.
- No necesita imprimación.



Foto 3.1. Mortero epoxídico Sikadur 42 anclajes

c. Retardantes de llama

Para la realización de las probetas de mortero epoxi modificado, utilizamos como mortero base Sikadur 42 Anclajes® al cual le iremos añadiendo de manera separada cinco tipos diferentes de retardantes de llama, las características de los cuales se explican a continuación:

- FR CROS C 70

Esta clase de retardante, está libre de halógenos y es suministrado en forma de polvo blanco. Tiene muy baja solubilidad en agua (<0.05g/100ml) y normalmente es utilizado como retardante de llama en polímeros (por ejemplo PU,EP), como catalizador de sistemas intumescentes en polímeros (Poliiolefinas) y en pinturas (base agua y base disolvente). En el caso de utilizarlo en sistemas intumescentes el FR CROS C70 se mezcla con agentes carboníferos (Pentaeritrita) y espumantes (Melamina) en una relación 3:1:1.

Este retardante realiza un proceso patentado para la producción de polifosfato amónico de cadena larga en su forma cristalina II con melamina reaccionada superficialmente. Muestra una estructura ramificada de elevado peso molecular, con el valor de "n" siempre mayor de 1000. Tiene una mayor estabilidad térmica y una solubilidad en agua más baja que la forma cristalina I. Mediante su encapsulado con diferentes aditivos, las propiedades de la forma cristalina II se modifican, haciéndolos mas apropiados para usar en varias aplicaciones.

Dosificación aproximada de la mezcla 15-25%. Tamaño medio de partícula 18 micras.

- BUDIT 3141

Está compuesto de polifosfato de melamina, libre de halógenos, y se suministra en forma de polvo blanco. Tiene muy baja solubilidad en agua y elevada estabilidad térmica- Su PH= 5.0 y el contenido en P2O5 se aproxima a 33%. Se usa principalmente en polímeros, como por ejemplo polipropileno, como parte de un sistema intumescente donde el BUDIT 3141 puede sustituir parcialmente tanto al catalizador de polifosfato amónico como al agente espumante. Puede ser utilizado en resina de poliéster insaturado particularmente para el proceso SMC. Budit 3141 proporciona una resistencia mejorada al agua, por ejemplo en pinturas.

- HIDROMAGNESITA SINTÉTICA (Carbonato básico de magnesio)

Este mineral se encuentra de forma natural habitualmente asociada a huntita, un carbonato mixto de calcio y magnesio cuya descomposición térmica sucede a temperaturas superiores a la Hidromagnesita, en depósitos geológicos como el de British Columbia en Canadá o el norte de Grecia.

La síntesis de carbonatos básicos de magnesio puede realizarse a través de diversas vías. En el caso del producto utilizado en este trabajo, la síntesis ha involucrado la utilización de subproductos industriales durante el proceso.

El mecanismo de acción de estos retardantes transcurre en la fase condensada debido a la absorción de energía del sistema que tiene lugar durante su descomposición y en la fase gaseosa por dilución de la temperatura de la llama gracias a la liberación de agua. Los óxidos resultantes de la descomposición forman a su vez una capa inerte térmicamente que puede proteger el polímero restante en la fase condensada. Este carbonato descompone endotérmicamente entre 200 - 550 °C con liberación de agua y CO₂.

- MAGNIFIN H5

Este retardante de llama es un hidróxido de magnesio de gran pureza, basado en una materia prima mineral con un proceso patentado que garantiza una estructura regular de cristalización.

Resulta ideal para aplicaciones en plásticos y elastómeros y representa un retardante halógeno sin llama con bajas emisiones de humo y una alta estabilidad térmica hasta los 340°C. Durante su proceso de descomposición se generan gases que no resultan ni tóxicos ni corrosivos.

3.3 Tipo de probetas y su geometría

Para poder estudiar las propiedades mecánicas de los morteros epoxi modificados, se realizan diferentes tipos de probetas en cuanto a formulación y geometría se refiere, ya que cada tipo de ensayo requiere un tipo determinado de probeta.

En función de la composición de las probetas hicimos siete tipos diferentes:

- Probetas de mortero de cemento portland
Destinadas a la fabricación de probetas mixtas para poder estudiar la adherencia entre materiales.

- Probetas de mortero epoxi sin aditivar

- Mortero epoxi modificado sustituyendo el 20% del peso de la resina por retardante y restándole dicha cantidad al árido:
 - o Mortero epoxi modificado con FR Cross C70
 - o Mortero epoxi modificado con Budit 3141

- Mortero epoxi modificado sustituyendo el 60% del peso de la resina por retardante y restándole dicha cantidad al árido:
 - o Mortero epoxi modificado con Hidromagnesita fina
 - o Mortero epoxi modificado con Hidromagnesita gruesa
 - o Mortero epoxi modificado con Magnifin H5

En función del ensayo al que vayan a ser sometidas, la geometría de las probetas varía para adaptarse a la normativa exigida en cada caso. Es por eso que se hacen cuatro tipos diferentes de probetas:

- Probetas prismáticas de 40x40x160 mm. simples.

Este tipo de probetas se realizan con dos objetivos diferentes según su composición:

- o Las probetas de mortero de cemento portland, están destinadas a ser probetas auxiliares para la realización de las probetas mixtas.
- o Las probetas de mortero epoxídico son el objeto de estudio de este proyecto.

- Probetas prismáticas de 40x40x160 mm. mixtas.

Destinadas para ser ensayadas a flexotracción tanto a temperatura ambiente como a 80°C par poder estudiar la adherencia entre materiales.

- Probetas cuadradas de 100x100x5 mm.

Destinadas a los ensayo de reacción al fuego.

- Probetas circulares de Ø 65 mm. y 5 mm. de espesor

Destinadas a otros ensayos que no requieren una forma precisa ya que solo son necesarias pequeñas cantidades de producto.

3.4 *Fabricación de las probetas*

Tal y como se ha dicho anteriormente, las probetas fabricadas serán de mortero de cemento portland y mortero epoxídico, tanto modificadas como no modificadas.

En este apartado se explicará el proceso de fabricación de cada tipo de mortero, así como los materiales empleados, su dosificación y el proceso de curado para cada tipo de probeta.

3.4.1 Probetas de mortero de cemento portland

Como anteriormente se ha comentado, la finalidad de estas probetas de mortero de cemento portland es simplemente auxiliar, ya que no serán sometidas a estudio, sino que una vez curadas y alcanzada su resistencia máxima, estas se partirán por la mitad para la formación de las probetas mixtas de mortero epoxídico.

Medidas de seguridad e higiene

Para trabajar con mortero, tomamos la medida de seguridad de llevar siempre puestos guantes de goma para así evitar el contacto directo de la piel con el mortero, así como el uso de mascarillas a la hora de trabajar con el cemento portland y los áridos finos para evitar la inhalación de las partículas de polvo en suspensión.

Dosificación

Una vez determinada la granulometría necesaria en el apartado anterior, procedimos a la realización de las amasadas. Para ello, se hace un cálculo estimado de la cantidad necesaria para una amasada, partiendo de la base de que cada molde esta compuesto de tres moldes prismáticos de 40x40x160 mm y la capacidad máxima de la amasadora disponible en el laboratorio de materiales es de 3.500 grs., aproximadamente, y teniendo en cuenta las mermas por el proceso de ejecución, determinamos que la cantidad de una amasada sea de un total de 2.700 grs. distribuidos tal y como se muestra en la Tabla 3.2.

Arena ZF VGR 12 S	720 grs.
Arena ZF L 105-115 S	630 grs.
Arena ZF V 3040 S	180 grs.
Quarfin	180 grs.
Lordaroig	90 grs.
Agua	330 grs.
Cemento	600 grs.

Tabla 3.2. Dosificación de los áridos utilizados

Preparación de moldes

Siguiendo indicaciones de la normativa, para una correcta ejecución de las probetas, los moldes deberán estar limpios, sanos y exentos de grasas y/o aceites. Estos moldes serán de poliestireno expandido de un solo uso, con las medidas indicadas por la norma.

Amasado

Para realizar el pesado de los áridos, utilizamos una báscula de precisión, con una sensibilidad de 0,1 gr. y el mismo recipiente para todos ellos. Para ello, ordenamos los áridos de mayor a menor diámetro y procedemos al pesado del primero tarando primero el recipiente contenedor y a continuación añadiendo el árido de más grosor hasta obtener la cantidad deseada. Una vez estabilizado el peso, volvemos a tarar el recipiente con el árido incluido, para así poder añadir el siguiente hasta obtener el peso deseado. Este procedimiento lo iremos repitiendo sucesivamente hasta tener pesados la totalidad de los áridos necesarios.

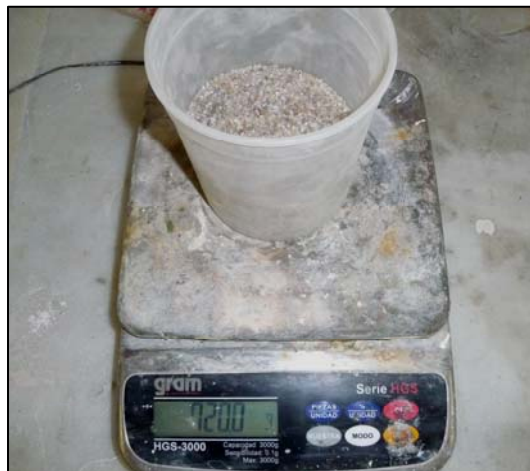


Foto 3.2. Árido pesado

Cuando ya tenemos todos los áridos pesados, los mezclamos manualmente para así conseguir una mezcla lo más homogénea posible. Una vez mezclados, volvemos a tarar el recipiente con todos los áridos para así poder pesar la cantidad de cemento portland necesario y volver a mezclar manualmente todos los componentes.

Acto seguido, humedecemos el recipiente y la pala mezcladora de la amasadora para evitar posibles aglomeraciones en las paredes. Vertimos toda la mezcla en su interior y se añade a continuación el agua anteriormente pesada y los mezclamos de manera manual durante un breve periodo de tiempo para así facilitar la mezcla en la amasadora.

Introducimos el recipiente en la amasadora y programamos la velocidad de la amasadora en dos tiempos, un primero a velocidad lenta durante 90 segundos y a continuación otro periodo de 90 segundos a velocidad rápida.



Foto 3.3. Amasada de mortero de cemento portland

Enmoldado

Para el llenado de los moldes de las probetas, utilizamos una espátula metálica y hacemos dos tongadas y así evitar que se quede aire en el interior de las probetas, para ello utilizamos la mesa de sacudidas, donde entre tongada y tongada sometemos al molde de tres probetas a una serie de sacudidas durante 60 segundos a razón de una sacudida por segundo.

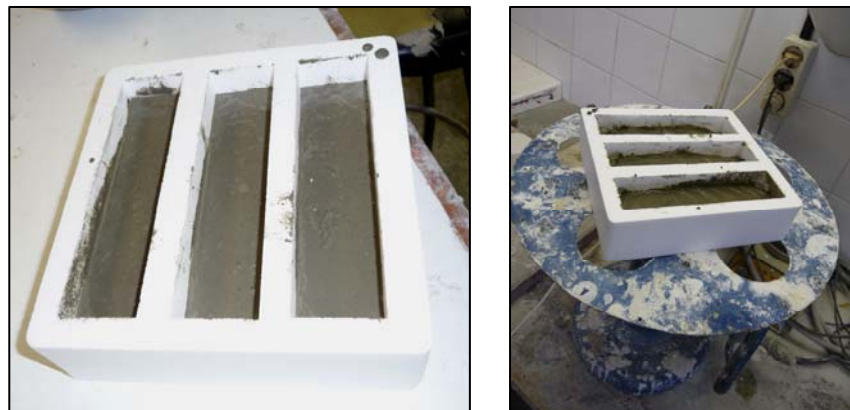


Foto 3.5. Mesa de sacudidas

Curado

Por último, introducimos los moldes de las probetas en la cámara húmeda donde las condiciones de humedad y temperatura están controladas con una humedad relativa $\leq 95\%$ y una temperatura de $20^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$, donde permanecerán un mínimo de 28 días, tiempo necesario para conseguir su resistencia máxima.

Transcurridas un mínimo de 24 horas desde la introducción de éstas en la cámara, se procederá al desmoldado y se volverán a introducir en la cámara húmeda para así conseguir su máxima resistencia.



Foto 3.5. Desmoldado y conservación en la cámara húmeda

Probetas realizadas

Siguiendo este proceso de fabricación, se hicieron un total de 47 probetas distribuidas en lotes tal y como indica la Tabla 3.2. que se muestra a continuación:

PROBETAS PORTLAND (40x40x160)			Entrada en cámara	Desenmolde	Salida de cámara	Nomenclatura
Lote	Amasada	Nº probetas	Fecha			
A	1	1 2 3	13/07/2009	15/07/2009	14/09/2009	A.1.1. A.1.2. A.1.3.
B	1	1 2 3	15/07/2009	17/07/2009	14/09/2009	B.1.1. B.1.2. B.1.3.
	2	1 2 3				B.2.1. B.2.2. B.2.3.
	3	1 2 3				B.3.1. B.3.2. B.3.3.
C	1	1 2 3	20/07/2009	21/07/2009	14/09/2009	C.1.1. C.1.2. C.1.3.
	2	1 2 3				C.2.1. C.2.2. C.2.3.
	3	1 2 3				C.3.1. C.3.2. C.3.3.
	4	1 2 3				C.4.1. C.4.2. C.4.3.
	5	1 2 3				C.5.1. C.5.2. C.5.3.
D	1	1 2 3	21/07/2009	22/07/2009	14/09/2009	D.1.1. D.1.2. D.1.3.
	2	1 2 3				D.2.1. D.2.2. D.2.3.
	3	1 2 3				D.3.1. D.3.2. D.3.3.
	4	1 2 3				D.4.1. D.4.2. D.4.3.
E	1	1 2 3 4	22/07/2009	23/07/2009	14/09/2009	E.1.1. E.1.2. E.1.3. E.1.4.
	2	1 2 3 4				E.2.1. E.2.2. E.2.3. E.2.4.
TOTAL PROBETAS REALIZADAS			47			

Tabla 3.2. Distribución de probetas de cemento portland

3.4.2 Probetas de mortero epoxi sin modificar

Dosificación

Para la realización de las probetas de mortero epoxi hemos seguido las instrucciones indicadas por el fabricante, en las que nos indican las proporciones con las que debemos mezclar los tres componentes:

Componente A: 2 partes

Componente B: 1 parte

Componente C: 12 partes

Para poder saber la cantidad exacta de cada componente a la hora de realizar el mortero epoxi, calculamos el peso necesario por amasada según la geometría de los moldes, de manera que a partir de la densidad indicada por el fabricante y el volumen de los moldes pudimos calcular la amasada de la siguiente manera:

Densidad del mortero epoxi: 2 g/cm^3 .

- Probetas prismáticas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$.

Volumen de la probeta: $4 \times 4 \times 16 = 256 \text{ cm}^3$.

Probetas previstas por amasada: 5

Volumen total: 1280 cm^3

Amasada: $2 \text{ g/cm}^3 \times 1280 \text{ cm}^3 = 2560 \text{ g}$.

- Probetas de $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}$.

Volumen de la probeta: $10 \times 10 \times 0,5 \text{ cm} = 50 \text{ cm}^3$

Probetas por amasada: 2

Volumen total: 100 cm^3

Peso por amasada: $2 \text{ g/cm}^3 \times 100 \text{ cm}^3 = 200 \text{ g}$

- Probetas cilíndricas de $\varnothing 65 \text{ mm}$ y 5 mm de espesor.

En este caso no determinamos el peso según el volumen, sino que fijamos el peso de cada probeta en 48 g .

De manera, que en cada amasada se realizarán unos 3 Kg. aproximadamente con la siguiente dosificación:

Componente A: 400 g.

Componente B: 200 g.

Componente C: 2400 g.

Preparación de moldes

Para una correcta ejecución de las probetas, los moldes deberán estar limpios, sanos y exentos de grasas y/o aceites.

En este caso, se preparan:

- Dos moldes de poliestireno expandido formados por tres probetas prismáticas de 40x40x160 mm., cada uno, para la realización de probetas simples.
- Dos moldes cuadrados de silicona de 100x100 mm.
- Dos moldes circulares de Ø 65 mm.

Amasado

Al tratarse de un producto de tres componentes predosificado, primero pesamos el componente C (los áridos) tal y como se hizo a la hora de realizar el mortero de cemento portland y por otra parte pesamos la cantidad necesaria del componente A.

Una vez pesado dicho componente, se tara la báscula y se añade el componente B hasta obtener la cantidad calculada anteriormente.



Foto 3.6. Mezclado de las resinas

A continuación, mezclamos brevemente con la varilla de vidrio los dos componentes durante un minuto. Una vez transcurrido este tiempo de mezclado, añadimos el componente C, anteriormente pesado, a la mezcla de los componentes A y B y los mezclamos manualmente para evitar que la mezcla no salpique, para posteriormente mezclarlo con una batidora eléctrica hasta lograr un mortero fluido totalmente homogéneo.



Foto 3.7. Mezcladora mecánica

Enmoldado

Al tratarse de un material autonivelante, las probetas las llenamos por vertido en dos tongadas, sometiendo a vibraciones con la mesa de sacudidas a cada tongada, para así facilitar la salida de aire, tal y como hicimos con las probetas de mortero de cemento portland.

Curado

En el caso del mortero epoxi Sikadur 42 Anclajes® no es necesario la introducción de las probetas en la cámara húmeda ya que la humedad no afecta al endurecimiento, pero si tuvimos que dejarlas endurecer sobre una base completamente nivelada para asegurar el paralelismo entre la cara superior e inferior de las probetas. Pasadas 24 horas, se procederá al desmoldado.



Foto 3.8. Curado a nivel de probetas de mortero epoxídico

Probetas realizadas

Siguiendo este proceso de fabricación, se hicieron un total de 14 probetas distribuidas en lotes tal y como se indica las siguientes tablas:

PROBETAS MORTERO EPOXI (40x40x160)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura	Combinación probeta portland
	Amasada	Nº probetas	Fecha			
RESINA	1	1	17/09/2009	18/09/2009	R.1.1	-
		2			R.1.2.	-
		3			R.1.3.	-
	2	1			R.2.1.	-
		2			R.2.2.	-
		3			R.2.3.	-
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		6				

Tabla 3.3. Distribución de probetas de 40x40x160 de mortero epoxídico

PROBETAS MORTERO EPOXI (100x100) (107'8 g.)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura
			Fecha		
RESINA	1	1	17/09/2009	17/09/2009	R.1.1.
		2			R.1.2.
	2	1			R.2.1.
		2			R.2.2.
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		4			

Tabla 3.4. Distribución de probetas de 10x10x5 de mortero epoxídico

PROBETAS MORTERO EPOXI CIRCULARES (Ø 65 Y 48 g.)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura
			Fecha		
RESINA	1	1	17/09/2009	17/09/2009	R.1.1.
		2			R.1.2.
	2	1			R.2.1.
		2			R.2.2.
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		4			

Tabla 3.5. Distribución de probetas cilíndricas de mortero epoxídico

3.4.3 Probetas de mortero epoxi modificado.

Dosificación

Para la realización de las probetas de mortero epoxi modificado, partimos de la dosificación indicada por el fabricante comentada anteriormente. A partir de aquí, modificamos la composición siempre sustituyendo parte del peso del árido por su peso en retardante en función de los porcentajes del peso de la resina indicados a continuación:

- Componente A: 2 partes
- Componente B: 1 parte
- Componente C: 12 partes
- Retardante:
 - Sustituyendo el 20% del peso de la resina por retardante y restándole dicha cantidad al árido:
 - o Mortero epoxi modificado con FR Cross C70
 - o Mortero epoxi modificado con Budit 3141



Foto 3.9. Retardantes de llama FR Cross C70 y Budit 3141 (respectivamente)

- Sustituyendo el 60% del peso de la resina por retardante y restándole dicha cantidad al árido:
 - o Mortero epoxi modificado con Hidromagnesita fina
 - o Mortero epoxi modificado con Hidromagnesita gruesa
 - o Mortero epoxi modificado con Magnifin H5



Foto 3.10. Retardantes de llama Hidromagnesita y Magnifin H5 (respectivamente)

Preparación de los moldes

Para una correcta ejecución de las probetas, los moldes deberán estar limpios, sanos y exentos de grasas y/o aceites y así evitar tener imperfecciones en las probetas.

En este caso por cada formulación se preparan:

- Dos moldes de poliestireno expandido formados por tres probetas prismáticas de 40x40x160 mm., cada uno, para la realización de probetas simples.
- Dos moldes cuadrados de 100x100 mm.
- Dos moldes circulares de Ø 65 mm.

A excepción del caso del mortero epoxi modificado con Magnifin H5, para el cual solamente se preparan:

- Cuatro moldes cuadrados de 100x100
- Dos moldes circulares de Ø 65 mm.

Amasado

Una vez determinadas las proporciones necesarias, procedemos a la realización del mortero tal y como lo hemos hecho en el caso del mortero sin modificar, teniendo en cuenta que hay que añadir el retardante antes de poner las resinas para así mezclar bien los áridos con el retardante y asegurarnos una mezcla homogénea del conjunto.

Enmoldado

Al tratarse de un material autonivelante, las probetas las llenamos por vertido en dos tongadas, sometiendo a vibraciones con la mesa de sacudidas a cada tongada, para así facilitar la salida de aire, tal y como hicimos con las probetas de mortero de cemento portland.

Curado

En el caso del mortero epoxi Sikadur 42 Anclajes® no es necesario la introducción de las probetas en la cámara húmeda ya que la humedad no afecta al endurecimiento, pero si tuvimos que dejarlas endurecer sobre una base completamente nivelada para asegurar el paralelismo entre la cara superior e inferior de las probetas.

Pasadas 24 horas, se procederá al desmoldado.

Probetas realizadas

Siguiendo este proceso de fabricación, se hicieron un total de 62 probetas distribuidas en lotes tal y como se indica las siguientes tablas:

PROBETAS MORTERO EPOXI MODIFICADO (40x40x160)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura	Combinación probeta portland
	Amasada	Nº probetas	Fecha			
HIDROMAGNESITA FINA	1	1	01/10/2009	02/10/2009	HF.1.1	-
		2			HF.1.2	-
		3			HF.1.3	-
	2	1			HF.2.1	-
		2			HF.2.2	-
		3			HF.2.3	-
HIFROMAGNESITA GRUESA	1	1	02/10/2009	08/10/2009	HG.1.1	-
		2			HG.1.2	-
		3			HG.1.3	-
	2	1			HG.2.1	-
		2			HG.2.2	-
		3			HG.2.3	-
BUDIT 3114	1	1	13/10/2009	15/10/2009	B.1.1	-
		2			B.1.2	-
		3			B.1.3	-
	2	1			B.2.1	-
		2			B.2.2	-
		3			B.2.3	-
FR CROSS C70	1	1	15/10/2009	16/10/2009	C.1.1	-
		2			C.1.2	-
		3			C.1.3	-
	2	1			C.2.1	-
		2			C.2.2	-
		3			C.2.3	-
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		24				

Tabla 3.6. Distribución de probetas de 40x40x160 de mortero epoxídico modificado

30 Propiedades mecánicas y comportamiento al fuego de morteros epoxídicos modificados

PROBETAS MORTERO EPOXI MODIFICADO (100x100X5) (107'8 g.)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura
			Fecha		
HIDROMAGNESITA FINA 1.1.1.	1	1 2	01/10/2009	01/10/2009	HF.1.1.
	2	1 2			HF.1.2.
HIDROMAGNESITA GRUESA	1	1 2	02/10/2009	02/10/2009	HF.2.1.
	2	1 2			HF.2.2.
BUDIT 3141	1	1 2	13/10/2009	13/10/2009	HG.1.1.
	2	1 2			HG.1.2.
FR CROSS C70	1	1 2	15/10/2009	15/10/2009	HG.2.1.
	2	1 2			HG.2.2.
MAGNIFIN H5	1	1 2	02/11/2009	02/11/2009	B.1.1.
	2	1 2			B.1.2.
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		20			B.2.1.
					B.2.2.
					C.1.1.
					C.1.2.
					C.2.1.
					C.2.2.
					H5.1.1.
					H5.1.2.
					H5.2.1.
					H5.2.2.

Tabla 3.7. Distribución de probetas de 10x10x5 de mortero epoxídico modificado

PROBETAS MORTERO EPOXI (Ø 65 Y 48 g.)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura
			Fecha		
HIDROMAGNESITA FINA	1	1 2	01/10/2009	01/10/2009	HF.1.1.
	2	1 2			HF.1.2.
HIDROMAGNESITA GRUESA	1	1 2	02/10/2009	02/10/2009	HF.2.1.
	2	1 2			HF.2.2.
BUDIT 3141	1	1 2	13/10/2009	13/10/2009	HG.1.1.
	2	1 2			HG.1.2.
FR CROSS C70	1	1 2	15/10/2009	15/10/2009	HG.2.1.
	2	1 2			HG.2.2.
MAGNIFIN H5	1	1	02/11/2009	02/11/2009	B.1.1.
	2	1			B.1.2.
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		18			B.2.1.
					B.2.2.
					C.1.1.
					C.1.2.
					C.2.1.
					C.2.2.
					H5.1.1
					H5.2.1.

Tabla 3.8. Distribución de probetas cilíndricas de mortero epoxídico modificado

Observaciones durante el proceso de elaboración de las probetas

Durante el proceso de elaboración de los morteros epoxídicos modificados, se observaron diferentes características según el retardante de llama aditivado.

En el caso de los morteros aditivados con Budit 3141 y Cross C70, se conservaban las propiedades autonivelantes del mortero epoxídico inicial. En cambio, en el caso de la adición de Hidromagnesita, si que se vieron afectadas las propiedades autonivelantes del mortero epoxídico sin aditar, dando como resultado dos masas muy diferentes en función del tipo de Hidromagnesita utilizada.

En el mortero aditivado con Hidromagnesita Gruesa, la pastada obtenida tras la mezcla de los componentes, era una masa disgregada y de poca cohesión, tal y como se muestra en la Foto 3.11. En este caso, para el relleno y compactación de los moldes, tuvimos que realizarlo de manera manual.



Foto 3.11. Mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita Gruesa

En el caso del mortero aditivado con Hidromagnesita Fina, la pastada obtenida era una masa bastante compacta y poco fluida, que se adhería con facilidad. Para la compactación de este tipo e probetas, tuvimos que recurrir al compactado manual.

3.4.4 Probetas mixtas

Materiales utilizados

Para la realización de estas probetas, utilizaremos los mismos materiales que en las ocasiones anteriores, a excepción del retardante de llama Magnifin H5, ya que de este tipo de retardante no se estudiarán sus propiedades mecánicas.

Dosificación

Para la realización de las probetas mixtas, de mortero epoxídico, tanto modificado como sin modificar, seguimos la misma dosificación explicada en los apartados anteriores.

Preparación de moldes

Para una correcta ejecución de las probetas, y al igual que en las ocasiones anteriores, los moldes deberán estar limpios, sanos y exentos de grasas y/o aceites.

En esta ocasión, la preparación de los moldes requiere algo más que una buena limpieza de estos, ya que este tipo de probeta esta compuesta por una mitad de probeta de mortero de cemento portland y otra de mortero epoxídico.

Para poder realizar este tipo de probetas, primero tuvimos que marcar la mitad de las probetas de mortero de cemento portland necesarias, que en este caso son un total de 15 probetas, ya que se tiene previsto realizar 30 probetas mixtas.

Una vez marcadas todas las probetas, procedimos a partirlas manualmente mediante un golpe seco con escarpa y martillo.

Para ello, tuvimos que colocar bajo la probeta dos redondos que nos permitiesen mantenerla separada de la mesa de trabajo para así permitir la rotura de esta. Estos redondos se colocan aproximadamente a $\frac{1}{4}$ de los extremos de la probeta respectivamente. El golpe proporcionado, deber ser único y contundente, ya que de esta manera nos aseguramos una buena rotura de la probeta.

Una vez rotas todas las probetas, se hace una selección de estas descartando aquellas probetas que no se hayan roto adecuadamente o que hayan perdido pequeños fragmentos al romperse. Esta selección es necesaria, ya que la superficie de contacto con el mortero epoxídico debe ser lo más vertical posible.



Foto 3.12. Rotura de las probetas de cemento portland

Elegimos el método de ruptura manual y no el mecánico mediante radial, ya que al romper la probeta mediante un golpe, nos aseguramos obtener una superficie rugosa no uniforme que nos proporciona una buena base adherente para el mortero epoxídico.

Probetas realizadas

Siguiendo este proceso de fabricación, se hicieron un total de 30 probetas distribuidas en lotes tal y como indica la siguiente tabla:

PROBETAS MORTERO EXPOXÍ MIXTAS (40 x 40 x 160)			Realización	Desenmolde	Nomenclatura	Combinación probeta portland
	Amasada	Nº probetas	Fecha			
RESINA	MIXTAS 1	1	17/09/2009	18/09/2009	R.X.1.1.	B.1.2.
		2			R.X.1.2.	A.1.3.
		3			R.X.1.3.	A.1.1.
	MIXTAS 2	1			R.X.2.1.	A.1.1.
2		R.X.2.2.	B.3.2.			
		3			R.X.2.3.	B.3.2.
HIDROMAGNESITA FINA	MIXTAS 1	1	01/10/2009	02/10/2009	HF.X.1.1.	B.1.3.
	MIXTAS 2	1			HF.X.2.1.	A.1.3.
		2			HF.X.2.2.	B.1.1.
		3			HF.X.2.3.	B.1.3.
		4			HF.X.2.4.	B.1.1.
5	HF.X.2.5.	B.1.2.				
HIFROMAGNESITA GRUESA	MIXTAS 1	1	02/10/2009	08/10/2009	HG.X.1.1.	B.2.1.
		2			HG.X.1.2.	B.2.2.
		3			HG.X.1.3.	B.2.3.
	MIXTAS 2	1			HG.X.2.1.	B.2.2.
		2			HG.X.2.2.	B.2.1.
		3		HG.X.2.3.	B.2.3.	
BUDIT 3114	MIXTAS 1	1	13/10/2009	15/10/2009	B.X.1.1.	D.4.4.
		2			B.X.1.2.	D.3.1.
		3			B.X.1.3.	D.3.2.
	MIXTAS 2	1			B.X.2.1.	D.3.2.
		2			B.X.2.2.	D.3.1.
		3		B.X.2.3.	D.4.4.	
FR CROSS C70	MIXTAS 1	1	15/10/2009	16/10/2009	C.X.1.1.	E.2.4.
		2			C.X.1.2.	E.2.3.
		3			C.X.1.3.	E.2.3.
	MIXTAS 2	1			C.X.2.1.	C.3.1.
		2			C.X.2.2.	C.3.1.
		3		C.X.2.3.	E.2.4.	
TOTAL PROBETAS REALIZADAS		30				

Tabla 3.9. Distribución de probetas mixtas de 40x40x160 de mortero epoxídico

4 ENSAYOS REALIZADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS DIFERENTES FORMULACIONES DE MORTERO EPOXI

El mortero epoxi no es un material perfectamente estable y de características estándar para todas sus variantes, sino que éstas dependen de los materiales usados para su fabricación, dosificación y amasado. Es por este motivo por el cual sometemos a ensayo las diferentes formulaciones propuestas y así poder estudiar los diferentes efectos que producen los retardantes de llama en los morteros epoxídicos.

Para poder estudiar el comportamiento mecánico de los morteros epoxi modificados frente al convencional, realizamos dos tipos de ensayo según el tipo de probeta, distribuidos de la siguiente manera:

- Probetas sometidas a ensayo de flexotracción:
 - o Simples: 15
 - o Mixtas: 15
- Probetas sometidas a ensayo de compresión:
 - o Simples: 30

Para la realización de los estudios que tratamos, se han de romper todas y cada una de las probetas simples a flexotracción, tanto a temperatura ambiente como a 80°C. De esta manera quedan todas ellas partidas por la mitad, y así podemos hacer los ensayos a compresión de cada una de estas mitades, consiguiendo un mayor número de ensayos y un resultado más fiable y representativo.

Estos ensayos han sido realizados en su mayoría en el laboratorio del departamento de de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica de la facultad de Química, a excepción de un lote de probetas simples, el cual se ensayó en el laboratorio de materiales de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona. Las dos prensas utilizadas, a pesar de tener características similares, se diferencian por su sistema de carga, ya que la prensa situada en la facultad de Química carga en función del tiempo, mientras que la otra prensa lo hace en función de la deformación. De esta manera, hemos podido comprobar que no hay diferencias significativas aún habiendo utilizado protocolos diferentes.

Los ensayos se han realizado siguiendo las recomendaciones de la Norma Española:

- UNE EN 1015-11:2000/A1:2007 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido

- UNE EN 196-1 UNE-EN 196-1:2005 - Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

4.1 Ensayos realizados a temperatura ambiente

4.1.1 Procedimiento de ensayo para probetas simples a flexotracción

a. Flexotracción Simple

Para poder hacer el ensayo a flexotracción de las probetas, tanto simples como mixtas de mortero epoxídico, modificado o sin modificar, tuvimos que desplazarnos a la facultad de química, concretamente al laboratorio del departamento de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica, donde disponen de una prensa para la realización de este ensayo, así como el equipo informático para la recogida de datos.

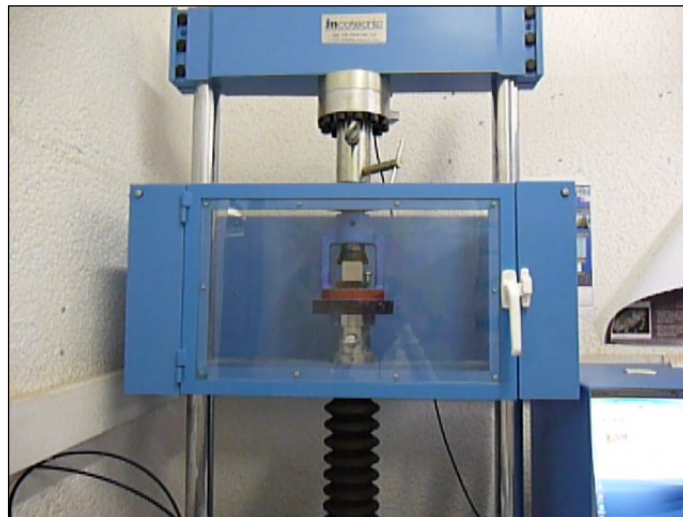


Foto 4.1. Prensa ubicada en la Facultad de Química

Esta prensa está compuesta por un motor que transmite movimiento vertical a un émbolo situado en la parte inferior, que es el encargado de ejercer presión al dispositivo adecuado para cada ensayo. La zona de ensayo está protegida por una cámara que impide, en caso de fuerte rotura, que las partículas del material ensayado salgan despedidas al exterior y puedan impactar contra algún objeto o persona.

Para la recogida de datos, la prensa dispone de una célula que es la encargada de enviar la fuerza realizada y la posición al equipo informático mediante el cual se procesan los datos y se obtiene tablas con la fuerza y deformación para cada segundo registrado durante el ensayo.

Para poder someter las probetas a flexión, el adaptador que debemos usar está compuesto por una parte inferior fija donde están colocadas dos barras rígidas que hacen la función de apoyo inferior para la probeta separadas entre si 10 cm. siendo una de ellas basculante para poder absorber las irregularidades de la probeta y así poder asegurar la planeidad de esta.

Alineados con estos y en la parte posterior, nos encontramos con dos pivotes metálicos que nos sirven de ayuda para alinear la probeta y así evitar que esta esté desplazada durante el ensayo. En la parte superior, tenemos la zona móvil del adaptador, compuesta por un brazo con libre movimiento vertical, acabado en una pieza circular basculante con una barra rígida, igual que las anteriores, encargada de transmitirle la carga a la probeta.

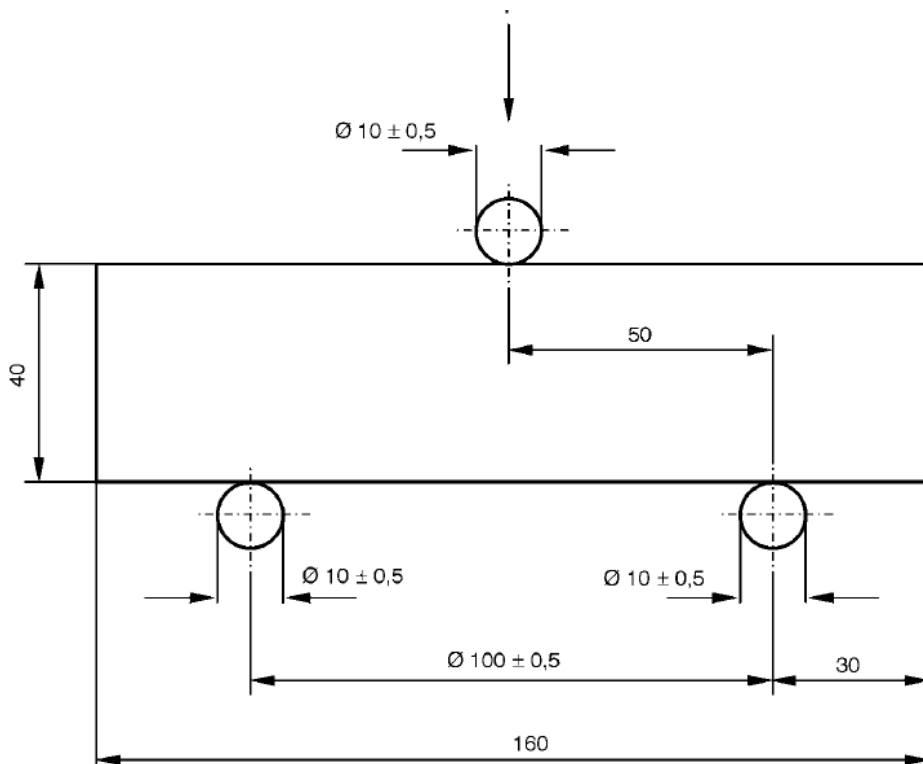


Figura 4.1. Geometría del adaptador según normativa UNE EN 1015-11:2000/A1:2007

1. Operaciones previas

Antes de empezar el ensayo, debemos colocar una célula que se ajuste a la resistencia de las probetas que vamos a ensayar, ya que si se diese el caso de que hubiese una que soporta menos carga que la probeta dañaríamos la célula de tal manera que quedaría inutilizable para siempre.

Una vez comprobada la célula, encendemos el motor de la prensa y arrancamos el programa informático INCOTECNIC “Lab-Pre S.L.”, donde tenemos que indicar:

- El tipo de ensayo que vamos a realizar: ensayo flexión de cementos
- La nomenclatura de la probeta
- Los límites de fuerza. En este caso solamente es necesario fijar el límite superior de fuerza en 20 toneladas para no dañar la célula.
- La posición inicial, para que al romper la probeta el émbolo inferior vuelva a su posición inicial y así poder extraer la probeta.
- El nivel de sensibilidad de la prensa, mediante el cual la prensa se detiene automáticamente al detectar una variación de fuerza/posición.

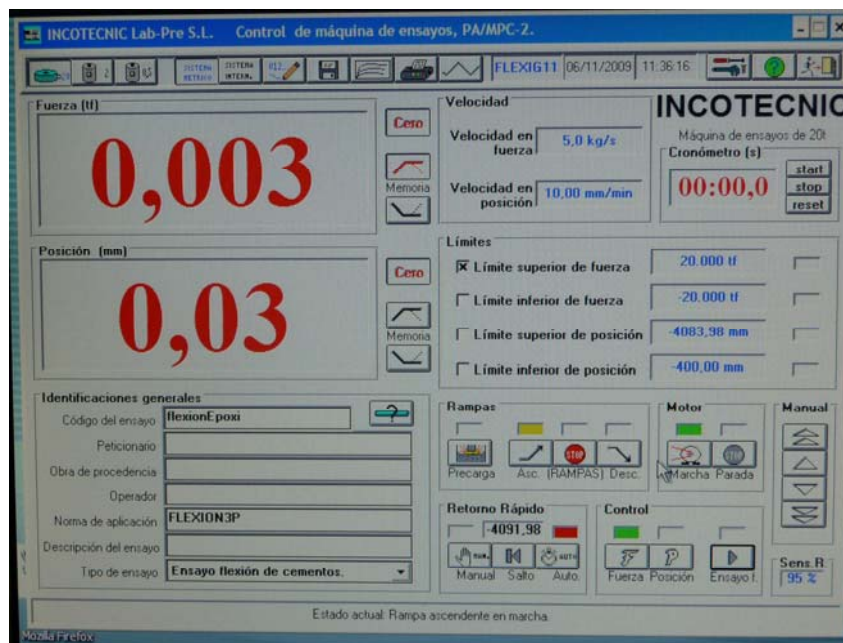


Foto 4.2. Programa INCOTECNIC “Lab-Pre S.L.”

II. Metodología de ensayo

Una vez determinados todos los parámetros anteriores, introducimos la probeta tocando los dos pivotes para asegurarnos que no esté torcida, y a continuación la centramos longitudinalmente, de manera que el pivote central situado en la parte superior quede justo a media probeta. Hay que tener en cuenta que al situar la probeta en el dispositivo, la única cara que no tiene que estar en contacto con los apoyos o los pivotes es la cara superior de la probeta, es decir, aquella que no ha estado en contacto con las paredes del molde.

Cuando ya lo tenemos centrado, se hace una precarga para así ajustar la prensa lo máximo posible a la superficie de la probeta sin que esta llegue a entrar en carga. Una vez realizada la precarga, ya tenemos todo listo para hacer el ensayo y podemos presionar el botón "Ensayo f." para que empiece la carga, la cual terminará de manera automática cuando detecte que la probeta ha roto.

Para finalizar, guardamos los datos en el ordenador y automáticamente al guardar, el émbolo inferior volverá a su posición inicial para poder extraer la probeta y poder introducir la siguiente.

b. Flexotracción con galgas extensiométricas

Decidimos someter a ensayo un lote de diez probetas de 40x40x160 mm. formado por series de dos probeta de cada formulación, para poder observar la diferencia que hay entre los dos métodos de ensayo.

Para poder medir la deformación unitaria que sufre la probeta en el ensayo a flexotracción, tuvimos que adherir a cada probeta una galga extensiométrica. Para este ensayo, utilizaremos el mismo dispositivo de ensayo a flexión que el empleado en el laboratorio del departamento de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica

1. Características de las galgas extensiométricas

Básicamente una galga es una resistencia eléctrica, ya que lo que mide en ella es la variación de la resistencia de dicha galga cuando esta sufre una determinada deformación. Es decir, existe una relación directa entre la variación que sufriría la resistencia y la variación de la deformación en la galga. La unidad de medida de la deformación es adimensional, y expresa la relación existente entre el incremento de longitud experimentado por el objeto y la longitud inicial.

Al pegar una galga en una superficie en la cual se quiere analizar su deformación, se parte del supuesto que el sensor experimenta la misma deformación que el material. Este sensor consta de una base muy delgada no conductora, en la cual hay adherido un hilo metálico muy fino, de esta forma, la mayor parte de su longitud esta distribuida paralelamente a un dirección determinada, tal y como se muestra en la figura siguiente:

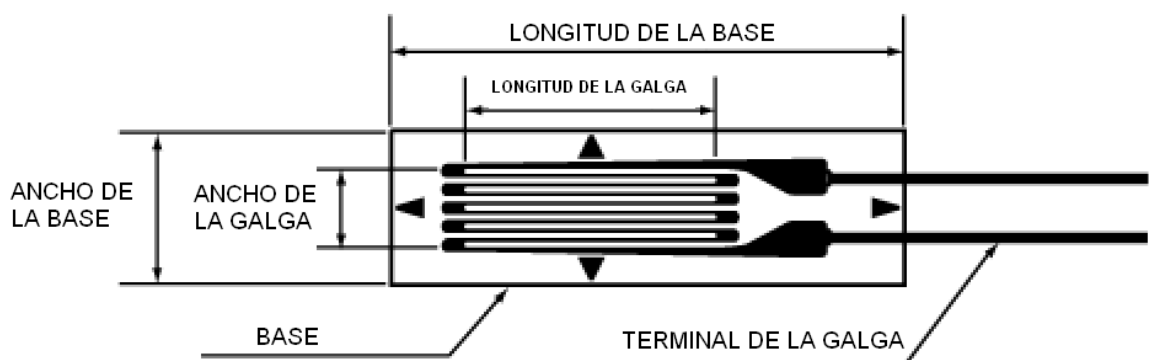


Figura 4.2. Esquema de una galga extensiométrica

El principio de medida de las galgas metálicas se basa en tres premisas:

- El valor de la resistencia de un conductor es función de sus características geométricas (efecto enunciado por Lord Kelvin)
- A todo aumento de longitud corresponde una disminución de sección (efecto de Poisson).
- La variación de resistividad es proporcional a la variación relativa de volumen (efecto enunciado por Bridgman).

II. Colocación de las galgas extensiométricas

Durante la instalación de las galgas extensiométricas hay que poner especial cuidado en la instalación de las galgas en las probetas, ya que de ello depende tener unos resultados reales y evitar errores en las mediciones. Este proceso varía según el tipo de galga, el material a ensayar, la temperatura o el tipo de ensayo a realizar. Por lo general el proceso consiste en:

- Preparación de la base

Esta etapa es una de las más importantes de todo el procedimiento, ya que si no se hace bien, la galga no funcionará correctamente.

El objetivo primordial de esta fase, es conseguir una base lisa y sin porosidades situada en el centro geométrico de una de las caras de la probeta. Esta cara debe ser una de las tres que han estado en contacto con el molde a la hora de la fabricación de las probetas, para así poder asegurarnos su planeidad. Para ello y debido a que la superficie de nuestras probetas presenta mucha porosidad, lo primero que se debe realizar es un pulido de la superficie a tratar para así eliminar las rugosidades creadas por el molde de poliestireno expandido.

Dicho pulido lo realizamos con una pulidora eléctrica situada en el laboratorio de materiales, dentro de una estancia cerrada para así evitar que el polvo creado se disperse por todo el laboratorio. Una vez pulidas todas las caras necesarias, eliminamos los restos de partículas adheridos a la superficie mediante una pistola de aire comprimido. Cabe mencionar que para la elaboración de estas tareas, nos hicimos valer de guantes y mascarillas para protegernos de las partículas de polvo expulsadas al pulir y evitar su inhalación.



Foto 4.3. Pulido de la superficie de las probetas

A continuación, determinamos la ubicación de la galga marcando mediante una cuchilla los ejes del centro geométrico en la cara de la probeta anteriormente tratada. Una vez marcados los ejes, procedemos al desengrase de la superficie con tricloroetileno (disolvente para desengrasar superficies) tomando siempre las precauciones de llevar puesta mascarilla para así poder evitar la inhalación de los vapores que desprende el producto, y la utilización de guantes para evitar el contacto directo.

Una vez eliminadas estas imperfecciones, para cubrir los poros del material recurrimos a un adhesivo de dos componentes específico para el tipo de galgas, cuya dosificación es la siguiente:

- Componente A: 100 g
- Componente B: 10 g

Para realizar la mezcla, utilizamos una báscula de precisión, de manera que después de tarar el recipiente, pesamos los 100 g del componente A para añadirle a continuación los 10 g del componente B y mezclarlos con una varilla hasta obtener una pasta uniforme viscosa de color rosa. A partir de este momento se disponen de unos cinco minutos de vida útil de la pasta, ya que conforme pasa el tiempo su textura se va volviendo cada vez más espesa hasta llegar al punto de convertirse en una especie de gelatina no apta para extender en finas capas.



Foto 4.4. Adhesivo de dos componentes utilizado

Para extender el adhesivo en finas capas sobre la superficie a tratar, nos ayudamos de unas paletas de plástico de unos 2 cm. de anchura, las cuales nos permiten crear una capa fina de adhesivo con tan solo una gota de éste y con las dimensiones adecuadas para la galga. Esta película debe tener unas dimensiones aproximadas de 2 x 3 cm. aprox., de manera que podamos colocar toda la base de la galga sobre esta sin que toque parte de la superficie no tratada. Éste último paso, lo repetiremos tantas veces como sea necesario hasta obtener una base lisa y sin ningún poro, siempre dejando un intervalo de 24 horas para asegurarnos el correcto secado y endurecido del adhesivo. En nuestro caso y debido a la naturaleza porosa del material, tuvimos que repetir el proceso un total de tres veces, excepto para la probeta de Hidromagnesita gruesa, a la cual le tuvimos que dar una capa más que al resto.



Foto 4.5. Probeta tras una primera capa de adhesivo de dos componentes

- Montaje de la galga

En esta etapa, la galga es adherida a la superficie previamente preparada.

Para ello, primero nos debemos asegurar de que los ejes marcados anteriormente siguen siendo visibles y que no hayan restos de polvo ni grasas en la base, de lo contrario se tendría que repetir el marcaje de estos tal y como lo hemos hecho con anterioridad.

Una vez comprobados los ejes, sacamos las galgas de su envoltorio con cuidado de tocarla lo mínimo posible con los dedos, ya que le podríamos traspasar grasas, y la colocamos sobre una superficie de cristal desengrasada con cuidado de dejar la base de la galga en contacto con la superficie de cristal y la fijamos con una tira de cinta adhesiva para poder manejarla después con más facilidad.

A continuación preparamos tal y como se explico anteriormente adhesivo de dos componentes para poder adherir la galga a la base y colocamos una fina película de adhesivo. Acto seguido, cogemos la galga con la cinta adhesiva y alineamos las marcas de la galga con los ejes marcados anteriormente en la probeta, fijamos la cinta a los laterales de la probeta y le colocamos dos plásticos protectores, uno sobre la galga y otro bajo los terminales de esta para evitar que se peguen a la probeta, y sobre estos plásticos una goma y un peso para asegurarnos un buen contacto, y las dejamos reposar unas 24 horas para que el adhesivo endurezca.



Foto 4.6. Protección de la galga

Por último, se retiran las láminas del plástico protector y se levantan los terminales de la galga para poder fijar los conectores y poder hacer la unión con los cables. Para

ello debemos recortar tantos conectores como probetas tengamos y los fijamos a 0'5 cm. aprox. de la base de la galga con Loctite ®.

A continuación, soldamos los terminales de la galga a la parte superior del conector para así dejar libre la parte inferior donde soldaremos los cables para la recepción de los datos.

III. Operaciones previas

Una vez instaladas las galgas, se procedió realizar la puesta a punto de la máquina para poder realizar los ensayos. Para ello se calibró la cédula de 2 t. de la máquina y se introdujeron los parámetros necesarios en el programa y los canales por los cuales íbamos a recibir la información recogida.

A la hora de medir la flecha, colocamos un comparador conectado al portátil para que midiese el desplazamiento del brazo de la máquina.



Foto 4.7. Prensa ubicada en el Laboratorio de Materiales de la EPSEB

Para poder transmitir la variación de la resistencia medida por la galga cuando esté sometida a deformación, le soldamos un cable en el conector y lo conectamos al receptor de datos.

IV. Metodología de ensayo

Una vez todos los componentes preparados, procedemos a colocar la probeta dentro del dispositivo de ensayo, tal y como lo hemos hecho anteriormente, pero en este caso hay que tener en cuenta que la cara donde esté situada la galga debe quedar en la parte inferior, es decir, la que mayor deformación sufre. La probeta debe estar tocando los dos pivotes posteriores para asegurarnos que no esté torcida. A continuación la centramos longitudinalmente, de manera que el pivote central esté situado en la parte superior quede justo a media probeta. Hay que tener la precaución de que al situar la probeta en el dispositivo, la única cara que no tiene que estar en contacto con los apoyos o los pivotes, es la cara superior de la probeta, es decir, aquella que no ha estado en contacto con las paredes del molde.

Cuando ya está todo preparado, debemos ajustar la prensa a la probeta. Este procedimiento lo realizaremos manualmente hasta que la zona de contacto del dispositivo de ensayo se encuentre a menos de un milímetro de la probeta.

A continuación activamos la recogida de datos del ordenador y accionamos la prensa para hacerla entrar en carga y así empezar el ensayo, el cual lo deberemos parar manualmente una vez haya roto la probeta, para poder extraerla y así introducir la siguiente.

Una vez detenido el ensayo, se deben guardar todos los datos obtenidos y a continuación deshacer la soldadura de la probeta con el cable de datos para poder soldarlo a la siguiente.

4.1.2 Procedimiento de ensayo para probetas simples a compresión

Como ya hemos comentado anteriormente, este ensayo se realizará a partir de las dos mitades resultantes después de haber sometido las probetas a flexión.

Para la realización de este ensayo, volvimos al laboratorio del departamento de de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica de la facultad de química, para hacer uso de la misma prensa utilizada en el ensayo de flexotracción.

A diferencia del ensayo de flexotracción, para realizar la compresión necesitamos un dispositivo diferente para poder ensayar las probetas. Este dispositivo es el más simple de todos, ya que esta formado por dos bases opuestas situadas en el centro del dispositivo de dimensiones 40x40 mm., sobre las cuales situamos las probetas para así poderles transmitir la fuerza de compresión. Al igual que en el dispositivo anterior, este dispone de dos pivotes metálicos que nos sirven de ayuda para alinear la probeta y así evitar que esta esté desplazada durante el ensayo.



Foto 4.8. Adaptador a compresión

I. Operaciones previas

Antes de empezar el ensayo a compresión, debemos cambiar la célula de la prensa, ya que anteriormente habíamos utilizado la de menor capacidad (5t.) y para el ensayo a compresión esta prevista una resistencia superior a esta pero sí inferior a 20t., por lo que la célula que se instalará será la de 20 t.

Una vez comprobada la célula, seguimos los pasos anteriores para la adquisición de datos, de manera que procedemos al encendido del motor de la prensa y arrancamos el programa informático INCOTECNIC “Lab-Pre S.L.”, donde tenemos que indicar:

- El tipo de ensayo que vamos a realizar: ensayo compresión de cementos
- La nomenclatura de la probeta
- Los límites de fuerza. En este caso solamente es necesario fijar el límite superior de fuerza en 20 toneladas para no dañar la célula.
- La posición inicial, para que al romper la probeta el émbolo inferior vuelva a su posición inicial y así poder extraer la probeta.
- El nivel de sensibilidad de la prensa, mediante el cual la prensa se detiene automáticamente al detectar una variación de fuerza/posición.

II. Metodología de ensayo

Una vez determinados todos los parámetros anteriores, introducimos la probeta tocando los dos pivotes para asegurarnos que no esté torcida, y a continuación la centramos longitudinalmente. Como en todos los casos, hay que tener en cuenta que al situar la probeta en el dispositivo, la única cara que no tiene que estar en contacto con las bases o los pivotes es la cara superior de la probeta, es decir, aquella que no ha estado en contacto con las paredes del molde.

Cuando ya lo tenemos centrado, se hace una precarga para así ajustar la prensa lo máximo posible a la superficie de la probeta sin que esta llegue a entrar en carga. Una vez realizada la precarga, ya tenemos todo listo para hacer el ensayo y podemos presionar el botón “Ensayo f.” para que empiece la carga, la cual terminará de manera automática cuando detecte que la probeta ha roto. Finalmente, guardamos los datos en el ordenador y automáticamente al guardar, el émbolo inferior volverá a su posición inicial para poder extraer la probeta y poder introducir la siguiente.

4.1.3 Procedimiento de ensayo para probetas mixtas a flexotracción

El objetivo de este ensayo es poder observar el comportamiento de las probetas mixtas sometidas a flexotracción, así como el comportamiento de la junta entre morteros epoxídicos y morteros de cemento portland.

Para la realización de este ensayo, recurrimos a la prensa utilizada anteriormente en el laboratorio del departamento de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica de la facultad de química.

Al tratarse de una probeta mixta, necesitamos un dispositivo que nos permita someter la probeta de estudio sin que la carga se ejerza sobre la junta de unión. Para ello utilizamos un dispositivo diferente al de flexotracción utilizado anteriormente. Este nuevo dispositivo está diseñado para ensayar probetas de 40x40x160 mm. y consta de dos apoyos inferiores formados por rodillos separados entre sí 115 mm., siendo uno de ellos fijo y el otro basculante para poder ajustarse a la superficie de la probeta. La parte superior del dispositivo consta de otros dos rodillos, ambos basculantes, separados entre sí 40 mm. quedando fuera de la zona de unión, para así poder transmitir la carga a ambas partes de la probeta de manera equitativa.

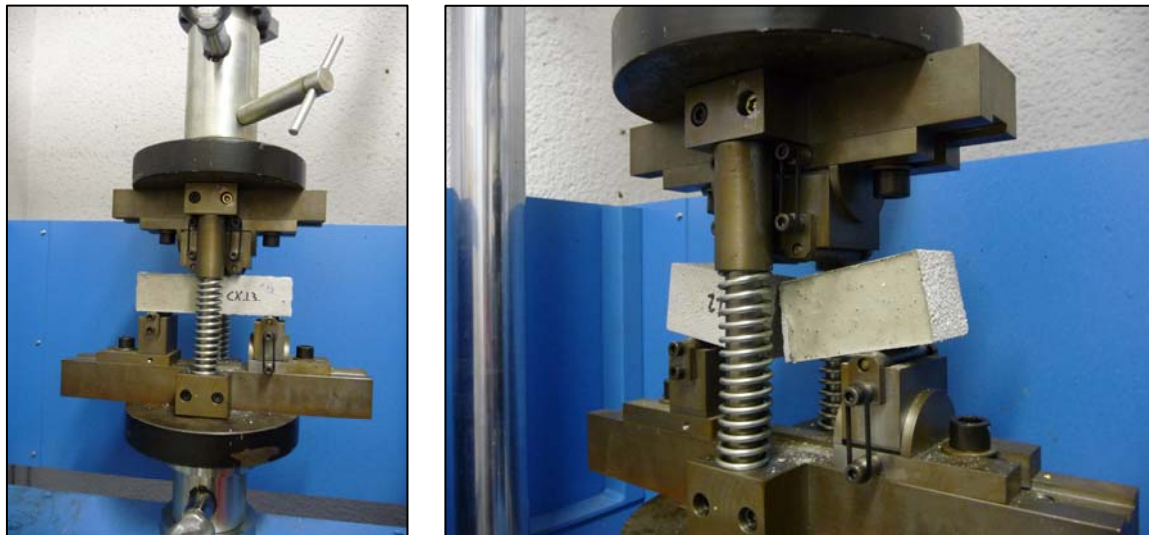


Foto 4.9. Adaptador ensayo flexotracción con carga bipuntual

I. Operaciones previas

Al igual que se ha hecho con los ensayos anteriores, debemos comprobar que la célula que hay colocada es de suficiente envergadura para soportar la presión ejercida por la prensa durante el ensayo.

II. Metodología de ensayo

Una vez hecha esta comprobación, procedemos a la introducción de los datos en el programa, tal y como se hizo para el ensayo de flexotracción con las probetas simples, y se sigue el mismo procedimiento de ensayo anteriormente descrito.

4.2 Ensayos realizados a 80°C

El objetivo de estos ensayos es poder observar las características mecánicas del mortero epoxídico, y todas sus variantes estudiadas en este PFG, sometido a una temperatura de 80°C para así poder hacer un estudio comparativo de las variaciones que sufre respecto a las características observadas en los ensayos a temperatura ambiente.

El procedimiento de ensayo a seguir, tanto a compresión como a flexotracción es idéntico al utilizado anteriormente, a diferencia que las probetas se someten a ensayo a una temperatura de 80°C.

Siguiendo esta metodología se ensayaron un total de 60 probetas distribuidas de la siguiente manera:

- Ensayo de flexotracción:
 - o Simples : 15
 - o Mixtas: 15

- Ensayo de compresión:
 - o Simples : 30

4.2.1 Proceso de calentamiento

Para poder subir la temperatura de las probetas a ensayar, nos hicimos valer de una estufa situada en el laboratorio del departamento de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica, ya que es allí donde posteriormente realizaremos los ensayos correspondientes a las probetas. Para esto, introducimos las probetas en la estufa, previo calentamiento de esta, y las dejamos a la temperatura elegida durante al menos 5 horas. Una vez comprobada la temperatura de estas mediante la ayuda de un termopar, procedemos a realizar los ensayos de flexotracción y compresión.

El tiempo de transporte de las probetas hasta el punto de ensayo es mínimo, de manera que se hace mediante una manopla aislante de silicona, ya que solamente son unos metros.

5 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Tras haber sometido a diferentes clases de ensayo las probetas fabricadas, y una vez tratados y analizados los datos obtenidos, presentamos a continuación una discusión de los diferentes resultados obtenidos.

5.1 Flexotracción de probetas simples

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras someter las probetas simples a flexotracción midiendo a temperatura ambiente y a 80 °C la tensión frente la deflexión. Además en las probetas con galgas extensiométricas instaladas se mide la tensión frente la deformación unitaria únicamente a temperatura ambiente.

5.1.1 Temperatura ambiente

I. Tensión deflexión

En la siguiente tabla (5.1.) podemos observar los datos recogidos para las diferentes clases de probetas sometidas a flexotracción en igualdad de condiciones.

Retardante	Temperatura	Probeta	Fuerza máxima (T)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	SD
Budit 3141	Ambiente	B11	1,4	31,9	32,0	4,7
		B21	1,2	27,4		
		B23	1,6	36,8		
FR Cross C70	Ambiente	C11	1,7	39,9	36,4	3,2
		C12	1,5	33,9		
		C23	1,5	35,4		
Hidromagnesita Fina	Ambiente	F11	1,5	33,8	31,0	2,5
		F21	1,3	29,4		
		F22	1,3	29,7		
Hidromagnesita Gruesa	Ambiente	G11	0,9	20,5	16,0	4,1
		G12	0,7	15,2		
		G21	0,5	12,4		
Resina	Ambiente	R11	1,4	32,4	32,0	0,8
		R12	1,3	31,0		
		R13	1,4	32,4		

Tabla 5.1. Resultados flexotracción a temperatura ambiente

Analizando numéricamente los resultados, podemos ver como a rasgos generales la adición de retardantes de llama en los morteros de resina epoxi no empeora el comportamiento mecánico de las probetas, a excepción del caso aditivado con Hidromagnesita gruesa, que como ya esperábamos, baja notablemente la resistencia.

A continuación, se presentan una serie de gráficas donde se muestra el comportamiento durante el ensayo desde el inicio de este hasta la rotura de la probeta graficando la tensión frente la deflexión. En estas gráficas se compara el comportamiento registrado de las tres probetas ensayadas de mortero epoxídico modificado frente al comportamiento de las probetas de mortero epoxídico sin modificar (graficada siempre en rojo), ensayadas a temperatura ambiente y en igualdad de condiciones.

En el caso del mortero epoxídico modificado con retardantes de llama Budit 3141, podemos observar como no disminuye la resistencia del mortero respecto a la formulación original, sino que en alguna probeta llega a superar la resistencia de la probeta sin retardante.

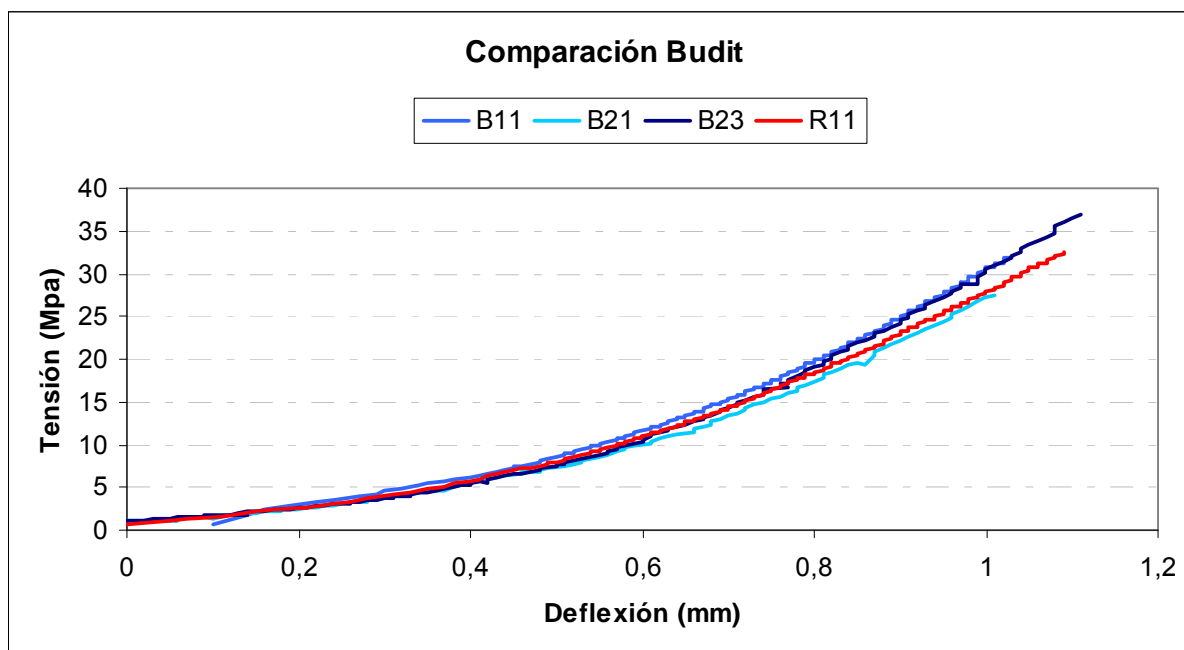


Figura 5.1. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Budit 3141

Si observamos el comportamiento del mortero epoxídico modificado con retardante de llama Cross C70, podemos observar como no solo no disminuye la resistencia del mortero epoxídico, sino que llega a mejorar el comportamiento a flexotracción a temperatura ambiente.

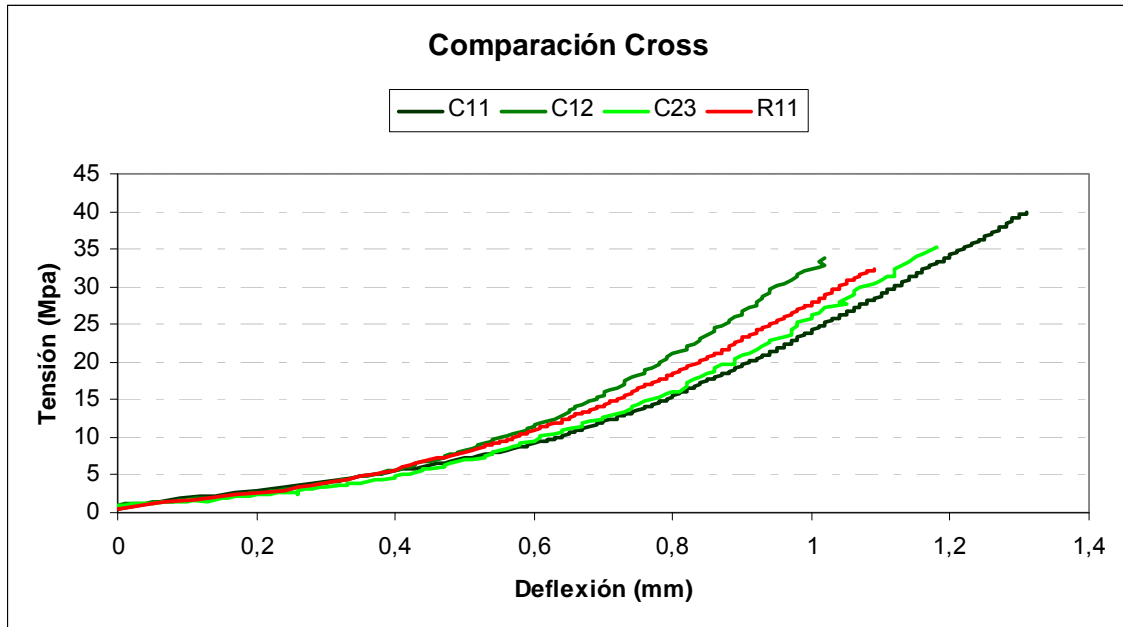


Figura 5.2. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Cross C70

En el caso del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina, podemos observar como a pesar de tener una gran cantidad de retardante (el 60% del peso de la resina, sustituyendo dicha cantidad del peso del árido) no se ven grandes pérdidas de resistencia a flexotracción a temperatura ambiente, incluso la probeta F11 llega a superar la resistencia del mortero epoxi sin modificar.

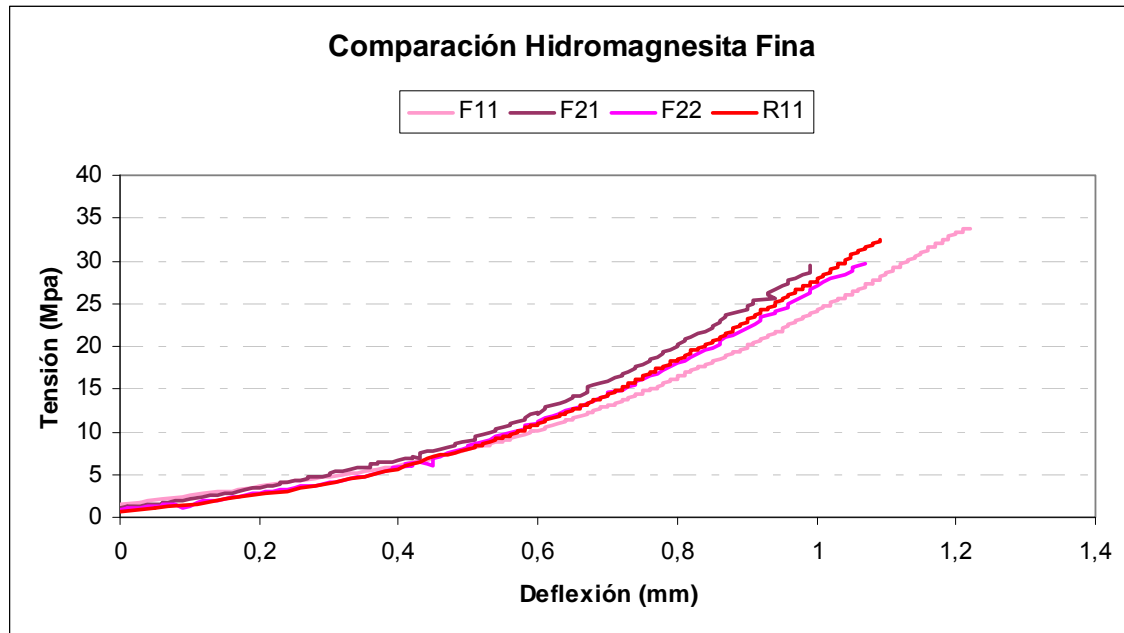


Figura 5.3. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina

Cabe mencionar, que en el caso de la adición de la Hidromagnesita gruesa como retardante de llama el comportamiento es el esperado, ya que a la hora de la realización de las probetas se observó como la masa no era compacta y fluida, sino más bien disgregada, y es por eso que los resultados se encuentran por debajo de los otros retardantes, e incluso del mortero epoxi sin modificar, rompiendo con una tensión de 16,06 Mpa.

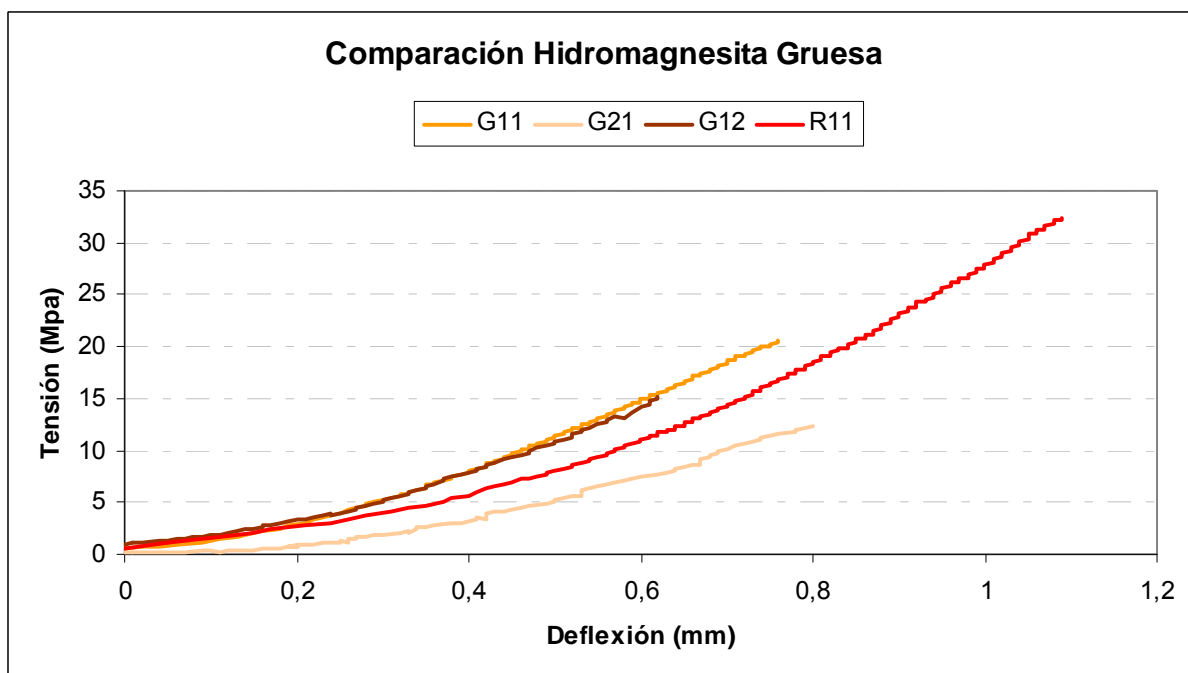


Figura 5.4. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita gruesa

A continuación, estudiaremos los resultados obtenidos de una forma más global comparando de manera conjunta el comportamiento de las probetas de mortero epoxi sin modificar frente a las probetas de mortero epoxi modificado.

A través de las gráficas, podemos observar como tras la introducción de retardantes de llama en la formulación de los morteros epoxídicos, el comportamiento a flexotracción no se ve afectado negativamente y presenta unas características muy similares al mortero sin modificar.

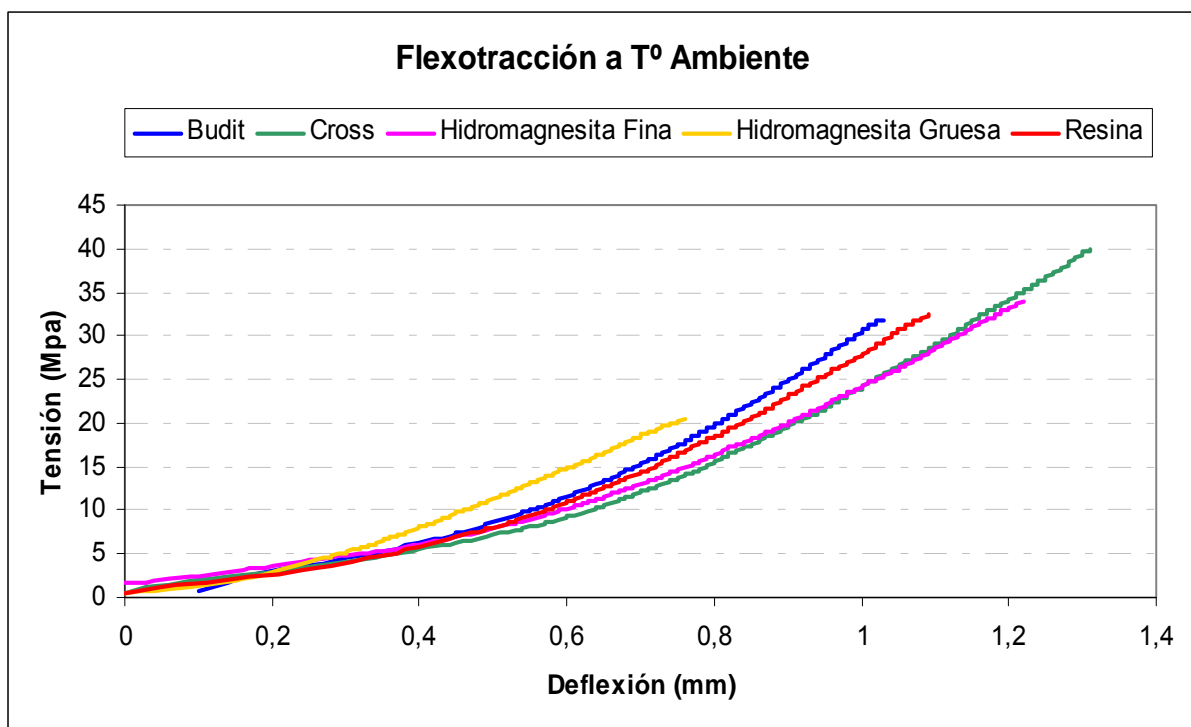


Figura 5.5. Resumen comportamiento flexotracción a temperatura ambiente

Si prestamos más atención a las pendientes mostradas en el gráfico, y teniendo presente que estas están directamente relacionadas con el módulo elástico, podemos observar como las probetas modificadas con Budit 3141, FR Cross C70 e Hidromagnesita Fina tienen pendientes muy similares si las comparamos con la obtenida en la probeta de mortero epoxídico sin modificar, mientras que en el caso de la probeta modificada con Hidromagnesita Gruesa, y como es esperado, se observa una clara disminución de la pendiente y por lo tanto del módulo elástico.

II. Tensión deformación unitaria

Tras someter a ensayo un total de diez probetas de 40x40x160 mm. distribuidas en series de dos probeta de cada formulación y tratar los datos obtenidos a través de las galgas, se obtuvieron las diferentes gráficas, tal y como se muestra en la figura 5.6.

Si observamos la grafica mostrada, podemos observar como las pendientes obtenidas con las probetas de mortero epoxídico modificado tienen una inclinación similar respecto a la obtenida con la probeta de mortero epoxídico sin modificar. Sin embargo, en el caso de las probetas modificadas con Hidromagnesita Gruesa, si que podemos observar, como la disminución de la pendiente de la recta es mucho mayor comparado con el resto de retardantes.

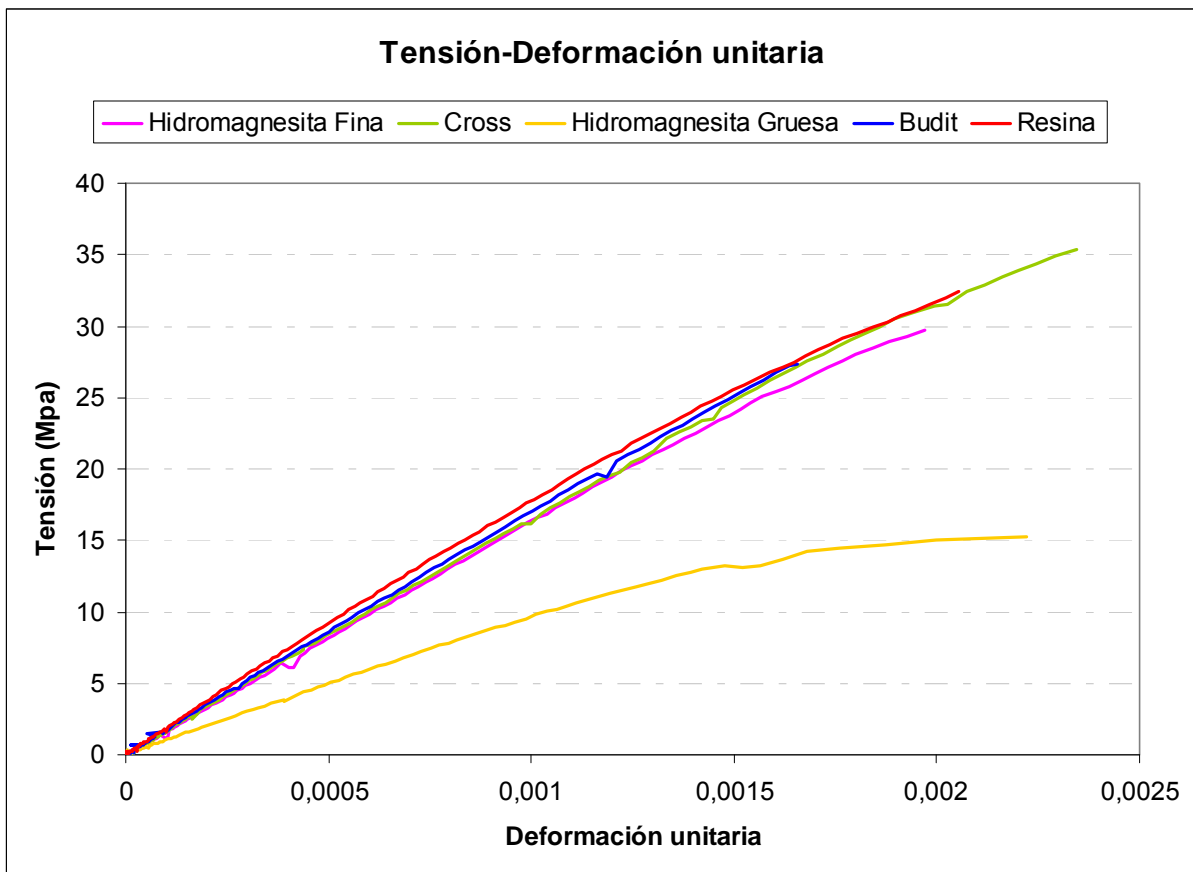


Figura 5.6. Resumen comportamiento flexotracción a temperatura ambiente

5.1.2 Temperatura de 80°C

En la siguiente tabla podemos observar los datos recogidos para las diferentes clases de probetas sometidas a flexotracción a 80 °C y en igualdad de condiciones.

Retardante	Temperatura	Probeta	Fuerza máxima (T)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	SD
Budit 3141	80°C	B12	0,2	3,9	4,2	0,4
		B13	0,2	4,1		
		B22	0,2	4,6		
FR Cros C70	80°C	C13	0,2	4,4	4,2	0,2
		C21	0,2	4,0		
		C22	0,2	4,2		
Hidromagnesita Fina	80°C	F12	0,2	5,5	5,7	0,4
		F13	0,2	5,5		
		F23	0,3	6,2		
Hidromagnesita Gruesa	80°C	G13	0,2	4,1	4,1	0,1
		G22	0,2	4,2		
		G23	0.17	3,9		
Resina	80°C	R21	0,2	3,9	3,8	0,2
		R22	0,2	3,6		
		R23	0,2	3,9		

Tabla 5.2. Resultados flexotracción a 80°C

Analizando los datos numéricos expuestos en la tabla, podemos observar como en todos los casos estudiados la resistencia de las probetas incrementa como mínimo un 7% respecto a la formulación inicial, mejorando notablemente la probeta aditivada con Hidromagnesita Fina.

A continuación analizaremos el comportamiento de las diferentes probetas sometidas a ensayo de manera gráfica mostrando la evolución de estas a medida que la carga va aumentando.

En el caso de las probetas de mortero epoxídico modificado con retardante de llama Budit 3141, podemos observar como aún siguiendo un comportamiento muy similar al del mortero epoxi original, los valores de resistencia máximos a flexotracción obtenidos son mayores en el caso de las probetas de mortero modificado.

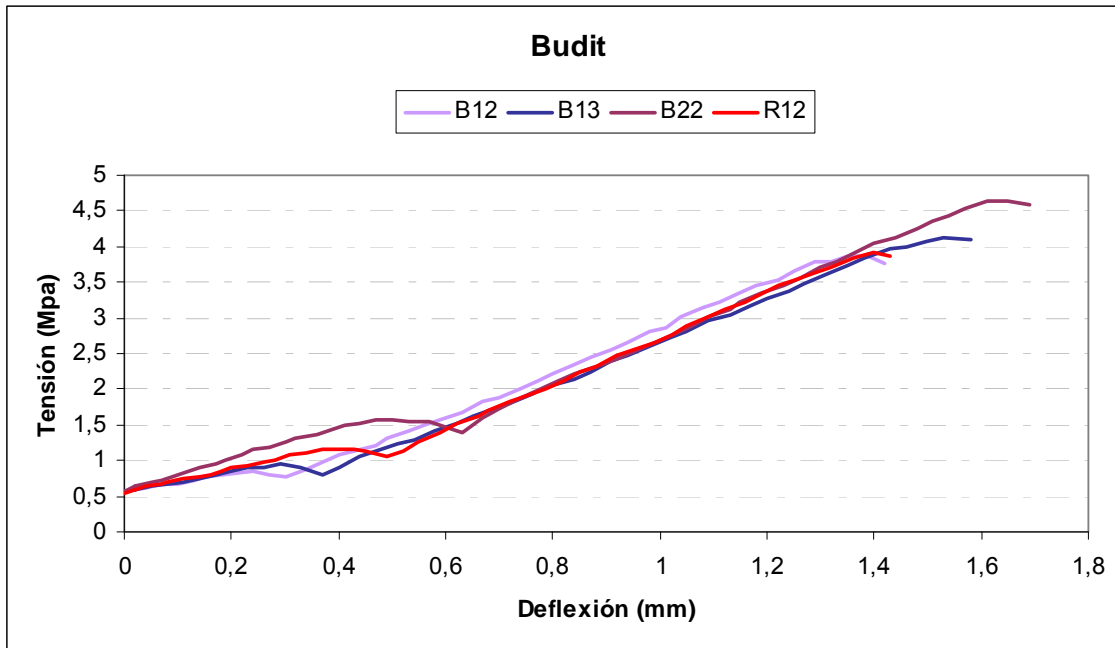


Figura 5.7. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Budit 3141 a 80°C

Si observamos el comportamiento de las probetas modificadas con retardante de llama FR Cros C70, al igual que en el caso anterior, aunque muestren un comportamiento diferente en la primera zona de la gráfica, una vez pasada esta zona podemos observar como todas siguen un patrón de comportamiento muy similar entre ellas, lo que nos indica que los módulos elásticos son similares entre si. Además podemos observar como la resistencia máxima a flexotracción se ve mejorada aumentando su valor máximo.

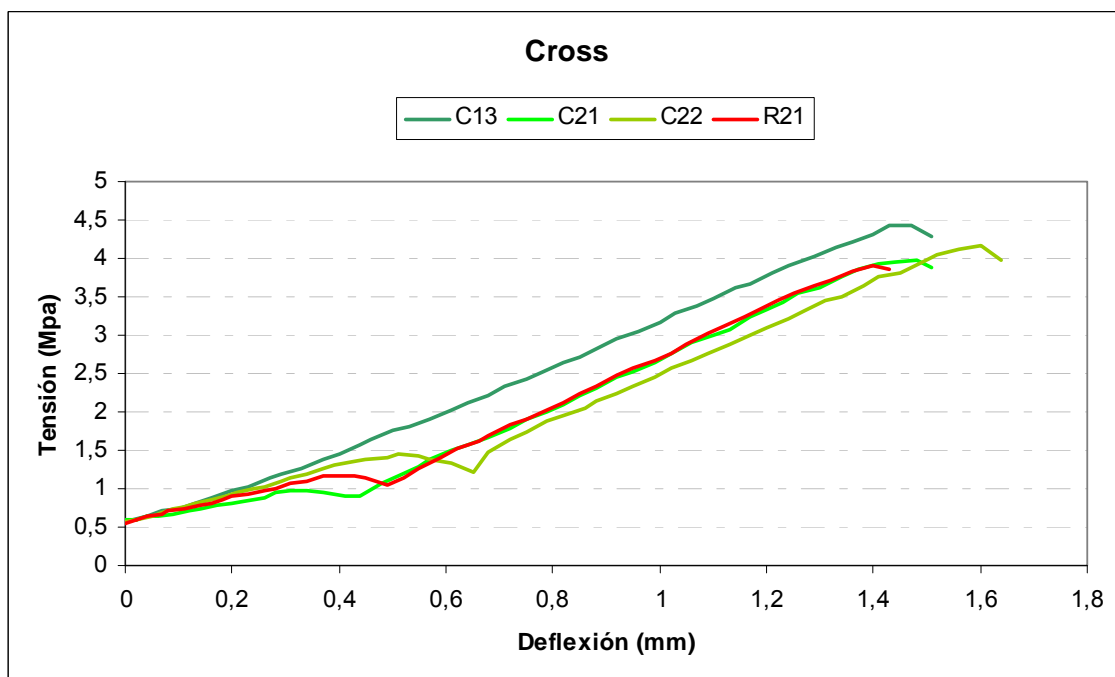


Figura 5.8. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con Cross C70 a 80°C

En el caso del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita Fina, tal y como hemos podido ver en la tabla 5.2 y ahora de manera gráfica, es la formulación que mejores resultados ha mostrado, ofreciendo valores de resistencia hasta un 50% superior que los obtenidos con el mortero epoxi sin modificar.

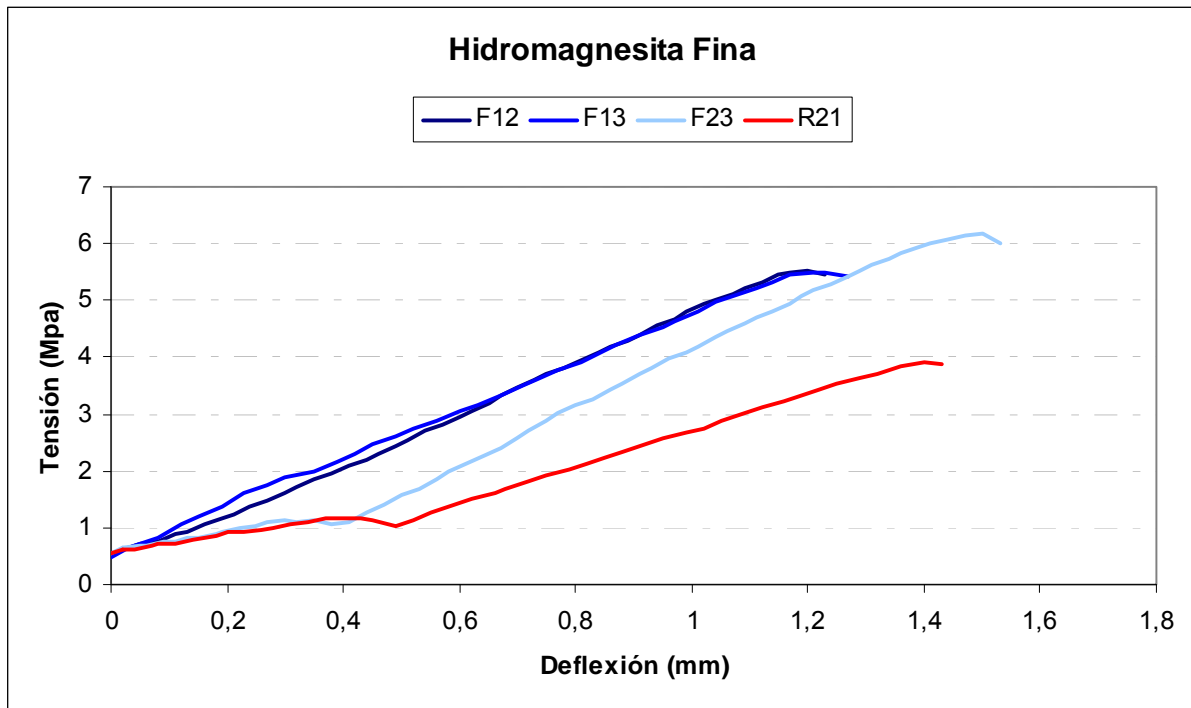


Figura 5.9. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con hidromagnesita fina a 80°C

Cabe mencionar, que en el caso de la adición de la Hidromagnesita Gruesa como retardante de llama el comportamiento ha sido inesperado, ya que a pesar de tener una resistencia muy baja a temperatura ambiente, a 80°C consigue una resistencia a flexotracción muy similar a la de la probeta sin retardante.

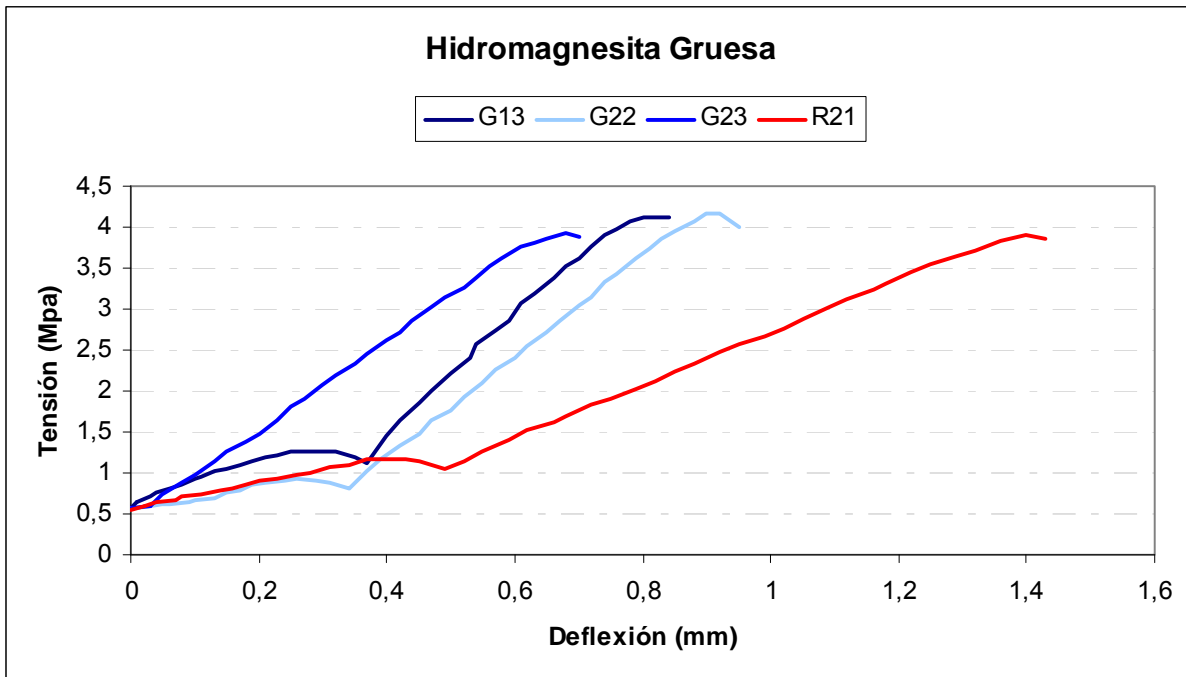


Figura 5.10. Tensión deflexión del mortero epoxídico modificado con hidromagnesita gruesa a 80°C

5.1.3 Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C

Para poder hacer una comparación del comportamiento que tiene este tipo de morteros en las diferentes situaciones estudiadas, se ha realizado la siguiente gráfica de barras donde se muestran las tensiones máximas obtenidas en los ensayos de flexotracción realizados agrupadas según la composición del mortero.

Observando los resultados graficados podemos ver una clara diferencia entre el comportamiento de los morteros epoxídicos a temperatura ambiente y aquellos que han sido sometidos a 80°C. Esto se debe a la transición vítrea que sufren los morteros epoxídicos entre los 60 y 90 °C, donde se produce un cambio viscoelástico y una pérdida de la resistencia así como un aumento notable de la deformabilidad.

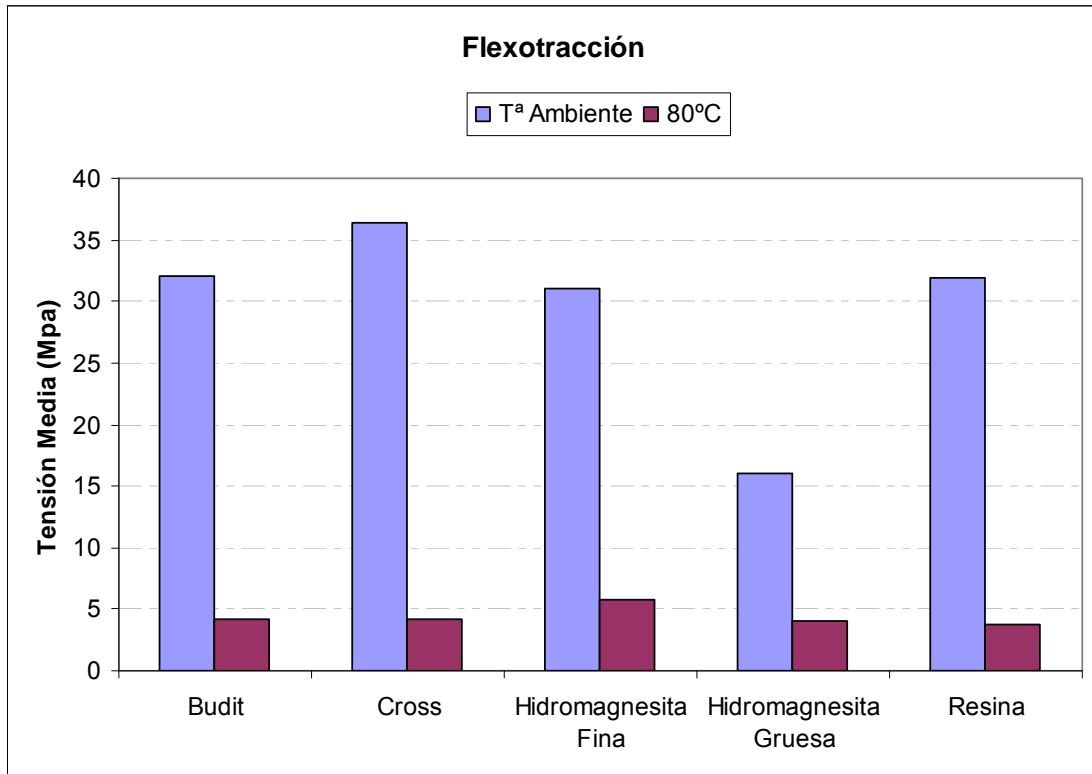


Figura 5.11. Comparativa flexotracción en función de la temperatura ensayada

Analizando de manera más detenida, podemos ver como en el caso de los morteros aditivados con Budit 3141 y Cros C70, mejoran mínimamente la resistencia respecto al mortero sin modificar, tanto en los casos a temperatura ambiente como a 80°C

En cambio con los morteros aditivados con Hidromagnesita si que se observan diferencias notables. Si nos fijamos en el comportamiento que tiene este tipo de mortero temperatura ambiente, podemos observar como disminuye un poco la resistencia en comparación con el mortero sin aditivar. Pero sin embargo, a temperaturas cercanas a los 80°C se ve una clara mejora a la hora de realizar los ensayos a flexotracción. También en el caso de la Hidromagnesita gruesa “mejora”, al comportarse mucho peor que la resina, esperábamos unos resultados similares, pero aun estando tan disgregado se llega a una resistencia máxima muy parecida a la del mortero epoxídico.

5.2 Compresión probetas simples

5.2.1 A temperatura ambiente

En la siguiente tabla se muestran los datos recogidos tras someter a compresión las diferentes clases de probetas en igualdad de condiciones:

Retardante	Temperatura	Probeta	Fuerza Máxima (t)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	SD
Budit 3141	Ambiente	B11A	18,8	115,2	109,9	3,9
		B11B	18,4	112,3		
		B21A	17,6	108,1		
		B21B	17,7	108,4		
		B23A	18,2	111,5		
		B23B	17,0	104,2		
FR Cross C70	Ambiente	C11A	18,5	113,7	107,9	7,0
		C11B	18,6	114,0		
		C12A	18,3	112,1		
		C12B	17,9	109,7		
		C23A	16,2	99,0		
		C23B	16,2	99,1		
Hidromagnesita Fina	Ambiente	F11A	16,2	99,2	96,3	3,2
		F11B	16,1	99,9		
		F21A	15,8	97,1		
		F21B	14,8	91,0		
		F22A	15,5	94,9		
		F22B	15,6	95,7		
Hidromagnesita Gruesa	Ambiente	G11A	11,9	73,2	58,8	11,4
		G11B	7,3	44,7		
		G12A	10,9	66,6		
		G12B	10,8	66,4		
		G21A	8,1	49,8		
		G21B	8,5	52,2		
Resina	Ambiente	R11A	17,8	109,4	108,3	1,9
		R11B	18,0	110,2		
		R12A	17,3	106,3		
		R12B	17,8	108,9		
		R13A	17,8	109,2		
		R13B	17,2	105,5		

Tabla 5.3. Resultados compresión a temperatura ambiente

Si hacemos un análisis numérico de los resultados obtenidos, podemos observar como de manera general la adición de los diferentes retardantes de llama al mortero epoxídico no empeora el comportamiento mecánico de las probetas a excepción, y como viene siendo de costumbre, del caso aditivado con Hidromagnesita Gruesa, que como ya esperábamos, baja notablemente la resistencia llegando casi a ser un 50% inferior.

Tal y como hemos hecho en los ensayos anteriores, procederemos al análisis gráfico de las probetas ensayadas donde se muestra el comportamiento de la probeta a medida que se va incrementando la carga. Debido a que sometimos a ensayo una gran cantidad de probetas, para la realización de las gráficas se han cogido las curvas más representativas en cada caso.

Si observamos el comportamiento de las probetas modificadas con retardantes de llama Budit 3141 y Cros C70 respectivamente, podemos ver como el trazado de las gráficas es muy similar al del obtenido con las probetas de mortero epoxídico sin modificar, incluso, se podría decir que mejora sensiblemente su comportamiento, ya que los valores máximos obtenidos están por encima de los del mortero epoxídico sin modificar.

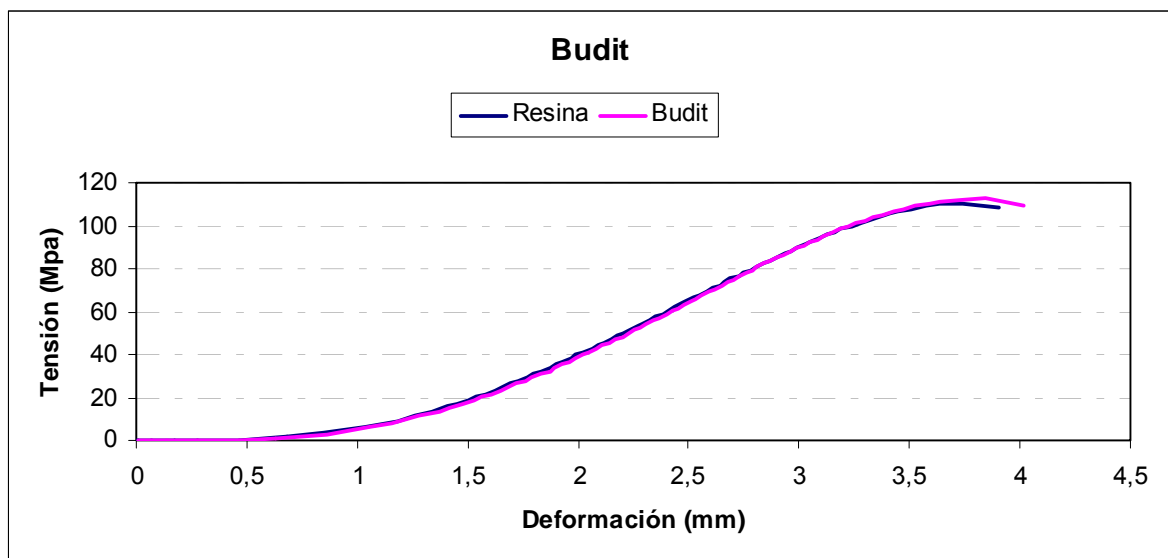


Figura 5.12. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Budit 3141 a temperatura ambiente

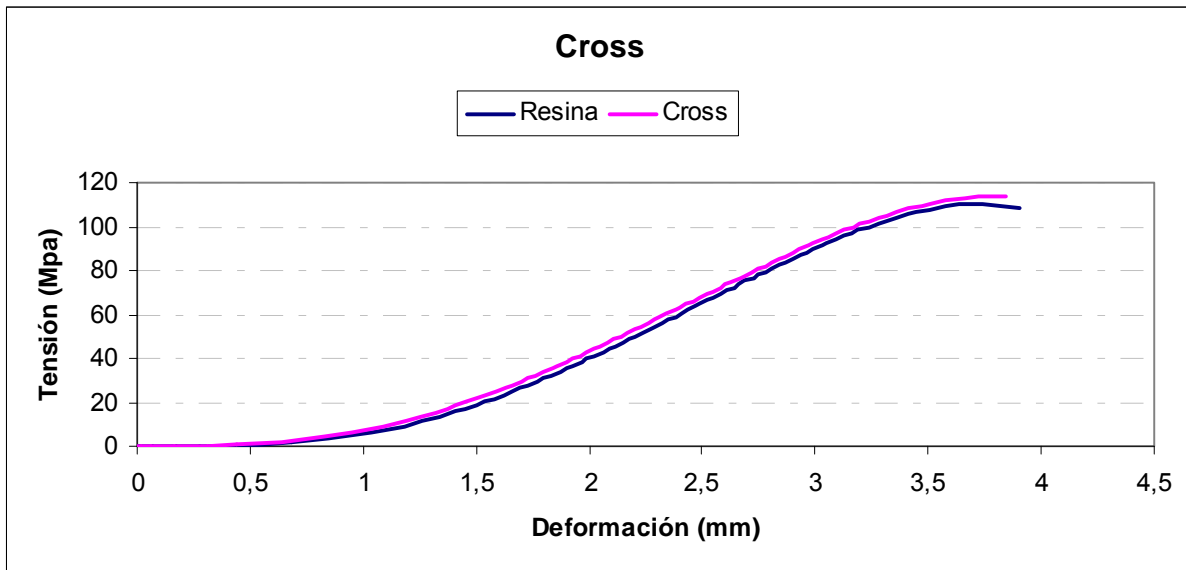


Figura 5.13. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Cross C70 a temperatura ambiente

En cambio en las probetas modificadas con Hidromagnesita si que podemos ver notables variaciones en cuanto a comportamiento se refiere, ya que tanto las probetas aditivadas con Hidromagnesita Fina o Gruesa sufren una disminución de la resistencia máxima registrada.

En el caso de la Hidromagnesita Fina, la resistencia sufre una leve disminución alrededor de un 11% menos respecto a la del mortero epoxídico sin modificar, al contrario de la Hidromagnesita gruesa, en la cual vemos como sufre una gran disminución de resistencia, llegando a valores próximos al 50% respecto el mortero inicial.

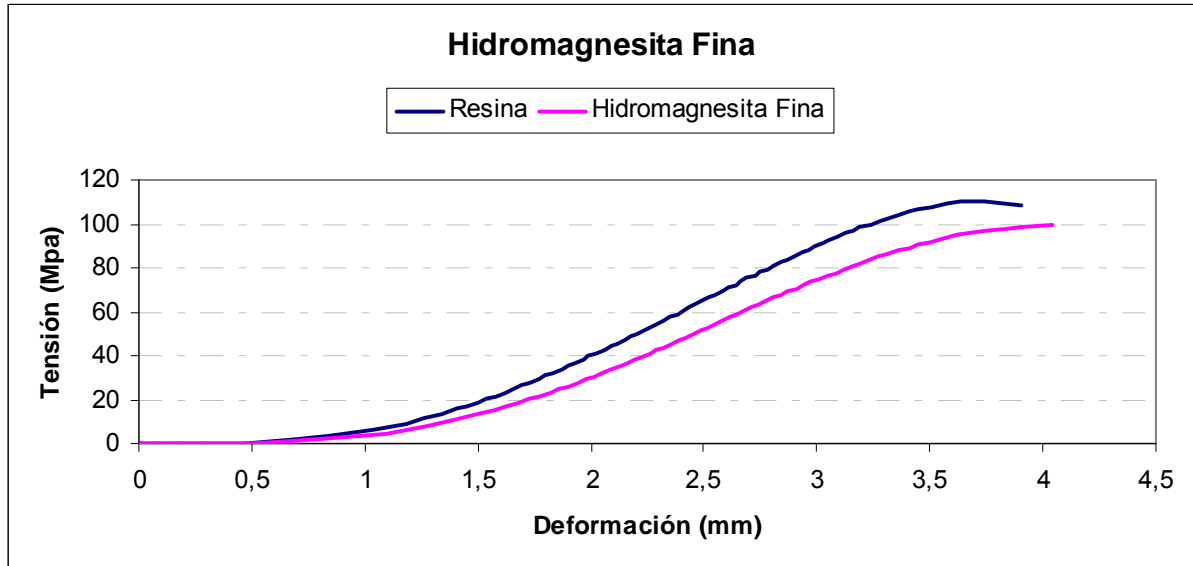


Figura 5.14. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina a temperatura ambiente

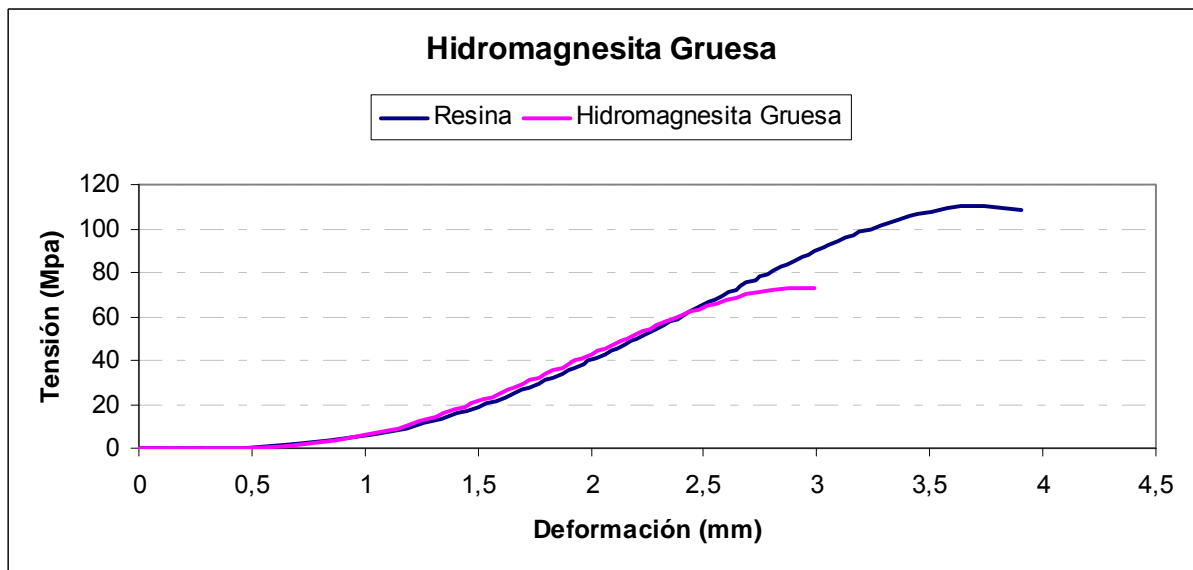


Figura 5.15. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita gruesa a temperatura ambiente

5.2.2 Temperatura de 80° C

En la siguiente tabla se muestran los datos recogidos tras someter a compresión las diferentes clases de probetas a 80°C y en igualdad de condiciones:

Retardante	Temperatura	Probeta	Fuerza Máxima (t)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	SD
Budit 3141	80°C	B12A	2,5	15,1	16,0	0,9
		B12B	2,5	15,2		
		B13A	2,8	17,0		
		B13B	2,7	16,7		
		B22A	2,5	15,3		
		B22B	2,6	16,9		
FR Cros C70	80°C	C13A	2,3	14,1	14,2	0,4
		C13B	2,4	14,6		
		C21A	2,3	14,3		
		C21B	2,2	13,5		
		C22A	2,4	14,4		
		C22B	2,3	14,3		
Hidromagnesita Fina	80°C	F12A	3,9	23,9	24,2	1,1
		F12B	3,8	23,6		
		F13A	4,0	24,4		
		F13B	4,2	25,5		
		F23A	3,7	22,5		
		F23B	4,1	25,2		
Hidromagnesita Gruesa	80°C	G13A	4,0	24,5	21,8	1,7
		G13B	3,7	22,7		
		G22A	3,4	20,8		
		G22B	3,2	19,4		
		G23A	3,6	22,0		
		G23B	3,5	21,4		
Resina	80°C	R21A	2,4	15,0	13,1	1,4
		R21B	2,1	13,0		
		R22A	2,1	12,9		
		R22B	1,9	11,6		
		R23A	1,9	11,7		
		R23B	2,4	14,5		

Tabla 5.4. Resultados compresión a temperatura ambiente

Analizando los resultados mostrados en la anterior tabla, podemos ver como en esta ocasión todas las formulaciones aditivadas con retardantes de llama sometidas a ensayo de compresión a una temperatura de 80°C incrementan su resistencia a notablemente respecto al mortero epoxídico sin modificar, destacando el incremento que sufren las probetas aditivadas con hidromagnesita.

A continuación procederemos al análisis gráfico de las probetas ensayadas. Al igual que en el apartado anterior y debido a que sometimos a ensayo una gran cantidad de probetas, para la realización de las gráficas se han cogido las curvas más representativas en cada caso.

Al observar el comportamiento de las probetas modificadas con retardante de llama Budit 3141 y Cros C70 respectivamente, podemos ver como no se ve alterada la resistencia máxima. En las probetas modificadas con Cross C70, podemos ver como la resistencia ha bajado mínimamente, al contrario del caso aditivado con Budit 3141, donde nos encontramos con que la resistencia ha aumentado también en un porcentaje muy pequeño.

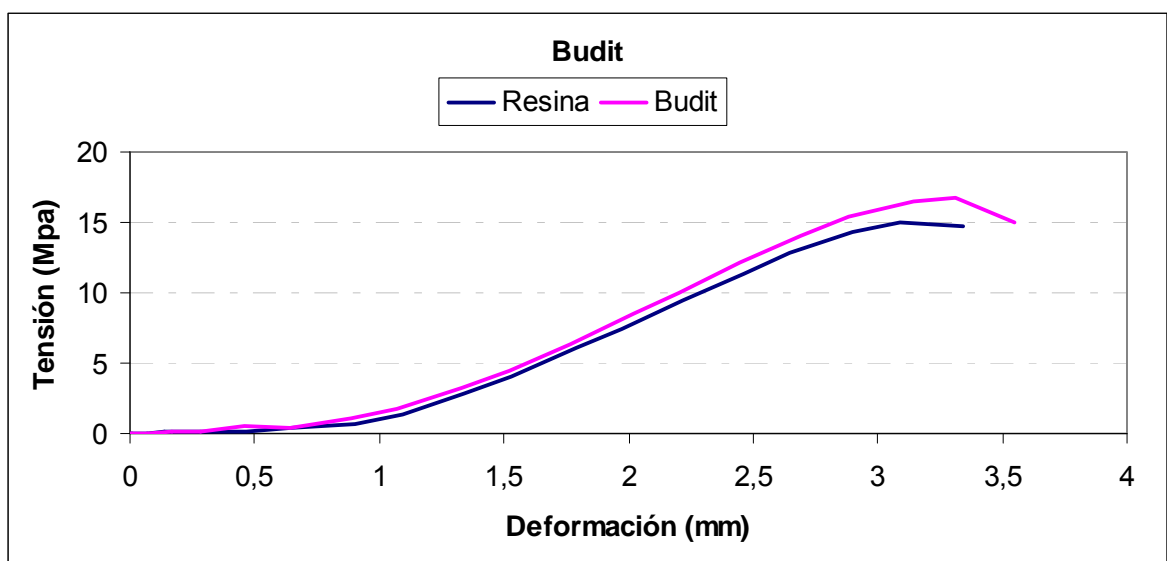


Figura 5.16. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Budit 3141 a 80°C

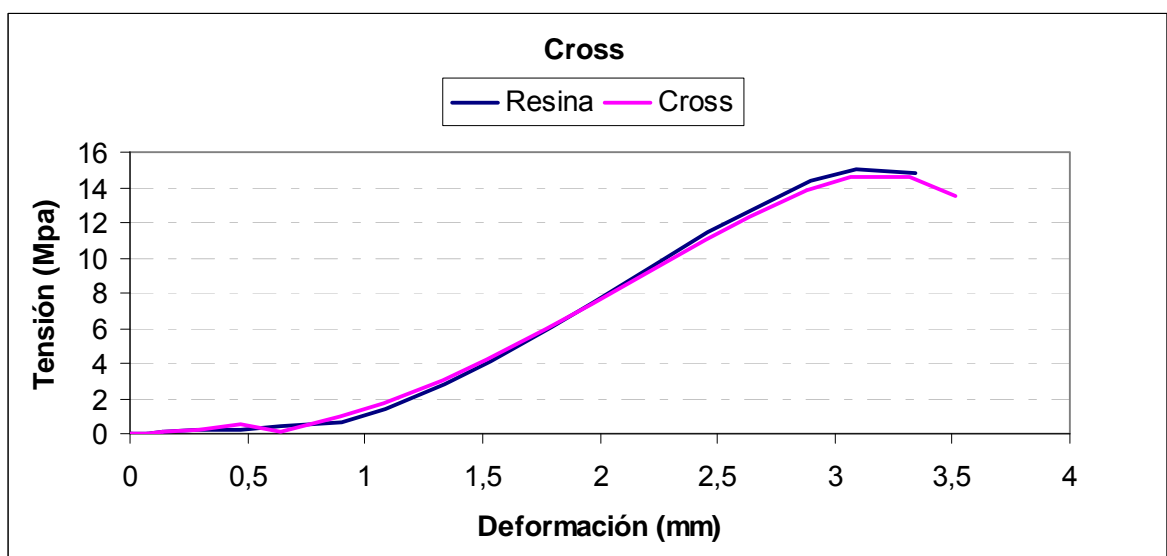


Figura 5.17. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Cross C70 a 80°C

Si observamos los resultados obtenidos tras ensayar las probetas modificadas con Hidromagnesita, vemos como el resultado se incrementa notablemente, llegando incluso a valores que se ven mejorados un 50% respecto a la resistencia obtenida a partir del mortero sin modificar.

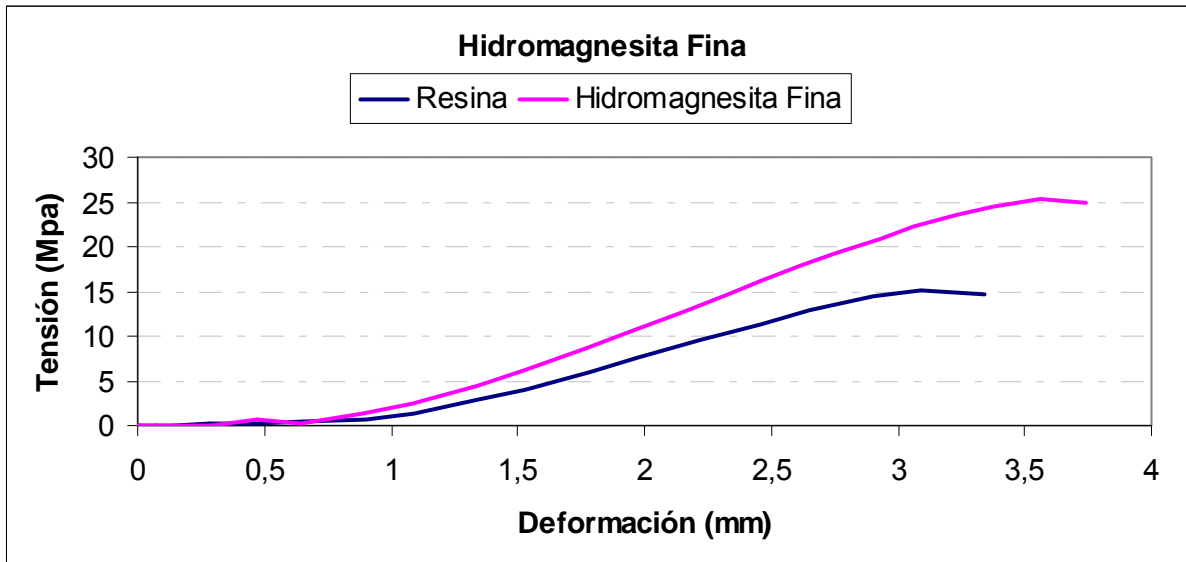


Figura 5.18. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina a 80°C

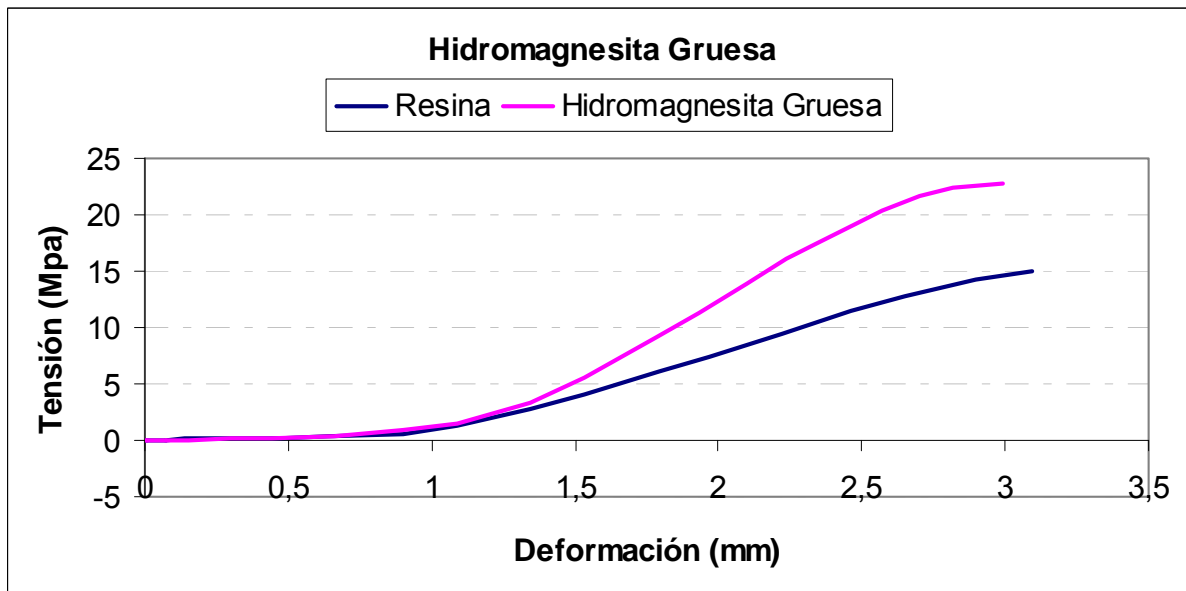


Figura 5.19. Tensión deformación del mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina a 80°C

5.2.3 Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C

Para poder hacer una comparación del comportamiento que tiene este tipo de morteros en las diferentes situaciones estudiadas, se ha realizado el siguiente gráfico de barras donde se muestran las tensiones máximas obtenidas en los ensayos de compresión realizados agrupadas según la composición del mortero.

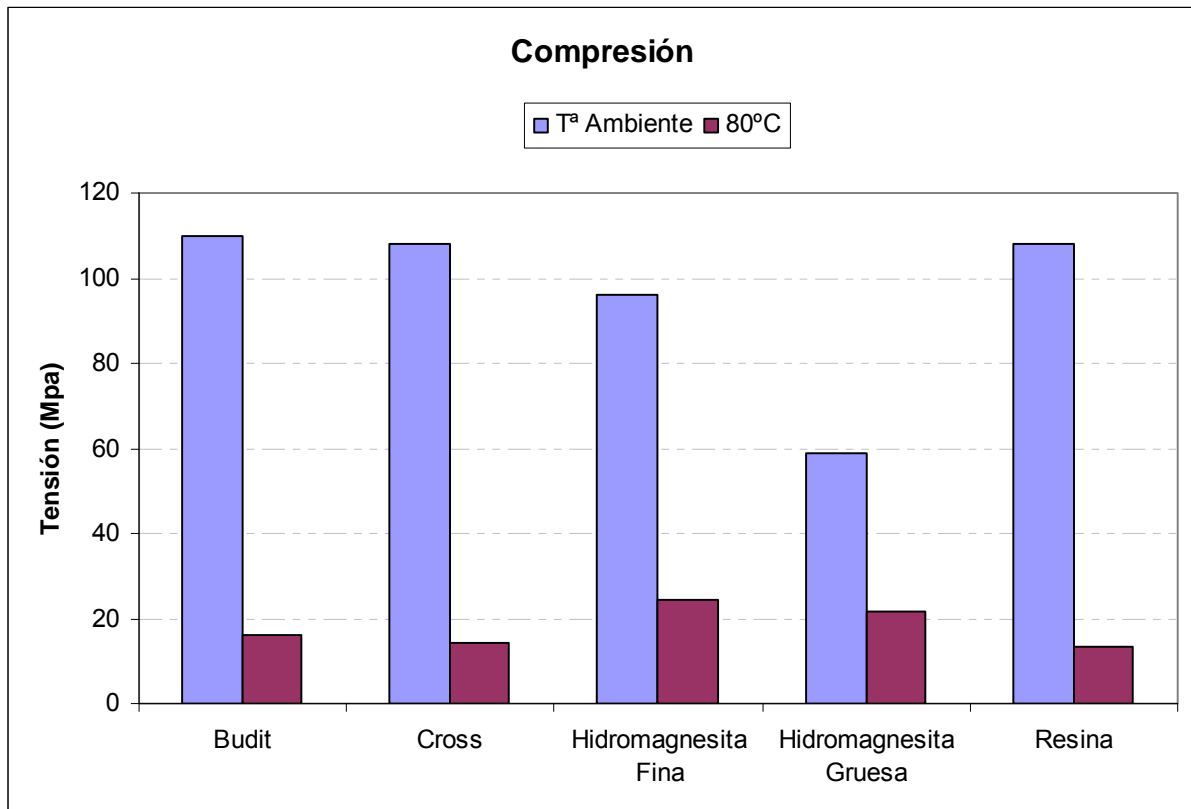


Figura 5.20. Comparativa compresión en función de la temperatura ensayada

En este gráfico podemos observar como los retardantes de llama Budit 3141 y Cros C70, no alteran significativamente la resistencia del mortero epoxi tanto a temperatura ambiente como a 80°C. En el caso de la Hidromagnesita fina si que se observan diferencias, a 80°C es la formulación que mejores resultados ha mostrado aunque a temperatura ambiente pierde algo de resistencia.

5.3 Compresión vs flexotracción

Con estas gráficas se puede observar como los diferentes retardantes de llama aditivados al mortero epoxídico siguen un patrón muy similar en cuanto al comportamiento a flexotracción y a compresión en las dos temperaturas estudiadas.

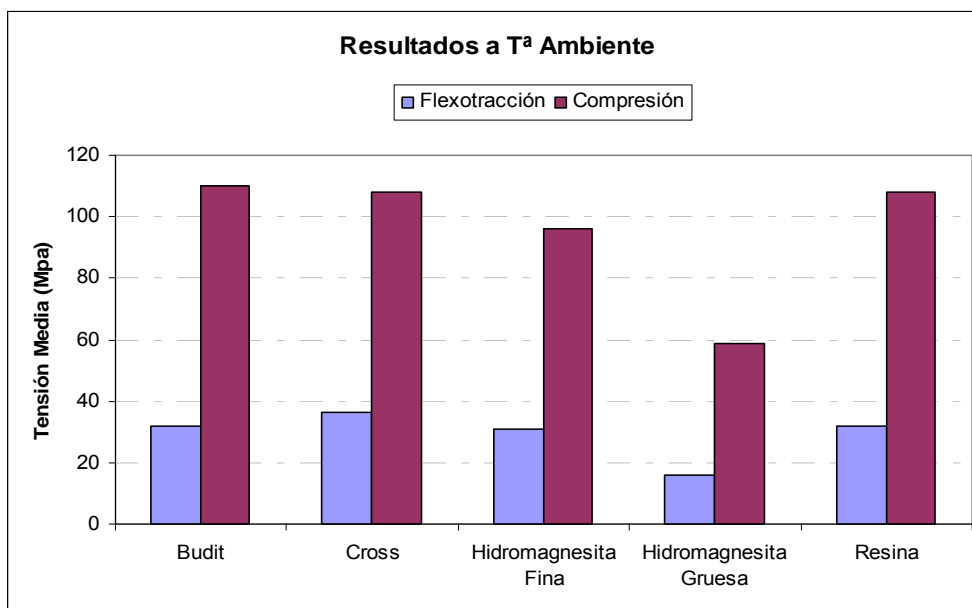


Figura 5.21. Comparativa flexotracción vs compresión a temperatura ambiente

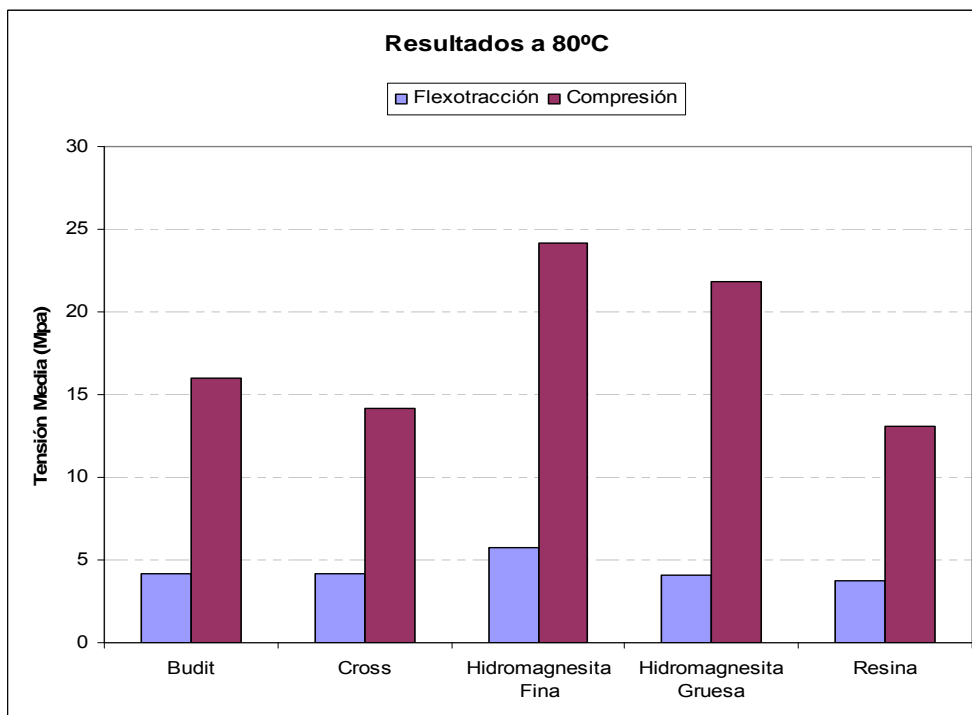


Figura 5.22. Comparativa flexotracción vs compresión a 80°C

5.4 Flexotracción probetas mixtas

Con este tipo de ensayo, no solo se estudia la resistencia máxima de la probeta, sino que uno de los objetivos primordiales de este ensayo es analizar el comportamiento de la junta entre los materiales y analizar la superficie resultante en la zona de rotura.

5.4.1 A temperatura ambiente

Para poder estudiar el comportamiento de las probetas mixtas sometidas a flexotracción, se ha configurado una tabla resumen con todos los datos característicos del ensayo y así poder hacer una comparación según las diferentes dosificaciones.

Retardante	Probeta	Fuerza Máxima (t)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	Zona de rotura
Budit 3141	BX21	0,45	10,39	10,28	Mortero de cemento portland
	BX22	0,51	11,63		
	BX23	0,38	8,82		
Cros C70	CX11	0,41	9,39	9,03	Mortero de cemento portland
	CX12	0,35	8,02		
	CX13	0,42	9,67		
Hidromagnesita Fina	FX21	0,25	5,77	7,25	Mortero de cemento portland
	FX22	0,29	6,64		
	FX23	0,41	9,34		
Hidromagnesita Gruesa	GX11	0,14	3,28	3,39	Unión entre morteros
	GX12	0,16	3,73		
	GX13	0,14	3,15		
Resina	RX11	0,45	10,37	10,31	Mortero de cemento portland
	RX12	0,46	10,49		
	RX13	0,44	10,08		

Tabla 5.5. Resultados flexotracción probetas mixtas a temperatura ambiente

En cuanto al comportamiento de la junta, cabe mencionar que todas las probetas se comportaron de la manera esperada, rompiendo en la mayoría de los casos por la zona de mortero de cemento Portland, muy próximas a la zona de unión, a excepción de las probetas aditivadas con Hidromagnesita Gruesa, ya que debido a su falta de cohesión no se formó la unión lo suficientemente fuerte como en los casos de los otros retardantes.

5.4.2 Temperatura de 80° C

En esta ocasión, y a diferencia del las probetas ensayadas a temperatura ambiente, podemos observar como la resistencia a flexotracción en probetas sometidas a temperaturas cercanas a los 80 °C de mortero epoxi modificado se ve mejorada en comparación con el mortero no modificado. En cambio, las probetas aditivadas con Hidromagnesita gruesa, se ve seriamente disminuida su resistencia a flexotracción.

En cuanto al comportamiento de la junta, al someter a ensayo las probetas a una temperatura donde el mortero epoxídico sufre una transformación vítrea y aumenta su plasticidad, durante el ensayo se observa una rotura plástica rompiendo en todos los casos por la zona de unión, hecho que se corrobora si comparamos los valores obtenidos con al ensayar las probetas simples y mixtas a 80°C siendo estos de valores similares.

Retardante	Probeta	Fuerza máxima (t)	Tensión Máxima (Mpa)	Tensión Media (Mpa)	Zona de rotura
Budit 3141	BX11	0,2	3,7	3,7	Unión
	BX12	0,2	3,7		
	BX13	0,2	3,7		
Cros C70	CX21	0,2	4,6	4,2	Unión
	CX22	0,2	3,7		
	CX23	0,2	4,3		
Hidromagnesita Fina	FX11	0,2	4,6	4,7	Unión
	FX24	0,2	4,2		
	FX25	0,2	5,3		
Hidromagnesita Gruesa	GX21	0,1	0,5	0,5	Unión
	GX22	0,1	0,7		
	GX23	0,1	0,4		
Resina	RX21	0,2	4,3	3,5	Unión
	RX22	0,1	3,0		
	RX23	0,1	3,3		

Tabla 5.6. Resultados flexotracción probetas mixtas a 80°C

5.4.3 Discusión de resultados a temperatura ambiente VS 80°C

Observando el comportamiento analizado gráficamente, podemos observar como la resistencia sufre un descenso en caliente respecto a temperatura ambiente, debido a la fase de transición vítrea.

No solo se observan cambios en cuanto a comportamiento mecánico, sino que en la zona de rotura, cuando la analizamos a temperatura ambiente, se observa como rompe por la zona de mortero de cemento Pórtland, mientras que si observamos las probetas sometidas a temperatura, la rotura se manifiesta justo en la zona de unión.

No todas las roturas en la zona de unión son de iguales características, sino que en función del retardante se puede observar como la distribución de mortero en la superficie va variando.

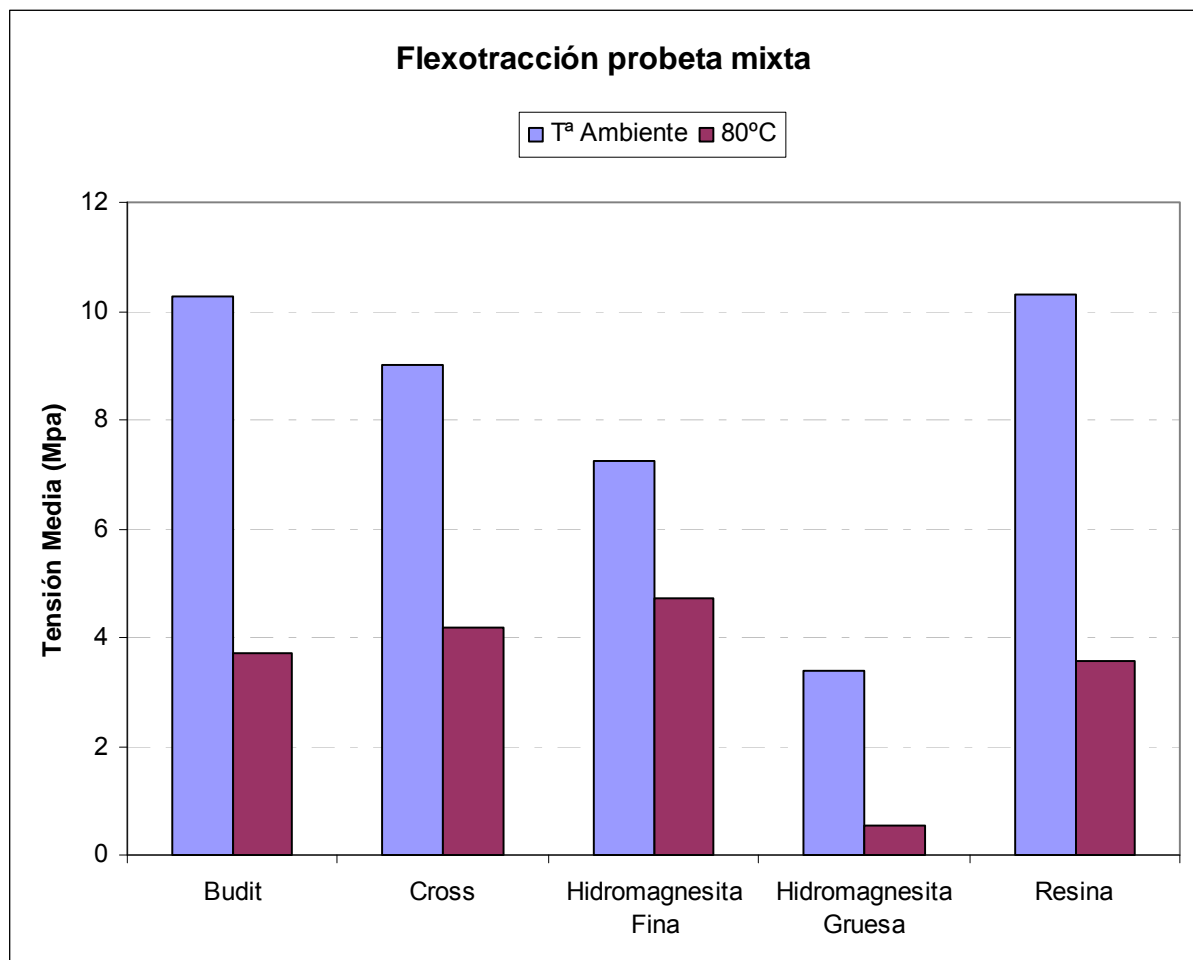


Figura 5.23. Comparativa flexotracción probetas mixtas a temperatura ambiente vs. 80°C

A continuación se muestran una serie de fotografías de las diferentes zonas de rotura obtenidas del ensayo a flexotracción de probetas mixtas agrupadas por temperatura ensayada con en el siguiente orden de aparición (nombradas de izquierda a derecha):

- Probeta mixta con mortero modificado con Budit 3141.
- Probeta mixta con mortero modificado Cros C70.
- Probeta mixta con mortero epoxídico sin modificar.
- Probeta mixta con mortero modificado con Hidromagnesita fina.

Si nos fijamos en las superficies expuestas en las fotografías en la foto 5.1., podemos ver como el material que se muestra en ambas mitades es el mismo. Esto confirma, tal y como se ha comentado con anterioridad, que la rotura al someter a flexotracción a temperatura ambiente las probetas mixtas se produce por la zona de mortero de cemento portland.

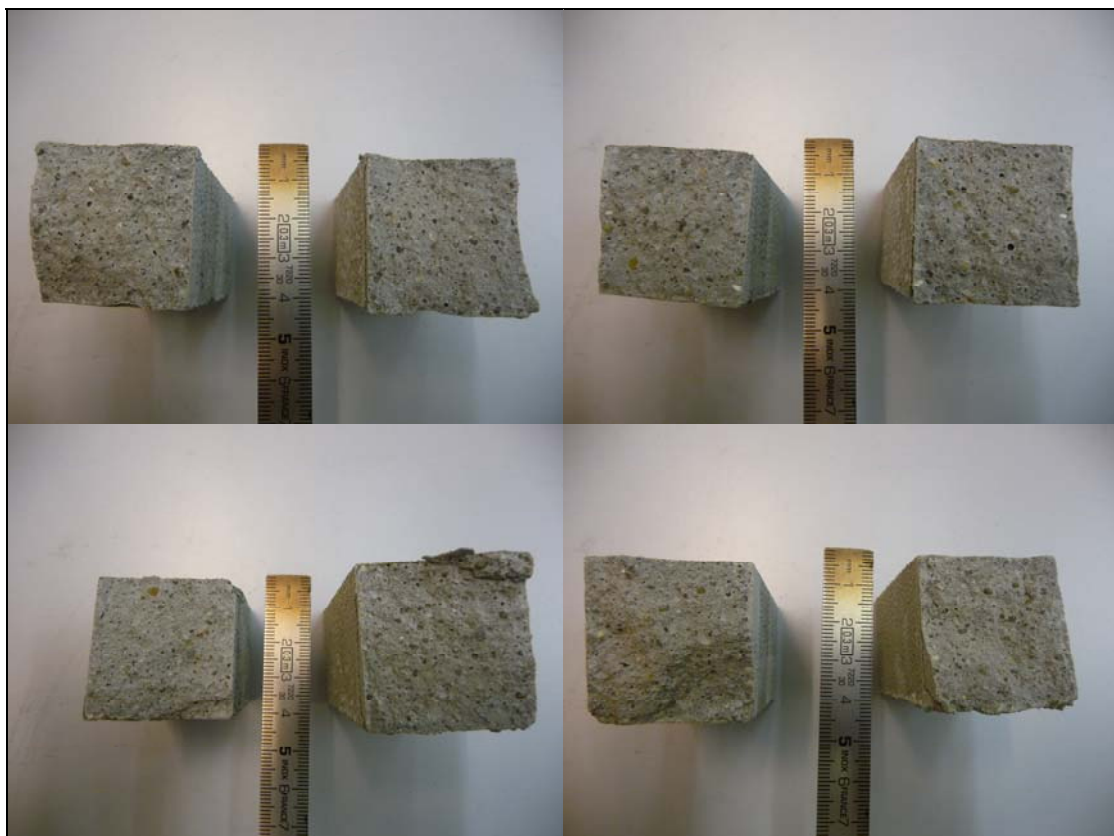


Foto 5.1. Zona de rotura a temperatura ambiente

Lo mismo ocurre con el caso mostrado en la foto 5.2. En esta ocasión, las probetas mostradas son las ensayadas a una temperatura de 80°C, con lo que al haber sufrido el mortero epoxídico una transformación vítrea y adoptado un comportamiento más viscoelástico, este ha perdido parte de su capacidad de adherencia produciéndose así la rotura por la zona de unión tal y como podemos observar en las fotografías ya que se muestran como en ambas zonas hay restos de mortero epoxídico.

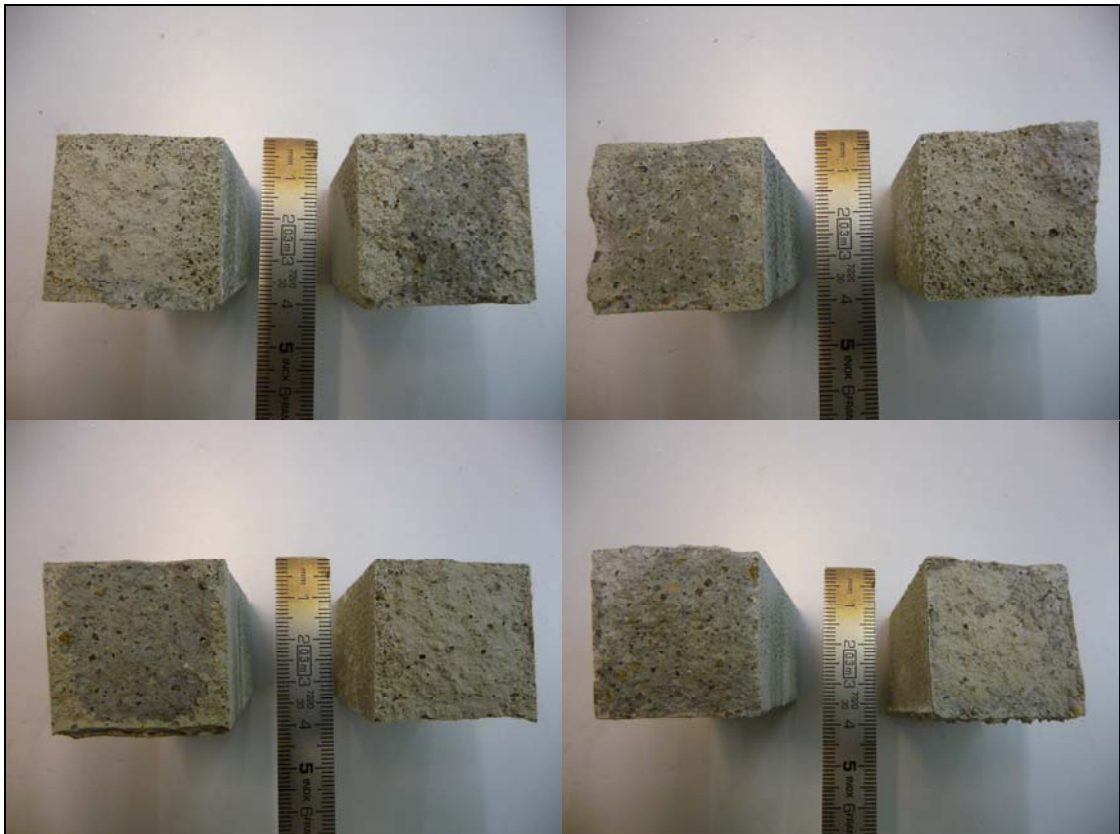


Foto 5.2. Zona de rotura 80°C

Cabe mencionar que en el caso de las probetas mixtas con mortero modificado con Hidromagnesita gruesa el comportamiento ha sido similar rompiendo en ambos casos claramente por la zona de unión tal y como se muestra a continuación:



Foto 5.3. Zona de rotura en probetas mixtas de mortero modificado con hidromagnesita gruesa

6 MICROSCOPIA ÓPTICA CON MICROSCOPIO PETROGRÁFICO

Para poder observar la unión entre el mortero de cemento portland y el mortero epoxídico después de haber sido sometidas a flexotracción, se realizan láminas finas de las probetas mixtas en sentido perpendicular a la unión.

Además de observar la unión, este tipo de microscopía nos permite ver la disposición de los áridos en el mortero, así como el efecto del retardante de llama añadido al mortero epoxídico.

6.1 Funcionamiento y partes del Microscopio Petrográfico

El microscopio petrográfico se utiliza para examinar e identificar los minerales transparentes y translúcidos en sección delgada, basándose en sus propiedades ópticas, y es igualmente útil para la interpretación de la textura de las rocas.

Este tipo de microscopio se distingue del microscopio biológico porque está equipado de una platina giratoria y dos filtros polarizadores, uno situado debajo de la platina (polarizador) y otro encima de aquella (analizador).

Un microscopio petrográfico tiene los dispositivos ópticos de cualquier otro microscopio (fuente de iluminación, objetivos y oculares) que sirven para aumentar el tamaño de la imagen. Su particularidad es que utiliza luz polarizada, que es aquella que vibra en un solo plano, a diferencia de la luz ordinaria o blanca que vibra en todas las direcciones alrededor de la línea de propagación. Para la obtención de esta luz polarizada se utilizan dos prismas (nícoles) de calcita, colocados uno por debajo (el polarizador) y otro por encima (el analizador) de la muestra de roca que se va a estudiar. Los planos de vibración (de polarización) del polarizador y del analizador son perpendiculares entre sí.

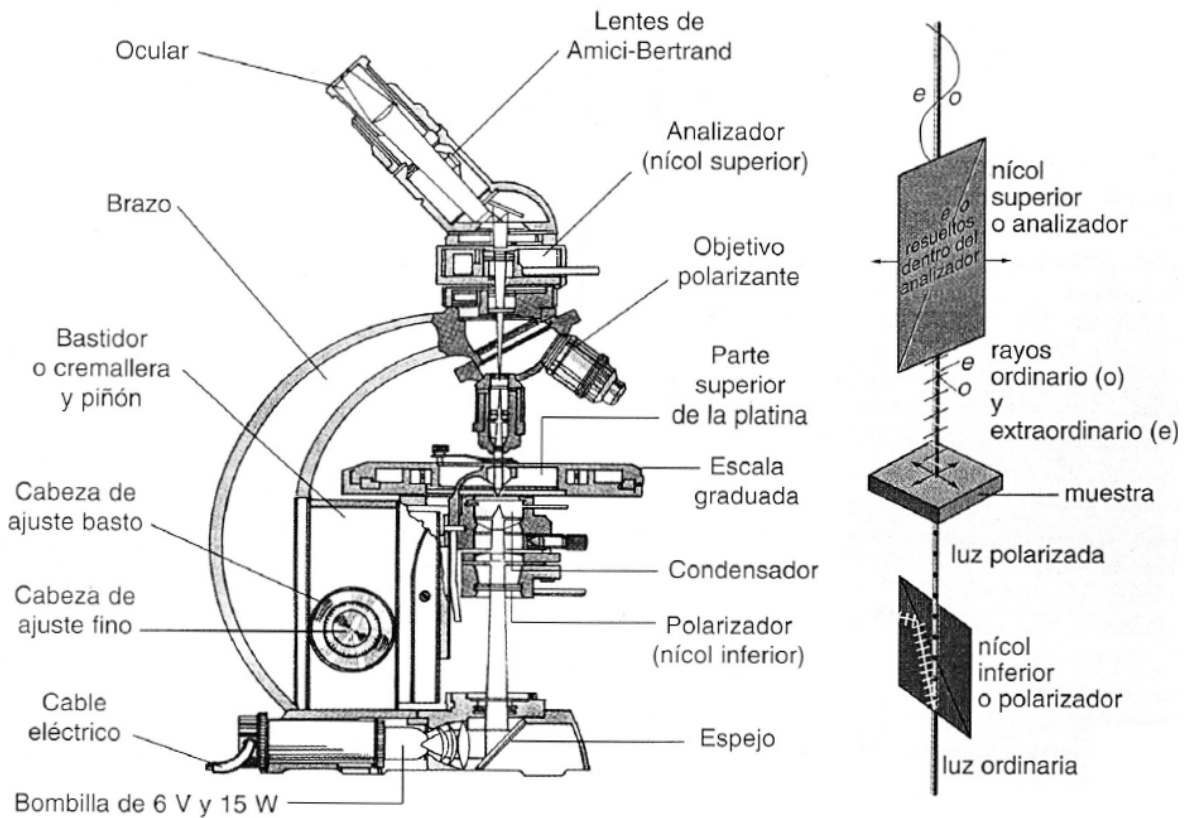


Figura 6.1. Sección de un microscopio polarizante de investigación y esquema de la trayectoria de la luz.

En un microscopio polarizante la luz pasa a través del nícol inferior o polarizador donde se difracta y sale un único haz de rayos que vibra en un solo plano. Este haz de luz polarizada pasa a través de la lámina delgada y se divide en dos series de rayos que vibran en dos planos perpendiculares entre sí, el rayo ordinario y el extraordinario, y con velocidades diferentes que son específicas de cada mineral. La observación de las rocas en estas condiciones, es decir con nícoles paralelos (NP ó LPP = luz polarizada paralela), permite determinar algunas características de los minerales, como su color, pleocroismo, relieve, etc. Cuando introducimos el analizador la observación es entonces con nícoles cruzados (NC ó LPX = luz polarizada cruzada), y los dos rayos que proceden de la lámina delgada pasan a vibrar en un mismo plano, pero conservan la diferencia de velocidad inicial y en consecuencia llegan al observador con un desfase, que es la causa de otras propiedades, como los colores de interferencia, que son también propios de cada mineral. Con algunas lentes accesorias se pueden determinar otras características ópticas de los minerales que a veces son necesarias para su identificación.

Este instrumento tiene un portaobjetivo giratorio con cuatro objetivos de aumentos diferentes y la rotación del portaobjetivo permite un cambio de aumento colocando el objetivo en posición vertical, directamente, encima de la lámina delgada.

El enfoque del microscopio implica ajustar la distancia entre el objetivo y el objeto examinado. Se obtiene modificando la altura de la platina y los dos mandos de dicho control (tronillo macrométrico para ajuste de distancias mayores y el micrométrico para el ajuste fino o de pequeñas distancias).

La subplatina comprende, además del polarizador inferior (giratorio), un condensador y un diafragma de iris. Estos equipos permiten la observación de minerales con un haz fuertemente convergente de luz polarizada (combinación del condensador y el diafragma de iris), pero también con un haz de luz no convergente (es decir, luz paralela).

6.2 Preparación de láminas finas para microscopía petrográfica

Para poder observar la unión entre el mortero de cemento portland y el mortero epoxídico en el microscopio petrográfico, se tuvieron que realizar láminas finas. Para una mejor observación en el microscopio, previamente se hizo una selección de probetas, donde las elegidas fueron aquellas en las que la zona de rotura se produjo mas lejos de la junta.

Todas las probetas observadas con el microscopio petrográfico habían sido previamente ensayadas a flexotracción.

Antes de realizar el corte, las probetas se tienen que impregnar en resina para que se puedan manipular adecuadamente y para que el corte sea estable, ya que en nuestro caso el material es poroso. Este corte se realiza perpendicularmente a la unión entre los dos morteros. Después de realizar el corte, la sección obtenida se pule hasta obtener una lámina transparente (30 micras de espesor aproximadamente).

En total, se realizaron 7 láminas finas de diferentes formulaciones de mortero epoxídico, repartidas de la siguiente manera:

- Mortero epoxídico sin modificar: 1 Ud.
- Mortero epoxídico modificado con retardante de llama:
 - o Budit: 2 Ud.
 - o Cross: 2 Ud.
 - o Hidromagnesita fina: 2 Ud.

De algunas probetas se realizan dos láminas finas ya que a la hora de prepararlas la superficie obtenida a ambos lados de la unión no era la suficiente para poder observarla bien en el microscopio.

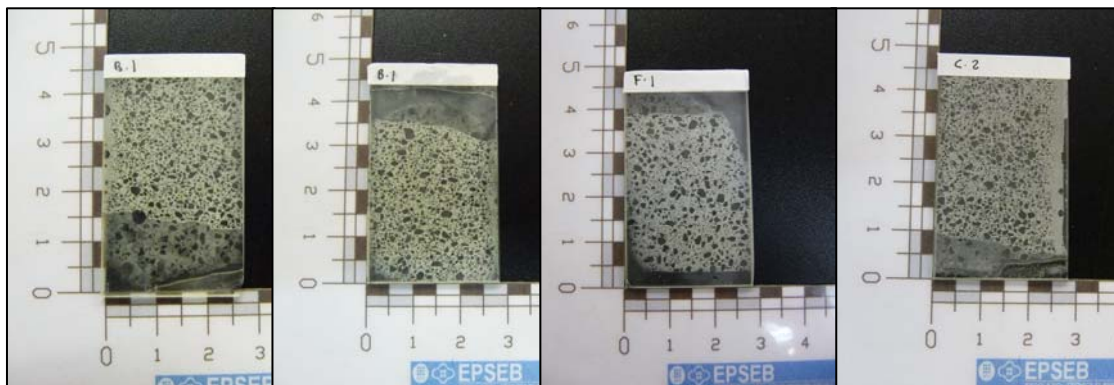


Foto 6.1. Láminas de 4,5 x 2,5 cm. analizadas en el microscopio petrográfico.

6.3 Resultados obtenidos

A continuación, mostramos una serie de fotos obtenidas tras la sesión de microscopía petrográfica en el laboratorio de materiales de la EPSEB. Las fotos situadas a la izquierda, muestran la imagen con los nículos paralelos, mientras que la imagen de la derecha con muestra esa misma toma con los nículos cruzados.

- Lámina fina de mortero epoxídico sin modificar

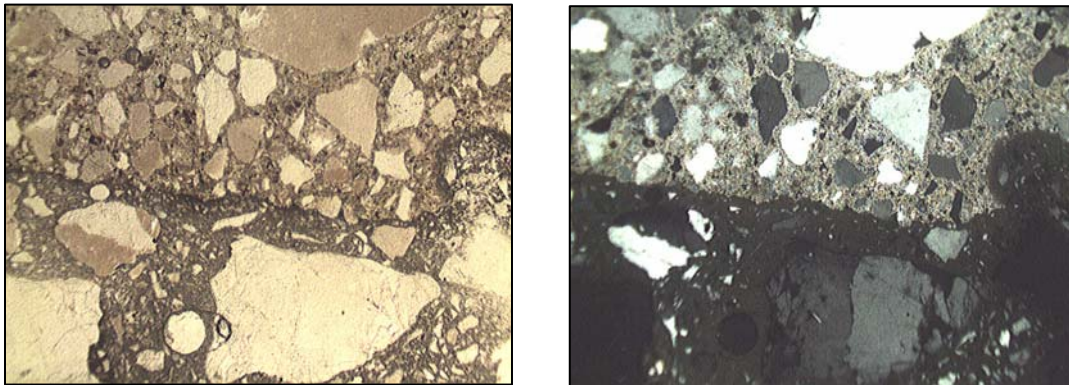


Foto 6.2 Fotos realizadas con el microscopio petrografico con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente.

En estas fotografías, podemos observar como la interfase entre los materiales es buena, ya que se puede ver como la resina (situada en la parte de abajo) penetra en el mortero de cemento portland sin dejar huecos visibles.

- Lámina fina de mortero epoxídico modificado con Budit 3141

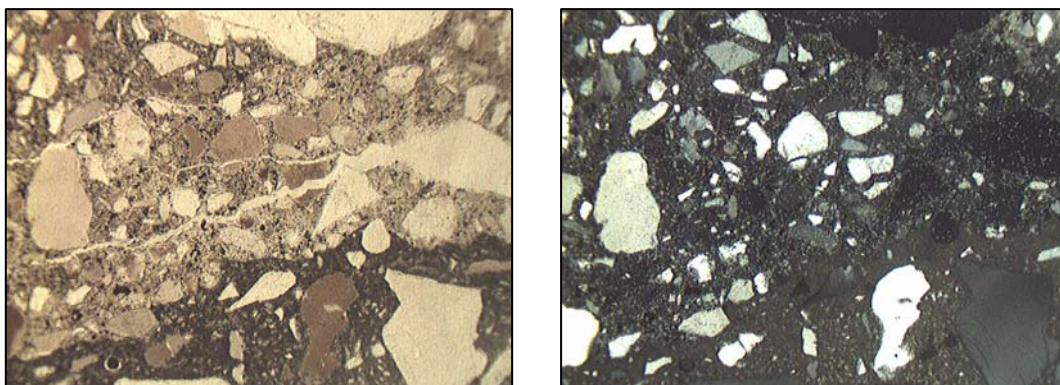


Foto 6.3 Fotos realizadas con el microscopio petrografico con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente.

En estas fotos podemos observar, al igual que en la anterior, que la interfase entre los dos materiales no ha sufrido ninguna alteración al incorporar el retardante de llama en la composición del mortero.

Si nos fijamos bien, podemos observar pequeñas fisuras en la parte del mortero de cemento portland (en la parte superior de la fotografía) cerca de la interfase. Estas fisuras son debidas a que las láminas se hicieron después de someter las probetas a ensayo de flexotracción, y por lo tanto, son fruto de la tracción a la que estuvo sometida la probeta.

- Lámina fina de mortero epoxídico modificado con Cross C70

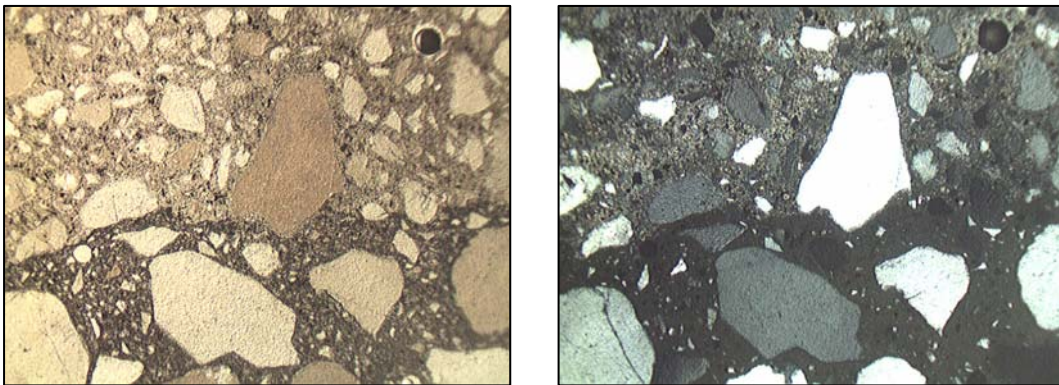


Foto 6.4 Fotos realizadas con el microscopio petrografico con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente.

Lámina fina de mortero epoxídico modificado con Hidromagnesita fina

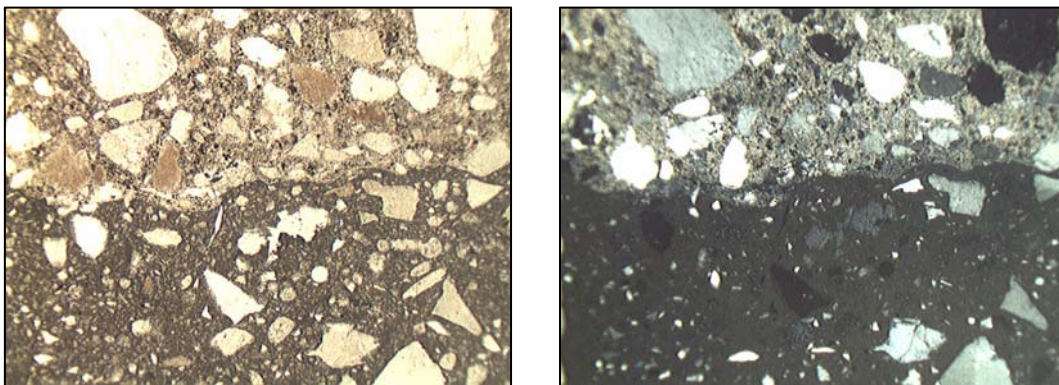


Foto6.5 Fotos realizadas con el microscopio petrografico con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente.

En este tipo de probeta, podemos observar como aún habiendo utilizado el mismo tipo de árido para la realización del mortero epoxídico que en las ocasiones anteriores, da la sensación de que hay más cantidad de árido, y de menor tamaño, que en las formulaciones anteriores.

7 ENSAYOS RELIZADOS PARA DETERMINAR LA REACCIÓN AL FUEGO

7.1 Ensayo de Goteo

Para poder estudiar la reacción al fuego de los morteros epoxi modificados frente al convencional, realizamos el ensayo de goteo. El ensayo consiste en someter las probetas, en las condiciones que se indican más adelante, a la radiación de una fuente de calor constante y provocar eventualmente la inflamación de los gases desprendidos.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Fuego de la EPSEB y han sido realizados siguiendo las recomendaciones de la Norma Española UNE 23-725-90.

1. Equipo necesario para la realización del ensayo

Para poder llevar a cabo el ensayo necesitaremos el siguiente material:

- Un vatímetro y un regulador de tensión.
- Un radiador de una potencia nominal de 500 w cuya superficie radiantes un disco de cuarzo transparente de 100 mm. \pm 5 mm. de diámetro. Este radiador deberá ser calibrado según la norma UNE 23-729, de forma que la energía radiada sobre una superficie paralela situada a 30 mm. de distancia sea de aproximadamente 3 W/cm².
- Un cronómetro.
- Una campana.
- Thermometer data logger HIBOK-18C
- Una columna vertical que soporte:
 - o Receptáculo de gotas en forma de cuba cilíndrica de \varnothing 118 mm
 - o Un soporte de probeta formado por un anillo metálico fijo, horizontal, de 122 mm. de diámetro interior, sobre el que se coloca un anillo metálico movable, horizontal, de 118 mm. de diámetro, sobre el que se sitúa una tela metálica inoxidable de las características siguientes:
 - Luz de malla: 2,10 x 2,10 mm.
 - Diámetro de hilo: 0,7 mm.

El radiador se coloca en la parte superior de la columna vertical, con el disco radiante horizontal y hacia debajo de manera que pueda elevarse ligeramente y girar horizontalmente para poderlo apartar de la probeta cuando el ensayo lo requiera. Un tope permite volverlo a su posición normal de trabajo. Hay que tener en cuenta que en posición normal de trabajo los ejes verticales del radiador y del portaprobetas deben coincidir.

El equipo de ensayo se coloca en el interior de una campana en la que el sistema de ventilación no esté en funcionamiento durante el ensayo.



Foto 7.1. Equipo de goteo

2. Dimensiones de las probetas.

Para igualar las condiciones de ensayo y así poder obtener unos resultados comparables, todas las probetas ensayadas son de idénticas características:

- Forma, dimensión y masa.

- Probetas cuadradas de mortero epoxi de 100x100x5 mm. y una masa de 107,8 gr.

- Número de probetas.

- El número de probetas utilizadas en este ensayo es de 1 por cada formulación a estudiar, haciendo un total de cinco.

3. Método Operativo

a. Operaciones previas al ensayo

Antes de hacer el ensayo, se procede al calibrado del radiador cada vez que sea necesario, conforme a la norma UNE 23-729, con una tolerancia respecto a la curva de 0-5 %.

Para asegurarnos que el radiador se encuentra en la posición correcta respecto a la probeta, se pone una probeta sobre el portaprobetas en el que la rejilla debe estar perfectamente limpia y se montan sobre la columna vertical el radiador, el portaprobetas de manera que:

- La superficie radiante del radiador se encuentre exactamente a 30 mm. de la cara superior de la probeta.
- Se coloca el radiador de manera que no radie a la probeta y se conecta para que adquiera la temperatura necesaria y se encuentre en régimen estacionario (aprox. unos 45 minutos).

Introducimos el termopar, encargado de recoger las temperaturas en el interior de la cámara estanca de humos a través de una pequeña abertura en el lateral de ésta, colocando el extremo de este en la cara superior de la probeta para así poder registrar la temperatura y lo conectamos al ordenador para poder recibir la información recogida.

b. Procedimiento de ensayo

Cuando ya tenemos la temperatura del radiador estable y el termopar en la posición correcta y conectado al ordenador, procedemos a cerrar las puertas de la cabina y una vez hecho esto, mediante una palanca exterior a esta colocamos el radiador en posición de ensayo a la vez que se acciona el cronómetro.



Foto 7.2. Cabina estanca para la realización del ensayo.

Durante los cinco minutos que marca la normativa como duración del ensayo, la probeta puede inflamarse o no. En caso de que esta se inflamase, el radiador debe ser retirado de la probeta tan pronto como se produzca la llama y devolverse a su posición una vez esta se haya extinguido. Este procedimiento se repetirá a lo largo de todo el tiempo de ensayo tantas veces como sea necesario.



Foto 7.3. Probeta inflamada durante el ensayo de goteo.

Los tiempos de ignición y extinción de la probeta deben ser anotados para cada llama, así como las observaciones que se crean oportunas a lo largo de ensayo.

Hay que tener en cuenta que si el material funde, se encoge o se expande, se modificará la altura del radiador de modo que la distancia entre la superficie radiante y la cara superior de la probeta se mantenga lo más próxima posible a 30 mm.

Una vez pasados los cinco minutos de ensayo, y en caso de no haber llama en la probeta, se retira el radiador de esta y se abre la compuerta superior para proceder a la extracción de humos mediante una campana. Si se diese el caso de tener la probeta en llamas una vez transcurrido el tiempo de ensayo, se dejara correr el cronómetro hasta que la llama se extinga y se tomará nota de ello.

7.2 Ensayo del cono calorimétrico

El Cono Calorimétrico es un método de ensayo de fuego estandarizado internacionalmente a través del a ISO 5660-1 y que se usa para determinar la mayor parte de las propiedades de un producto que son importantes en un fuego o incendio real. Estas propiedades, a menudo llamadas de Reacción al Fuego, tienen especial importancia en los primeros productos que quedan expuestos a la acción del incendio tales como revestimientos interiores de muros y cielos.

Con este mecanismo, es posible simular incendios de diferentes intensidades solamente cambiando la potencia de calor del cono calefactor para exponer las muestras de ensayo a niveles de flujo de calor incidente, entre 0 y 100 Kw/m².

Los ensayos serán evaluados en términos del tiempo de ignición, tasa de liberación de calor, pérdida de masa y calor efectivo de combustión.

1. Equipo necesario para la realización del ensayo

Para la realización de este ensayo, hicimos uso del cono calorimétrico instalado en el Centre Català del Plàstic (CCP) de Terrassa.

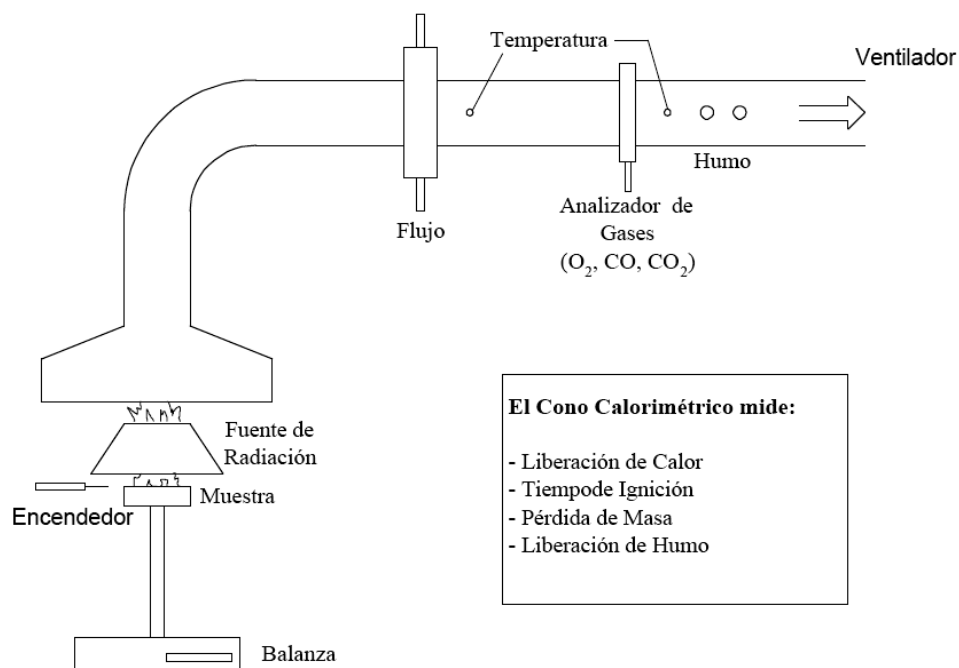


Figura 7.1. Esquema del cono calorimétrico

2. Dimensiones de las probetas.

Para igualar las condiciones de ensayo y así poder obtener unos resultados comparables, todas las probetas ensayadas son de idénticas características:

- Forma, dimensión y masa.

Probetas cuadradas de mortero epoxi de 100x100x5 mm. y una masa de 107,8 gr.

- Número de probetas ensayadas.

Se someten a ensayo 5 clases diferentes de probetas, una por cada formulación que se quiere estudiar, de manera que las probetas ensayadas son las siguientes:

- o Mortero de resina epoxi sin modificar
- o Mortero de resina epoxi modificado:
 - Hidromagnesita fina
 - Magnifin H5
 - Budit 3141
 - Cross C70

3. Método operativo

El procedimiento de ensayo se siguió según las indicaciones marcadas por la ISO 5660-1.

Antes de introducir la probeta dentro de del cono, se debe situar esta sobre una base de papel de aluminio, la cual debe sobresalir aproximadamente por todos los lados 5 mm. para así poder evitar que en caso de desprendimiento de residuos durante el ensayo dañe el recipiente. Una vez envuelta se sitúa la probeta dentro del recipiente, se coloca sobre la celda de carga encargada de registrar la masa perdida de la muestra durante la combustión y se tara la báscula.

A continuación, se deja que la temperatura del cono se estabilice sobre los 800°C, se retira el protector del foco de calor y se introduce un encendedor de chispa eléctrica para facilitar la inflamación de los gases volátiles desprendidos por la muestra. Una vez inflamados, cuando la llama es consistente, se registra este momento como tiempo de ignición. Se deja que la probeta se consuma hasta que se autoextinga. Los gases de combustión son recogidos por una campana de extracción para el análisis en el mismo equipo mediante el consumo de oxígeno. Este análisis de gas es el que permite calcular la tasa de liberación de calor (HRR).

8 RESULTADOS ENSAYO REACCIÓN AL FUEGO

A continuación presentamos los resultados obtenidos de someter las probetas a los diferentes ensayos a fuego para poder determinar su comportamiento.

8.1 Ensayo de Goteo

Este ensayo nos permite comparar los diferentes tiempos de ignición obtenidos al someter la probeta a ensayo, de manera que podemos ver los diferentes tiempos de ignición en función del retardante aditivado, así como la duración y cantidad de inflamaciones. Se considera que una inflamación es efectiva cuando su duración supera los 3 segundos.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las diferentes inflamaciones obtenidas del ensayo:

	Tiempo de primera ignición	Nº de inflamaciones totales	Duración Media (s)	Nº de inflamaciones efectivas
Budit 3141	1' 20"	5	41,5	5
Cross C70	0' 52"	13	14,08	7
Hidromagnesita Fina	1' 03"	28	5,41	24
Hidromagnesita Gruesa	0' 47"	23	18	6
Resina	1' 26"	6	30,8	6

Tabla 8.1. Resultados obtenidos en el ensayo de goteo.

Con estos datos, podemos observar como la cantidad de inflamaciones totales y efectivas en los retardantes Budit 3141 y Cros C70 son inferiores a los de Hidromagnesita, pero también se tiene que tener en cuenta que la duración media de las inflamaciones es inferior. Estas diferencias son debidas a que el Budit 3141 y el Cros C70 a estas temperaturas, necesitan más tiempo para generar la capa protectora, en cambio las Hidromagnesitas al ser un retardante endotérmico libera oxígeno y empieza absorber calor desde el inicio del ensayo.

8.2 Ensayo del Cono Calorimétrico

A continuación se muestra la gráfica obtenida durante el ensayo en la que se muestra la liberación de calor frente al tiempo transcurrido hasta la total extinción de la probeta.

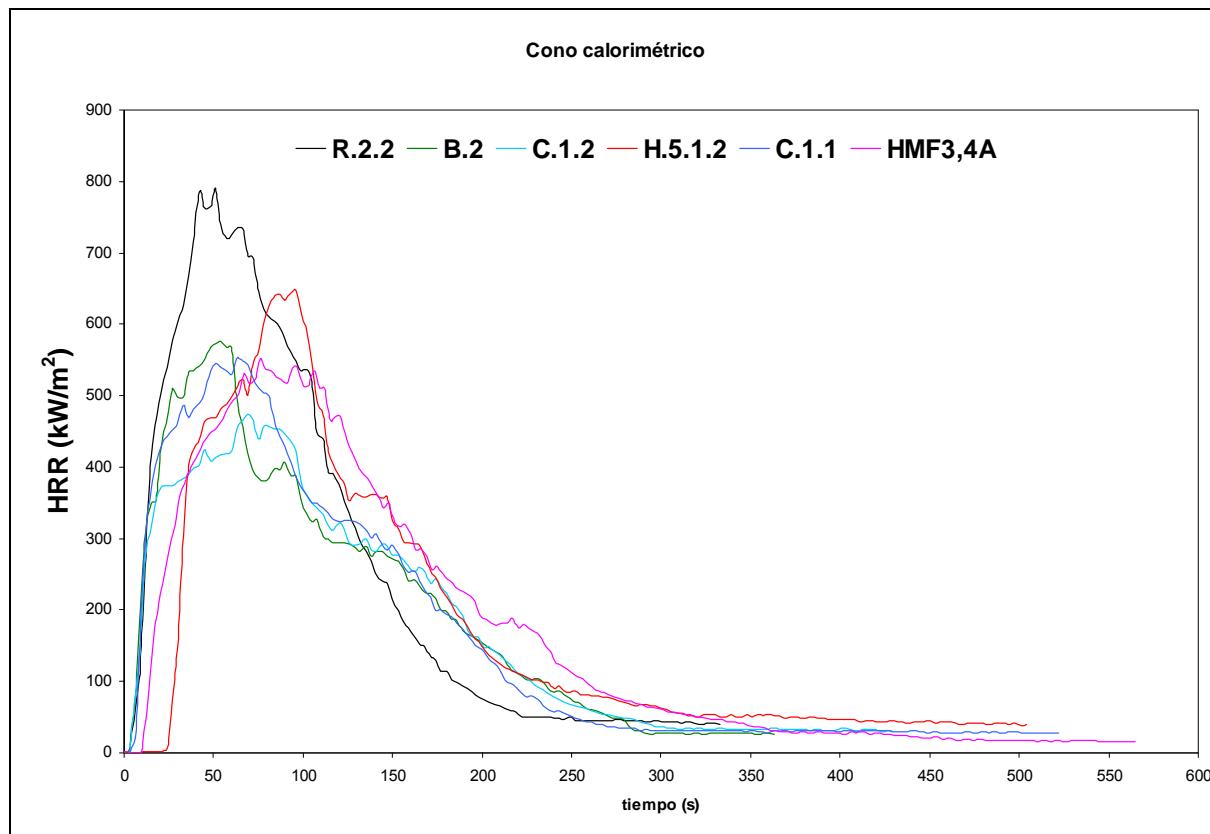


Figura 8.1. Gráfica obtenida en el ensayo del cono calorimétrico.

A través de esta gráfica, podemos observar los diferentes tiempos de ignición, así como la cantidad de calor desprendida durante el ensayo. Analizando las diferentes formulaciones estudiadas, podemos ver como las probetas que contienen retardantes Budit 3141 y Cros C70, tienen un tiempo de ignición muy similar al del mortero epoxídico sin aditivar, mientras que la cantidad de calor desprendida es aproximadamente un 25% inferior en comparación al calor desprendido por el mortero sin modificar. En cambio, si nos fijamos en la probeta aditivada con Hidromagnesita Fina, podemos ver como alcanza valores similares en cuanto a calor desprendido, pero con la diferencia de que tarda más tiempo en alcanzar dicho valor, además de tener un tiempo de ignición un poco más tardío.

En el caso de las probetas modificadas con el retardante de llama Magnifín H5, se puede observar como la cantidad de calor desprendida es superior a la del resto de retardantes, pero siempre siendo inferior a los valores obtenidos con probetas de mortero epoxídico sin modificar. Pero si observamos los tiempos de ignición, podemos ver como es el retardante que mejor se comporta, ya que es el que más retrasa el tiempo de ignición.

Si nos fijamos en el FPI (Fire Performance Index) - parámetro definido como la proporción entre tiempo de ignición (TTI) y el pico de calor máximo generado (PHRR), obtenemos un índice relacionado con el tiempo de evacuación en caso de un incendio real – las probetas que presentan mejores resultados son las de mortero modificado con Hidromagnesita fina y Magnifín H5 ya que tienen un valor mayor, y a mayor índice, más tiempo se dispone para realizar la evacuación.

Probetas	Tiempo primera ignición (seg)	PHRR (kW/m ²)	Tiempo de PHRR (seg)	AVHRR (180s) (MJ/m ²)	AVHRR (240s) (MJ/m ²)	FPI (TTI/PHRR)*1000 (sm ² /kW)	PHRR (kW/m ²)	AVHRR (180s) (240s)	AVHRR (180s)	AVHRR (240s)	FPI*1000
R11	3	829,0	51	73809	80252	58,8	51,0	76348, 81722,5	76348,	81722,5	58,8
R22	3	786,5	51	78887	83193	58,8	45,0	62349,0	62349,0	70670,5	69,4
B1	3	540,5	36	61211	69741	83,3	66,0	63592,5	63592,5	71193,5	45,5
B2	3	574,5	54	63487	71600	55,6	642,0	67303,0	67303,0	74480,0	32,7
C11	3	544,0	63	66639	73487	47,6	96,5	68858,5	68858,5	79447,5	113,9
C2	3	474,0	69	60546	68900	43,5					
H512	24	642,0	96	67303	74480	218,8					
HMF3.3A	12	590,0	96	69958	79688	104,2					
HMF3.4A	12	545,5	97	67759	79207	123,7					

Tabla 8.2. Resultados obtenidos en el ensayo del cono calorimétrico.

9 Conclusiones

A lo largo de este proyecto se han realizado diversos tipos de ensayo que nos han ayudado a caracterizar diferentes formulaciones de mortero epoxídico modificado. La realización de un proyecto final de grado de base experimental, nos ha permitido darnos cuenta de la complejidad que tiene llevar a cabo el estudio de un material. Es necesaria la utilización de muchos tipos de técnicas para complementar la información y para cada una de ellas es importante realizar un elevado número de probetas.

Una vez analizados los resultados obtenidos, hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- Se ha podido observar cómo tras la incorporación de retardantes de llama en morteros epoxídicos no sólo las propiedades mecánicas no se ven alteradas sino que a 80°C dichas propiedades se ven mejoradas.
- A pesar del gran porcentaje de hidromagnesita fina añadida al mortero epoxídico, éste no se ve afectado negativamente respecto al comportamiento mecánico a temperatura ambiente, sino que incluso a altas temperaturas, es el que presenta un mejor comportamiento mecánico.
- Los retardantes de llama Budit 3141 y FR Cross C70, no empeoran las propiedades mecánicas del mortero epoxídico a temperatura ambiente, ya que tienen un comportamiento muy similar respecto al mostrado en el caso del mortero sin modificar. En cambio a 80°C sí que se notan ligeras mejoras de las propiedades mecánicas, además de disminuir la cantidad de calor desprendida en el ensayo del cono calorimétrico.
- En cuanto a la unión, hemos podido ver cómo todos los materiales presentan una adherencia buena con el mortero a temperatura ambiente, ya que la rotura obtenida siempre ha sido por la parte de cemento y no por el epoxi, excepto en el caso de la Hidromagnesita Gruesa, en la cual la unión no es lo suficientemente resistente y rompe por la misma. Este comportamiento no es el mismo cuando las ensayamos a 80°C ya que pierde adherencia y la rotura es justo por la junta entre ambos materiales.

- En cuanto a los ensayos de reacción al fuego, los resultados más significativos son los obtenidos del cono calorimétrico, donde se muestra como realmente la cantidad de calor generada en los morteros con retardante de llama incorporado es significativamente inferior en todos los casos.
- El hecho de que la hidromagnesita sea un subproducto, supone una disminución de costes si lo comparamos con los retardantes comerciales como son Budit 3141 y Cros C70.

10 Bibliografía

Fernandez Canovas, M. (1981), *Las resinas epoxi en la construcción*. 2ª edición corregida y ampliada. Madrid

Franco, Mª P., Gonzalo, J.C. (2000) *Taller de Petrología: Enseñanza de la Petrología con el Microscopio Petrográfico*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Vol. 8.1. Universidad de Salamanca – Facultad de Ciencias.

Galan Gutierrez, L., Garralon Jorba, J. *Materiales de la Construcción: Morteros*. Universidad Politecnica de Madrid – Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.

ISO 5660-1:2002 *Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*

M.C.S. Ribeiro, et. al., *Flexural Performance of polyester and epoxi polymers mortars under severe thermal conditions - Cements & Concrete Composites 26 (2004) 803-809*

Mendo, L. D., *Estudio para la mejora del comportamiento al fuego de los morteros epoxi*. (Octubre de 2008) Proyecto final de carrera – EPSEB – UPC.

Prontuario Sika

UNE 83-701-94: *Materiales de reparación. Morteros epoxi para reparaciones en hormigón. Recomendaciones de uso*.

UNE-EN 1015-11: *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*.

UNE-EN 196-1:2005 *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*.

UNE 23-725-90: *Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles (ensayo complementario)*.

UNE 88-101-88:1988, *Método de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas.*

Vigil Montaña, M^a R., Pasporiza Martínez, A., Fernández Pierola, I. *Los Plásticos como materiales de la Construcción.* Universidad Nacional de educación a distancia.

Yoshihiko Ohama. *Handbook of Polymer – Modified concrete and Mortars. Properties and Process Technology.* Noyes Publications.

11 Agradecimientos

Ante todo, queremos darle las gracias a nuestras tutoras de proyecto Ana M^a Lacasta y Laia Haurie por todo el apoyo, asesoramiento e implicación mostrado en todo momento durante el proceso de realización del proyecto.

A todo el personal del Laboratorio de materiales de la EPSEB por su ayuda y consejos durante la elaboración de los ensayos y en especial a Joan Ramón Rossell, Marc Tous, y Antonia Navarro por su colaboración en diferentes aspectos de este proyecto.

Sin olvidar al personal del Laboratorio de fuego, que también han aportado su granito de arena.

Al personal del laboratorio del departamento de Ciencias de los materiales e Ingeniería metalúrgica de la Facultad de Química por su ayuda en la realización de ensayos y la utilización de la maquinaria allí disponible.

Y sobretodo, agradecer el apoyo recibido por todos aquellos que han estado al pie del cañón en todo momento ya sea ayudándonos en pequeños aspectos o bien ofreciendo apoyo moral cuando más se necesitaba.

En resumen, ¡muchas gracias por el apoyo recibido a todo el mundo!