

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

TESIS DOCTORAL

**PROTECCIÓN DE RECIPIENTES DE GASES LICUADOS Y/O
HIDROCARBUROS CON REVESTIMIENTO DE MORTEROS
MODIFICADOS PARA EVITAR FENÓMENO DE BLEVE**

Luis Moneo Peco

Orihuela, Junio de 2014

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

PROTECCIÓN DE RECIPIENTES DE GASES LICUADOS Y/O HIDROCARBUROS CON REVESTIMIENTO DE MORTEROS MODIFICADOS PARA EVITAR FENÓMENO DE BLEVE

TESIS DOCTORAL

Autor: Luis Moneo Peco
Ingeniero Industrial

DIRECTORES

D. José Antonio Flores Yepes
Dr. Ingeniero Industrial
Profesor colaborador
Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)

D. Joaquín Julián Pastor Pérez
Dr. Ingeniero Agrónomo
Catedrático de Escuela Universitaria
Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)

CERTIFICACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS DOCTORAL

D. Joaquín Julián Pastor Pérez, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Escuela Universitaria del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche. D. José Antonio Flores Yepes, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor colaborador del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

CERTIFICAN:

Que la Tesis Doctoral que lleva por título **“Protección de recipientes de gases licuados y/o hidrocarburos con revestimiento de morteros modificados para evitar fenómeno de BLEVE”**, de la que es autor el Ingeniero Industrial D. Luis Moneo Peco, ha sido realizada íntegramente bajo la dirección de ambos, en el Departamento Ingeniería, en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, durante el periodo comprendido entre los años 2011 y 2014.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en el R.D. 778/1998, de 30 de abril (B .O. E. de 1 de mayo de 1.998), autorizamos su presentación.

Y para que conste a todos los efectos, expido el presente certificado en Orihuela, a 16 de Junio de dos mil catorce.

Fdo: José Antonio Flores Yepes

Fdo: Joaquín Julián Pastor Pérez

**PROTECCIÓN DE RECIPIENTES DE GASES LICUADOS Y/O
HIDROCARBUROS CON REVESTIMIENTO DE MORTEROS
MODIFICADOS PARA EVITAR FENÓMENO DE BLEVE**

MEMORIA QUE PRESENTA EL INGENIERO INDUSTRIAL LUIS MOENO
PECO PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR



Vº Bº DE LOS DIRECTORES

D. José Antonio Flores Yepes

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor colaborador

Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)

D. Joaquín Julián Pastor Pérez

Dr. Ingeniero Agrónomo

Catedrático de Escuela Universitaria

Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)

RESUMEN

Las normativas referentes por un lado a la protección de esferas de gases e hidrocarburos, así como al transporte de mercancías peligrosas es cada vez más restrictiva, dadas las necesidades de control y seguridad que hay que solventar para evitar situaciones de peligro para personas y para medio ambiente.

Dadas estas necesidades, las empresas dedicadas a este tipo de servicios se encuentran en muchas ocasiones con la dificultad de compaginar seguridad con rendimiento económico, lo que provoca una serie de inconvenientes en ocasiones difícilmente solventables.

La aplicación de morteros modificados en base a sulfato cálcico, pueden constituir una solución eficaz a un coste competitivo en sustitución de otras soluciones.

Por otro lado, se aborda el fenómeno del BLEVE; es el acrónimo inglés de "boiling liquid expanding vapour explosion". Este tipo de explosión ocurre en tanques que almacenan gases licuados a presión, en los que la temperatura exterior, localizada normalmente por un incendio, hace que el líquido (o gas) del interior del tanque entre en ebullición y se incorpora masivamente al vapor en expansión. Si el vapor liberado corresponde a un producto inflamable, se genera una bola de fuego también en expansión.

Se pretende analizar compuestos de sulfato cálcico aditivado, con comportamiento térmico y refractario para el revestimiento y protección de las esferas de gases licuados e hidrocarburos, para evitar el fenómeno BLEVE. Para ello se analizarán los compuestos a desarrollar, y se comparará el resultado con los distintos procedimientos y/de materiales existentes en la actualidad.

ABSTRACT

The regulations relating to, on the one hand, to the protection of sphere of gases and hydrocarbons, as well as the transport of dangerous goods is increasingly restrictive, due to the control and safety needs which would have to resolved in order to avoid dangerous situations for people and environment.

Given these needs, the companies in charge of this kind of services have found it difficult to combine with security economic performance, resulting in a number of disadvantages, sometimes difficult to resolve.

The application of modified mortars based on calcium sulfate, can be an effective solution at competitive cost replacing other solutions.

On the other hand, addresses the phenomenon of BLEVE; it's the acronym for "boiling liquid expanding vapor explosion". This type of explosion takes place in tanks that storage pressurized liquefied gases, in which the outside temperature, normally located in a fire, is the cause of the liquid (or gas) inside the tank comes to a boil and it's incorporated massively into expanding vapor. If the steam released corresponds to a flammable product, a fireball is created also in expansion.

It aims to analyze additive composed of calcium sulfate with additives, and thermal and refractory performance for coating and protection of sphere of liquefied gases and hydrocarbons in order to avoid the BLEVE phenomenon. To that end we will analyze the development of compounds and the result will be compared with the different procedures and currently existing materials.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez, Catedrático de Escuela Universitaria, su participación en este proyecto.

Este trabajo de investigación sigue la línea investigadora comenzada por el Dr. José Antonio Flores Yepes, agradeciéndole su esfuerzo y tenacidad para abrir nuevos horizontes en la investigación de nuevos materiales.

Agradecer la ayuda inestimable a D. José Joaquín García Díaz, técnico del Departamento de Ingeniería por todo “su buen hacer” en cuanto al manejo del yeso y a Dr. Juan Manuel Berna Serna por su ayuda y colaboración.

Por último, deseo manifestar mi gratitud a todos aquellos amigos y familiares que me han apoyado en esta Tesis, y en especial a mi cuñado José D. Antonio González Pérez que nunca dejó de darme ánimos.



INDICE



Índice:	Página:
1.- ANTECEDENTES	15
1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN. JUSTIFICACIÓN.	16
1.2. BLEVE.	18
<i>Tabla 1: Resumen de los accidentes BLEVE.</i>	20
<i>Tabla 2: Resumen de causas BLEVE.</i>	20
<i>Figura 1. Esquema fenómeno BLEVE</i>	20
<i>Figura 2. Esquema de expansión del BLEVE</i>	23
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO.	24
1.2.2. TERMODINÁMICA DE LA BLEVE.	26
<i>Figura 3: Curva de saturación P-T</i>	27
<i>Figura 4: Gráfica P-T-V para gases licuables</i>	30
1.2.3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE ENTRAN EN EL PROCESO: TEMPERATURA/PRESIÓN.	32
<i>Figura 5: Gráfica P-T-V para gases licuables</i>	34
<i>Tabla 3. Propiedades críticas de gases licuados con potencial de BLEVE</i>	35
1.2.4. ACCIDENTES EN LA HISTORIA DE ESTE FENÓMENO.	40
1.2.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. PROTECCIONES ACTUALES.	45
1.2.5.1. LIMITACION DE LA PRESION.	46
1.2.5.2. LIMITACION DE LA TEMPERATURA.	47
1.2.5.3. PREVENCION DE IMPACTOS.	49
1.2.5.4. SISTEMAS MODERNOS DE PREVENCION.	50
1.2.5.5. REDISEÑO DE LAS VALVULAS DE SEGURIDAD.	50
1.2.5.5.1. INTRODUCCION DE MALLAS QUE RETARDAN LA APARICION DE LAS BLEVE's.	51
1.2.5.5.2. ADICION AL FLUIDO DE NUCLEOS INICIADORES DE LA EBULLICION.	52
1.2.6. ANTECEDENTES SOBRE SOLUCIONES QUE SEAN SUSCEPTIBLES DE EMPLEO PARA PREVER EL FENÓMENO.	53
<i>Figura 6: Pruebas de mallas en una esfera de 20 l</i>	55
<i>Fotografía 1: Esferas recubiertas para evitar BLEVE</i>	56
1.3. NUEVOS MORTEROS UTILIZANDO COMO BASE EL SULFATO CÁLCICO.	57
1.3.1. EL YESO.	57
<i>Fotografía 2: Estructura de cristales de yeso, obtenida por microscopia electrónica de barrido.</i>	57

1.3.1.1. FABRICACION DEL YESO.	58
<i>Tabla 4. Productos del resultado de la calcinación del aljez.</i>	59
1.3.1.2. RESEÑA HISTORICA.	59
1.3.1.2.1. YESO ARTESANAL	59
1.3.1.2.2. YESO INDUSTRIAL	62
1.3.1.2.3. YESOS DE TERCERA GENERACIÓN	63
1.3.1.3. TIPOS DE YESO.	64
<i>Tabla 5. Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.</i>	65
<i>Tabla 6. Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción.</i>	65
<i>Tabla 7. Especificaciones para los yesos de construcción.</i>	66
<i>Tabla 8. Especificaciones para los yesos especiales para la construcción.</i>	66
1.3.1.4. USOS DEL SULFATO CALCICO	67
1.3.1.5. YESOS ESPECIALES DE APLICACIÓN MANUAL PARA LA CONSTRUCCIÓN. (UNE 102-014-1: 1999; UNE 102-014-2: 1999; UNE 102-014-3: 1999).	67
1.3.1.6. PROPIEDADES DEL YESO.	70
<i>Tabla 9. Valores usuales A/Y correspondiente al amasado a saturación</i>	70
<i>Tabla 10. Relación entre el agua de amasado y la densidad</i>	71
<i>Tabla 11. Cálculos de expansión del fraguado</i>	72
<i>Figura 7. Expansión de fraguado con relación al tiempo</i>	73
<i>Tabla 12. Valores de resistencia iniciales.</i>	73
<i>Tabla 13. Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de construcción.</i>	74
<i>Tabla 14. Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de yeso en función de sus densidades.</i>	74
<i>Tabla 15. Inercia térmica, velocidad de propagación de la onda térmica y factor de amortiguamiento.</i>	75
<i>Tabla 16: Valores del aislamiento acústico en tabiques compuestos en los que interviene el yeso.</i>	76
<i>Tabla 17. Valores del coeficiente de absorción acústica para diversos materiales.</i>	77
1.3.1.6.1. UTILIZACIÓN DEL YESO.	77
1.3.1.7. MECANISMOS DE FRAGÜADO DEL YESO.	78
1.3.1.7.1. FACTORES: EL AGUA.	78

1.3.1.7.2. FACTORES: EL AMASADO.	79
1.3.1.7.3. FACTORES: LA TEMPERATURA.	80
1.3.1.7.4. TEORIAS DEL FRAGUADO.	80
<i>Figura 8. Sistemas de cristalización Ortorrombico (Anhidrita I y II).</i>	82
<i>Figura 9. Sistemas de cristalización Monoclinico (Dihidrato).</i>	82
1.3.1.7.5. FACTORES: RESISTENCIA DEL YESO.	83
1.3.2. ADITIVOS EN MORTEROS DE YESO.	84
1.3.2.1. TIPOS DE ADITIVOS EN MORTEROS DE YESO	84
1.3.2.2. PROPIEDADES DE LOS ADITIVOS.	85
1.3.3. VERMICULITA.	88
<i>Fotografía 3: Diferentes tipos de vermiculitas en función de su granulometría.</i>	89
<i>Fotografías 4 y 5: Granulometrías de Vermiculita.</i>	90
<i>Tabla 18. Análisis químico de la vermiculita exfoliada.</i>	90
<i>Tabla 19. Usos de la vermiculita exfoliada.</i>	91
1.4. MATERIALES EMPLEADOS EN LOS SISTEMAS ACTUALES. DESCRIPCIÓN DE LOS MISMOS.	91
1.4.1. VIDRIO CELULAR.	92
<i>Tabla 20. Características del vidrio celular.</i>	92
1.4.1.1. FABRICACIÓN	92
<i>Fotografía 6: Proceso fabricación vidrio celular</i>	93
1.4.1.2. CARACTERÍSTICAS	94
1.4.1.3. APLICACIONES	94
<i>Fotografía 7: Prueba de ignición del vidrio celular</i>	95
1.4.2. FIBRA DE VIDRIO. LANA DE VIDRIO.	95
<i>Fotografía 8: Fibra de vidrio</i>	97
<i>Tabla 21. Características de la fibra de vidrio</i>	98
1.4.2.1. PROPIEDADES	98
<i>Fotografía 9: Revestimiento de esferas con Fibra de vidrio</i>	100
1.4.3. LANA DE ROCA	100
<i>Figura 10: Esquema de la línea de fabricación de lana de roca.</i>	101
<i>Tabla 22. Tabla de la línea de fabricación de lana de roca.</i>	102
1.4.3.1. COMPORTAMIENTO TÉRMICO	102
<i>Tabla 23. Tabla de características de la Lana de Roca</i>	103
1.4.4. POLIURETANO.	103
1.4.4.1. ORÍGENES Y CARACTERÍSTICAS.	103
<i>Figura 11: Esquema de formación de un poliuretano.</i>	103

<i>Fotografía 10: Vista microscópica de las celdas cerradas de la espuma de poliuretano.</i>	104
<i>Fotografía 11: Proceso de espumación del poliuretano.</i>	104
<i>Figura 12: Estructura de una celdilla de espuma.</i>	105
1.4.4.2. PROPIEDADES.	105
<i>Tabla 24: Valor de Resistencia Térmica en función del espesor.</i>	106
<i>Fotografía 12: Poliuretano en espuma y Poliuretano en espuma.</i>	106
<i>Tabla 25: Coeficiente de absorción del poliuretano proyectado de celda cerrada en función de la frecuencia.</i>	107
<i>Figura 13: Valores de resistencia a Flexión, Tracción y Compresión para el poliuretano en función de la densidad.</i>	108
<i>Tabla 26. Estabilidad química del poliuretano proyectado bajo condiciones de ensayo (Comportamiento después de 28 días a 20 °C).</i>	110
1.4.4.3. APLICACIONES.	110
2. OBJETIVOS	113
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	117
3.1. OBSERVACIONES PREVIAS.	117
<i>Figura 14. Esquema de mediciones chapa y material aislante.</i>	118
<i>Fotografía 13. Ensayo de horno mufla.</i>	119
<i>Fotografía 14. Ensayo de radiación directa localizada.</i>	119
3.2. MATERIALES EMPLEADOS EN EL ENSAYO.	120
3.2.1. Yeso Moreno.	120
<i>Fotografía 15. Yeso moreno listo para su uso en laboratorio.</i>	121
3.2.2. Aditivo.	121
<i>Tabla 27. Resumen de las propiedades del aditivo.</i>	122
3.2.3. El agua.	122
<i>Tabla 28. Análisis de agua de la zona de Orihuela. Fecha de emisión 13/01/2012.</i>	123
3.2.4. Vermiculita.	123
<i>Tabla 29. Granulometría de Vermiculita de grano medio (VH), según el ensayo de granulometría de ISO 565.</i>	124
<i>Tabla 30. Granulometría de Vermiculita de grano fino o Laminada (VL), según el ensayo de granulometría de ISO 565.</i>	124
3.2.5. Vidrio celular.	125

<i>Tabla 31. Propiedades de suministro del vidrio celular.</i>	125
3.2.6. Lana de Roca.	125
<i>Tabla 32. Propiedades de suministro de la lana de roca empleada.</i>	126
3.2.7. Silicato cálcico.	126
<i>Tabla 33. Propiedades de suministro de las placas de silicato cálcico.</i>	127
3.2.8. Acero de la chapa.	127
<i>Tabla 34. Propiedades de suministro de las placas de acero. ASME Specifications.</i>	128
<i>Tabla 35. Propiedades de las chapas empeladas. ASME Specifications.</i>	128
3.3. MAQUINARIA UTILIZADA.	129
3.3.1. Máquina universal de ensayos.	129
<i>Fotografía 16. Máquina Universal de ensayos.</i>	129
3.3.2. Durómetro escala Shore C	129
<i>Fotografía 17: Durómetro portátil Baxlo Shore C.</i>	129
3.3.3. Mufla y Datalogger.	130
<i>Fotografía 18: Horno mufla y datalogger con sondas.</i>	130
3.3.4. Soplete.	130
<i>Fotografía 19: Ensayo de radiación directa. Soplete de propano.</i>	130
<i>Tabla 36. Propiedades del propano.</i>	131
<i>Tabla 37. Valores característicos de los GLP comerciales. CEPESA.</i>	131
3.3.5. Otra maquinaria utilizada.	131
<i>Fotografía 20: Estufa de secado de las probetas.</i>	132
<i>Fotografía 21: Moldes de silicona.</i>	132
<i>Fotografía 22: Calibre de precisión.</i>	133
<i>Fotografía 23: Báscula.</i>	133
3.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	133
3.4.1. Parte I de ensayos. Estudio del aditivo seco y ajuste de la dosificación mismo.	134
3.4.1.1. Proceso de fabricación de probetas de yeso en laboratorio.	134
<i>Fotografía 24: Coqueras (Burujas de aire junto a la pared del molde).</i>	134
<i>Defecto en la fabricación de las probetas de yeso.</i>	
<i>Fotografía 25: Probeta de yeso con aditivo recién desmoldada.</i>	135
3.4.1.2. Elección de la relación A/Y mínima para el amasado que nos permita la trabajabilidad del producto.	136
3.4.1.3. Yeso aditivado a distintas dosis.	136

<i>Tabla 38. Dosificaciones de aditivo utilizadas en los ensayos.</i>	136
3.4.1.4. Yeso con la dosis óptima de aditivo y con adición de Vermiculita a diferentes dosis.	137
<i>Tabla 39. Porcentajes de vermiculita añadida en los diferentes ensayos.</i>	137
<i>Tabla 40. Propiedades de los materiales base del mortero.</i>	137
<i>Tabla 41. Adiciones de Vermiculita Laminada (Fuente: Elaboración Propia).</i>	138
<i>Tabla 42. Dosificaciones empleadas.</i>	138
3.1.1.1. Resumen del procedimiento de fabricación.	138
<i>Figura 15: Ensayo normalizado de Dureza Shore C. Croquis de colocación de los pinchazos del durómetro. (UNE-EN-13279-2, 2006)</i>	139
<i>Figura 16: Ensayo normalizado (UNE-EN-13279-2, 2006). Croquis de colocación de rodillos.</i>	139
<i>Fotografía 26: Proceso de ensayo a Flexión en máquina universal de ensayos.</i>	140
3.4.2. Parte II de ensayos. Análisis y desarrollo de materiales frente a fuego de alta intensidad.	140
3.1.1.1. Relación de ensayos.	141
3.4.3. Parte III de ensayos. Combinación de materiales.	142
3.4.4. Tratamiento estadístico.	142
4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.	149
4.1. PARTE I. Estudio del aditivo seco y ajuste de la dosificación del mismo.	149
4.1.1. Evaluación del proceso de fabricación de probetas de yeso en laboratorio. Comportamiento del sulfato cálcico aditivado a distintas dosis.	149
<i>Tabla 43. Dosificaciones empleadas de aditivo seco.</i>	149
<i>Tabla 44. Resultados de propiedades mecánicas del mortero aditivado.</i>	150
<i>Grafica 1: Evolución de la cantidad de aditivo con la resistencia a flexión.</i>	150
<i>Grafica 2: Evolución de la cantidad de aditivo con el módulo de elasticidad.</i>	151
4.1.2. Estadística procesada con SPS 17 de la evaluación de aditivo seco.	151
4.1.1.1. Resistencia a flexión. Descriptores. Valores extremos. Pruebas de normalidad.	151

Tabla 45. Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo para el parámetro de resistencia a flexión.	154
Tabla 46. Pruebas de normalidad 1.	154
Tabla 47. Pruebas de normalidad 2.	155
4.1.1.2. Histogramas	155
Grafica 3: Histogramas de frecuencias de las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno y general.	156
4.1.1.3. Gráficos Q-Q normales	157
Gráfica 4: Gráficas Q-Q de ajuste a normalidad de las distintas concentraciones de aditivo.	157
4.1.1.4. Gráficos Q-Q normales sin tendencia	158
Gráfica 5: Gráfica de cajas para las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno respecto al parámetro de Flexión.	158
4.1.1.5. Módulo elasticidad	158
Tabla 48. Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo para el parámetro de módulo de elasticidad.	161
Tabla 49. Pruebas de normalidad 1	162
Tabla 50. Pruebas de normalidad 2	162
4.1.1.6. Histogramas	162
Grafica 6: Histogramas de frecuencias de las diferentes concentraciones de aditivo con yeso y general.	163
4.1.1.7. Gráficos Q-Q normales	164
Gráfica 7: Gráficas Q-Q de ajuste a normalidad de las distintas concentraciones de aditivo.	165
4.1.1.8. Gráficos Q-Q normales sin tendencia	165
Gráfica 8: Gráfica de cajas para las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno respecto al parámetro de módulo de elasticidad.	165
4.1.1.9. ANOVA de un factor.	166
Tabla 51. Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo.	166
Tabla 52. Prueba de homogeneidad de varianzas para las diferentes concentraciones de aditivo.	166
Tabla 53. ANOVA de las series para las diferentes concentraciones de aditivo.	166
Tabla 54. Prueba robusta de igualdad de medias de Welch para las diferentes concentraciones de aditivo.	167
4.1.1.10. Pruebas post hoc	167

<i>Tabla 55. Prueba de subconjuntos homogéneos entre las distintas concentraciones de aditivo.</i>	167
4.1.1.11. ANOVA de un factor	168
<i>Tabla 56. Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo.</i>	168
<i>Tabla 57. Prueba de homogeneidad de varianzas para las diferentes concentraciones de aditivo.</i>	168
<i>Tabla 58. ANOVA de las series para las diferentes concentraciones de aditivo.</i>	169
<i>Tabla 59. Prueba robusta de igualdad de medias de Welch para las diferentes concentraciones de aditivo.</i>	169
4.1.1.12. Pruebas post hoc	169
<i>Tabla 60. Prueba de subconjuntos homogéneos entre las distintas concentraciones de aditivo.</i>	169
4.2. Parte II de ensayos.	170
4.2.1. INCORPORACIÓN DE VERMICULITA. ANÁLISIS	170
4.2.2. Vidrio celular. Vidrio celular.	171
<i>Tabla 61. Tabla resumen del ensayo, vidrio celular 5cm T^a=800°C.</i>	172
<i>Grafica 9: Evolución temperatura de ensayo del vidrio celular 5cm T^a=800°C.</i>	173
<i>Figura 17: Curva normalizada Temperatura - Tiempo de un incendio</i>	174
<i>Tabla 62. Tabla resumen del ensayo, vidrio celular 5cm T^a=1200°C.</i>	174
4.2.3. Lana de roca	175
<i>Tabla 63. Tabla resumen del ensayo, lana de roca 5cm T^a=800°C.</i>	175
<i>Grafica 10: Evolución temperatura de ensayo de la lana de roca 4cm T^a=800°C.</i>	176
<i>Tabla 64. Tabla resumen del ensayo, lana de roca 5cm T^a=1200°C.</i>	176
<i>Fotografía 27: Localización del foco de calor con un soplete o llama directa.</i>	177
<i>Grafica 11: Evolución temperatura de ensayo de la lana de roca 4cm T^a=1200°C.</i>	177
<i>Fotografía 28: Termografías de calor en placa situada en horno mufla.</i>	178
4.2.4. Silicato cálcico	178
<i>Tabla 65. Tabla resumen del ensayo, Silicato Cálcico 5cm T^a=800°C.</i>	179
<i>Grafica 12: Evolución temperatura de ensayo del Silicato Cálcico T^a=800°C.</i>	179
<i>Tabla 66. Tabla resumen del ensayo, Silicato Cálcico 3cm T^a=1200°C.</i>	180
<i>Grafica 13: Evolución temperatura de ensayo del Silicato Cálcico T^a=1200°C.</i>	180

Tabla 67. Tabla resumen del ensayos, vidrio celular, lana de roca y Silicato Cálcico a la $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	181
4.2.5. Mortero sin vermiculita	181
Fotografía 29: Placas prefabricadas de mortero base de sulfato cálcico.	181
Fotografía 30: Enlucido de pared a base de mortero de sulfato cálcico.	182
Tabla 68. Tabla resumen del ensayo, mortero de 3cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1.	182
Tabla 69. Tabla resumen del ensayo, mortero de 3cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2.	183
Grafica 14: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1.	183
Grafica 15: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2	184
Tabla 70. Tabla resumen del ensayo, mortero de 3cm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 1.	184
Tabla 71. Tabla resumen del ensayo, mortero de 3cm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 2.	184
Grafica 16: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30mm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 1	185
Grafica 17: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30mm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 2	186
Tabla 72. Tabla resumen del ensayo, mortero de 6cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1.	186
Tabla 73. Tabla resumen del ensayo, mortero de 6cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2.	186
Grafica 18: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1	187
Grafica 19: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2	187
Tabla 74. Tabla resumen del ensayo, mortero de 3cm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 1.	188
Grafica 20: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60mm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$.	188
Tabla 75. Tabla resumen de ensayos, materiales de base y morteros $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	189
4.2.6. Mortero con vermiculita	189
Tabla 76. Tabla resumen del ensayo, mortero V6 de 3cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	190
Tabla 77. Tabla resumen del ensayo, mortero V6 de 6cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	190
Grafica 21: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V6 de 30mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	191
Grafica 22: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V6 de 60mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	191
Tabla 78. Tabla resumen del ensayo, mortero V24 de 3cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$.	192

<i>Tabla 79. Tabla resumen del ensayo, mortero V24 de 6cm T^a=800°C.</i>	192
<i>Grafica 23: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 de 30mm T^a=800°C.</i>	192
<i>Grafica 24: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 de 60mm T^a=800°C.</i>	193
<i>Tabla 80. Tabla resumen del ensayo, mortero V48 de 3cm T^a=800°C.</i>	193
<i>Tabla 81. Tabla resumen del ensayo, mortero V48 de 6cm T^a=800°C.</i>	193
<i>Grafica 25: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V48 de 30mm T^a=800°C.</i>	194
<i>Grafica 26: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V48 de 60mm T^a=800°C.</i>	194
<i>Tabla 82. Tabla resumen de ensayos, mortero con vermiculita y sin vermiculita. T^a=800°C.</i>	195
4.3. PARTE III	195
<i>Tabla 83. Tabla resumen del ensayo, composite mortero vermiculita más vidrio celular T^a=800°C.</i>	196
<i>Tabla 84. Tabla resumen del ensayo, composite mortero vermiculita más vidrio celular T^a=1200°C.</i>	196
<i>Grafica 27: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 más vidrio celular de 30mm T^a=800°C.</i>	197
<i>Grafica 28: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 más vidrio celular de 30mm T^a=1200°C.</i>	197
<i>Tabla 85. Tabla resumen del ensayos, comparativa todos los materiales. T^a=800°C.</i>	198
5. CONCLUSIONES	201
6. BIBLIOGRAFIA	205

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES



1.- ANTECEDENTES

El grupo de investigación denominado “nuevos materiales para la construcción” perteneciente al Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, lleva investigando, desde varios años, y en una de sus líneas de trabajo, los morteros basados en el sulfato cálcico como material de base. Con la incorporación de aditivos especiales al yeso, se puede obtener un material de bajo coste que se adapte a unas necesidades mucho más exigentes y encomendadas a materiales mucho más caros.

El desarrollo de nuevos materiales ha surgido, en algunas ocasiones, del estudio y mejora de los ya existentes. En el caso que nos atañe, mejorar las propiedades de los morteros y yesos (Del Río Merino, M., 1999) (Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F., 2000) (Del Río Merino, M., 2001) (Del Río Merino, M., 2002) (Múzquiz Ramos, E.M., 2009), es un campo de aplicación que ha estado y está en continua evolución debido a la constante investigación, sobre todo en las bases químicas u orgánicas de aditivos (JC. Ochoa, 2013) (V. Galvan Llopis, 1990), o de las dosificaciones y mezclas que sobre ellos se lleva a cabo, en concordancia con el avance de nuevas técnicas (Rivero Fernández, L., 1997).

Sin embargo, hay una marcada tendencia al desarrollo de los cementos o elementos cementosos en detrimento de los derivados del sulfato cálcico, componente principal del yeso de construcción (P. Kittll, J.H. Castro, 1975) (Bundyra-Oracz G., W. Kurdowski, 2011) (M.M. Alonso, 2007). Es sobre todo por una búsqueda de mejoras mecánicas que ya de por sí, se obtienen en los cementos, mucho más elevadas que en los yesos. Pero, para ciertas aplicaciones, las propiedad de transmisión de calor, ductilidad, ausencia de áridos, etc., hacen que el uso de pastas a base de sulfato cálcico, sean motivo y justificación de aplicaciones de carácter diverso y distinto; apartándonos de la tendencia general expuesta.

Las nuevas investigaciones en comportamiento térmico o ante el fuego (A. Oliver, 2010) (K. Darkwa, 2004) (D.A. Neeper, 2000), así como ante la protección a explosiones, aplicación en exteriores, o incluso el análisis acústico o térmico, han hecho que el yeso vuelva a retomar su merecido reconocimiento (Ruiz, B.A., 2009).

Como se indica a continuación, los resultados obtenidos en cuanto a comportamiento ante el fuego y anti-explosiones, hacen que se tenga que profundizar

más en la investigación, tomando como elemento básico el yeso, como elemento de aplicación.

Se consigue que estas pastas o morteros¹, una vez aditivados, que aumenten sus propiedades de dureza, resistencia, manejabilidad e interacción con otros elementos, consiguiendo el grado de innovación necesaria para la aplicación a nuevos proyectos.

El mortero con el cual vamos a trabajar es una base de sulfato cálcico aditivado con una base orgánica; otra opción, será la de usar dicha base con un porcentaje de vermiculita añadido (Berna Serna, J.M. 2013), con el fin de conferir poco peso, manteniendo otras propiedades físicas que se observarán en el presente trabajo.

Como referencia de los ensayos realizados con morteros similares, bajando las cantidades o manteniendo a mínimos la relación agua/yeso (A/Y) y dosificaciones de aditivos varias, se han de citar las pruebas realizadas por el Cuerpo de Seguridad del Estado por la Guardia Civil y del Ministerio de Interior, así como las ejecutadas, por ejemplo, por el Cuerpo de Bomberos de la localidad de Molina de Segura; con el objetivo de probar su eficacia como protección de elementos estructurales, ante el fuego y contra explosiones, empleados en la lucha antiterrorista.

Morteros similares, cuyo análisis y composición es estudiado en el presente documento, se aplican al interior de puertas cortafuegos, como protección para alojamiento de cerraduras, puertas preparadas para la absorción de ondas de impacto, provocadas por explosiones.

Es objetivo prioritario del presente Tesis, el estudio y desarrollo de morteros que con una base de sulfato cálcico, aprovechen recursos a bajo coste y que con ciertos componentes adicionales, se obtengan unas características suficientes para abordar el problema de las explosiones BLEVE, fuente de millares de víctimas, en el último siglo.

¹ Un mortero adquiere esa denominación porque además del aglomerante, también contiene áridos; cuando indicamos en el documento: morteros de sulfato cálcico, solo sería correcto en el caso de la adición de vermiculita que es un árido, en los casos en los que no disponga de dicho elemento, no sería riguroso. Por otra parte, al aditivar el sulfato cálcico y mejorar sus propiedades, el uso del concepto mortero, es acorde con las nuevas propiedades adquiridas, similares a las de ciertos morteros de cemento.

1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN. JUSTIFICACIÓN.

La Universidad Miguel Hernández, ha desarrollado varios morteros en base al sulfato cálcico, añadiéndole minicomponentes, los cuales potencian entre otras, la resistencia mecánica, la resistencia frente al fuego etc. Patente de referencia: P201200897 (2013).

Esta base hizo pensar en resolver un problema actual; para ello se experimentó con estos morteros para solucionar la compleja problemática de la BLEVE. Consideramos importante reseñar, que es el accidente más peligroso que puede ocurrir en el almacenamiento del gas licuado del petróleo (GLP, y se destaca por el gran número de almacenamientos existentes en el mundo) y es la denominada: explosión de vapor de líquido hirviendo.

Se debe profundizar en los medios actuales para evitar este fenómeno, pero, se observa que la solución más estable, de más garantía como elemento de mitigación cuando el suceso iniciador mayoritario: un incendio, o en cisternas y vagones: un golpe; para ambas situaciones o casos, el que se encuentre aislado el recipiente, para que los bomberos puedan hacer su trabajo y apagar el incendio, es básico para evitar la explosión, y en ocasiones, un desastre que acabe en tragedia.

A la anterior hipótesis añadimos un mortero, que con poco espesor, da un margen de varias horas, para que los bomberos puedan llegar a tiempo, máxime, cuando el accidente proviene de un recipiente móvil (que retarda la llegada de los bomberos al suceso), sin que se haya producido el BLEVE, y además permita que trabajen con la tranquilidad exigida para extinguir el incendio.

Esto está contemplado en una legislación, o requerimiento que en algunos estados de EEUU y Canadá es obligatorio (Joint Meeting of the RID Safety Committee and the Working Party on the Transport of Dangerous Goods (Bern, 20-24 March 2006).

Todo lo anterior, nos hizo plantear la línea de experimentar con un trozo de acero (envolvente del recipiente habitual de estos depósitos, recipientes o elementos) aplicándoles morteros y productos que actualmente se emplean (o no, debido a su coste), suponiendo el recipiente y sus aislamientos, y simulando un incendio y comparar los resultados, cuando utilizamos el producto coya referencia de patente es P201200897.

1.2. BLEVE.

BLEVE es el acrónimo de “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosión”, es decir en español sería “EXPLOSIÓN DEL VAPOR EN EXPANSIÓN DE UN LÍQUIDO HIRVIENDO” o más descriptivamente “Explosión de los vapores que se expanden al hervir un líquido”.

El “BLEVE” es un accidente (Tasneem Abbasi, 2007) que ocurre con cierta periodicidad en la industria química y petroquímica.

Las sustancias que lo pueden producir son entre otras, butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, etc., relativamente comunes en la industria, y abundan las instalaciones susceptibles de que ocurra en ellas, tales como depósitos, reactores, cisternas, etc. El suceso es propicio a que pueda ocurrir durante el transporte, ya sea por carretera, tren o barco, dando además unas connotaciones especiales, como el lugar del suceso indefinido y a veces, por lugares muy concurridos lo que añade un riesgo extra. El origen puede ser diverso: reacción fuera de control, colisión, etc., pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente. En la tabla (Richard W. Prugh, 1991) se muestra una lista con una breve información de los BLEVE más notorios ocurridos en todo el mundo entre 1926 y 1986. Como puede observarse, en muchos de ellos ha habido víctimas mortales, a veces en un número muy elevado. Otra fuente (Londiche H., 1991) cita 900 personas muertas y unas 9.000 heridas en setenta y siete BLEVE ocurridos entre 1941 y 1990.

Fecha	Lugar	Causa	Sustancia	Toneladas	Nº. muertos
13/12/1926	St. Auban, F	Rebosamiento	cloro	25	19
28/05/1928	Hamburgo, G	Reacción fuera de control	fosgeno	10	10
10/05/1929	Syracusa, USA	Explosión (H ₂)	cloro	25	1
24/12/1939	Zarnesti, Rum.	Rebosamiento	cloro	10	60
29/07/1943	Ludwigshafen, G	Rebosamiento	butadieno	16	57
05/11/1947	Roemo, Finl.	Rebosamiento	cloro	30	19
28/07/1948	Ludwigshafen, G	Rebosamiento	éter etílico	33	209
07/07/1951	Port Newark, USA	Fuego	propano	2.600	0
04/04/1952	Walsum, G	Rebosamiento	cloro	15	7
04/01/1954	Institute, USA	Reacción fuera de control	acroleína	20	0
1957	Quebec, Can.	Fuego	butano	?	1
1958	Michigan, USA	Rebosamiento	butano	55	1

Protección de recipientes de gases licuados y/o hidrocarburos con revestimiento de morteros modificados para evitar fenómeno de BLEVE

28/06/1959	Meldria, USA	Descarrilamiento	propano	55	23
18/08/1959	Kansas City, USA	Fuego	gasolina	20	5
17/04/1962	Doe Run, USA	Reacción fuera de control	óxido de etileno	25	1
04/01/1966	Feyzin, F	Fuego	propano	1.000	18
01/01/1968	Donreith, USA	Descarrilamiento (fuego)	óxido de etileno	2	0
21/08/1968	Lieven, F	Mecánica	amoníaco	20	5
02/01/1969	Repcelak, Hung.	Rebosamiento	dióxido de carbono	35	9
25/01/1969	Laurel, USA	Descarrilamiento (fuego)	propano	65	2
18/02/1969	Crete, USA	Descarrilamiento	amoníaco	65	8
1969	Cumming, USA	Descarrilamiento	amoníaco	?	?
11/09/1969	Glendora, USA	Fuego	cloruro de vinilo	55	0
21/06/1970	Crescent City, USA	Descarrilamiento (fuego)	propano	275	0
19/01/1970	Baton Rouge, USA	Sobrepresión	etileno	4	0
19/10/1971	Houston, USA	Descarrilamiento (fuego)	cloruro de vinilo	50	1
09/02/1972	Tewksbury, USA	Colisión	propano	28	2
30/03/1972	Río de Janeiro, Br.	Fuego	propano	1.000	37
21/09/1972	New Jersey, USA	Colisión	propileno	18	2
27/11/1972	S. Antonio, USA	Corrosión	dióxido de carbono	0,01	0
05/07/1973	Kingman, USA	Fuego	propano	100	13
11/01/1974	West S. Paul, USA	Fuego	propano	27	4
12/02/1974	Oneonta, USA	Descarrilamiento (fuego)	propano	288	0
29/07/1974	Pueblo, USA	Fuego	propano	80	0
29/04/1975	Eagle Pass, USA	Colisión	propano	18	16
14/12/1975	Niagara Falls, USA	Reacción fuera de control	cloro	20	4
11/05/1976	Houston, USA	Colisión	amoníaco	20	6
31/08/1976	Gadsden, USA	Fuego	gasolina	4	3
1977	Cartagena, Colombia.	Sobrepresión	amoníaco	7	30
22/02/1978	Waverly, USA	Descarrilamiento	propano	45	12
11/07/1978	Els Alfacs, E	Dilatación/sobrepresión	propileno	23,6	216
30/05/1978	Texas City, USA	Fuego	butano	1.500	7
30/08/1979	Good Hope, USA	Colisión de barcos	butano	120	12
01/08/1981	Montonas, México.	Descarrilamiento	cloro	110	29
19/01/1982	Spencer, USA	Sobrecalentamiento	agua	0,3	7

11/12/1982	Taft, USA	Reacción fuera de control	acroleína	250	0
12/07/1983	Reserve, USA	Reacción fuera de control	clorobutadieno	1	3
04/10/1983	Houston, USA	Rebosamiento	bromuro de metilo	28	2
19/11/1984	Ciudad de México	Fuego	propano	3.000	500
28/01/1986	Kennedy S C, USA	Fuego	hidrógeno	115	7

Tabla 1: Resumen de los accidentes BLEVE. (Richard W. Prugh, 1991)

En la tabla 2, se observa las causas externas más frecuentes de los anteriores accidentes.

Causa	%
• fuego	26
• rebosamiento	18
• descarrilamiento	20
• reacción fuera de control	12
• colisión	10
• sobrepresión	6
• otras	8

Tabla 2: Resumen de causas BLEVE. (Richard W. Prugh, 1991)

Las explosiones BLEVE son de los peores accidentes que pueden ocurrir tanto en la industria química como en la petroquímica, con el resultado de que los líquidos contenidos en recipientes, bien cilíndricos, bien esféricos, y dadas sus circunstancias de almacenamiento, hacen que el recipiente se rompa en dos o más trozos, con proyección y grandes desplazamientos de éstos, producido por el tipo de explosión especial que se

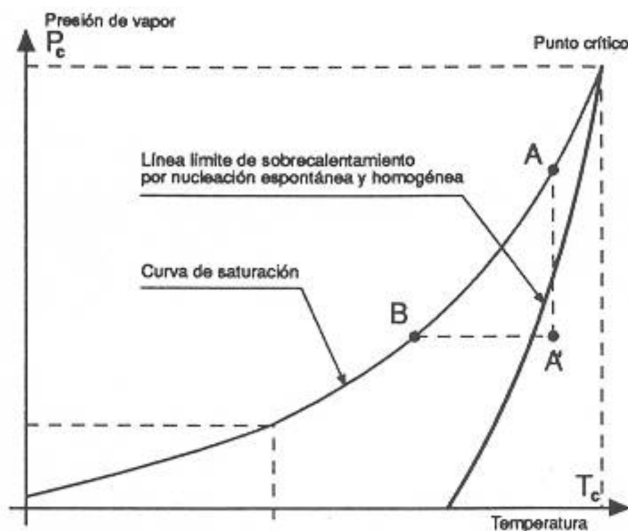


Figura 1. Esquema fenómeno BLEVE. (Mañas Lahoz J. L., 1991)

da, por las condiciones que el líquido contenido en el recipiente, al estar por encima de la temperatura que le correspondería estar si estuviera a presión atmosférica. Las explicaciones y estudios sobre el fenómeno son diversas (J.E.S. Venart, 1993) (A.M. Birk, 1994) (G.A. Pinhasi, 2007).

Es decir, el líquido se encuentra por encima de la temperatura de su punto de ebullición a presión atmosférica (Figura 1), de ahí que el recipiente que contiene la sustancia se encuentra a presión para evitar su ebullición, lo que nos produce, que el líquido se encuentra a mayor temperatura de la que debería estar para no tener riesgo de ebullición, estas condiciones se denominan genéricamente que el líquido está “sobrecalentado”.

Si tenemos un recipiente que contiene un líquido a presión y es calentado por la radiación procedente de un incendio, la presión en su interior irá en aumento. En este caso, es donde el mortero desarrollado por la tesis aportará propiedades para evitar este tipo de sucesos. Este aumento de temperatura desembocará en un aumento de la presión, en el que las paredes no podrán resistir la elevada tensión a la que están sometidas y cederán. Esto sucederá principalmente en la parte superior del recipiente, donde la pared, al no estar bañada por el líquido, no estará refrigerada, de este modo, aumentará su temperatura y disminuirá su resistencia mecánica. En cambio, la parte situada por debajo del nivel del líquido que contiene, transmitirá el calor recibido al líquido, por lo que se calentará mucho menos que la parte superior. En caso de apertura de una válvula de seguridad, la ebullición del líquido implicará una refrigeración aún mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización.

Por tanto, para que se produzca una explosión BLEVE, no es necesaria la existencia de reacciones químicas ni fenómenos de combustión. Podrá producirse incluso en calentadores de agua y calderas de vapor. En principio podría originarse en cualquier líquido almacenado en un recipiente hermético, aunque hay explosiones que pueden confundirse con una BLEVE, sin serlo. Las BLEVES son exclusivas de los líquidos o gases licuados en determinadas condiciones, en términos comunes es la vaporización instantánea de un líquido almacenado en un recipiente instantáneamente, es decir, es un fenómeno mecánico de presión.

La despresurización súbita del líquido hará que éste, se encuentre a una temperatura superior a la que le correspondería en la curva de saturación P-T para la nueva presión. El líquido que se encuentra en estas condiciones de inestabilidad se define como “líquido sobrecalentado”. Si su temperatura en el momento de la despresurización es superior a una temperatura denominada “temperatura límite de sobrecalentamiento” (que será distinta para cada producto), se producirá (Mañas Lahoz J. L., 1991) una vaporización instantánea y brutal de una parte del mismo, que será vertido al exterior en forma de mezcla bifásica líquido/vapor. El incremento

extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse, que es de unas 1700 veces en el caso del agua y de unas 250 veces en el caso del propano, más la expansión del vapor preexistente, provocarán una onda de presión (explosión, estallido del depósito), así como la rotura del recipiente en varios pedazos que serán lanzados a una distancia considerable.

Si la sustancia contenida en el recipiente no es combustible, los únicos efectos de la explosión serán la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos.

En cambio, si la sustancia contenida en el recipiente es combustible, como suele suceder en la industria petroquímica (por ejemplo, gas licuado de petróleo, GLP), como el etileno o el propano, la masa de líquido y vapor vertida en el momento de la explosión se incendiará, y dará lugar a un fuego de forma aproximadamente hemisférica que se extenderá inicialmente a ras de suelo. El efecto de la radiación térmica en esta primera fase, muy corta, ya que suele durar solo un par de segundos, es muy importante. La masa de combustible solo puede arder en superficie, porque en su interior, está muy rica en combustible (por encima del límite superior de inflamabilidad), debido al arrastre de la fase líquida en el proceso de vaporización instantánea, prácticamente sin aire, y por tanto fuera de los límites de inflamabilidad. La fase líquida también es arrastrada por los trozos de los recipientes, y se incendia cuando cae al suelo en forma de fuegos locales. Posteriormente, la turbulencia del incendio provoca que vaya entrando aire dentro de la masa de combustible. Simultáneamente, la radiación procedente de la combustión va evaporando las gotas de líquido y calentando el conjunto. Como resultado de todo este proceso, la masa en ignición va aumentando su volumen de forma turbulenta (se han propuesto valores del orden de 1 m/s para la velocidad de crecimiento del diámetro) (Lihou D.A., 1982), adquiriendo una forma más o menos esférica, y va ascendiendo, dejando una estela de diámetro variable semejante, en la forma, a la de la típica “seta” de una explosión nuclear (Figura 2). Las dimensiones de las bolas de fuego formadas de este modo, pueden ser extraordinariamente grandes, con una radiación térmica muy elevada.



Figura 2. Esquema de expansión del BLEVE. (Lihou D.A., 1982)

Un parámetro de estos sucesos muy estudiado y necesario para la planificación de actuaciones, es el tiempo a partir del cual puede ocurrir un BLEVE en un recipiente afectado por un incendio, depende de los siguientes factores:

a) flujo calorífico del incendio, que será función de la distancia al fuego del recipiente afectado, de si hay contacto directo con las llamas y del tipo de llamas (llamas turbulentas, de antorcha, etc.);

b) radio de la esfera o del cilindro que forma el recipiente;

c) grado de llenado del recipiente;

d) capacidad de alivio de las válvulas de seguridad;

e) espesor de la capa de producto ignífugo aplicado como protección pasiva, material objeto de la tesis.

Aunque este tiempo en el que puede ocurrir un BLEVE puede variar en función de las características de la instalación (existencia de aislamiento térmico, refrigeración, etc.), es evidente que otros factores pueden contribuir a reducirlo aún más, debido a impactos o daños originados por ondas de sobrepresión, por ejemplo; lo más prudente, pues, en estas circunstancias, es tener en cuenta, que la explosión puede producirse en cualquier momento por lo cual, es aconsejable evacuar rápidamente la zona.

El término BLEVE fue usado por primera vez en 1.957 por los ingenieros norteamericanos James B. Smith, William S. Marsh y Wilbur L. Walls

(www.contraincendiosonline.com), al investigar las causas de un accidente por explosión de un recipiente de acero, usado en la producción de una resina fenólica a partir de la formalina (disolución de formáldehido en agua) y fenol.

1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO.

Se describe la BLEVE, (Manas, J. L., 1984), como la ruptura, en dos o más pedazos, de un recipiente, con proyección y grandes desplazamientos de dichos pedazos, producida por un tipo de explosión especial que se da en una determinadas circunstancias en los almacenamientos de gases licuados, pero que exige como primera condición necesaria esencial, pero no suficiente, que el gas licuado (líquido contenido en el recipiente) esté a una temperatura bastante mayor que la que le correspondería estar, se encontrara a la presión atmosférica normal. Con lo que la temperatura de ebullición (a una atmósfera) ha de ser bastante menor que la temperatura a la que está el recipiente y el líquido contenido en él.

Característica fundamental de una BLEVE, es la expansión explosiva de toda la masa de líquido evaporada súbitamente, aumentando su volumen más de 200 veces. La gran energía desarrollada en esa explosión repentina proyecta fragmentos rotos de distintos tamaños del recipiente a considerables distancias. Esta es una prueba de confirmación de una BLEVE. Los fragmentos proyectados pueden arrastrar tras de sí a cierta masa de líquido en forma de gotículas de finísima lluvia, con posibilidad de inflamación a considerables distancias.

Tras producirse el estallido del recipiente, la gran masa evaporada asciende en el exterior, arrastrando finísimas partículas de líquido y en caso que el líquido sea inflamable, entra en combustión produciendo al instante, una gran bola de fuego por haberse producido la difusión en el aire por debajo del límite superior de inflamabilidad. Dicha bola de fuego se irá expandiendo a medida que va ardiendo la totalidad de masa de vapor liberada.

La causa más frecuente de este tipo de explosiones es debida a un incendio externo que envuelve al tanque presurizado, lo debilita mecánicamente, eleva la temperatura del líquido contenido y aumenta la presión dentro del tanque. Llega a un punto, en el que la presión alcanza valores que el recipiente no puede soportar, produciendo una fisura o ruptura del mismo. Esto ocasiona un súbito descenso de la presión, comienza el proceso de nucleación espontánea y todo el líquido contenido

cambia su estado a gaseoso en forma virtualmente instantánea, aumentando su volumen cientos o miles de veces.

Si bien la explosión de un recipiente que contenga un líquido inflamable a presión casi siempre provocará una bola de fuego, no siempre se puede hablar rigurosamente de explosión BLEVE. Para que la explosión sea de este tipo, con la violencia extraordinaria que la caracteriza y que es la que provoca que los fragmentos puedan alcanzar distancias considerables, se tienen que cumplir unas determinadas condiciones (Reid, 1979) (Mañas, 1984) (Mañas, 1991) (Montenegro, 1987) (Fernández-Camara, 1990) (Bestratén, 1991), que exponemos a continuación:

Sobrecalentamiento considerable del líquido, de forma que el mismo esté a una temperatura superior a su temperatura límite de sobrecalentamiento. Esta condición la cumplen la mayoría de los gases licuados (GLP, amoníaco, cloro). Por otra parte, también pueden cumplirla líquidos contenidos en recipientes cerrados que se ven sometidos a un calentamiento anómalo, por ejemplo, por la radiación de un incendio; y, como ya se ha dicho anteriormente, también la cumple el agua a presión en el interior de una caldera. En todo caso, para la existencia de BLEVE en sentido estricto es necesario un valor mínimo de este sobrecalentamiento.

Despresurización súbita, de forma que se reduzca instantáneamente la presión a la que se encuentra toda la masa de líquido contenida en el recipiente. Un fenómeno de este tipo suele comportar, en caso de accidente, la rotura del depósito, ya sea por el incremento excesivo de la presión interior y, simultáneamente, por el calentamiento excesivo de las paredes a causa de un incendio, o ya sea por un impacto. Sea cual sea la razón, la substancia contenida en el recipiente pasa en un instante desde la presión a la que estaba almacenada extraordinariamente alta, si el recipiente había estado sometido a la acción de un incendio, a la presión para la que la vertical trazada por el punto de equilibrio en la curva P-T en la que se encontraba el líquido, corta a la recta límite de sobrecalentamiento (que se define en los párrafos siguientes).

Cuando se dan las dos condiciones anteriores se produce una vaporización casi instantánea con formación de núcleo de vaporización en toda la masa (nucleación homogénea). Se ha sugerido la formación de “un millón de núcleos de ebullición por milímetro cúbico y milisegundo”. En estas condiciones, la velocidad de incremento del volumen es extraordinaria y la violencia de la explosión es muy elevada. Éste es, estrictamente hablando, el fenómeno asociado a la explosión BLEVE.

Consecuencias de las Bleve`s, sobrepresión por la onda expansiva, la magnitud de la onda de sobrepresión depende de la presión de almacenamiento, del calor específico del producto implicado y de la resistencia mecánica del depósito.

Proyección de fragmentos, la formación de proyectiles suele limitarse a fragmentos metálicos del tanque y a piezas cercanas a éste. Se trata de una consecuencia difícilmente predecible, y los fragmentos pueden proyectarse a varios cientos de metros, e incluso a miles de metros.

Radiación térmica, de la bola de fuego (caso de que el líquido sea inflamable), la radiación de la bola de fuego suele tener un alcance mayor que el resto de efectos, y es la que causa más daños. El alcance de la radiación depende del tipo y cantidad de producto almacenado, y de la temperatura y humedad relativa ambiental.

Estos accidentes en las empresas químicas o petroquímicas pueden agravarse debido a que pueda producirse el denominado efecto dominó, que no es más que el efecto alcanza otras instalaciones anejas u otros establecimientos con sustancias peligrosas, pudiéndose generar en ellos nuevos accidentes secundarios que propaguen y aumenten las consecuencias iniciales, sobre todo debido a que este tipo de almacenamientos no solo tienen un recipiente sino varios.

1.2.2. TERMODINÁMICA DE LA BLEVE.

En el interior de un recipiente cerrado, un líquido o gas licuado se encuentra en las dos fases; líquido y vapor en situación de equilibrio, la curva de saturación, temperatura/presión de la Figura 3, nos indica que a cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión, que es la que está soportando la pared interior del recipiente expuesto a la fase vapor.

Las variables dentro del recipiente, responden ante un aumento de la temperatura con un aumento de la presión de equilibrio, hasta alcanzarse el punto crítico, a partir del cual solo es posible la existencia de la fase gaseosa. Por ello se define la temperatura crítica como aquella temperatura máxima a la que no se puede licuar un gas. Y la correspondiente presión crítica es la presión de vapor máxima que puede tener un líquido.

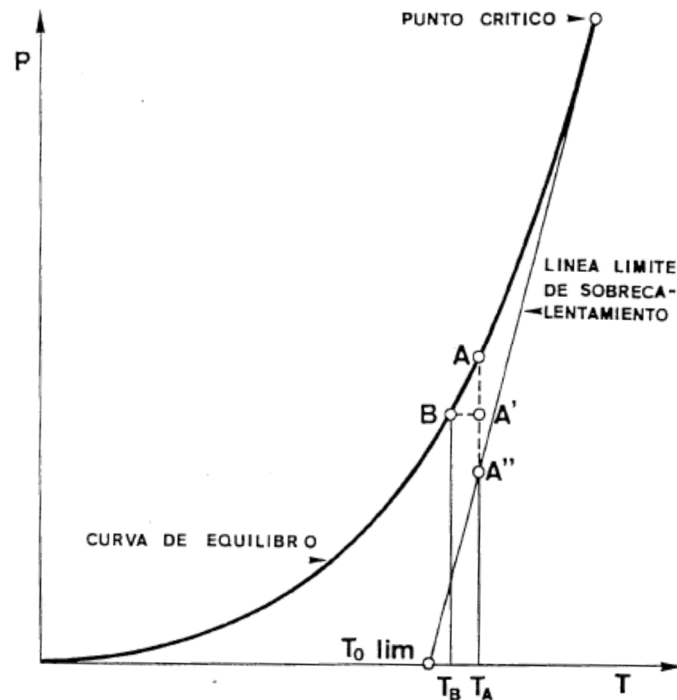


Figura 3: Curva de saturación P-T. (Reid, R.C., 1979)

Un punto estará "sobrecalentado" (a temperatura T_A) pues la presión a la que le correspondería estar en la curva de equilibrio es la representada por el nuevo punto B, cuya temperatura de saturación es T_B . A estos productos, principalmente gases licuados, cuando están en unas determinadas condiciones de temperatura que ya comentamos, se les llama "sobrecalentados" y están en un equilibrio metaestable, que puede romperse por la actuación de una mínima perturbación. La inestabilidad en los líquidos "sobrecalentados" se puede caracterizar por la diferencia entre la temperatura real del líquido en el estado dado y la temperatura teórica de ebullición del líquido a la misma presión. Para el caso que hemos supuesto, paso B-A'; la diferencia de temperaturas es $T_A - T_B$.

Experimentalmente, el sobrecalentamiento se puede lograr o bien a base de conseguir calentar (a $P = \text{cte.}$) un producto por encima de su punto de ebullición sin que se transforme en vapor, o bien por disminución de la presión (a $T = \text{cte.}$). Sin embargo, para lo que a nosotros nos interesa, la manera en la que, en caso de accidente de recipientes, se nos puede dar en la práctica, es cuando sucede una disminución brusca de la presión (por expansión isoentrópica, que es lo que entonces sucede). Es decir una bajada de presión de A a A', e incluso a A'', que es más allá del punto de corte de la vertical de descenso de la presión con la línea límite de sobrecalentamiento donde puede suceder la nucleación espontánea y por tanto la BLEVE.

Que el gas licuado, en el sentido que antes definíamos, esté a una temperatura bastante superior (no es suficiente que esté 2° o 3° C por encima) de lo que tendría ese mismo fluido a la presión atmosférica normal (aproximadamente a una atmósfera) es una cosa bastante corriente. En la mayoría de los gases licuados GLP, Amoníaco, Cloro, algunos gases criogénicos (CO₂, Nitrógeno, etc.), se dan estas condiciones.

También existen líquidos que están por encima de su temperatura de ebullición, cuando los recipientes que los contienen, por la causa que sea, entran en contacto con fuentes importantes de calor y estando bien cerrados, incrementan su presión. Es corriente el caso de líquidos que se calientan mucho cuando se ven involucrados en incendios que afecten a las inmediaciones de los envases (o a otros recipientes próximos).

Por tanto, cualquier líquido o gas licuado almacenado en el interior de un recipiente cerrado se encuentra en las dos fases, líquido y vapor en situación de equilibrio, según la curva de saturación temperatura/presión de la Figura 1, o sea que a cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión de vapor, que es la que está soportando la pared interior del recipiente expuesto a la fase vapor.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta obviamente la presión de equilibrio, hasta alcanzarse el punto crítico, a partir del cual solo es posible la existencia de la fase gaseosa. Por ello se define la temperatura crítica como aquella temperatura máxima a la que se puede licuar un gas. Y la correspondiente presión crítica es la presión de vapor máxima que puede tener un líquido.

El sobrecalentamiento de una sustancia puede lograrse mediante calentamiento, como hemos descrito, superando su punto de ebullición sin que llegue a transformarse en vapor, o bien disminuyendo la presión, permaneciendo la temperatura constante. Así por ejemplo, en la Figura 3 podemos observar que el punto A' de sobrecalentamiento se puede alcanzar por un aumento de temperatura a presión constante desde el punto B o una disminución brusca de presión (por expansión isoentrópica) desde el punto A. Evidentemente la posición A' es una situación inestable que tenderá a buscar su posición natural de equilibrio sobre la curva de saturación. En esta zona de inestabilidad definida en los márgenes que a continuación se expondrán, se favorece la nucleación espontánea como paso previo de la vaporización masiva y por tanto de la BLEVE (Walls, W. L.1979).

Precisamente, y tal como hemos dicho, la BLEVE es provocada originariamente por un descenso brusco de la presión a temperatura constante por las causas ya expuestas.

Para comprender mejor la situación de inestabilidad de los líquidos sobrecalentados es necesario analizar el comportamiento de los gases licuados según la ecuación de Van der Waals:

$$\left(p + \frac{3}{v^2}\right)(3v - 1) = 8t$$

en donde:

$$p = \frac{P}{P_c}; v = \frac{V}{V_c}; t = \frac{T}{T_c}$$

siendo:

P = presión

p = presión reducida

V = volumen

v = volumen reducido

T = temperatura absoluta

t = temperatura reducida

P_c, V_c y T_c = constantes críticas

Esta ecuación, que se representa gráficamente en el diagrama de la (Figura 4), muestra para cada isoterma la relación existente entre presión y volumen para un gas licuado tipo. En dicho diagrama se han representado los dos posibles estados de inestabilidad (estados metaestables), el del líquido sobrecalentado y el del vapor subenfriado, que corresponden respectivamente, para la isoterma representada, al tramo 1-2 y 4-5. Precisamente en estos puntos límites de inestabilidad 2 y 4 le corresponde un mínimo y un máximo de la ecuación de estado, por lo que en ellos la pendiente de la tangente a la curva es cero.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{t=cte} = 0$$

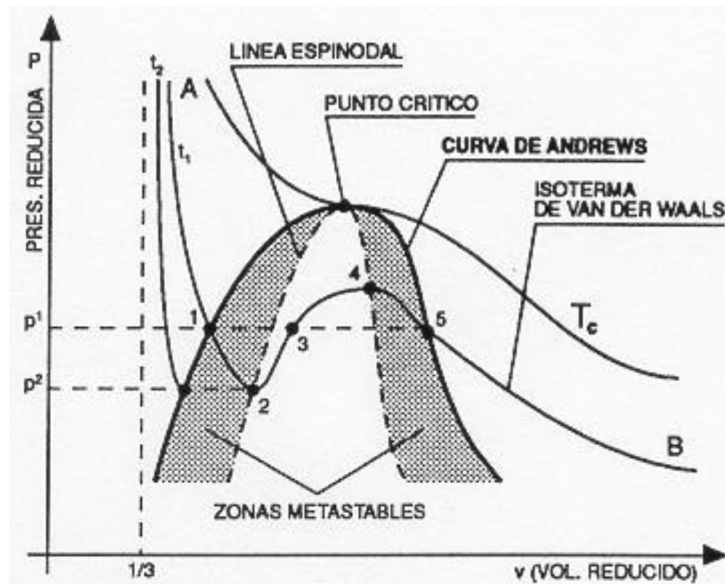


Figura 4: Gráfica P-T-V para gases licuables. (Andrews, T., 1869)

La línea que une los diferentes puntos límite de inestabilidad para líquidos sobrecalentados y vapores subenfriados se suele denominar línea espinodal.

Las zonas de metaestabilidad quedan delimitadas entre dicha curva espinodal y la curva binodal o de Andrews la cual separa el área en la que existen dos fases, vapor y líquido, de las áreas en que sólo existe una sola fase (líquido o vapor).

En el punto crítico, la línea binodal y espinodal coinciden con tangente común que es precisamente la tangente a la curva de presión de vapor en dicho punto crítico.

Tales puntos límite de sobrecalentamiento de la línea espinodal pueden representarse en el anterior diagrama de presión de vapor - temperatura de la Figura 1 en una curva.

Cabe reseñar que respecto a la posible BLEVE que nos ocupa, no toda la zona de metaestabilidad de líquidos sobrecalentados entraña riesgo, ya que precisamente éste se concreta al alcanzar los mínimos de la curva de Van der Waals en los que irremisiblemente el líquido sobrecalentado se vaporiza súbitamente con una nucleación homogénea.

Para determinar el límite de sobrecalentamiento en el que se produce la

nucleación espontánea y consecuentemente la BLEVE, habría que obtener los diferentes puntos de la curva espinodal que permitieran representarla. Dado que la tangente a esta curva en el punto crítico estará siempre en la gráfica a la izquierda de tal tramo de la misma, suele admitirse según los estudios más recientes que dicha recta tangente constituye el límite de seguridad con un margen suficientemente amplio.

Según datos experimentales, se ha comprobado que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento que podría provocar la BLEVE y el límite establecido por la tangente a la curva de saturación en el punto crítico y a presión atmosférica, oscila entre 20 y 35 °C.

La curva de saturación del diagrama presión de vapor-temperatura se asimila a la ecuación de Antoine, que es una aproximación de la de Clausius Clapeyron, según la cual:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B; \text{ o bien, } P = e^{-\frac{A}{T} + B}$$

siendo:

P = presión de vapor (atm).

T = temperatura absoluta (K).

A y B = constantes para cada compuesto.

La tangente a dicha curva de saturación en el punto crítico se obtiene calculando la derivada de la presión respecto a la temperatura en dicho punto:

$$\frac{dP}{dT} = P \frac{A}{T^2}$$

Y el punto crítico:

$$\frac{dP_c}{dT_c} = P_c \frac{A}{T_c^2} = \operatorname{tg} \alpha$$

1.2.3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE ENTRAN EN EL PROCESO: TEMPERATURA/PRESIÓN.

Así pues, las dos grandes categorías de productos que en principio pueden producir BLEVE's son:

- I) Todos los gases licuados almacenados a la temperatura ambiente (tanto combustibles como no).
- II) Los líquidos que, accidentalmente, entren en contacto con focos importantes de calor.

Principalmente, las BLEVES más conocidas, y de las que se tienen mejores informaciones, se refieren a gases licuados derivados del petróleo (GLP) inflamables que se ven involucrados en incendios aunque, en teoría, repetimos, no es necesario que sean inflamables.

El común denominador para que exista la posibilidad de que se puedan producir BLEVES, es que sean gases licuados o líquidos muy calientes. Evidentemente es la primera condición necesaria pero, en absoluto, suficiente sino están contenidos en recipientes herméticos.

En el caso de los líquidos, para que se pueda dar una, BLEVE, ha de existir la posibilidad de que el recipiente esté a presión.

Subida de la temperatura.

Los trabajos de Reid (Reid, 1979), nos dan la esencia para establecer la temperatura límite de sobrecalentamiento y la línea límite de sobrecalentamiento, que determinan, para cada sustancia, las condiciones a partir de las cuales es posible que se produzca el BLEVE.

Las condiciones límite de sobrecalentamiento en las que se producirá la nucleación espontánea en toda la masa del líquido, se pueden establecer a partir de la línea tangente a la curva de presión de vapor-temperatura en el punto crítico (Ver Figura 1).

La relación entre la presión de vapor y la temperatura es la establecida por la ecuación de Antoine:

$$\ln P = \frac{A}{T} + B$$

La tangente a la curva de saturación en el punto crítico se obtiene calculando la derivada de la presión respecto a la temperatura (Montenegro, 1987) (Fernández, 1990) (Bestratén, 1991).

$$\frac{dP}{dT} = A \frac{P}{T^2}$$

Aplicando esta expresión al punto crítico,

$$\frac{dP_c}{dT_c} = \frac{P_c A}{T_c^2} = \text{tg } \alpha$$

Esta expresión da, pues, la pendiente de la línea tangente a la curva de saturación en el punto crítico. La ecuación de la recta será:

$$P = \text{tg } \alpha \cdot T + b$$

La utilidad de esta expresión se verá más claramente mediante un ejemplo. Se calcula a continuación el valor límite de sobrecalentamiento para el butano. Los datos de equilibrio correspondientes al punto crítico y a la presión atmosférica son:

$$P_c = 38,7 \text{ atm} \quad T_c = 425,8^\circ \text{ K}$$

$$P = 1 \text{ atm} \quad T = 272,5^\circ \text{ K}$$

Introduciendo estos datos en la ecuación de Antoine, se hallan los valores de las constantes A y B para el butano (para la presión expresada en atm y la temperatura en K):

$$A=2769$$

$$B=10,16$$

La pendiente de la tangente a la curva de saturación en el punto crítico es, pues:

$$\tan \alpha = 38,7[2769/425,8^2] = 0,591$$

Y el valor de la ordenada en el origen, b, se encuentra introduciendo nuevamente los valores correspondientes al punto crítico, con lo que se obtiene $b = -213$. De este modo se determina la ecuación de la recta tangente; su intersección con el eje de temperaturas a $P = 1$, da una temperatura de 89° C (Figura 5). Para el sistema de coordenadas empleado con origen en 0° C , la ordenada en el origen será la presión correspondiente a 273° K ,

$$P_{273} = 0,591X 273 - 213 = -52 \text{ atm}$$

Supongamos un depósito de butano a temperatura ambiente (unos 20 °C), en el que el líquido y el vapor están en equilibrio a una presión absoluta de unas 2 atm (punto M de la Figura 5). Si por la radiación emitida en un incendio, la temperatura aumenta hasta 70 °C, la presión en el interior del depósito será de 8 atm (punto N). Si en estas condiciones el depósito estalla (por fallo del material o por impacto, por ejemplo), habrá una despresurización repentina desde 8 atm hasta la presión atmosférica. A presión atmosférica, la temperatura de la mezcla líquido-vapor formada será -0,5 °C; el punto correspondiente es O, y el proceso de despresurización corresponde a la línea vertical que une N con O. Al no llegar esta línea hasta la recta tangente a la curva de saturación en el punto crítico, se puede considerar estrictamente que no habrá BLEVE. Es decir, si bien se producirá una fuerte vaporización instantánea, no se dará una nucleación en toda la masa del líquido.

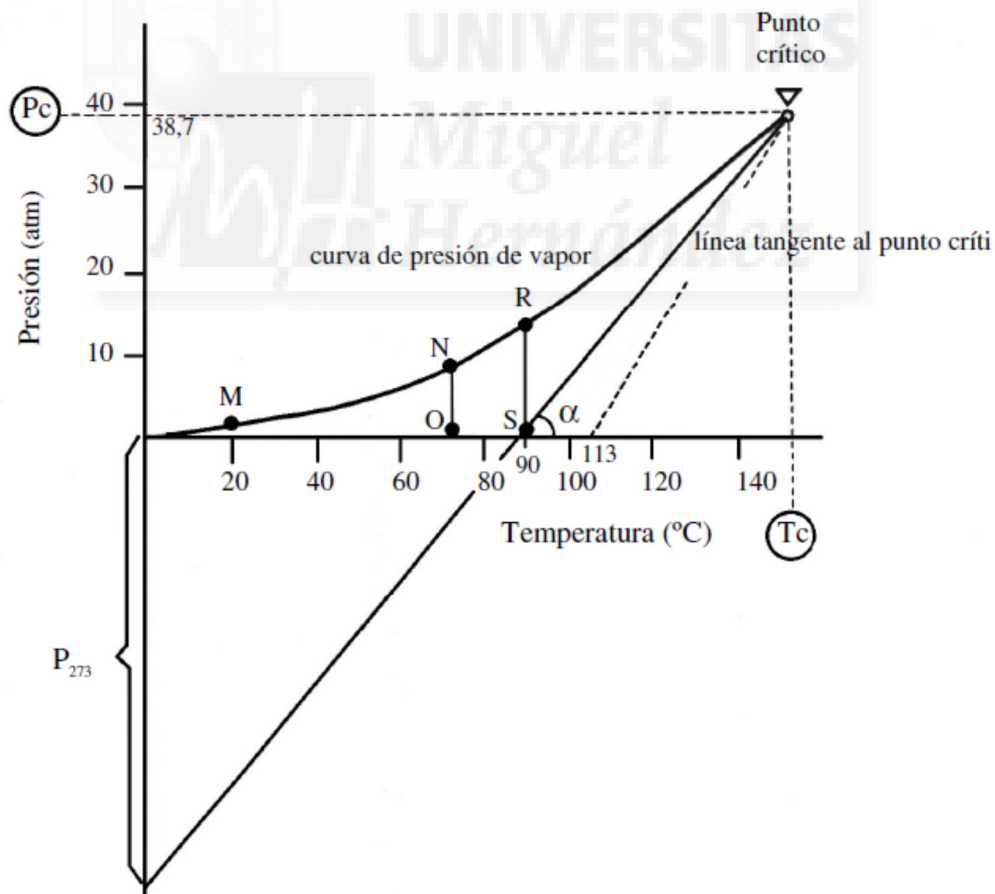


Figura 5: Gráfica P-T-V para gases licuables. Mañas Lahoz, J. L (1991).

En cambio, si en el calentamiento la temperatura del líquido llega, por ejemplo,

a 90 °C (punto R), en la despresurización se alcanza la recta tangente (punto S de la Figura 5). En este caso se darían las condiciones necesarias (sobrecalentamiento) para que se produzca la nucleación antes mencionada, y sucedería una explosión BLEVE.

Producto	Fórmula	T _s , °K	T _c , °K	P _{cr} , At	I _n P _{cr}	A	B	tgα	b, At	TR, K	T _g , °K	T _g , °K	T _g -T _{cr} , °K
Agua	H ₂ O	373	647	217.7	5,38312	4741	12.71	2,4656	1378	559	571	576	5
Anhidrido Carbónico	CO ₂	195	304	73	4,29046	2333	11.96	1,8429	487	265	270	271	1
Amoniaco	NH ₃	240	406	112.3	4,72117	2771	11.55	1,8878	654	347	359	361	2
Fosgeno	COCl ₂	281	455	56	4,02535	2958	10.53	0.8001	308	386	404	405	1
Metano	CH ₄	111.5	191	45.8	3,82428	1024	9.18	1,2856	200	156	169	170	1
Etano	C ₂ H ₆	184.4	305	48.8	3,88773	1812	9.83	0.9499	241	255	270	271	1
Etileno	C ₂ H ₄	169.1	282.7	50.9	3,92986	1654	9.78	1,0534	247	235	250	252	2
Propano	C ₃ H ₈	231.1	369.8	43	3,76120	2317	10.03	0.7286	226	312	328	329	1
Propileno	C ₃ H ₆	225	365.3	45	3,80666	2230	9.91	0.7520	230	307	324	325	1
n-Butano	C ₄ H ₁₀	272.5	425.8	38.7	3,65584	2767	10.15	0.5906	213	362	379	379	0
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	309.3	470.2	33	3,49651	3160	10.22	0.4717	189	403	419	418	-1
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	342	507.8	29.5	3,38439	3545	10.37	0.4056	176	436	453	452	-1
n-Heptano	C ₇ H ₁₆	371.3	539.8	26.8	3,28840	3911	10.53	0.3597	167	467	483	480	-3
n-Octano	C ₈ H ₁₈	398.8	569.2	24.7	3,20680	4272	10.71	0.3257	161	497	510	507	-3
Eter etílico	(C ₂ H ₅) ₂ O	307.6	467	35.5	3,56953	3217	10.46	0.5236	209	401	416	416	0
Cloro	Cl ₂	238.4	419	93.5	4,53796	2510	10.53	1,3368	467	350	370	373	3

Tabla 3. Propiedades críticas de gases licuados con potencial de BLEVE. Mañas Lahoz, J. L. (1991).

En realidad, la utilización de la recta tangente a la curva de saturación en el punto crítico como valor límite para la existencia de BLEVE implica un margen de seguridad; los datos experimentales parecen poner de manifiesto que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento capaz de provocar BLEVE y el establecido por esta recta es del orden de 20 a 35°C. Esto es debido a que cuando el producto se despresuriza hasta alcanzar la línea límite de sobrecalentamiento, se produce también una ligera disminución de temperatura, de forma que para alcanzar el punto de intersección de la tangente en el punto crítico con la recta P=1 atm (temperatura límite de sobrecalentamiento) será necesario partir de una temperatura superior. Si desde esta nueva temperatura se traza una vertical se obtendrá un nuevo punto o temperatura límite para la recta P = 1 atm. Uniendo este nuevo punto límite con el punto crítico, se obtendrá una nueva línea límite de sobrecalentamiento más cercana a la realidad que la tangente propuesta por Reid. Ha sido propuesta la expresión siguiente para calcular este límite

de sobrecalentamiento:

$$T_g + T_s = 0,82206T_{cr} - 0,89485T_s$$

Donde T_g es la temperatura límite de sobrecalentamiento y T_s la temperatura de saturación correspondiente a la presión atmosférica. Algunos autores en vez de esta expresión utilizan la siguiente:

$$T_g = 0,89T_{cr}$$

La diferencia entre las temperaturas obtenidas mediante estas dos expresiones oscila entre $-3\text{ }^\circ\text{C}$ y $+5\text{ }^\circ\text{C}$, para la gama de productos incluidos en la tabla adjunta.

Existen, sin embargo, algunas reservas, sobre la utilidad de estas predicciones en un caso real. En el calentamiento de un depósito por un incendio, a escala real, aparecen sin duda algunos factores, como por ejemplo los sobrecalentamientos locales, que dificultan la predicción para determinados casos de si se producirá BLEVE o no. Este es un campo en el que quedan aún interesantes trabajos de investigación por realizar.

Bajada brusca de la presión.

La segunda condición necesaria para que se pueda producir una BLEVE es que haya un descenso súbito de la presión interna en el recipiente, o tanque, que contenga el líquido.

Cualquier fallo, fisura o perforación que se produzca en las paredes del recipiente así como la entrada en funcionamiento de algún dispositivo de aplicación directa sobre el recipiente que libere, incontrolada y súbitamente, la presión; puede ser, en ciertos casos, y dependiendo de las circunstancias, el origen desencadenante de una BLEVE.

Dicha fisura o perforación puede ser producida, principalmente, por causas mecánicas (grietas en la chapa del recipiente, impactos sobre el recipiente, choque o vuelco de una cisterna a presión en su transporte, etc.).

Normalmente los líquidos y en particular los líquidos inflamables no suelen estar presurizados. Por ello aunque hubiese un impacto o choque sobre el tanque que los contiene no se produciría BLEVE. Si se produce un impacto o choque, evidentemente

puede haber fuga del producto e incluso, producirse un incendio, pero es bastante improbable, en las condiciones antedichas, que se produzca una BLEVE.

También puede ser producida por causas térmicas. En efecto, el calentamiento excesivo de la chapa del recipiente o contenedor produce una pérdida de la resistencia mecánica del metal con lo que sus paredes pueden llegar a ser incapaces de aguantar la presión interna del recipiente, que además habrá aumentado con el calentamiento, produciéndose las grietas o fisuras que pueden iniciar una BLEVE.

Recipientes para contener GLP (Butano, Propano, etc.) pueden fallar (agrietándose o rajándose) a presiones de unos 14 a 20 kg/cm² (1,4 a 2 N/mm²), por el sólo hecho de calentar la chapa a unos 650 a 700 °C, ya que la resistencia mecánica de este acero, a dichas temperaturas, se reduce a, aproximadamente, el 30% de la que tiene a las temperaturas normales.

En este caso, como se ha dicho antes, el calor proporcionado no solo debilita la chapa sino que además incrementa la presión interna en el recipiente con lo que el efecto del aumento de la temperatura es doblemente pernicioso.

Volviendo al caso de los líquidos inflamables, si un foco de calor, o incendio, incide sobre las chapas de los recipientes que los contienen, siendo los recipientes herméticos, aumentaría la presión con lo que un BLEVE si sería entonces posible.

Comportamiento de las válvulas de seguridad en las BLEVES.

Hablando de los descensos bruscos de la presión habría que decir que, desgraciadamente, las válvulas de seguridad, mejor dicho, de alivio de sobrepresiones, y los orificios de venteo, pueden, como es su misión, descargar parte del vapor producido por la ebullición del líquido si, por ejemplo, el recipiente resulta expuesto al fuego, pero no podrán evitar que la chapa del recipiente vaya subiendo de temperatura, dependiendo de la intensidad del foco calorífico que sea, con lo que la BLEVE seguirá siendo posible. Lo que sí podrá lógicamente hacer la válvula de seguridad es retrasar el momento de aparición de la BLEVE y aligerar algo de carga del depósito, pero no evitará, desgraciadamente, que pueda generarse por causas térmicas.

Asimismo, la válvula de seguridad, puede funcionar perfectamente y no evitar la BLEVE producida por un choque o impacto físico (descarrilamiento, colisión, etc.) de una cisterna o recipiente que lleve un gas licuado, pues la presión no se incrementará

apreciablemente por el impacto con lo que, dicha válvula, normalmente, no tiene por qué abrirse. Sin embargo el choque sí que puede producir fisuras o grietas que liberen la presión hasta cercana a la atmosférica. Ello puede entonces generar una BLEVE. Por tanto, tampoco se evitan las BLEVES, originadas por causas mecánicas, mediante el uso de válvulas de seguridad.

Aunque no encontremos en la bibliografía, pruebas documentales de sucesos que realmente hayan ocurrido al respecto, sí que podemos afirmar, al menos desde un punto de vista teórico, que puede darse el caso de que una válvula de alivio, de seguridad, sea el origen de una BLEVE si se dan, desgraciadamente, estas dos condiciones, al mismo tiempo:

1) Que esté tarada a una presión superior a aquella cuya correspondiente temperatura (en la curva de equilibrio de presiones-temperaturas) línea "Superheat Limit Locus" (que luego definiremos) con el eje de temperaturas, abscisas. Véase detalles, como ejemplo, en la Figura 1. Es decir, que esté en la zona de la derecha de la Figura donde el líquido está sobrecalentado, por lo que la nucleación espontánea es allí posible.

2) Que sea una válvula de seguridad de un gran caudal con lo que, al abrirse, permitirá la evacuación en pocos instantes de una gran cantidad de fluido por lo que producirá una bajada muy rápida de la presión con el consiguiente peligro de BLEVE.

No obstante lo anterior, se podría argumentar que es difícil que ocurra, pues, por lo menos, la segunda condición es difícil que suceda ya que la válvula de alivio, si está bien diseñada, construida y contrastada, por su concepción, se abrirá sólo hasta liberar el exceso de presión hasta su timbre de cierre. Con ello, en cuanto llegue a este nivel, se volverá a cerrar, impidiendo así que se despresurice hasta una presión cercana a la atmosférica que, recordemos, es lo que suele desencadenar la BLEVE. Aceptemos tal punto de vista. Todo ello es cierto pero quede apuntada la posibilidad de que, si la válvula de alivio tiene demasiado caudal y el resorte tiene mucha "inercia" o sea, tiende a cerrarse después de que la presión en el depósito ha descendido bastante por debajo de la teórica de cierre, es posible una BLEVE. Todos sabemos que lo de la "inercia al cierre" es un caso que, en la práctica industrial, se da mucho más de lo que todos desearíamos.

Todo lo anterior es posible si las válvulas funcionan bien, qué decir de una

válvula de seguridad que no funcione correctamente al cierre. Entonces sí que podemos afirmar que una válvula que no funcione bien es origen de BLEVE's.

Por supuesto que, con lo dicho anteriormente, se entenderá perfectamente que un disco de ruptura, que esté aplicado directamente al recipiente y que se rompa por exceso de presión, puede muy bien, en determinadas condiciones, producir una BLEVE. Si el disco va colocado en serie, como es frecuente en los nuevos diseños, con la válvula de alivio, hará que sea, lógicamente, más difícil que la ruptura de dicho disco sea el origen de una posible BLEVE.

Producción de la nucleación espontánea por "sobrecalentamiento" de líquidos.

Para R.C. Reid y otros investigadores sobre el tema, la tercera y más específica condición que debe ocurrir para que pueda darse una explosión BLEVE, es que, como se ha indicado anteriormente, el fluido esté "sobrecalentado", es decir, en una zona del diagrama cuyas condiciones de presión y temperatura favorezcan el fenómeno de "nucleación espontánea" por lo cual, se produzca una evaporación "en masa" rapidísima, en milésimas de segundo, que haga de desencadenante de la explosión BLEVE. Esta teoría de la nucleación espontánea, aunque todavía se está experimentando parece confirmar dicha hipótesis

Sin describir con todo detalle el fenómeno general de la nucleación como paso previo a la vaporización, pero siguiendo las teorías de Reid y, basándonos también en lo descrito por A. King (King, A. 1980), relacionaremos, aunque sólo sea someramente, cómo se pueden explicar los principios de generación de una BLEVE y, lo que es más importante, describiremos algunas de las armas con las que se cuenta actualmente para evitar este tipo de explosiones.

Para Reid y otros investigadores, el mecanismo de las explosiones BLEVE se pueden explicar de una manera lógica, si se estudia previamente el fenómeno de la vaporización en las distintas condiciones de presión y temperatura.

Si tenemos, por ejemplo, como se ha dicho antes, un gas licuado o un líquido muy caliente encerrado en un depósito y con su vapor a la presión correspondiente a las condiciones de equilibrio y, por la razón que sea, falla la chapa del depósito produciéndose una grieta o perforación, se generará una rápida caída de la presión.

Entonces, el líquido debería empezar a hervir y a bajar su temperatura a través de toda su masa hasta un valor compatible con la nueva presión, (que, normalmente, a los pocos segundos, será la presión atmosférica). En concreto para el caso del Propano, (dado por King), debería bajar a las siguientes condiciones, $T=-42\text{ °C}$ y $P = 1\text{ Atmósfera}$. Sin embargo la iniciación del proceso de ebullición necesita de la existencia, dentro de la masa del líquido, del "suficiente número de núcleos iniciadores de la ebullición".

Es el caso que, según dichos investigadores, en los primeros instantes no existen en los tanques de GLP (Propano, Butano, etc.) dichos núcleos por lo que, en contra de lo expresado teóricamente, la ebullición, por unos breves momentos, no tendrá lugar. Habrá por tanto un gas licuado por encima de la temperatura a la que teóricamente estaría en equilibrio, a la presión atmosférica. Tal equilibrio, pues, no se produce, al menos en los primeros instantes, por la inexistencia de los núcleos iniciadores de la ebullición. Ese "desequilibrio" puede dar lugar (o no, dependiendo de las condiciones) a una explosión BLEVE. Por lo menos producirá una ebullición violenta, como luego veremos, que puede rajarse el depósito.

Copiando a Reid diremos que, según la teoría cinética de los gases, no se producirá nucleación y por tanto evaporación, en contra de lo admitido vulgarmente, hasta que se alcance una determinada temperatura para cada producto. Además, en la sola variación de unos pocos grados centígrados el rango de producción de núcleos iniciadores de la evaporación pasa a ser, de apenas apreciable, a un valor enorme. Citando su ejemplo diremos que una explosión BLEVE se podrá producir cuando "un millón de núcleos-embrión se generen en cada milisegundo por milímetro cúbico de líquido sobrecalentado".

1.2.4. ACCIDENTES EN LA HISTORIA DE ESTE FENÓMENO.

La BLEVE tristemente conocida en España es la del Camping "Los Alfaques".

El 11 de julio de 1978, un camión cisterna cargado con 25 toneladas de propileno licuado salió desde Tarragona de la refinería Enpetrol y se dirigió hacia el sur por la antigua carretera N-340, hacia Alicante. La cisterna tenía una capacidad aproximada de 45 metros cúbicos y una capacidad legal máxima de 19,35 Toneladas de carga, a una presión máxima de 8 bares, sin embargo, como demostró la investigación posterior, esta capacidad fue sobrepasada con creces. Por si fuera poco, la cisterna (fabricada en acero al carbono) no disponía de ningún sistema de alivio de presión.

La secuencia de la tragedia se inició, cuando el conductor del camión, probablemente para ahorrarse el paso por el peaje que habría tenido que pagar de su propio bolsillo, decidió conducir por la N-340 en dirección sur. Después de recorrer 102 kilómetros, en el punto kilométrico 159,5, a las 14:35, al pasar por delante del camping "Los Alfaques", ocurrió la catástrofe. En ese momento, el camping tenía registradas unas 800 personas, y se estima que entre 300 y 400 se encontraban dentro del radio de la explosión, calculada entre 0,5 y 1 km, y que mató instantáneamente a 158 personas.

En la investigación subsiguiente se expuso como hipótesis más probable que el camión cisterna estaba sobrecargado, ya que llevaba unas 25 t en vez de las 19 t máximas reglamentarias. Aquella cantidad ocupaba totalmente el espacio disponible de la cisterna, que de este modo quedaba llena al 100%. A pesar de que inicialmente el líquido se encontraba muy frío, como consecuencia de una larga exposición al sol durante el viaje, la carga se fue calentando y con ella se generó una expansión del líquido contenido, el cual al carecer de espacio para expandirse elevó la presión interna muy por encima de la que correspondería a su punto de equilibrio líquido-vapor. A causa del exceso de presión, el tanque de acero reventó, posiblemente por rotura de una de las soldaduras que unían dos secciones cilíndricas de la cisterna, desdoblándola en dos piezas. En ese instante el propileno licuado se encontró sin una pared de contención y se liberó bruscamente, al igual que ocurriría en un cohete a reacción.

El gas licuado, al verse libre y encontrar los numerosos puntos productores de chispas por los rozamientos, se incendió generando una explosión cuyo empuje dividió en dos al camión proyectando sus mitades en direcciones opuestas durante cientos de metros. Como resultado, la parte delantera de la cisterna y la tractora del camión sufrieron un impulso hacia adelante en la dirección de la carretera. La parte posterior, mucho mayor, salió despedida hacia atrás, desviándose ligeramente de la carretera y avanzando más de 200 metros campo a través hasta alcanzar el edificio de un restaurante. Visto el ángulo que formaron las dos partes de la cisterna se puede inferir que la rotura de la soldadura empezó por el lado del mar, justo apuntando al Campamento los Alfaques. Las dos piezas en que se rompió la cisterna avanzaron hacia la montaña, así como el líquido incendiado, que avanzó hacia el Campamento. La deflagración del líquido arrastró una pieza inerte de la cisterna, su cobertura, que se encontró en la mitad del campamento, concretamente en la zona de mayor devastación.

Durante la explosión, la bola de fuego cubrió en un instante la mayor parte del campamento, afectando la plaza al sur de la calle y a muchos de los veraneantes que

estaban allí. Además, las altas temperaturas de más de 2000 °C, hicieron que la gran cantidad de bombonas de gas que había en el propio campamento se inflamaran, sumándose al incendio de la explosión. Según los testigos presenciales, la temperatura en la zona fue tan alta que hizo hervir el agua de la orilla del mar hacia donde las víctimas huían.

Fallecieron 158 personas en el acto, incluido el conductor del camión. Sin embargo, si la explosión se hubiese producido pocos minutos antes las consecuencias hubiesen sido desproporcionadas, ya que la carretera N-340 pasa también por el centro de San Carlos de la Rápita, que en esa época del año podía albergar a unas 20000 personas, entre residentes y turistas. Se calcula que la explosión se produjo justo un minuto después de abandonar el núcleo urbano, lo que atenuó que la explosión hubiese sido más devastadora en cuanto a víctimas y destrozos materiales se refiere.

El análisis del accidente ha determinado tres posibles causas.

- ✓ El sobrellenado del tanque causó la ruptura hidráulica de la cisterna, con la consecuente evaporación y expansión del gas licuado, provocando una explosión de tipo BLEVE. Ésta fue la causa oficial según el tribunal de Tarragona.
- ✓ Una fuga en la cisterna produjo una nube inflamable de propileno que se incendió al encontrar un punto de ignición. El calor del incendio produjo el calentamiento del interior del tanque, provocando un aumento de la presión interna al evaporarse el propileno, lo que produjo igualmente una BLEVE.
- ✓ El camión sufrió un accidente de tráfico con fuga de propileno que se incendió, dando lugar a una súbita bola de fuego.

Muchas de las personas fueron trasladadas a los hospitales cercanos, principalmente a la Clínica Arrosera de Amposta que era la más cercana al lugar de los hechos, y al Hospital Verge de la Cinta de Tortosa, que recibió más de 80 quemados graves que fueron trasladados a Barcelona. Muchos fueron enviados a la unidad de quemados del Hospital La Fe de Valencia, especialista en cuidados a quemados.

A raíz de este accidente se promulgaron regulaciones más severas en relación con el transporte de materias peligrosas. Se prohibió el paso de camiones cisterna con productos peligrosos por las travesías urbanas y se les obligó a circular por las autopistas; también se mejoró la seguridad de vehículos y transportistas a través de nuevas reglamentaciones sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera,

tales como la obligatoriedad de la instalación de válvulas de alivio de presión en las cisternas que transportan determinadas sustancias, como gases licuados inflamables.

El más característico para el estudio en el cual nos encontramos es el de: SAN JUAN Ixhuatepec, MEXICO, 19/11/1984.

A eso de las 05:35, del 19 de noviembre 1984, un gran incendio y una serie de explosiones catastróficas tienen lugar en la terminal de PEMEX Gas LP en San Juan Ixhuatepec, México.

Tres refinerías que abastecen de GLP diariamente el almacenamiento, estaban siendo abastecidas desde una refinería a 400 kilómetros de distancia. Dos grandes esferas y 48 cilindros estaban llenos al 90% y cuatro pequeñas esferas estaban a un 50% de su capacidad.

El almacenamiento se realizaba mediante cuatro esferas GPL, (Mezcla 80 % de butano, 20 % propano), con un volumen de 1600 m³ por unidad, dos esferas de 2,400 m³ de volumen y 48 tanques cilíndricos horizontales de diferentes capacidades, con un total de unos 12000 m³ de G.P.L.

En el momento del accidente, durante una fase de llenado de un depósito, mediante una tubería de 8 pulgadas (200 mm de diámetro), la sala de control y una estación de bombeo detectan una caída de presión. El tubo de 8", entre una esfera y los tanques cilíndricos se rompe. Sin embargo, los operadores no pueden identificar la causa de la caída de presión.

Esto produjo una nube de GLP, ocupando unos 200 m por 150 m y llegando a una altura visible alrededor de dos metros, se inflama, entre 5 a 10 minutos después del comienzo de la fuga. La nube inflamada alcanza las casas vecinas (a menos de 100 m de los tanques), las llamas destruyen las casas e incluso carbonizan a personas en el acto.

Un empleado con el tiempo desconecta la operación mediante el botón de parada de emergencia.

Aproximadamente 15 minutos después de la ignición de la nube, en las dos esferas más pequeñas se produce una BLEVE, causando la formación de una bola de fuego (diámetro medido sin certeza, a 350 o 400 metros) y en uno o dos tanques

cilíndricos. Los efectos térmicos y de lanzamiento de fragmentos causan un efecto dominó, y otros BLEVE.

En última instancia, cuatro pequeñas esferas fueron destruidas. Esferas más grandes permanecieron intactas, aunque sus apoyos estaban rotos. Sólo 4 de los 48 tanques cilindros permanecieron en su posición inicial. Dentro de los 300 metros, todas las personas murieron o se produjeron grandes heridas. El accidente causó la muerte total de más de 600 personas. Había cerca de 7.000 heridos y 39.000 personas evacuadas. Alivio movilizó cerca de 4.000 equipos de rescate.

Fragmentos de esferas se encuentran a más de 600 metros y 12 partes de tanques cilíndrico horizontal se proyectaron por "efecto de cohetes " a distancias de hasta 1.200 metros.

Las deficiencias identificadas durante el análisis de la seguridad en el lugar del accidente fueron principalmente:

- En general, el sitio no disponía de las medidas de seguridad y evacuación elementales.
- La implantación de los tanques y su posicionamiento estaban demasiado cerca entre ellos, y cerca de las casas.
- Aislamiento: no existían zonas de protección en caso de emergencia.
- Los medios para la lucha contra el fuego, el sistema de agua contra incendios de la terminal fue hecho inoperante con la primera BLEVE. Del mismo modo, en el sistema de pulverización el agua era insuficiente.
- No existían sistemas de detección de fugas.
- Las emergencias para dar respuesta al suceso estuvo muy afectada por el tráfico que impidió la llegada de la ayuda para la evacuación de los residentes.
- La BLEVE puede ocurrir en cuestión de minutos de la ignición de la nube inflamable o cuando un dardo de fuego afecta la pared del tanque, por lo cual debería estar aislado o con suficiente sistema de refrigeración.

1.2.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. PROTECCIONES ACTUALES.

Por los efectos descritos anteriormente se comprenderá la corriente que se ha establecido dentro, principalmente, del mundo industrializado, para desarrollar sistemas que nos prevengan de tan importantes accidentes. Por supuesto que dichos accidentes, y ahí radica, quizá, una de sus características de peligrosidad, no sólo pueden afectar al interior de las instalaciones industriales sino que además pueden verse involucrados los alrededores de las factorías en las que se manipulan gases licuados e, incluso, líquidos de determinadas características. Pero es que, como muchos recipientes conteniendo dichos fluidos son usualmente transportados con bastante frecuencia, pueden sufrir dichos accidentes no sólo en determinadas áreas industriales sino en centros urbanos y vías públicas (ver el accidente de los Alfaques), como aparecen en la tabla nº1. Los últimos preceptos reglamentarios obligan en EEUU y Canadá aislar los vagones y cisternas, para retrasar el BLEVE 75 minutos al menos, para dar tiempo a los bomberos a apagar el incendio.

Los devastadores efectos de las BLEVE's que, repetimos, similares al estallido de potentes bombas y artefactos explosivos, nos pueden dar una justa dimensión de este problema ya que, si bien no es frecuente que se produzcan, cuando suceden pueden presentar efectos de gran peligrosidad para las personas y los bienes.

Todavía el problema, como se desprende de la información de que se dispone en la actualidad, se complica más si el líquido o gas afectado es inflamable, reactivo o tóxico, pues a los efectos devastadores de los impactos "físicos" de los restos del recipiente, se unirán los peligros "químicos" (reactivos, inflamables, tóxicos, etc.) del contenido.

Es pues un problema importante por su potencial peligrosidad y hay, justamente, que intentar no suceda nunca y, si sucediese, que sus efectos sean neutralizados dentro de lo que sea posible.

Los medios de protección de este fenómeno, se han venido clasificando como métodos clásicos y modernos, aunque estos últimos ya se podrían también clasificar como clásicos.

Los sistemas clásicos eran aquellos que se utilizaron antes de conocer el termino BLEVE y se utilizaban para mitigar explosiones, incendios, etc. O sea, propiamente, lo

que se hizo fue aplicar los métodos de prevención de que disponía la seguridad clásica, a las BLEVE's porque no se disponía de otros sistemas. Posteriormente la profundización en el conocimiento del fenómeno y las nuevas teorías, estudios y trabajo experimental sobre la BLEVE llevaron y, nos llevan en la actualidad, a poner a punto nuevas técnicas preventivas, que explicaremos progresivamente. Nos referimos a aquellos sistemas de los que la bibliografía nos ha dispuesto de información pues, como se ha repetido continuamente, en este campo, no se cesa de investigar.

En la descripción de los sistemas clásicos seguiremos el trabajo, de WALLS, (recordemos uno de los tres ingenieros que inventaron el término BLEVE) pues expone con mucha claridad, y sistematizándolas, las técnicas de las que dispusieron y aplicaron los pioneros en el estudio de este fenómeno, para prevenir dichas explosiones y/o paliar sus efectos.

Walls (Walls, W. L 1979) especifica que los métodos de prevención se dividen en tres grandes áreas:

- a) LIMITACION DE LA PRESION.
- b) LIMITACION DE LA TEMPERATURA.
- c) PREVENCIÓN DE IMPACTOS.

1.2.5.1. LIMITACION DE LA PRESION.

Para conseguir evitar la explosión BLEVE por la sola limitación de la presión se exige, evacuar gran cantidad del líquido antes de que el recipiente pueda fallar. Habrá, por tanto, entonces, que reducir la presión hasta un nivel cercano a la presión atmosférica. En determinadas ocasiones, y si la unidad donde esté ubicado el recipiente está prevista para ello, podrá realizarse la evacuación a través de las plantas del proceso. Esta operación, para recipientes transportables será muy difícil de efectuar con seguridad, rapidez y eficacia, pero imposible durante el recorrido de los recipientes que contengan dichos fluidos. Por ello, este sistema, en el caso práctico de ocurrir un accidente tiene muy pocas posibilidades sobre todo en el caso de transporte.

1.2.5.2. LIMITACION DE LA TEMPERATURA.

Este sistema sí que ofrece, en muchos casos, una real alternativa de prevención. Por supuesto que también presenta a veces sus problemas.

Según Walls (Walls W. L, 1979) la limitación de la temperatura puede lograrse por:

- I) PREVENCIÓN CONTRA EL FUEGO
- II) REFRIGERACIÓN DE LOS RECIPIENTES.
- III) AISLAMIENTO DE LOS RECIPIENTES

I) Prevención contra el fuego. Por supuesto que lo mejor, si se puede, en caso de incendio, es apagarlo o por lo menos limitar la intensidad de las llamas y/o el tiempo de exposición al fuego. Si el fuego se origina en alguna tubería desde la cual se produce un dardo de fuego que calienta al tanque, existe un procedimiento que mediante agua jabonosa se introduce en la tubería anulando el dardo de fuego, y barriendo el líquido GLP hacia el tanque. Se hace de forma automática con alarmas y se refleja en la sala de control.

II) La Refrigeración de los Recipientes. Se consigue con agua. Este método es efectivo cuando son BLEVE's originadas por causas térmicas. La aplicación de agua puede evitar una BLEVE, pues forma una película sobre la chapa que evita que la temperatura de las paredes del recipiente suba por encima de 100 °C (los estudios indican que el acero no pierde sus propiedades hasta pasados los 500 °C) y, entonces, es probable que a tal temperatura no afecte el metal del recipiente y no suba la temperatura interior del producto.

Sin embargo hay casos en que la aplicación de agua puede ser contraproducente. Es el caso de los gases criogénicos que están a baja temperatura, si se les rocía con agua a la temperatura normal, toman calor de la misma y aumentan, por tanto, su presión interna con lo que el peligro de producirse una BLEVE aumenta.

La refrigeración se puede hacer con:

MANGUERAS,

SISTEMAS de ROCIADORES FIJOS y

SISTEMAS MONITORIZADOS de ROCIADO.

Las mangueras, con boquillas de proyección, tienen la ventaja de su movilidad y versatilidad pero presentan cierta limitación de capacidad y necesitan un cierto tiempo para montarse.

Los sistemas de rociadores y los monitorizados son muy efectivos, sólo se suele disponer de ellos en algunas zonas de almacenamiento, determinadas unidades de proceso y en ciertas estaciones de carga y similares. Tienen una gran rapidez de respuesta y ello puede lograr que, si se utilizan convenientemente, no se produzcan BLEVE's por causas térmicas en dichas áreas.

III) Aislamiento de los Recipientes. La limitación de propagación de altas temperaturas debidas a incendios, focos de calor intenso, etc., se puede conseguir también mediante el uso de las adecuadas técnicas de AISLAMIENTO.

Hay varias técnicas:

ENTERRAMIETO,

CUBRIMIENTO (TANQUES SEMIENTERRADOS)

REVESTIMIENTO.

El enterramiento y cubrimiento son sistemas obvios de protección antitérmica muy utilizados en almacenamientos de GPL y para ciertos hidrocarburos petrolíferos (Refinerías, Plantas Petroquímicas, etc.).

Los sistemas de revestimiento son variados: Lanas de vidrio, lanas minerales, lanas refractarias, poliuretanos, ciertos cementos, sustancias bituminosas, etc. Desgraciadamente muchas veces estos revestimientos están diseñados para otras cosas distintas de la protección antifuego (para evitar pérdidas caloríficas, mejoras del rendimiento, evitar condensaciones, etc.). Si se diseñan para la protección exclusiva de las BLEVE's térmicas se suelen proyectar para resistir un determinado tiempo, pasado el cual se supone que otras medidas de protección (refrigeración externa, etc.) entrarían en funcionamiento.

De todas maneras convendría ahora subrayar la importancia del factor tiempo de cara a la prevención de una explosión BLEVE debido a un fuego, pues puede ocurrir que después de pocos minutos de exposición al fuego se supone que entran en funcionamiento otros sistemas de protección de incendios.

Este tiempo de prevención según el tamaño de los recipientes, y está considerado sin aislamiento y dependiendo del producto que contiene sobre unos 25 minutos. Existe unos ensayos en un vagón de GLP, donde sin aislar se originaba el suceso a los 25 minutos y a otro exactamente igual, aislado, en 93 minutos. También existen casos que se produjo a los 8 minutos.

1.2.5.3. PREVENCIÓN DE IMPACTOS.

Los métodos de prevención de impactos son válidos sólo para recipientes con gases licuados ya que, como hemos dicho antes, los recipientes de líquidos no son susceptibles de sufrir una BLEVE a causa de impactos (a no ser que, al mismo tiempo, haya un incendio en sus alrededores).

Evidentemente es muy poco frecuente que, dentro de una factoría, se produzcan impactos en los depósitos de gases licuados (salvo en caso de que se produzcan otras explosiones). Desgraciadamente esto no es así en el transporte pues la BLEVE puede originarse por el descarrilamiento de un vagón-cisterna o por el choque, colisión o vueltas de campana de las cisternas o de los camiones que portan los contenedores con gases licuados.

Las técnicas de prevención de impactos pueden ir desde el reforzamiento del grosor de las chapas que forman las paredes del recipiente, y el uso de aleaciones más dúctiles y elásticas (resisten mejor los impactos), hasta la protección de los fondos de las zonas delanteras y traseras de los vagones y de las cisternas. Hoy incluso hasta con recubrimientos cerámicos.

Evidentemente, los recipientes provistos de aislamiento, como por ejemplo los recipientes para gases criogénicos además de protegerlos térmicamente ejercen también la función de una cierta protección de los impactos. El efecto amortiguador producido por las lanas de vidrio, etc., hace que dichos recipientes estén físicamente muy protegidos. No se menciona en la base de datos de accidentes que un vagón cisterna de gases criogénicos (aislado) haya tenido accidente BLEVE por impacto.

1.2.5.4. SISTEMAS MODERNOS DE PREVENCIÓN.

Aunque, como antes se ha dicho, este es un campo en desarrollo, por ahora se vislumbran, al menos, los siguientes sistemas de protección:

1. Rediseño, para proteger de la BLEVE, de válvulas de seguridad y discos de ruptura.
2. Introducción de mallas en el recipiente para el retardo del proceso de BLEVE.
3. Adición de núcleos de ebullición que impidan la nucleación espontánea.

1.2.5.5. REDISEÑO DE LAS VALVULAS DE SEGURIDAD.

Como se ha dicho repetidamente, si bien las Válvulas de Seguridad que funcionan normalmente, y con los diseños clásicos, no suelen originar BLEVE's tampoco los suelen evitar, aunque puedan, eso sí, retrasar el tiempo de ocurrencia e incluso, al ir descargando en sucesivas aperturas, hacer la BLEVE muy improbable por desalojamiento relativo del fluido.

Ahora bien, combinando los conocimientos sobre funcionamiento de las válvulas de alivio con las nuevas teorías sobre los líquidos sobrecalentados y las nucleaciones espontáneas, sí que se pueden evitar las BLEVE's mediante el rediseño de las válvulas de Seguridad. Ya se ha dicho anteriormente la manera de hacerlo: dimensionando la válvula para que abra a una presión más baja que la correspondiente al punto de corte de las "Superheat Limit Locus" con el eje de temperaturas.

También sugiere Reid que los Discos de Ruptura pueden ser rediseñados para prevenir que cuando entren en funcionamiento, por subidas de la presión, no se produzcan, caídas bruscas de la misma. Por ejemplo la práctica de Reid sería poner varios discos de ruptura (no uno sólo) que, con distintas presiones de ruptura y capacidades de desalojo diferentes, eviten la producción de esta caída súbita de la presión hasta 1 atmósfera.

Aunque estos métodos de rediseño de válvulas de seguridad y discos de ruptura, no estén probados con el suficiente número de pruebas experimentales parece lógico pensar que, en esta línea, por su coherencia teórica, se podrá, avanzar bastante. Además, los experimentos hechos posteriormente prueban la validez de las teorías de REID.

Como ya se ha dicho, cada líquido, o gas licuado, necesitará un estudio de dimensionado de sus válvulas de alivio y de sus discos de ruptura.

1.2.5.5.1. INTRODUCCION DE MALLAS QUE RETARDAN LA APARICION DE LAS BLEVE's.

Un sistema de prevención de la BLEVE, aunque, mejor que la prevención propiamente dicha, es un sistema de retardo en la aparición de las BLEVE's que permite, en ese tiempo que se gana, aplicar otros sistemas preventivos.

En un principio sólo existía en el mercado comercial un sistema canadiense constituido por una malla metálica formada por láminas expandidas de una aleación de aluminio en forma de celdillas hexagonales que, aplicada en el interior de los recipientes en forma de capas, en anillo compactas del producto alrededor de la superficie interior del recipiente o en "masa", cubriendo todo su volumen, parece conseguir los tres siguientes efectos (entre otros menos importantes):

a) En caso de incendio que afecte al depósito distribuye el calor por toda la masa del líquido y del gas del recipiente con lo que evita recalentamientos locales, en las zonas de la chapa que lame la llama, evitando que ésta se reblandezca, con posible aparición de las temidas fisuras que pueden ser las iniciadoras de la BLEVE.

b) Por otro lado, al lograr una mejor distribución del calor por toda la masa del líquido y, sobre todo, por la fase gas (recordemos que los gases y vapores tienen un bajo coeficiente de conductividad térmica) consigue que la temperatura, en la zona gaseosa, no se incremente demasiado rápidamente con lo que, consecuentemente, la presión no aumentará tan rápidamente como lo haría si no tuviese la malla interior. Esto hace también que el tiempo de aparición de una posible BLEVE.'s se retrase bastante.

c) Si, además, el recipiente contuviese circunstancialmente aire y combustible, en proporción detonante, la clásica explosión (no BLEVE) tampoco se produciría o lo haría en muy pequeña escala pues las celdillas de la lámina ejercen una función que favorece el apagado y la dispersión del calor generado.

Además, por el efecto brillante de las láminas de aleación de aluminio, se consigue una reflexión de las radiaciones que se producen en una posible combustión localizada dentro de una determinada zona de la masa, en caso que se pueda producir, por ejemplo, por el impacto de un proyectil que atraviesa un recipiente con combustibles.

De aquí dimana también la utilización militar de este producto en vehículos y aviones de guerra.

Evidentemente también esta solución de introducción de estas mallas de aluminio tiene sus desventajas que es necesario estudiar. Señalemos las más significativas.

- a) Su relativo alto costo.
- b) Pérdida del volumen real de un recipiente en, desde el 2% al 1% de su capacidad, depende de renovaciones y mantenimiento.
- c) En el caso de cisternas de transporte, un peso muerto entre 35/40 kg/m³.
- d) Ciertos problemas de polimerización limpieza, falta de fluidez en productos con elevada viscosidad, posibles reacciones con ciertos productos químicos, etc.
- e) Limpieza reducida.
- f) Limitación productos viscosos.
- g) Hace más complicadas las reparaciones y revisiones de los recipientes que contienen la malla.
- h) Posible actuación como catalizadores.

1.2.5.5.2. ADICION AL FLUIDO DE NUCLEOS INICIADORES DE LA EBULLICION.

Parece ser un campo que tiene algún futuro aunque, hasta ahora, que conozcamos, solo ha dado buenos resultados la adición al fluido a proteger de ciertos materiales gelificados o líquidos modificados para que se comporten como geles (partículas de hielo, alcoholes helados, etc.) (Reid, R.C., 1976) (Birk, A.M., 1995). En este caso dio buen resultado añadir pequeñas partículas (<1 µm) dispersadas homogéneamente en toda la masa del líquido. Ello parece generar unos nódulos de nucleación, en toda la masa del líquido, que impiden la nucleación espontánea y, por tanto, las explosiones BLEVE.

Sin embargo el uso, de partículas sólidas añadidas como núcleos iniciadores de la ebullición (tanto hidrofóbicas como hidrofílicas) no ha dado resultados prácticos de control de la nucleación espontánea.

1.2.6. ANTECEDENTES SOBRE SOLUCIONES QUE SEAN SUSCEPTIBLES DE EMPLEO PARA PREVER EL FENÓMENO.

La práctica ha desarrollado más, unas soluciones que las otras, sobre las tildadas como clásicas, hoy en las instalaciones donde se encuentran este tipo de productos que pueden llegar a producir BLEVE existen habitualmente los rociadores como defensa de este fenómeno.

Dentro de esta línea, ya hay legislación española que en establecimientos de este tipo, donde es de obligado cumplimiento la legislación llamada Seveso, quitan de su listado los posibles BLEVE´s, si cumple la instalación referida una serie de elementos de mitigación.

Ponemos el ejemplo, para poder descartar la posibilidad de la rotura de un equipo, fenómeno de la BLEVE, deberá poder demostrar de forma clara el cumplimiento al menos de tres de las siguientes disposiciones:

- a) Sistema de rociadores de toda la superficie del equipo, al día de las obligaciones que marca la legislación vigente, que proporcione un caudal no inferior a 10 l/min.m² durante un tiempo no inferior a una hora.
- b) Cubeta de retención a una distancia tal que en caso de incendio no afectara en más de 8 kW/m² el tanque más cercano. Las dimensiones de la cubeta y canalizaciones asociadas deberán tener la capacidad suficiente y demostrable para contener el líquido remanente después de un flash.
- c) Recubrimiento aislante que pueda retrasar la generación de BLEVE en un tiempo superior a una hora, homologado por entidad de reconocido prestigio.
- d) Válvula de bloqueo en el fondo del equipo a la línea principal de líquido resistente al fuego el suceso en caso de poder descartar la posibilidad de la rotura de un equipo.

No obstante vamos a profundizar en dos desarrollos que día a día mejoran sus cualidades, el relleno de los depósitos y el aislamiento de los recipientes.

Hoy día los sistemas retardantes de la nucleación espontánea, que se comercializan, son:

- Malla o esferas metálicas.
- Espuma de poliuretano

- Gel retardante de la nucleación.

Entre las anteriores la malla y esferas metálicas presentan, frente a la espuma de poliuretano, las siguientes ventajas:

- ✓ Mayor vida útil
- ✓ Mayor absorción del calor
- ✓ Mayor T^a de fusión, permitiendo soldar.
- ✓ Menor generación de residuos.
- ✓ Mayor facilidad de aplicación
- ✓ Menor capacidad de retención de 1,5 % frente al 15 % de la espuma.
- ✓ Elimina las cargas electrostáticas.

Y las ventajas frente al gel retardante son las siguientes:

- Menor costo
- Reduce la presión
- Mayor vida útil frente a un solo uso del gel.
- Mayor reducción del movimiento de líquidos, etc.

La red o las esferas metálicas, como indicamos, actúan de la siguiente forma:

- En caso de incendio, el calor recibido en la superficie del recipiente se distribuye por toda la masa del líquido y del gas, retrasando la aparición de fisuras en el depósito y por lo tanto retardando o anulando la tan temida nucleación espontánea.

- Al lograrse una mejor distribución del calor recibido la presión no aumentará tan rápidamente como cuando se calienta mayormente la fase gas, debido a que la energía cinética de los gases disminuye al interponerse la red en su movimiento hacia las paredes. Esta cualidad es muy importante, como puede verse reflejada en la siguiente gráfica.

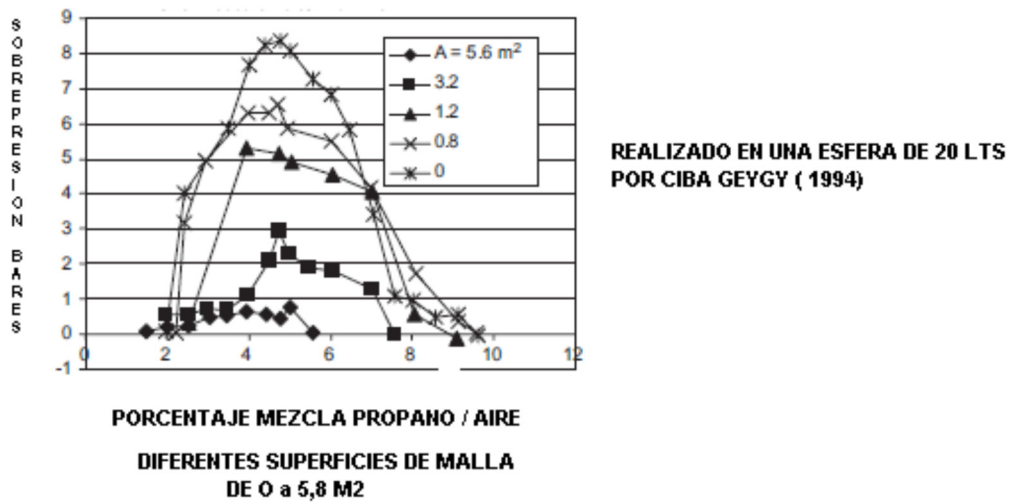


Figura 6: Pruebas de mallas en una esfera de 20 l. Ciba Geygy (1994)

Los volúmenes de desaprovechamiento llegan, en este caso a un porcentaje del 1,04 %.

Otro campo para la lucha de las BLEVE's es el aislamiento. Dentro de él se ha avanzado en la realización de instalaciones enterradas y la cubrición de esferas o depósitos.

1. En la técnica de instalar los depósitos enterrados nos encontramos con las dificultades de la corrosión, y además con la dificultad de acceso a la superficie del depósito, para la realización de las inspecciones reglamentarias que requiere este tipo de almacenamiento. Estos depósitos son cilíndricos, llegando a 8 m de diámetro (tienen mayor necesidad de superficie de chapas por igual volumen que las esferas) y necesitan bombas para sacar el producto, pues como es lógico se realiza por arriba. Tiene también el inconveniente de la inspección de la superficie lateral y que en la parte baja de la esfera queda una zona de elevadas probabilidades de fuga confinada.

2. Se han desarrollado sistemas para cubrir las esferas, con una mezcla de productos, existiendo Texsol® que fue desarrollado por el IFSTTAR (LCPC), en 1980 y se destina exclusivamente fabricado por "EiffageTravaux Publics". Es un material que se obtiene mediante una mezcla compuesta de arena y fibras "Texsol sintéticas" que lo hacen aceptable para la protección de los muros de contención y para el sostenimiento de las estructuras industriales. También tiene ciertas propiedades contra incendios y de protección contra el ruido. La capacidad de deformación de Texsol es buena, por lo cual

le permite adaptarse a superficies heterogéneas, y además es flexible, fácil de instalar, y se ha generalizado su uso también en toda Europa.

Las cualidades intrínsecas de Texsol, como la cohesión, estabilidad, resistencia, capacidad de deformación y buen comportamiento sísmico, lo convierten en un material protector aceptable para la contención preventiva contra el fuego que retarde la elevación repentina de la temperatura y la consiguiente explosión y proyección de materiales.



Fotografía 1: Esferas recubiertas para evitar BLEVE. Texsol.

Ejemplo de referencias construidas y su tamaño:

TOTALGAZ in Frontenex (73): a 1,300 m³ LPG storage sphere.

COBOGAL in Ambes (33): a 3,500 m³ LPG storage sphere.

PRIMAGAZ in St Pierre des Corps (37): LPG storage spheres of 3,000m³ and a 115m³ cylinder.

TOTALGAZ in Merlerault (61): a 1,000 m³ LPG storage sphere.

ELF ATOCHEM in Brignoud (38): a 1,450 m³ LPG storage sphere
TOTALGAZ in Ressons (60): a 1,000 m³ LPG storage sphere and a 200 m³ cylinder.

PRIMAGAZ JORFGAZ in Jorf Lasfar (Morocco): a 2,500 m³ LPG storage sphere.

TOTALGAZ in Fenouillet (31): a 1,600 m³ LPG storage sphere.

KOALAGAZ in Barcelona (Spain): two 2,000 m³ LPG storage spheres.

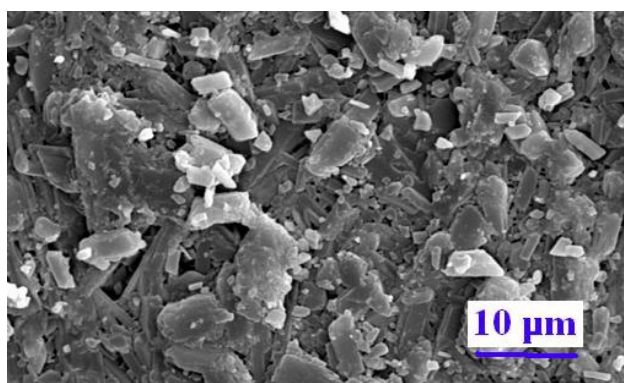
TOTALGAZ in Fenouillet (31): a 600 m³ LPG storage sphere.

1.3. NUEVOS MORTEROS UTILIZANDO COMO BASE EL SULFATO CÁLCICO.

La base del desarrollo que se plantea en el presente documento, se basa en el sulfato cálcico como elemento o materia prima básico. Esta aplicación, o pretensión, se establece por la formulación de aditivos que mejoran las propiedades y características del mismo.

1.3.1. EL YESO.

El yeso, es un mineral denominado aljez o piedra de yeso. Esta roca está constituida principalmente por sulfato de calcio con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), denominado sulfato de calcio dihidratado o dihidrato. Según Riddell (Ignacio de la Cruz, 1983) (Gomis Yagües, 2013), la forma cristalina del sulfato de calcio dihidratado, son prismas monoclinicos con cuatro a ocho moléculas de agua, y mediante rayos X se aprecia la red cristalina formada por capas de átomos de calcio y grupos tetraédricos de sulfato separados por laminas o capas de moléculas de agua, las cuales al ser eliminadas, no destruyen la estructura cristalina.



Fotografía 2: Estructura de cristales de yeso, obtenida por microscopía electrónica de barrido (Gomis Yagües, V. Universidad de Alicante).

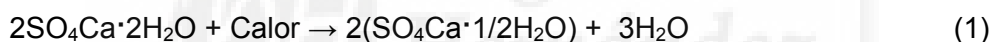
Como producto Industrial obtenido a partir de él, se utilizaba desde tiempo inmemorial, como material para revestimientos, uniones, y fabricaciones de diversas preformas, etc.

Llamamos yeso de construcción al producto pulverulento procedente de la cocción de la piedra de yeso o aljez, que una vez mezclado con agua, en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en el aire. Este yeso se denomina sulfato de calcio hemihidratado o semihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$).

1.3.1.1. FABRICACION DEL YESO.

La piedra de yeso o aljez se extrae de canteras a cielo abierto o de canteras subterráneas, minas. Esta materia prima extraída, previamente a su cocción, se tritura utilizando maquinaria apropiada, como pueden ser los molinos de rodillos, machacadoras de mandíbulas, molinos de martillos, de rodillos, etc. El tamaño del grano, tras su trituración, viene determinado principalmente por el método o sistema de cocción a emplear.

La reacción química que condiciona su posterior uso y es:



Los diversos sistemas de cocción del yeso se dividen en dos grandes grupos, en función de que los gases de combustión estén o no en contacto con la materia prima. Entre ellos destacamos: los hornos rotatorios, los hornos de caldera (marmitas) y los autoclaves. La elección del tipo de horno está en función principalmente del producto final que se quiere obtener, y de su rentabilidad.

El calor actúa sobre la piedra de yeso, según se desarrolla la reacción anterior, hace que se puedan obtener las distintas variedades que se utilizan básicamente en la construcción. Como repetidamente venimos diciendo, la piedra de yeso cristaliza con dos moléculas de agua, el dihidrato, según Van t'Hoff, de estas dos moléculas de agua, una y media está combinada débilmente, y media molécula fuertemente. Cien partes de dihidrato, contienen 79,07 de sulfato cálcico, 15,70 de agua débilmente unida y 5,23 de agua fuertemente combinada. La expulsión del agua del dihidrato se hace en dos fases: en la primera se desprende la débilmente combinada, y en la segunda, la fuertemente.

PRODUCTOS Y TEMPERATURA POR LA ACTUACION DEL CALOR EN LA PIEDRA DE YESO.	
Temperatura ambiente	Dihidrato o Algez.
128-180° C	Hemihidrato, $2\text{SO}_4\text{Ca}\cdot\text{H}_2\text{O}$
180-300° C	γ - Anhidrita
300-600° C	β - Anhidrita.
900-1000° C	Yeso hidráulico.
1450° C	Fusión del yeso.

Tabla 4. Productos del resultado de la calcinación del algez.

Tras la cocción de la materia prima, ésta se muele finamente para conseguir una granulometría correcta, y se almacena en silos hasta su distribución posterior, bien en sacos o a granel.

1.3.1.2. RESEÑA HISTORICA.

Para facilitar la interpretación del presente trabajo comenzaremos por repasar la evolución del “yeso” como material constructivo hasta nuestros días.

1.3.1.2.1. YESO ARTESANAL

Como otros materiales, el yeso comenzó artesanalmente y sin duda unido a territorios donde su abundancia lo hiciera ostensible. Estas circunstancias unidas posiblemente a la necesidad del hombre de un conglomerante para unir piezas mayores o revestir estas, sin necesidad de tratamiento posterior dejó al yeso en muy buena posición debido a su facilidad de deshidratación parcial a baja temperatura.

Así, cuando el hombre del Neolítico alcanzó el nivel tecnológico necesario para dominar el fuego a bajas temperaturas, pudo sustituir por yeso los morteros de barro utilizados en los revestimientos de sus cabañas y en las juntas de sus primitivas fábricas de piedra. En Catal-Huyuk (Turquía) en el IX milenio a.C. hay guarnecidos de yeso y cal que soportan pinturas al fresco. En Jericó, en el VI milenio a.C aparecen moldeados de yeso. En la cantería faraónica de Egipto, el yeso se empleaba habitualmente como uno de los materiales para revocar los paramentos pétreos en tumbas y templos, así como pasta de juntas entre los sillares de sus pirámides, como la de Keops, 2.800 a.C. También aparece yeso en los revestimientos de suelos y paredes del palacio de

Knossos (Creta), con construcciones y reformas entre 2200 y 1600 a.C. Incluso el trono del rey Minos era de yeso.

En esta parte debemos aclarar que su uso estaba unido al de la cal, la analogía y la posible confusión nace de un origen geológico similar, al tratarse en ambos casos de evaporitas, que aparecen en estratos próximos y cuyos yacimientos en muchas ocasiones están mezclados. El proceso de fabricación, también puede originar confusión, ya que la piedra de yeso si se calcina a alta temperatura, por encima de 900 °C puede transformarse en óxido cálcico, o cal viva, que es lo que habitualmente se produce a temperatura similar en las caleras. Por último, en muchas de las aplicaciones tradicionales, los albañiles y, sobre todo, los “yesaires” y los estuquistas, han mezclado yeso y cal tratando de combinar la mayor velocidad de fraguado del yeso con la mejor estabilidad de la cal. Aunque, después, con el estudio metódico de los conglomerantes a partir del desarrollo de la química, nadie puede confundir actualmente el yeso con la cal, en etapas anteriores esta diferenciación no era tan sencilla, teniendo en cuenta, además, las mezclas producidas, tanto en su origen como en los procesos, de ahí que es necesario admitir ciertas imprecisiones al referirnos a estos dos materiales en la antigüedad.

Continuando con los orígenes de la aplicación del yeso en construcciones, en la civilización griega el yeso es muy utilizado, como material de revestimiento, en estucos y guarnecidos (Villanueva y García Santos, 2001). De esta época es la referencia escrita sobre el gypsos, palabra griega que significa tierra más agua y que se utilizó para referirse al yeso y a la cal. Se debe a Teofrasto (372-287 a.C.) quien describe el proceso de cocción y la existencia de yaserías en Chipre, Fenicia y Siria. Menciona su empleo en revestimientos y ornamentación y describe un tipo de horno artesano con las mismas características que se han mantenido hasta la aparición de los procedimientos industrializados.

En Roma, Plinio el Viejo se refirió a este material, citando los yacimientos de espejuelo en Segóbriga, que se exportaba a Roma por el puerto de Cartagena y se utilizaba para acristalamiento de huecos. Los romanos utilizaron el yeso en aquellas provincias en que abundaba. En Pompeya aparecieron importantes decoraciones y revestimientos, junto a almacenes de yeso proveniente de Grecia, lo que indica la existencia de un comercio a larga distancia y una alta valoración del producto.

San Isidoro en sus Etimologías cita el término *plastiche* para referirse al trabajo en relieve realizado con yeso, que, posteriormente, se denominó *yasería*. Donde más se utilizó el yeso fue en la Persia sasánida, heredera de las viejas tradiciones de la albañilería mesopotámica y trasmisora a través de los árabes del empleo de este material en la España medieval. Se puede citar su empleo en los alcázares omeyas de Siria y en la ciudadela de Amman, donde aparece un sistema de piezas prefabricadas de yeso para la construcción de arcos.

En España, durante los siglos XIII al XV, se distinguen focos de gran interés, tanto en el reino musulmán nazarí de Granada como en la zona cristiana en Aragón, Toledo y Sevilla. Este uso se prorrogó desde la edad media hasta la primera mitad del s. XVI, con motivos decorativos renacentistas, en el denominado estilo plateresco, como sucede en el Paraninfo de la Universidad de Alcalá.

En Europa también hay ejemplos de utilización medieval del yeso, particularmente destacable es la región de París, en la que había 18 canteras de yeso en explotación, el año 1292. El yeso se utilizaba en revestimientos, forjados de pisos, en tabiquería y chimeneas. El producto se exportó a Inglaterra, a partir del siglo XVII después del incendio de Londres.

El yeso tradicional, descrito hasta ahora, científicamente es un producto multifase producido por la calcinación de aljez o piedra de yeso. El aljez es un sulfato cálcico cristalizado con agua, en la proporción de dos moléculas de agua por cada una de sulfato cálcico. La calcinación de mampuestos de aljez en hornos artesanos tradicionales, también llamados en España *morunos* o *árabes*, produce un producto de varias fases, en función de la temperatura alcanzada. En efecto en la superficie de la piedra se puede sobrepasar los 900 °C y resultaría un yeso anhidro, también denominado hidráulico por su capacidad de fraguar bajo en agua, o de pavimentos, por su uso tradicional. Al ser la piedra de yeso un producto aislante, en la parte interior se reduce la temperatura, obteniéndose anhidrita II entre 400 y 800 °C, anhidrita III entre unos 200 y 400 °C y semihidrato beta por debajo de esa temperatura. La estructura poco porosa del interior de la piedra, al impedir la salida del agua desprendida, hace pensar a algunos autores en la posible existencia parcial de semihidrato alfa, producido en condiciones de sobrepresión de vapor. Por último, en ocasiones, el corazón de la piedra no alcanza la temperatura necesaria para deshidratarse, aunque sea parcialmente, y permanece crudo.

En resumen, se produce un yeso multifase, en el que en función del tamaño de la piedra y de la exposición calor de sus caras se puede encontrar todas las fases del sistema sulfato cálcico-agua. De modo general puede decirse que a medida que aumenta el contenido de anhídrita el fraguado es más lento. Sin embargo la presencia de crudo aumenta la velocidad de fraguado.

Tradicionalmente se producen tres tipos de yesos artesanales. Las piedras, más renegridas y, por tanto, sobrecocidas, se separan y trituran aparte dando lugar al yeso hidráulico o de pavimentos. Las piedras de mejor aspecto, se separan y muelen fino, dando lugar al denominado yeso blanco, utilizado para enlucidos o blanqueos. El resto de las piedras junto con las escorias y subproductos de la combustión se recogen y trituran juntos, dando lugar al yeso negro o moreno, utilizado para guarnecidos y como conglomerante de albañilería.

1.3.1.2.2. YESO INDUSTRIAL

El proceso de industrializar la fabricación del yeso es lento y no se produce por igual en todos los países. Se da, por tanto, una convivencia prolongada con los yesos artesanos, descritos en la etapa anterior y los llamados industriales.

A partir del s. XVIII comienza el conocimiento científico del yeso. En 1768, Lavoisier presenta en la Academia de Ciencias el primer estudio científico de los fenómenos en los que se basa la preparación del yeso, Van t'Hoff y Le Chatelier dieron una explicación científica a la deshidratación, iniciando una serie ininterrumpida de investigaciones sobre este material.

Con la industrialización aparece la posibilidad de tipificar los productos, de modo que sus características se mantengan constantes dentro de unos límites. Y con esta posibilidad aparecen las normas de calidad. Además se pueden obtener más tipos de productos, modificando parcialmente las condiciones de su fabricación. La normativa sobre la calidad del yeso tipifica los productos habituales en cada país, regulando las características de composición química, finura de molido, agua de amasado, tiempos de fraguado y resistencia mecánica. En algún caso se normaliza la expansión de fraguado y la dureza superficial. Surge así una normativa sobre yeso en los principales países industrializados, entre la que se puede citar: las normas ASTM (Estados Unidos), DIN (Alemania), BS (Gran Bretaña), NF (Francia), UNI (Italia), UNE (España), NP (Portugal),

SIA (Suiza), etc. La mayoría de los yesos industrializados son monofase o bifase, en contraposición con los yesos multifase característicos de la etapa artesanal.

A principios del S. XX aparece en Estados Unidos la placa de yeso laminado. Un tablero de dos cartones con alma de yeso, inventado con el fin de sustituir a los tableros de madera, con el fin de reducir los riesgos y aumentar la resistencia al fuego en caso de incendio y produce un efecto importante, tendente a la industrialización del sistema constructivo. Esa misma tendencia hacia la industrialización se produce con prefabricados de escayola, donde la plancha lisa sustituye a los tradicionales encañizados, en la ejecución de cielorrasos y en diferentes tipos de techos, desmontables o no, realizados con piezas prefabricadas de escayola, así como a toda una serie de productos prefabricados como complementos y decoración de techos, como molduras, cornisas interiores, cortineros, fosas, plafones, etc.

1.3.1.2.3. YESOS DE TERCERA GENERACIÓN

Acabada la II Guerra Mundial, se comienza a estudiar científicamente las modificaciones producidas en las características del yeso, mediante el empleo de aditivos y adiciones.

En la reconstrucción de los edificios dañados durante el conflicto bélico, en Gran Bretaña, se comienzan a utilizar productos aligerados, con perlita y vermiculita, hasta el punto de llegar a normalizar una serie de productos aligerados. Tanto la perlita expandida como la vermiculita exfoliada son productos minerales e inertes, con capacidad de ocluir aire en su interior y mejorar el aislamiento térmico de los revestimientos.

Cada vez fue más frecuente la adición en fábrica de retardadores de fraguado, para la producción de yeso lento, muy apreciado en la ejecución de revestimientos.

El producto en polvo estaba completamente industrializado, pero su colocación era artesanal. Por eso, las principales industrias europeas del yeso condujeron sus esfuerzos para industrializar el proceso de colocación, ya que la incidencia del material en el precio final del guarnecido, era cada vez menor, frente a una mano de obra cada vez más cara. Era preciso buscar un producto, que, sin perder sus características esenciales de cubrir los paramentos adhiriéndose bien a las diferentes bases, tuviera el mejor rendimiento posible en su colocación. Se investigó un tipo de yeso capaz de ser

proyectado mecánicamente contra los paramentos. Tiene que ser lo suficientemente lento en su fraguado para que no endurezca en la manguera y, lo suficientemente espeso y adherente para que no escurra por la pared o se desprenda de los techos. Con aditivos modificadores del fraguado, espesantes y retenedores de agua se consigue formular este tipo de yeso, que ya se puede considerar de tercera generación.

Paralelamente se actuó sobre los yesos de amasado manual mejorando sus características para facilitar la colocación. Así, cada vez fue más amplio en tiempo abierto o período en el que, el yeso, después de amasado con el agua, se puede trabajar. Se obtienen así los denominados yesos manuales de fraguado controlado. El proceso se completa al producirse yesos aligerados de proyección mecánica, tan aditivados como éstos y, además, aligerados con perlita. El proceso de adición además produce un aumento de la resistencia superficial, por lo que el panorama se completa con los yesos de alta dureza.

La principal dificultad se presenta a la hora de normalizar estos productos, ya que los ensayos de laboratorio reproducen mal las condiciones de puesta en obra, sobre todo en los yesos de proyección mecánica.

De este modo el yeso se integra en una nueva etapa del proceso constructivo que ya se vislumbra en manifestaciones concretas con gran proyección y diversas aplicaciones por descubrir ante sus sólidas propiedades, como las que se han indicado para este material.

1.3.1.3. TIPOS DE YESO.

La norma EN UNE 13279-1, Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción Parte 1: Definiciones y especificaciones, entre otras cosas define los tipos de yesos y sus especificaciones.

Para mejor entendimiento trasponemos la tabla 5, donde figuran las familias y sus propiedades.

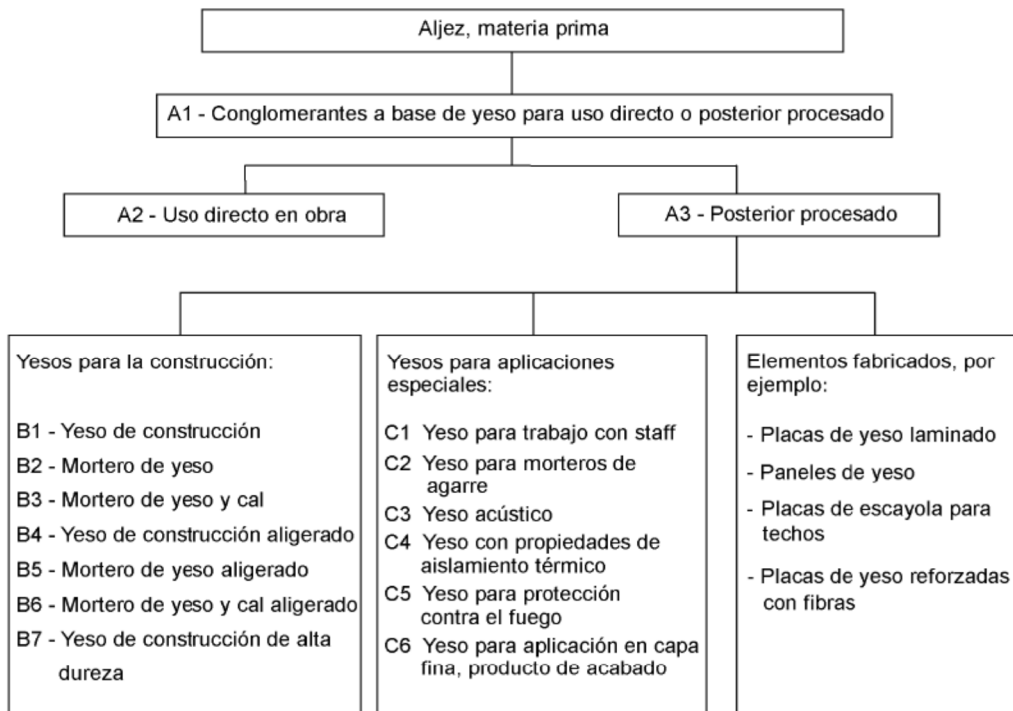


Tabla 5. Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. (Norma UNE EN 13279-1)

La designación de los yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso para la construcción se debe hacer según lo indicado en la tabla 6.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso*, por ejemplo: – para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos); – para su empleo directo en la obra; – para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas de escayola para techos).	A A1 A2 A3
Yeso para la construcción: – yeso de construcción; – mortero de yeso; – mortero de yeso y cal; – yeso de construcción aligerado; – mortero de yeso aligerado; – mortero de yeso y cal aligerado; – yeso de construcción de alta dureza.	B B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
Yeso para aplicaciones especiales: – yeso para trabajos con staff; – yeso para morteros de agarre; – yeso acústico; – yeso con propiedades de aislamiento térmico; – yeso para protección contra el fuego; – yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado – producto de acabado	C C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7

Tabla 6. Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción. (Norma UNE EN 13279-1)

Cuando las características de los yesos para la construcción se determinen según lo especificado en la Norma EN 13279-2, deben cumplir los valores establecidos en la tabla 7.

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de yeso %	Tiempo de principio de fraguado min.		Resistencia a flexión N/mm ²	Resistencia a compresión N/mm ²	Dureza superficial N/mm ²	Adherencia N/mm ²
		Yeso de aplicación manual	Yeso de proyección mecánica				
B1	≥ 50	> 20 ^b	> 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	La rotura se produce en el soporte o en la masa de yeso; cuando la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser ≥ 0,1
B2	< 50						
B3	^a						
B4	≥ 50						
B5	< 50						
B6	^a						
B7	≥ 50			≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 2,5	

^a Según los apartados 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.

^b En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20 min. En ese caso, el productor debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

Tabla 7 – Especificaciones para los yesos de construcción. (Norma UNE EN 13279-2)

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante a base de yeso %	Finura de molido				Tiempo de principio de fraguado min.		Resistencia a flexión N/mm ²		Resistencia a compresión N/mm ²	Dureza superficial N/mm ²		
		5 000 μm	1 500 μm	200 μm	100 μm	Vicat	Cuchillo	2h ^d	7d ^e		2h ^d	7d ^e	
C1	Trabajos con staff	> 50	0	0	< 1%	< 10%	-	> 8	> 1,5	> 3,0	-	> 4,0	> 10
C2	Mortero de agare	> 50	0	-	-	-	> 30	-	-	-	> 2,0	-	-
C3	Yeso acústico ^a	-	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C4	Yeso para aislamiento térmico ^b	-	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C5	Yeso para protección frente al fuego ^c	Desviación respecto al contenido nominal < 10%	-	-	-	-	> 20 ^f	-	-	-	-	-	-
C6	Yeso para capa fina, producto de acabado	> 50	-	0	-	-	> 20 ^f	-	-	> 1,0	> 2,0	-	-
C7	Producto de acabado	> 50	-	-	-	0	> 20 ^f	-	-	> 1,0	> 2,0	-	-

^a El fabricante debe verificar las propiedades acústicas mediante los métodos adecuados indicados en los apartados 5.1.3.1 y/o 5.1.3.2.

^b El fabricante debe verificar las propiedades de aislamiento térmico mediante los métodos adecuados indicados en el apartado 5.1.4.

^c El fabricante debe verificar las propiedades de reacción al fuego mediante los métodos adecuados indicados en el apartado 5.1.1.

^d Después de acondicionar durante 2 h, tras finalizar el tiempo de fraguado, en las condiciones especificadas en el apartado 3.1 de la Norma Europea EN 13279-2:2004.

^e Después de acondicionar durante 7 d en una atmósfera húmeda a (20 ± 2) °C y (95 ± 5)% de humedad relativa, seguido de un secado hasta alcanzar una masa constante a (40 ± 2) °C.

^f En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20 min. En ese caso, el productor debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

Tabla 8. Especificaciones para los yesos especiales para la construcción. (Norma UNE EN 13279-2)

Cuando las características de los yesos para la construcción para aplicaciones especiales se determinen según lo especificado en la Norma Europea EN 13279-2, deben cumplir los valores establecidos en la referida tabla 8.

1.3.1.4. USOS DEL SULFATO CALCICO

- Como yeso dihidratado. Se usa en la fabricación de cemento Pórtland, donde actúa como elemento retardador del fraguado (1 al 2% de yeso) y para aplicaciones agrícolas, actúa como abono y desalinizador.
- Como yeso calcinado. Se utiliza en construcción en forma de pasta para guarnecidos, enlucidos y revoques; como pasta de agarre y de juntas. También se emplea en la obtención de estucados y en la preparación de superficies de soporte para la pintura artística al fresco.
- Aproximadamente el 80% del yeso calcinado se utiliza para la fabricación de placas de yeso (prefabricado).
- Prefabricado, como paneles de yeso para tabiques y escayolados para techos.
- Como aislante térmico, ya que el yeso es mal conductor del calor y la electricidad.
- Para confeccionar moldes de dentaduras, en odontología. Para usos quirúrgicos en forma de férula para inmovilizar un hueso y facilitar la regeneración ósea en una fractura.
- En los moldes utilizados para preparación y reproducción de esculturas.
- En la elaboración de tizas para escritura.
- En la obtención de ácido sulfúrico.
- Como material fundente en la industria.

1.3.1.5. YESOS ESPECIALES DE APLICACIÓN MANUAL PARA LA CONSTRUCCIÓN. (UNE 102-014-1: 1999; UNE 102-014-2: 1999; UNE 102-014-3: 1999).

Observamos la clasificación de yesos según su aplicación, definiendo sus propiedades que podrán ser comparadas con la de los yesos aditivados.

Yeso aligerado (YA): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados ligeros, orgánicos o inorgánicos, tales como perlita expandida o vermiculita

exfoliada, para conseguir mejores prestaciones en aislamiento térmico o protección contra el fuego.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, determinadas con ensayos realizados según normas UNE 102-031 y UNE 102-032 son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 20 min.
- La densidad aparente será inferior a 800 kg/m³.
- La resistencia mecánica mínima a compresión, medida sobre probetas prismáticas de 4x4x16 cm será de 0,5 MPa (N/mm²)
- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 45 ud Shore C.
- Su pH será mayor o igual a 6.

Yeso de alta dureza (YD): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados orgánicos o inorgánicos para conseguir mejores prestaciones en dureza superficial.

Las características mínimas a exigir en este tipo de yeso, son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.
- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.
- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 20 min.
- La densidad aparente será superior a 800 kg/m³.

- La resistencia mecánica mínima a compresión, medida sobre probetas prismáticas de 4x4x16 cm será de 6,0 MPa (N/mm²).

- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 75 ud Shore C.

- Su pH será mayor o igual a 6.

Yeso de terminación (YE/T): Material constituido fundamentalmente por sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación, que lleva incorporado en fábrica aditivos y agregados orgánicos o inorgánicos.

Se amasa de forma manual o mecánica (taladradora, batidora) consiguiendo una consistencia de pasta que permite su aplicación inmediata de forma manual.

Estos yesos están libres de partículas gruesas que pueden impedir el logro de una superficie de acabado lisa.

Las características mínimas a exigir son:

- El índice de pureza debe ser mayor del 50%.

- La finura de molido, será tal que la masa de yeso retenida en el tamiz de 200 μ m sea inferior o igual al 15%.

- La relación A/Y, será tal que el diámetro de escurrimiento esté comprendido entre 165 mm y 210 mm.

- El tiempo de principio de fraguado, determinado por el método del aparato de Vicat, será superior a 50 min.

- La dureza superficial Shore C, será igual o superior a 45 ud Shore C.

- Su pH será mayor o igual a 6.

Loas yesos de proyección quedan fuera de nuestro estudio, por incorporar agregados minerales que confieran otras propiedades distintas a las buscadas.

1.3.1.6. PROPIEDADES DEL YESO.

El yeso es también un buen material en cuanto a su comportamiento térmico-acústico y de resistencia al fuego.

Otro aspecto del yeso es la trabajabilidad. El yeso es un material adecuado y de fácil manipulación para ser usado en múltiples derivados prefabricados y directamente en obra. La trabajabilidad del yeso depende de la moldeabilidad, la consistencia variable, el fraguado rápido regulable, la expansión de fraguado, la adherencia, las altas resistencias iniciales y la modificabilidad o facilidad de trabajo sobre elementos ya fraguados.

Moldeabilidad: El yeso pasa por unos estados plásticos de consistencia variable antes de terminar su proceso de fraguado, en los cuales se le puede dar forma a voluntad. Este carácter formativo hace posible que se adapte a cualquier tipo de molde, que reproduce de forma precisa, debido a la conjunción de otra propiedad, la *expansión de fraguado*. Esta propiedad hace del yeso un material idóneo para ser utilizado en derivados prefabricados, tales como placas, paneles suelo-techo, molduras, cornisas, bovedillas para forjados.

Consistencia variable: el estado de consistencia que presenta la pasta o el mortero de yeso, al ser trabajado, es regulable a voluntad, principalmente en dos momentos de su proceso. En primer lugar, durante su fabricación, donde la relación de agua/yeso (A/Y) puede variar en un amplio espectro de valores, por ejemplo en el agua de saturación desde 0,3 para semihidrato alfa hasta 0,9 para semihidrato β . (Tabla 9). Esta consistencia normal del producto tiene mucha influencia en su utilización, tanto en la resistencia final, que es inversamente proporcional al cuadrado del factor agua/yeso utilizado, como en el rendimiento del material, o cantidad necesaria del mismo, para obtener una determinada cantidad de producto terminado o dihidrato.

Tipo de yeso según RY-85	Intervalo A/Y del amasado a saturación
E-35	0,7 – 0,74
E-30	0,7 – 0,72
YF	0,65 – 0,68
YP	0,58 – 0,54
YG	0,50 – 0,60

Tabla 9: Valores usuales A/Y correspondiente al amasado a saturación (ATEDY, 2008).

En el caso de amasado por dosificación se parte de una relación A/Y en peso, la cual es fijada previamente con el fin de conseguir una consistencia normalizada. (Manuales de soluciones constructivas. Saint Gobain Placo Ibérica, S.A., 2010)

La consistencia del producto puede ser regulada a voluntad durante su puesta en obra, dentro de ciertos límites, sin más que variar la cantidad de agua de amasado, o sea, actuando sobre el factor agua/yeso de utilización. Indudablemente esto tendrá consecuencias más o menos importantes para el producto terminado, según su destino, ya que de la misma depende tanto la resistencia final y el tiempo de fraguado, como la porosidad y densidad del yeso endurecido, y tiene notables influencias en las propiedades de habitabilidad y durabilidad. Dependiendo por tanto de la cantidad de agua añadida para su fraguado y de la naturaleza de cada yeso obtenemos consistencias variables y productos con diferentes densidades (Tabla 10)

A/Y (en peso)	Densidad (Kg/cm ³)			
	C.S.T.B. (1)	Blachere (2)	C.E.B.T.P. (3)	Collomb (4)
0,6	0,115	0,0012	0,001235	0,00125
0,7	0,108	-	-	-
0,8	0,100	0,0010	-	-
0,9	0,095	-	-	-
1,0	0,088	0,0009	0,000835	0,00085
1,1	-	0,0008	-	-
1,2	0,75	-	-	-

(1) "ChiersTechniques" 1973-74. París.

(2) E. Blachere. Saber construir. Barcelona 1.967.

(3) Collomb. Eurogypsum. Lyon 1.971. Boletín Informativo del yeso. N°4. Enero 1972

(4) Collomb. Las propiedades del yeso con respecto al aislamiento acústico. B.I.Y n° 14. Junio 1974

Tabla 10: Relación entre el agua de amasado y la densidad (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Fraguado regulable: el yeso es un producto de fraguado rápido. Este tiempo de fraguado es muy variable según haya sido el proceso de fabricación y dependerá de las distintas proporciones que el producto tenga, de las distintas fases de deshidratación del sistema sulfato de calcio - agua, o sea, de semihidrato alfa o beta, anhidrita III o II e incluso anhidrita I y dihidrato, para obtener diferentes tiempos de fraguado que pueden regularse en fábrica dentro de la constante general de ser tiempos relativamente cortos.

En su puesta en obra, dependiendo de la cantidad de agua de amasado, se puede regular la duración del fraguado de yeso. A mayor cantidad de agua de amasado, a proporciones más elevadas de la relación agua/yeso, corresponden tiempos de fraguado más prolongados.

Hay otros factores que influyen en la velocidad del fraguado durante la puesta en obra del yeso, por ejemplo, la temperatura del agua, la rapidez del amasado, la pureza, el grado de finura y como se ha indicado la cantidad de agua. Pero la forma más idónea de regular el fraguado es la adición en fábrica de los correspondientes reguladores.

El dihidrato del sulfato de calcio es considerado como un buen aditivo para acelerar el fraguado. Finamente dividido, actúa como un enérgico acelerador y por consiguiente deber ser completamente eliminado cuando el aljéz es calcinado, el efecto acelerador de estas sustancias es debido a un aumento de la solubilidad, que influye en porcentaje de disolución del yeso calcinado y en el crecimiento del núcleo.

Expansión del fraguado: Independientemente del tipo de yeso empleado, se puede detectar la expansión de la masa durante el paso de hemihidrato a dihidrato. Por otra parte, si se comparan los volúmenes equivalentes de hemihidrato, agua y el producto de la reacción (dihidrato), el volumen del dihidrato formado será menor que los volúmenes equivalentes de hemihidrato y agua. Esto representa un cambio lineal en el objeto del 2,4%, aproximadamente. Por eso, según estos cálculos debería producirse una contracción volumétrica durante la reacción de fraguado. Pero, en su lugar, lo que se observa es una expansión de fraguado, fenómeno que puede expandirse a través del mecanismo de la cristalización. Los cálculos son los siguientes (Phillips, R. W., 1987):

	(CaSO₄)₂	+	3H₂O	→	2CaSO₄ . 2H₂O + Q↑	
Peso molecular			290,284		54,048	344,332
Densidad (g/cm ³)			2,75		0,997	2,32
Volumen equivalente			105,556		54,211	148,405
Volumen total			159,767		148,405	

Tabla 11: Cálculos de expansión del fraguado (Phillips, R.W., 1987)

Debido a que el producto de la reacción de fraguado del yeso tiene un volumen externo mayor, pero un volumen cristalino menor, se deduce que el material fraguado debe ser poroso. Por tanto, la estructura obtenida inmediatamente después del fraguado está formada por cristales engranados entre los que existen poros y microporos que

contienen el exceso de agua necesaria para la mezcla. Al secarse se pierde el exceso de agua y el espacio vacío aumenta. La Figura 7 representa las oscilaciones de la expansión de fraguado y dan valores de su magnitud.

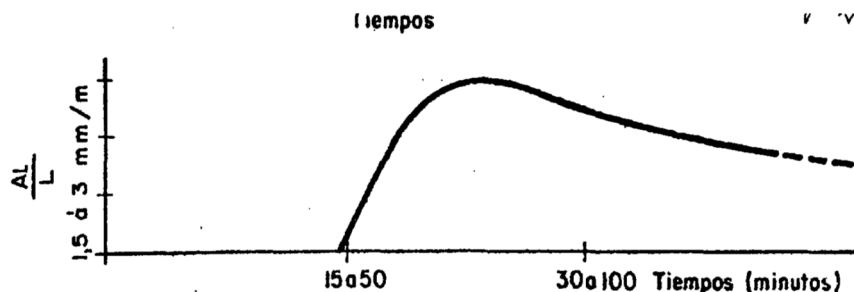


Figura 7: Expansión de fraguado con relación al tiempo. (G. Blachere: Saber construir. Barcelona 1.967)

La expansión de fraguado del yeso, siempre que esté dentro de unos límites, tiene ventajas para su utilización, tanto en los enlucidos, al evitar las fisuras de retracción, como en los morteros y hormigones realizados con cemento. También, en los derivados prefabricados al tener que reproducir fielmente la forma de los moldes por delicada que sea la Figura a reproducir.

Adherencia: el yeso debido a la naturaleza del proceso de fraguado se adhiere a otros materiales al introducirse, cuando aún permanece en estado fluido, por las oquedades y por los poros de éstos, en los que a continuación cristaliza, formando un conjunto íntimamente ligado.

Esta propiedad se mejora en gran medida en los adhesivos a base de yeso, con adición de resinas sintéticas, obteniéndose pegamentos de gran calidad.

Resistencias iniciales: la resistencia de trabajo se adquiere a los seis o siete días, en condiciones de humedad y temperatura ambiente, aunque la pasta de yeso es capaz, a edades tempranas, de adquirir la resistencia suficiente para que los productos prefabricados con ella puedan ser desmontados poco después de su fraguado, transportados y manipulados. En la Tabla 12, se muestra una relación de valores de resistencias iniciales.

Tipo de producto	Resistencia a Flexo tracción (N/mm ²)			
	Después de 2 horas en cámara húmeda		Valor final en seco	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
- Escayola	1,5	0,3	3,5	0,3
- Yeso fino de construcción	0,6	0,3	2,5	0,4
- Yeso grueso de construcción	0,4	0,1	1,2	0,4

Tabla 12: Valores de resistencia iniciales. (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Conductividad térmica: para un material determinado, el coeficiente de conductividad térmica depende de su densidad y del estado de humedad en que se encuentre. De su densidad, pues al ser ésta más baja se debe a que en su interior hay mayor cantidad de poros o burbujas de aire, que lo hacen menos conductor, y de su humedad, pues el contenido de agua hace que aumente la conductividad del material. En el caso del yeso hay gran variedad de valores para este coeficiente, en función de las variables densidad y humedad. Así en productos ligeros de yeso celular se alcanzan valores que suponen un extraordinario poder de aislamiento térmico, mientras que en yesos más densos se obtienen valores que lo sitúan en un buen puesto con respecto a otros materiales (Tabla 13 y Tabla 14).

Materiales	Coeficiente de Conductividad térmica (Kcal/m.h.°C)
Hormigón armado	1,30
Cerramiento de ladrillo	0,29 - 0,90
Partición de ladrillo	0.24 - 0.74
Placas aislantes de lana de madera	0.70 - 0.10
Tabiques y cielorrasos de yeso	0.25
Vidrio	0.65
Yesos	0.05 - 0.60

Tabla 13 Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de construcción. (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Tipo de yeso	Densidad (N/dm ³)	Coeficiente de Conductividad térmica (kcal/m h °C)
Mortero de yeso	10 - 12	0,34
Revoco de yeso	8,0	0,30
Placas de yeso	6,0	0,21 - 0,25
Yeso celular	2,0	0,08 - 0,05
Enlucido de yeso	8,0	0,3
Yeso con vermiculita	2,0	0,07

Tabla 14. Valores de Conductividad Térmica para diferentes materiales de yeso en función de sus densidades. (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Los valores dados se refieren al yeso seco, para obtener el coeficiente de conductividad útil, o sea, aquel que se emplea en los cálculos, teniendo en cuenta la influencia de la humedad, cada país fija normas para su determinación.

Inercia térmica: La inercia térmica depende, en primer lugar, de la difusividad de los materiales en relación con el acondicionamiento higrotérmico. En segundo lugar, depende de la velocidad de enfriamiento de la pared que es directamente proporcional al almacenaje térmico de la misma, y por tanto a su calor específico, e inversamente proporcional al coeficiente de transmisión total de calor de la pared. En tercer lugar, depende de la velocidad de propagación de la onda térmica, que es proporcional a la difusividad del material y por último del factor de amortiguamiento, que nos da una idea de la inercia térmica de cada material. En la tabla 15, se expresan valores para estos

dos últimos factores y por los mismos se observa que el yeso es un material que proporciona, en función de su densidad, una inercia térmica similar a la de los elementos de construcción tradicionales.

Por tanto consideramos la Inercia térmica (Tabla 15) como una propiedad de la construcción tradicional que el yeso comparte, en la medida en que forma parte de ella, y no lo hace en la medida en que se integra en la construcción ligera por medio de sus prefabricados.

Material	Velocidad de propagación de la onda en 24 h (mm/h)	Factor de amortiguamiento (1/m)
Hormigón	34,96	7,87
Yeso	32,12	8,64
Fábrica de ladrillo	31,40	8,52
Madera	17,02	15,41
Espuma de plástico	1,52	18,03
Hormigón espumado	2,12	13,11

Tabla 15. Inercia térmica, velocidad de propagación de la onda térmica y factor de amortiguamiento (Del Río Merino, M. Tesis doctoral, 1999)

Regulación higrotérmica: La eliminación del vapor de agua de los locales, puede hacerse mediante orificios de ventilación natural o forzada, y a través de las paredes según sea su grado de permeabilidad al vapor acuoso. La velocidad de difusión del vapor de agua depende de dos factores. En primer lugar, de la diferencia de presión de vapor entre interior y exterior, y en segundo término de la llamada "difusividad " de la pared. La difusión relativa a través de yeso es unas quince veces menor que a través del aire, afirmando por tanto que a través del yeso las edificaciones transpiran.

Acondicionamiento acústico:

Aislamiento al ruido aéreo: para una frecuencia determinada y en tabiques simples, constituidos por un solo material o por materiales homogéneos en relación a su módulo de elasticidad, puede afirmarse que el aislamiento al ruido aéreo depende directamente de su peso por m² de superficie.

Se presentan tablas de valores obtenidos experimentalmente para particiones de yeso, en los que se aprecia que la ligereza de este material, al igual que sucede con los otros materiales utilizados en tabiquería, no favorece su aislamiento acústico (Tabla 16)

Tabiques dobles de placa de yeso		Aislamiento a ruido aéreo (dB), para frecuencias			
Espesor de placa (cm)	Espesor cámara de aire (cm)	Bajas	Medias	Altas	Valor medio
6	5	35.7	42.5	53.8	41.9
7	5	36.1	41.5	51.1	41.2
7 y 9	5	36.9	44.6	51.3	42.6

Tabla 16: Valores del aislamiento acústico en tabiques compuestos en los que interviene el yeso. (Datos del laboratorio INCE, 2001)

Se ha intentado aumentar la densidad de las particiones, mediante la adición de otros materiales más pesados, tratando de mejorar el aislamiento de los tabiques, en general, a base de aumentar su peso, por ello se recurre a la utilización de tabiques de varias capas cuando se requieren aislamientos acústicos elevados.

Esta técnica consiste en disponer elementos compuestos, formados por elementos de igual o diferentes materias, pero con diferentes rigideces, dejando entre ellos cámaras de aire rellenas con materiales de escasa rigidez, de modo que constituyan un sistema vibratorio diferente, por capa, a la propagación del sonido.

Análogo principio tienen los denominados paneles resonantes, que se adosan a las paredes, dejando en su trasdós una cámara de aire subdividida, de modo que sus dimensiones individuales no excedan de 1/3 aproximadamente, de la longitud de onda del sonido que debe absorberse.

Absorción sonora: la absorción de cada material se determina por el coeficiente de absorción (energía absorbida por unidad de superficie, tomando como absorción máxima la de una ventana de superficie unidad).

En la absorción influye de modo importante la textura superficial del material, ya que la energía sonora se atenúa a medida en que la onda penetra por las superficies lisas de yeso. El yeso tiene un bajo coeficiente de absorción, alrededor de 0.02. Sin embargo su facilidad de moldeo hace posible con poco esfuerzo conseguir placas de yeso con gran número de penetraciones, que trasdosadas con materiales absorbentes obtienen importantes valores en su coeficiente de absorción, que por otra parte depende de la frecuencia del sonido. (Tabla 17)

Material	Coefficiente medio de absorción acústica
Acero	0,10
Hormigón	0,015
Cemento	0,020
Yeso	0,020
Madera	0,030 / 0,100
Ladrillo	0,032
Corcho	0,160

Tabla 17. Valores del coeficiente de absorción acústica para diversos materiales (Del Río Merino, M., M. Tesis doctoral, 1999).

Reflexión luminosa: Depende fundamentalmente de la capa de terminación de las paredes. Así es que el yeso únicamente cuando se deja visto, como en determinadas placas de techos o en la construcción tradicional tiene una influencia en ella.

1.3.1.6.1. UTILIZACIÓN DEL YESO.

Nos encontramos frente a un material, en primer lugar, por una parte económico, debido a que es una materia prima abundante en todo el mundo, sobre todo en España, de explotación simple y poco costosa, pues se encuentra generalmente de forma muy superficial, y por otra parte, debido a que el consumo energético para producir yeso calcinado es menor que para la producción de otros materiales de construcción, por ejemplo el cemento. (Oteiza San José, I. 2008). Es de fácil trabajabilidad y secado rápido y controlado.

Es un material con resistencia mecánica suficiente para resistir los esfuerzos al corte que deben aguantar las particiones.

Tiene buenas prestaciones de habitabilidad: de baja densidad y alto volumen de poros, lo que implica, una baja conductividad térmica y una rápida absorción y cesión del vapor de agua, "respira bien". Las paredes realizadas con yeso son cálidas al tacto y no sudan.

Los materiales a base de yeso, tienen una dureza superficial suficiente, para situaciones normales, gran estabilidad de volumen, cambiando su tamaño sólo en condiciones extremas de humedad y temperatura.

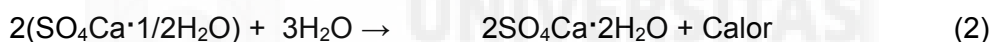
Además, estos materiales proporcionan una buena protección contra el fuego, debido a su contenido en agua, que puede llegar hasta un 20,6%. Esta agua en presencia de fuego, se evapora, impidiendo que la temperatura del paramento supere los 100°C (Vilanueva, L. 1982).

Para aumentar esta protección se utiliza el yeso laminado y los yesos reforzados con fibra de vidrio que mantienen su estructura y su integridad cuando se exponen al fuego, gracias a las fibras que contienen (Villanueva, L. d. and Del Rio Merino M., 1994).

Los inconvenientes principales de este material son: su fragilidad, la falta de tenacidad que determina una rotura frágil, sin prácticamente capacidad de deformación y las alteraciones que sufre a causa del agua, lo que, en condiciones normales, lo inutiliza para aplicaciones al exterior y es por lo que en todo momento se hable de aplicaciones del yeso en interiores. En este caso, divisiones y trasdosados.

1.3.1.7. MECANISMOS DE FRAGÜADO DEL YESO.

En la reacción (1) del epígrafe 1.3, describe el proceso de calcinación del sulfato de calcio dihidratado para formar sulfato de calcio hemihidratado, paso básico para la utilización y el colocado del yeso en cualquiera de sus utilidades, vamos en este epígrafe a estudiar la misma reacción a la inversa, es decir:



Por tanto esta reacción es la inversa de (1), partimos del Sulfato de calcio semihidratado, y con agua obtenemos yeso y calor desarrollado en la reacción exotérmica, equivalente al calor empleado en la reacción originalmente en la calcinación. A este proceso se le llama fraguado, y normalmente nunca supone una conversión del 100% hacia la forma dihidratada, a menos que sea expuesto a una alta humedad durante mucho tiempo.

1.3.1.7.1. FACTORES: EL AGUA.

Lo primero que se nos ocurre es saber la cantidad de agua que se necesita para realizar la reacción, la respuesta podría ser que depende del hemihidrato, pero esto es conveniente matizarlo. Matemáticamente la cantidad que requiere el hemihidrato para convertirse en dihidrato es de 18,6 g de agua por 100 g de yeso.



El peso molecular (PM) del sulfato hemihidrato de calcio es de 145, el PM del agua es 18, por tanto el peso que se añade es $1,5 \times 18 = 27$ g, por cada 145 g, haciendo la proporción obtenemos que para 100 g de hemihidratado necesitamos 18,6 g de agua.

Aunque en la actualidad existen hemihidratados que pueden trabajar con cantidades muy próximas a la teórica, en general para aplicaciones específicas y pequeñas, lo usual es trabajar entre 40-80 g por 100 g de hemihidratado.

En aras de ir entendiendo el fenómeno, se nos ocurren preguntas como, ¿De qué depende esta diferencia? ¿Qué ocurre con el excedente de agua? Intentemos dar respuesta.

La cantidad de agua que necesita el hemihidratado depende en primer lugar de la forma de los cristales y de su mayor o menor porosidad, así, el hemihidratado β , cuyos cristales son de forma irregular y esponjosos, necesita más agua que el hemihidratado α con cristales de forma más regular y menos porosos. Esto quiere decir que el hemihidratado β posee un área de superficie por unidad de peso de las partículas mucho mayor que el hemihidratado α y, por tanto, también necesitará más agua para saturar la disolución y comenzar el fraguado. En resumen, las relaciones agua-polvo surgen fundamentalmente de la forma y densidad de los cristales.

En segundo lugar, es opción de los fabricantes regular este factor (área por peso de hemihidrato), pulverizando las partículas una vez preparado el hemihidrato, lo que hace a la vez una reducción del tiempo de mezcla o la cantidad de agua necesaria.

Podemos dar como factor clave en la cantidad (exceso) de agua el grado de adhesión entre partículas del hemihidrato, a que el fabricante puede aumentar añadiendo materiales de superficie activa. De esta forma se reduce la cantidad de agua para conseguir una actividad adecuada.

Vayamos a dar respuesta a lo que ocurre con el excedente de agua. El excedente de agua sobre los 18,6 g es el factor que nos da una viscosidad para poder trabajar el yeso, queda libre en el material fraguado, sin formar parte de la cristalización. Esta agua con el tiempo, se evaporará dando lugar en el material a la creación de huecos y poros que restarán resistencia y compacidad a este. Con lo cual a más exceso de agua del necesario, el resultado será un material más poroso y menos resistente.

1.3.1.7.2. FACTORES: EL AMASADO.

El amasado como fase del fraguado es básico e imprescindible para la rehidratación del hemihidratado con agua que gracias a esta operación acabará siendo dihidratado. Objetivo es transformar todo ello en una masa uniforme, en la que todo el

hemihidratado esté perfectamente empapado en agua y evite en lo posible la incorporación de aire que daría lugar a poros que rebajarían la resistencia del producto.

1.3.1.7.3. FACTORES: LA TEMPERATURA.

A 20° C se disuelve 4,5 veces más el hemihidrato que el dihidrato en una cantidad de agua. Por tanto, y según la teoría “cristalina” (que veremos en el apartado siguiente), en este caso se acortará el tiempo de fraguado.

Por encima de 50° C Craig (Craig, R. G. 1998), señala 37° C) se produce un retraso creciente, hasta el punto de impedir la reacción a partir de 100° C.

1.3.1.7.4. TEORIAS DEL FRAGUADO.

Mediante la reacción (2) descrita anteriormente, el sulfato de calcio hemihidratado pasa a sulfato de calcio dihidratado mediante el mecanismo de fraguado (endurecimiento de la masa). Los diferentes dihidratos tienen una solubilidad relativamente baja con una diferencia marcada entre la mayor solubilidad del hemihidrato respecto al dihidrato.

La reacción de fraguado se produce por la disolución del sulfato cálcico hemihidratado, formación de una solución saturada de sulfato cálcico, agregación posterior de sulfato cálcico dihidratado menos soluble y precipitación de los cristales de dihidrato. La precipitación de las moléculas de sulfato cálcico dihidratado se produce al mismo tiempo que la disolución del sulfato hemihidratado remanentes. Datos de rayos-X, indican que existen partículas de hemihidratado en el producto fraguado, esto se produce en los distintos tipos de materiales, siendo mayor el grado de conversión en los más débiles, lo cual abre el campo para considerar todas las teorías sobre el fraguado.

A lo largo de la historia se han propuesto diversas teorías para explicar este mecanismo.

En 1887, Le Chatelier (Le Chatelier, H. 1887), expuso la primera teoría más o menos consistente: la teoría “cristalina” que más tarde en 1907, recibiría el apoyo del famoso químico holandés Van't Hoof, instalado en Berlín.

Por otra parte, M. Michaelis, en 1983, y después Khül, expusieron la teoría coloidal (Granja Valle, V. E. 2011). Esta teoría propone que el yeso al mezclarlo con

agua entra en un estado coloidal mediante un mecanismo sol-gel. En estado sol, las partículas del hemihidrato se hidratan formando dihidrato, entrando así en un estado activo. Conforme se consume el agua la masa se convierte en un gel sólido. Aquí la teórica hidratación sugiere que las partículas de yeso rehidratadas se unen, mediante uniones de hidrógeno a los grupos sulfato para formar el material fraguado.

Posteriormente Baykoff, (Pacheco, G., & Portilla, M. 1991), presentó una teoría mixta, donde el fraguado se explicaba por coloidación, siendo el endurecimiento relevante, el fruto de una cristalización posterior. Este mismo autor explica el proceso de fraguado de manera esquemática, apoyándose en la teoría de Le Chatelier, pero modificada según sus propios conocimientos. Veamos como la desarrolla:

-Disolución del demihitrato en agua, hasta que la solución se satura.

-Hidratación del hemihidrato, se hidrata hasta volver a dihidrato, según reacción (3).

-Disolución del yeso en el agua, el dihidrato formado por la hidratación del hemihidrato, se disuelve en la solución saturada de hemihidrato. Esta se sobresatura de dihidrato, ya que este último es menos soluble que el hemihidrato. Por tanto, se forma un gel debido a la precipitación del dihidrato, que constituye un retículo, que encierra entre sus mallas la solución saturada de hemihidrato y sobre saturada de dihidrato.

Conforme se produce la precipitación del dihidrato, hay una nueva disolución de hemihidrato, seguido de una hidratación del hemihidrato, después la precipitación, y así sucesivamente.

Por último se produce un agrupamiento de las mallas del retículo. La tendencia cada vez más marcada hacia la cristalización explica la disminución de la plasticidad con el paso del tiempo, es decir, el endurecimiento. Correlativamente, los cristales ortorrómbicos del hemihidrato dejan sitio a los cristales monoclinicos del dihidrato (Regueiro, M., & Sorando, J. P. C. 1997). (Figuras 8 y 9).

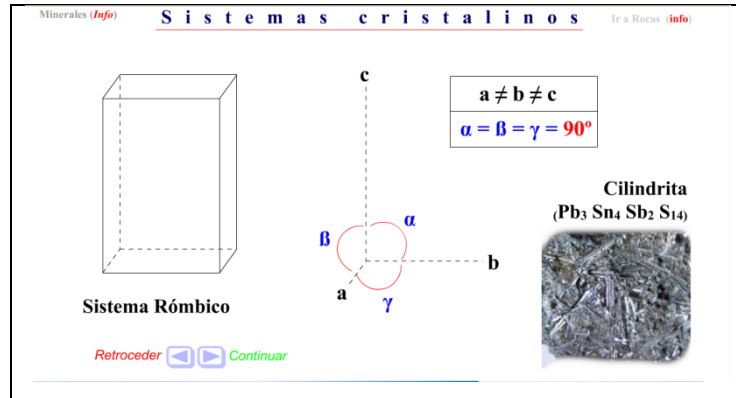


Figura 8. Sistemas de cristalización Ortorrómbico (Anhidrita I y II).

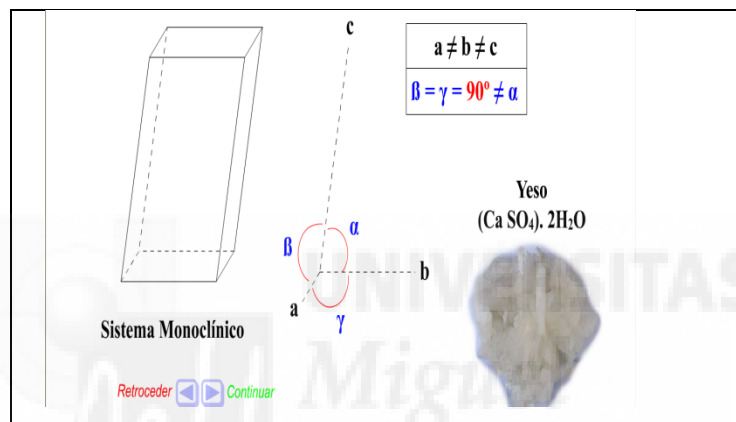


Figura 9. Sistemas de cristalización Monoclinico (Dihidrato).

Existe una teoría especialmente interesante, la de R.W. Phillips (Phillips, R. W., 1987), quien, igual que la anterior teoría, explica el fraguado básicamente por la diferencia de solubilidades entre el dihidrato y el hemihidrato, según los siguientes pasos:

- El hemihidrato mezclado con el agua forma una suspensión líquida y manejable.
- El hemihidrato se disuelve hasta formar una solución saturada.
- Esta solución saturada de hemihidrato se sobresatura con respecto al dihidrato, de tal manera que este último se precipita.
- A medida que se precipita el dihidrato, la solución no se satura más con el hemihidrato, así que continúa disolviéndose. El procedimiento sigue, solución de hemihidrato y precipitación del dihidrato en forma de cristales o en forma de crecimiento de aquellos ya presentes. La reacción es continua y repetida hasta que se extingue.

La reacción se puede seguir por medio de producción de calor exotérmico: al principio hay poca reacción y, en consecuencia, poco o ningún aumento de la temperatura. Este intervalo de tiempo se llama o denomina "periodo de inducción". Después hay un ligero crecimiento de la masa que permite su manipulación. A medida que la reacción aumenta, la masa se espesa y finalmente se endurece formando nidos o centros de cristalización en forma de agujas llamadas "esferulitas". Por último, el entremezclado y la imbricación de los cristales de yeso dan lugar a una estructura fuerte y sólida.

1.3.1.7.5. FACTORES: RESISTENCIA DEL YESO.

La resistencia de yeso seco fraguado es directamente proporcional a su densidad; por consiguiente, depende principalmente de su porosidad y menos directamente de la proporción de agua/yeso y del tamaño y estructura de los poros. La resistencia varía también con la humedad o con la presencia de aditivos sin que cambie su densidad. La resistencia del yeso con un contenido en humedad superior al 5%, es aproximadamente la mitad de la del yeso en estado seco. Durante el secado, la resistencia del yeso va aumentando hasta el 5% de humedad, haciéndose evidente al 1% y alcanza su valor final cuando se ha llegado al equilibrio con el contenido en humedad.

La humedad continua, rebaja la resistencia debido a cambios cristalinos y estructurales; aparece una recristalización como consecuencia de sus cambios estructurales.

También la presencia de aditivos provoca un cambio en la estructura del cristal modificando la hidratación, lo que provoca variaciones en la resistencia, aun cuando no haya una modificación de la densidad, incluso en estado seco.

Un caso extremo es la reducción de la resistencia en presencia del ácido cítrico que se usa normalmente como retardador. Usado en proporciones inferiores al 0,1% sobre peso de yeso, retardante y sólo rebaja la resistencia ligeramente, cantidades superiores al 0,2%, cambian el hábito del cristal del dihidrato de forma que no se produce un endurecimiento del yeso porque los cristales ya no se entrelazan ni se entrecruzan.

El yeso calcinado sufre un cambio en sus propiedades durante su almacenamiento, "envejecimiento". Esté envejecimiento es causado, hasta cierto punto,

por la absorción de vapor de agua del aire. El grado de envejecimiento afecta al agua de amasado necesaria para una consistencia dada; se necesita más agua para el yeso recién calcinado que para el envejecido. Si se absorbe una considerable cantidad de agua, pueden formarse núcleos de dihidrato, acelerando el proceso de hidratación. Sin embargo, las reacciones que tienen lugar debido al envejecimiento natural de yeso calcinado, producen cambios graduales en las propiedades del yeso durante varios meses. Para evitar esto, se han desarrollado métodos para producir un envejecimiento artificial, de tal manera que el yeso no sufra cambios significativos durante su almacenamiento. Existe un proceso llamado "aridización", que consiste en añadir al sulfato de calcio utilizado como materia prima, antes de su calcinación, cloruro de calcio o sales minerales en proporciones de hasta un 0,2% en peso.

También se consigue el envejecimiento de yeso calcinado mediante la inyección de pequeñas cantidades de agua que contenga un agente estabilizante; de esta forma se puede prevenir la formación de dihidrato.

Murat (Ould Chamekh, M. L., 1998), estudió la morfología de los sulfatos de calcio dihidratados tanto naturales como sintéticos, con técnicas sofisticadas con el fin de conocer el efecto de los aditivos sobre el hábito del cristal del dihidrato.

1.3.2. ADITIVOS EN MORTEROS DE YESO.

Productos incorporados en el momento del amasado al yeso, en una cantidad pequeña en relación con la partida a tratar, con el objetivo de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido.

1.3.2.1. TIPOS DE ADITIVOS EN MORTEROS DE YESO

Los aditivos de uso más generalizado son:

Reductores de agua (plastificantes): aquellos cuya función principal es la de disminuir el contenido de agua para una trabajabilidad dada o aumentar la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir efectos negativos en el resultado del producto.

Acelerantes de fraguado: cuya función principal es reducir o adelantar el tiempo de fraguado del yeso.

Retardadores de fraguado: aquellos que retrasan el tiempo de fraguado del yeso.

Inclusores de aire: cuya función principal es disminuir la densidad. De todos los aditivos anteriores los más usados son los que tienden a controlar el tiempo de fraguado como forma más eficaz y practica de controlar este.

El fraguado y endurecimiento pueden acelerarse o retardarse por medio de numerosos aditivos. Varios ácidos inorgánicos y sus sales son muy útiles como acelerantes, especialmente el ácido sulfúrico y sus sales. El dihidrato del sulfato de calcio es considerado como un buen aditivo para acelerar el fraguado. Finamente dividido, actúa como un enérgico acelerador y por consiguiente debe ser completamente eliminado cuando el aljez es calcinado, el efecto acelerador de estas sustancias es debido a un aumento de la solubilidad, que influye en porcentaje de disolución del yeso calcinado y en el crecimiento del núcleo.

1.3.2.2. PROPIEDADES DE LOS ADITIVOS.

- **ACELERADORES DE FRAGUADO.**

La tasa de disolución de hemihidrato influye en la velocidad de fraguado. Por tanto, es lógico suponer que los materiales que aumentan el grado de disolución del hemihidrato aceleran la reacción de fraguado. Sin embargo, es también importante el ritmo de precipitación del dihidrato. Así, el acelerador debe incrementar la solubilidad del hemihidrato sin aumentar la del dihidrato. Por ello, la aceleración que produce un aditivo depende de la cantidad y velocidad de solubilidad del hemihidrato, frente al mismo efecto en el dihidrato.

Para complicar más las cosas, aunque las sales inorgánicas suelen ser aceleradores, pueden convertirse en retardadores si se agrega más de una cierta cantidad. El sulfato sódico tiene un máximo efecto acelerador aproximadamente a la concentración del 3,4%, en concentraciones más altas, se convierte en retardador.

- Sulfato potásico (K_2SO_4) al 2%.
- Cloruro sódico (ClNa) en concentraciones menores al 20%. A mayores concentraciones, actúa como retardador. Según Phillips, en concentraciones menores, el cloruro de sodio incrementa la velocidad de disolución del hemihidrato. De este modo, la saturación de la disolución se produce con mayor rapidez. El resultado es un periodo

de inducción más corto y una mayor velocidad de crecimiento de los cristales del dihidrato. A medida que se forma el dihidrato, la concentración del cloruro de sodio aumenta, de manera que al final el agua queda sobresaturada. Los cristales de cloruro de sodio que se forman pueden depositarse sobre los núcleos de cristalización y retardan la cristalización posterior.

- El sulfato de sodio (SO_4Na_2) actúa de forma similar al cloruro sódico, en concentraciones menores al 12% actúa como acelerador pero en concentraciones más altas, el tiempo de fraguado es más lento. El efecto máximo como acelerador ocurre al 3,4%.

- **RETARDADORES DE FRAGUADO.**

El mecanismo de los retardadores es más complicado, si cabe. La creencia general es que algunos productos químicos cubren las partículas del hemihidrato, evitando que este forme parte de la solución normalmente. Por lo general los citratos, acetatos y boratos retardan la reacción. Para un anión determinado, el catión correspondiente afecta notablemente la demora. Ejemplo, en los acetatos, el orden de retardo en términos del catión empleado es $\text{Ca}^{++} < \text{K}^+ < \text{H}^+$, mientras que el tartrato del potasio tiene un efecto acelerador marcado en contraste con la sal de calcio, que ejerce poco efecto en el fraguado. El comportamiento de los citratos es más complejo.

- Citrato de potasio/sódio, borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) reducen la tasa de disolución del hemihidrato, y/o son absorbidos en los núcleos de cristalización. En el caso del bórax, es el borato de calcio producido al reaccionar con el sulfato de calcio, compuesto insoluble, el que se deposita en los núcleos de cristalización.

- Sustancias orgánicas de elevado peso molecular que actúan como coloides protectores en la cristalización, es decir, interfieren la cristalización: cola, caseína, albumina, gelatina, aminoácidos y melaza.

Importancia especial tiene si el resultado que esperamos obtener es una dureza superficial elevada. La dureza superficial está relacionada con la resistencia a compresión directamente. Así mismo la dureza aumenta al eliminarse agua de evaporación, sin embargo, los valores de dureza superficial aumentan con mayor rapidez que los de resistencia compresiva, al evaporarse mucho antes el agua de la superficie que la de las parte interna de la misma.

- **INCLUSORES DE AIRE.**

Generalmente la conversión de un material sólido en uno celular, se realiza mediante la incorporación en el mismo, de aditivos espumantes apropiados que pueden tener como base una reacción física (vapor), química (H_2S) o incluso añadir trozos de otros materiales. El yeso como hemos visto en su proceso de fraguado crea poros, siendo estos un punto negativo a la resistencia final del material. A veces más que resistencia existe la necesidad de bajar el peso específico, en cuyo caso estos tratamientos o productos pueden resolver el problema.

Es decisivo tener en cuenta la microestructura del yeso, dada su microporosidad debida a:

- La creada por el agua que queda sin reaccionar y su posterior evaporación. Se trata de cavidades más o menos esféricas que se presentan entre grupos de cristales de yeso.
- La creada por el rechazo de los cristales de yeso en crecimiento. Son cavidades más pequeñas y de forma irregular. Aparecen dentro de los grupos de cristales de yeso.

Estos tipos de porosidad están relacionados por la relación agua-polvo pero de distinta manera:

- Una menor relación agua-polvo, da por resultado menor excedente de agua y, por tanto disminuye la cantidad de poros del primer tipo.
- Una relación agua-polvo baja, aumenta el efecto de crecimiento cristalino durante el fraguado, debido a que los núcleos de crecimiento disponibles están concentrados, la interacción de los cristales de yeso se produce antes y es más efectiva. Por tanto aumenta la cantidad de poros del segundo tipo.

Con estas premisas y sabiendo el resultado que se desea, se aplicarán los aditivos a tal efecto y según su comportamiento.

- **ADITIVOS DE CONTROL DEL FRAGUADO.**

Tanto el mezclado como el amasado de yeso calcinado y agua, para formar una pasta de consistencia específica, pueden estar afectados por la presencia de agentes humectantes. La mayor parte de éstos, llamados plastificantes o agentes reductores de

agua, pueden ser alquilarilsulfonatos, lignosulfonatos o resinas de melamina. Es también posible aumentar la demanda de agua añadiendo agentes floculantes, por ejemplo óxido de polietileno. Pueden añadirse productos químicos espesantes, como celulosa y almidones, para estabilizar la pasta de agua y yeso o para prevenir la sedimentación; sin embargo estos productos influyen muy poco en la demanda de agua de amasado.

El fraguado y endurecimiento pueden acelerarse o retardarse por medio de numerosos aditivos. Varios ácidos inorgánicos y sus sales son muy útiles, como acelerantes, especialmente en el ácido sulfúrico y sus sales. El dihidrato del sulfato de calcio es considerado como un buen aditivo para acelerar el fraguado. Finamente dividido, actúa como un enérgico acelerador y por consiguiente debe ser completamente eliminado cuando el aljez es calcinado, el efecto acelerador de estas sustancias es debido a un aumento de la solubilidad, que influye en porcentaje de disolución del yeso calcinado y en el crecimiento del núcleo.

Los retardantes son normalmente ácidos orgánicos y sus sales, y coloides orgánicos, procedentes de la descomposición y de la hidrólisis de biopolímeros, como las proteínas, así como las sales del ácido fosfórico o del ácido bórico. El mecanismo de retardo es diferente según el aditivo que se utilice. Por ejemplo, los coloides de alta masa molecular prolongan el periodo de inducción porque son venenos del núcleo. En condiciones normales la anhidrita II, no requiere ser retardada ya que es suficientemente lenta, y casi siempre exige una aceleración.

Otros retardantes disminuyen el índice de disolución del semihidrato o el crecimiento de los cristales del dihidrato.

1.3.3. VERMICULITA.

La vermiculita pertenece a la familia de la mica, y se compone básicamente de silicatos de aluminio, hierro y magnesio. Se caracteriza por su estructura foliada y su presentación en placas cristalinas de color amarillento que pueden medir hasta y más de 228,6 mm a lo largo y 152,4 mm de grosor. Tiene una presentación brillante en láminas lo que convierte a su superficie en un gran reflector de la radiación solar, lo cual dispersa el calor y aumenta la capacidad de aislamiento térmico en el material. Para su empleo en construcción una vez triturada, es necesario someterla a un proceso físico de expansión consistente en el calentamiento de la perlita a unos 1000 °C, en hornos

de procesamiento. En este proceso el agua se transforma en vapor y se expande en el interior formando microceldas y aumentando 20 veces su volumen (Europerlita S.A.).

La vermiculita, al someterla a una temperatura de unos 800 °C se expande en una sola dirección en ángulo recto respecto a la línea de la hendidura, en filamentos que tienen un movimiento vermicular, de ahí su nombre. Durante este proceso, su volumen aumenta hasta 16 veces.

La vermiculita, según las distintas granulometrías adquiere una densidad u otra, y sirven de clasificación en su comercialización:

- Vermiculita 1, de granulometría entre 0,5 - 2 mm y densidad de 100 - 120 kg/m³.
- Vermiculita 2, de granulometría entre 0,5 - 3 mm y densidad de 85 - 105 kg/m³.
- Vermiculita 3, de granulometría entre 1 - 4 mm y densidad 85 - 100 kg/m³.
- Vermiculita 4, de granulometría entre 2 - 6 mm y densidad 70 - 80 kg/m³.



Fotografía 3: Diferentes tipos de vermiculitas en función de su granulometría. (Europerlita, S.A.)

Las más gruesas, son de amplia difusión en agricultura como sustrato de cultivo para semilleros, siendo la fina o muy fina, considerada como un subproducto (residuo) en la fabricación de la vermiculita exfoliada.



Fotografías 4 y 5: Granulometrías de Vermiculita (Tesis: Berná Serna, J.M. 2013)

En la Tabla 17 se observa el análisis químico de la Vermiculita.

Silice	SiO ₂	30 %
Alúmina	Al ₂ O ₃	11 %
Oxido de Sodio	Na ₂ O	1,5 %
Oxido Potásico	K ₂ O	2,5 %
Oxido Cálxico	CaO	9 %
Oxido de Titanio	TiO ₂	3 %
Oxido de magnesio	MgO	15 %
Oxido Férrico	Fe ₂ O ₃	14 %
Agua libre y combinada	Agua libre y combinada	11,5 %
Otros compuestos	Otros compuestos	2,5 %

Tabla 18: Análisis químico de la vermiculita exfoliada (Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

Usos de la vermiculita.

La vermiculita ha sido usada en varias industrias desde hace más de 80 años. Se ha usado para la construcción, agricultura e industria (Tabla 18).

Agricultura:	Construcción:	Industrial	Horticultura
Alimentación animal.	Aislante acústico.	Envases absorbentes	Hidropónicos
Residuos avícolas	Aislante térmico.	Dispersión	Cultivo de semillas y esquejes
Fertilizantes	Aislante a temperatura ambiente alta	Lodo de perforación	Germinación se semillas
Plaguicidas.	Protección contra el fuego	Filtración	Mezclado para plantas de semillero
Condicionado de tierra.	Naval	Protección contra el fuego	Compuestos para siembra
Semilleros.	Morteros mono capas	Fijación de materias peligrosas	Plantación de bulbo
	Construcción de agregados ligeros	Hornos	Sustratos
	Cerámica	Diferentes formas de aislamiento (bloques)	Cultivo en macetas y grandes recipientes
		Aislamiento a alta y baja temperatura	

		Aislamiento para materiales que se funden a altas temperaturas (metal, vidrio)	
		Pinturas	
		Productos con moho	
		Perfumes absorbentes	
		Rellenos (texturización de plásticos)	
		Agregados de densidad media	
		Sellador	

Tabla 19: Usos de la vermiculita exfoliada (Perlindustria. Ficha técnica, 2002)

1.4. MATERIALES EMPLEADOS EN LOS SISTEMAS ACTUALES. DESCRIPCIÓN DE LOS MISMOS.

Como en el epígrafe 1.2 anterior se ha descrito, creemos que la forma clara y exhaustiva, tanto el origen y efectos de las BLEVES, como los medios actuales de protección, en general, para evitarlos, vamos a detallar, más si cabe, las características y propiedades de distintos materiales utilizados actualmente, así como sus ventajas e inconvenientes.

Posteriormente, analizaremos también, los productos ensayados por nosotros, para su cotejo y comparación de resultados. Bien entendido, que uno de los principales fines del proceso, consisten en evitar, por una parte la propagación del fuego y sus efectos, y por otra, que los medios protectores de estructuras, instalaciones, depósitos fijos y móviles, etc., empleados, retrasen el origen de la explosión catastrófica o BLEVE; de tal manera, que en este periodo de tiempo, permitan la llegada al lugar del suceso lo efectivo que lo anulen o lo mitiguen hasta el punto de que no desencadene el BLEVE. Hemos de tener en cuenta que la capa aislante debe soportar el fuego de forma estable y continuada, de forma tal que la superficie de la chapa de acero del contenedor no rebase los 150°C.

Los principales tipos de materiales existentes utilizados son, además de la vermiculita, ya descrita:

- El vidrio celular, o vidrio expandido.
- La fibra de vidrio, o lana de vidrio.
- Lana de roca.
- Poliuretano².

² El poliuretano tiene comportamiento térmico pero ninguna resistencia al fuego, es un complemento de los sistemas actuales, pero no un material directo.

1.4.1. VIDRIO CELULAR.

Características	Valor
Densidad aparente DIN 53420	170 Kg/m
Conductividad térmica a 12 °C DIN 52612	0,048 W/m°C
Resistencia a compresión DIN 52421	8 Kg/cm
Resistencia a flexión	11 Kg/cm
Resistencia a la difusión del vapor DIN 52615	infinita
Absorción de agua DIN 53428	0,00 % volumen
Higroscopicidad	nula
Temperatura resistencia al calor	1.257 °C
Reacción al fuego DIN EN 13501-1	Euroclase A1,
Dilatación térmica	$85 \times 10^{-7} \text{ m}^{\circ}\text{C}$
Capilaridad	nula
La permeabilidad	0
Resistencia a ácidos	resistente
Putrescibilidad	imputrescible
Resistencia contra insectos y roedores	Intocable
Propagación de llama (UL 723, ASTM E 84, R2844)	0
Humo Desarrollado (ASTM E 84, R2844, CR 1957)	0

Tabla 20: Características del vidrio celular. Foamglass. Ficha técnica.

El producto es el resultado de que a partir de polvo de vidrio con más sílice se fabrica el aislamiento empleado en construcción y estructuras industriales, especialmente recipientes de almacenamiento de productos petrolíferos, y que se conoce como vidrio celular, y su primer fabricante FOAMGLASS®. Este se obtiene por la fusión del polvo vítreo, donde por proceso termo-químico se crean células en estado de parcial vacío y cerradas entre sí lo que evita la comunicación entre ellas.

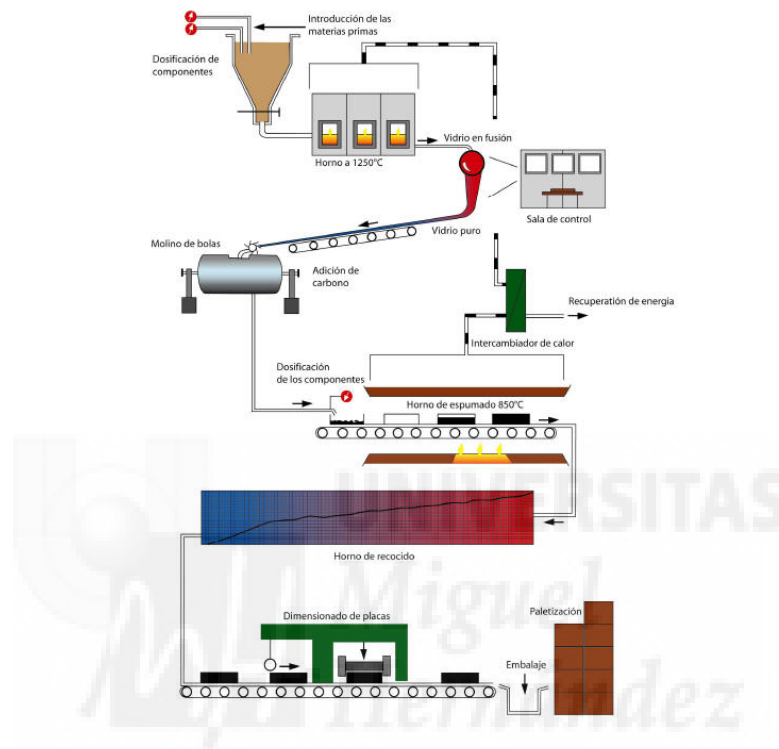
El **vidrio celular**, llamado también en ocasiones *vidrio expandido*, es un material básicamente para el aislamiento o como protección contra el fuego, y también en falsos techos de lugares muy húmedos o con necesidad de mantener buenas condiciones de asepsia.

1.4.1.1. FABRICACIÓN

El proceso de fabricación del FOAMGLAS® comprende cuatro etapas:

- La producción de vidrio (a partir de viejos vidrios).
- La molienda del vidrio y su mezcla con carbono.
- El espumado del vidrio y su recocido.
- La terminación del producto.

El material de base está constituido por arena con adición de algunos componentes con los que se produce un vidrio especial en continuo. Después de la molienda se añade al polvo de vidrio, una cierta cantidad de carbono y se dosifican los moldes que son introducidos en un horno calentado a una temperatura próxima a los 1250°C.



Fotografía 6: Proceso fabricación vidrio celular. www.ayfisa.com

El carbono se oxida provocando la formación de burbujas gaseosas que provocan el proceso de expansión creando burbujas en vacío parcial, por lo que se obtiene un material de muy baja conductividad térmica (en torno a 0,048 W/m°C).

Un ligero exceso de carbono explica el tono oscuro del producto.

Se obtiene así la estructura celular del material que es posteriormente desmoldado pasando a un largo horno de recocido donde permanece largo tiempo. Los bloques son posteriormente cortados en las dimensiones deseadas, verificados y embalados.

Durante todas estas operaciones son verificados minuciosamente una serie de parámetros. Un control estadístico tiene lugar sobre el vidrio celular terminado.

1.4.1.2. CARACTERÍSTICAS

El material es similar en aspecto y peso a la piedra pómez volcánica, pero con una textura más porosa de fácil desgranamiento.

- ✓ Material ligero y rígido.
- ✓ Por su composición muy porosa, y de burbujas no comunicadas entre sí, es impermeable al agua y al vapor de agua, siendo muy buen aislante térmico.
- ✓ Es incombustible y de gran resistencia al fuego.
- ✓ Es aséptico e imputrescible.
- ✓ Por lo general es de color negro, aunque puede colorearse en una limitada gama de colores.

Las placas de vidrio celular como producto final, son rígidas y muy ligeras: la densidad usual para placas de aislamiento térmico es de 157-170 kg/m³, mientras que el utilizado en la industria y en construcción para pantallas antihumedad, más resistente, presenta una densidad de 450 kg/m³. Debido a que las burbujas o células que encierra el material no están comunicadas entre sí, el material es impermeable al agua y al vapor de agua, y es un muy buen aislante térmico. También es incombustible y ofrece gran resistencia al fuego, de ahí su uso en almacenamientos en aislamientos de GLP. Otra característica del vidrio celular es que, al ser un material compuesto exclusivamente por vidrio, es aséptico e imputrescible; motivo por el cual se utiliza en falsos techos de laboratorios, hospitales o centros de salud.

El vidrio celular común es de color negro, aunque se puede colorear, comercializándose en una limitada gama de colores.

Las placas de vidrio celular, como todos los compuestos de vidrio, necesitan prestar atención a la presencia de álcalis, usualmente presentes en cementos y algunos tipos de yeso, por lo que su compatibilidad con algunos materiales (especialmente morteros) debe estudiarse con detenimiento.

1.4.1.3. APLICACIONES

Se utilizan en falsos techos en locales muy húmedos o sectores sanitarios, ya que este material impide la formación de hongos y bacterias y es imputrescible, por tal motivo es ideal en ambientes donde se requiere mantener estrictas medidas de asepsia.

El vidrio celular es un material de construcción también llamado vidrio expandido. Sus propiedades permiten que el vidrio celular sea muy utilizado como aislante térmico, dando protección contra el fuego y la humedad; también se utiliza en falsos techos.

El vidrio celular, se compara en apariencia y peso a la piedra pómez, aunque con una textura de mayor porosidad. Las placas del material están dotadas de gran dureza y además, son livianas. Es resistente a disolventes orgánicos y a casi todos los ácidos. Es resistente a la compresión y a las variaciones de temperatura y humedad, por lo que es indeformable. Es muy fácil de trabajar y cortar, y además, no es atacado por insectos u otros animales. Finalmente, es un material ecológico tanto en su elaboración como en su reciclaje.

Protección contra Incendios. GNL es un subproducto de procesamiento de hidrocarburos, y un riesgo potencial es el fuego. Cuando se selecciona un sistema de aislamiento, la protección de la instalación con potencial de incendio catastrófico es de suma importancia y debe ser considerado prioritario los materiales a instalar. De igual manera este aislante es especial resistencia a la humedad. Debido a que el aislamiento FOAMGLAS® es un material que tiene como base el vidrio, no absorbe ni expulsa líquidos inflamables, y además no puede arder ni producir humo tóxico. Evita la llama y su transmisión, así como la propagación de humo es casi nula. Ver fotografía 7.



Fotografía 7: Prueba de ignición del vidrio celular. www.ayfisa.com

1.4.2. FIBRA DE VIDRIO. LANA DE VIDRIO

Desde la más lejana antigüedad, fenicios y egipcios ya sabían obtener hilos de vidrio, sumergiendo una varilla metálica en un crisol conteniendo vidrio en fusión y retirándola rápidamente. Estos hilos se utilizaban para decorar vasos de vidrio

moldeados sobre formas de arcilla. Sin embargo, la primera comunicación sobre la lana de vidrio no aparece hasta el siglo XVIII, y se debe al físico y naturalista francés Antoine de Reamur (1713).

En la Colombian Exposition de 1893, se presentó un traje enteramente tejido con hilos de vidrio. Así pues, la fabricación de plumeros, mechas y filtros de laboratorio eran las aplicaciones más aptas de la lana de vidrio. No existen datos precisos que señalen el momento a partir del cual se desarrolla, paralelamente a estas aplicaciones tan particulares y limitadas, la utilización como aislamiento térmico. Sin embargo, parece que coincide con la aparición de un nuevo procedimiento de fibrado. El «algodón de vidrio» se obtenía dejando caer un hilo de vidrio fundido con un chorro de vapor. Así se lograba obtener gotas de vidrio prolongadas en una aguja fina. Este procedimiento deriva de la fabricación de la lana de escorias.

Las cualidades aislantes de estas fibras groseras no tardaron en ser advertidas. Mientras tanto, el aumento del desarrollo industrial impuso la necesidad creciente de los calorifugados. A partir de este momento, los procedimientos de fibrado van a progresar rápidamente.

En Francia la pionera en la lana de vidrio es la sociedad «La Seda de Vidrio», cuya fábrica estaba situada en Soissons; siendo destruida en 1940 por un bombardeo, concentrándose entonces la fabricación en la localidad de Ratigny, donde se produce una fibra corta y fina.

En España comienza la fabricación de la lana de vidrio en La Granja (Segovia), en el año 1942, por la sociedad EXPACO, S.A., y comercializada con la marca «VITROFIB».

En ese mismo año, el Laboratorio de Ensayos Técnicos (LET), de SAINT-GOBAIN, concibió un nuevo procedimiento que se bautizó con el nombre de TEL (de las iniciales LET invertidas).

El procedimiento TEL conjuga dos de las tres formas posibles de fibrado:

- Por centrifugación.
- Por fluido.

La puesta a punto se llevó a cabo en Ratigny, durante los años 1954 a 1956. SAINT-GOBAIN ha vendido la licencia de este procedimiento a la casi totalidad de los países productores de lana de vidrio.

En España se comienza la fabricación de la fibra TEL en el año 1963 por la Sociedad FIBRAS MINERALES, S.A., presentándose en el mercado con la marca «VITROFIB-TEL».

La Fibra de vidrio o manta de vidrio, son unos filamentos de vidrio unidos entre sí por una emulsión y conformados en forma de manta o tela. La fibra de vidrio es un material que consta de fibras numerosas y extremadamente finas de vidrio.



Fotografía 8: Fibra de vidrio. www.visitacasas.com

La fibra de vidrio se conoce comúnmente como un material aislante. También se usa como un agente de refuerzo con muchos productos poliméricos; normalmente se usa para conformar plástico reforzado con vidrio que por metonimia también se denomina fibra de vidrio, una forma de material compuesto consistente en polímero reforzado con fibra. Aunque no sea tan fuerte o rígida como la fibra de carbono, es mucho más económica y menos quebradiza.

Características	Valor
Densidad aparente DIN 53420	20 kg/m ³
Conductividad térmica a 75 °C DIN 52612	0,041W/m°C
Dilatación térmica $\mu\text{m}/(\text{m})$	2.9
Temperatura resistencia al calor	1056 °C
Reacción al fuego DIN EN 13501-1	Euroclase A1,
Temperatura de uso	Desde -30 °C hasta +200 °C.
CORROSIVO. Segun ASTM C-795 y C-871.	No
Tensión de rotura (MPa)	4890
Esfuerzo de Compresión (MPa)	1600
Aislamiento resistente a vibraciones.	

Tabla 21: Características de la fibra de vidrio. Resiglas S.A.

1.4.2.1. PROPIEDADES

Térmicas

Las fibras de vidrio son buenos aislantes térmicos debido a su alto índice de área superficial en relación al peso. Sin embargo, un área superficial incrementada la hace mucho más vulnerable al ataque químico. Los bloques de fibra de vidrio atrapan aire entre ellos, haciendo que la fibra de vidrio sea un buen aislante térmico, con conductividad térmica por debajo de 0.05 W/(m·K)

La tensión del vidrio usualmente se comprueba y reporta para fibras "vírgenes" o prístinas, aquellas que se acaban de fabricar. Las fibras recién hechas, más delgadas, son las más fuertes debido a que son más dúctiles. Cuanto más se raye su superficie, menor será la tenacidad resultante. Debido a que el vidrio presenta una estructura amorfa, sus propiedades son isotrópicas, es decir, son las mismas a lo largo y ancho de la fibra (a diferencia de la fibra de carbono, cuya estructura molecular hace que sus propiedades sean diferentes a lo largo y ancho, es decir, anisotrópicas). La humedad es un factor importante para la tensión de rotura; puede ser adsorbida fácilmente y causar rupturas y defectos superficiales microscópicos, disminuyendo la tenacidad.

A diferencia de la fibra de carbono, la de vidrio puede soportar más alargamiento antes de romperse; existe una relación de proporcionalidad entre el diámetro de doblez del filamento, al diámetro del filamento en sí. La viscosidad del vidrio fundido es muy importante para el éxito durante la fabricación; durante la conformación (tirando del vidrio para reducir el espesor de la fibra) la viscosidad debe ser relativamente baja; de ser muy alta, la fibra se puede romper mientras se tira. Sin embargo, de ser muy baja, el vidrio puede formar gotas en vez de convertirse en filamentos útiles para hacer fibra.

La fibra de vidrio se hizo muy popular desde que se descubrió que los asbestos son causantes de cáncer, y fueron eliminados de muchos productos. Sin embargo, la seguridad de la fibra de vidrio también se puso en duda debido a que investigaciones muestran que la composición de este material (tanto los asbestos como la fibra de vidrio son fibras de silicato) puede causar una toxicidad similar a la de los asbestos. Estudios realizados con ratas en la década de 1970, mostraban que vidrio en fibra de menos de 3 micras de diámetro y con una longitud superior a las 20 micras constituían un "cancerígeno en potencia". Igualmente en el Centro Internacional de Investigación de Cáncer CIRC se encontró que "podría anticiparse razonablemente como un cancerígeno" en 1990. Por otra parte en la American Conference of Governmental Industrial Hygienist, se estipula que no hay evidencia suficiente y que la fibra de vidrio se encuentra en el listado de la asociación dentro del grupo A4: "No clasificado como un cancerígeno humano".

La capacidad aislante de este material se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado, cuanto más pequeña es su conductividad. La lana de vidrio es un material compuesto. El fieltro, que se forma en la cadena, está constituido por fibras entrecruzadas desordenadamente, que impiden las corrientes de convección del aire. Es evidente que la conductividad térmica del fieltro será no una conductividad sólida real, sino una conductividad aparente y que será el balance de los efectos conjugados de varios procesos de cambios de calor, que vamos a tratar de analizar a continuación:

a) El aire inmovilizado por la red de fibras, es un volumen proporcionalmente importante; por tanto, una parte de la transmisión de calor se hará por convección.

b) Las fibras, en contacto unas con otras, permiten la transmisión de calor por conducción.

c) Finalmente, las fibras intercambian energía entre sí, por radiación.

La relativa importancia de estas formas distintas de cambio de calor dependen, a igualdad de temperatura en el ambiente, de:

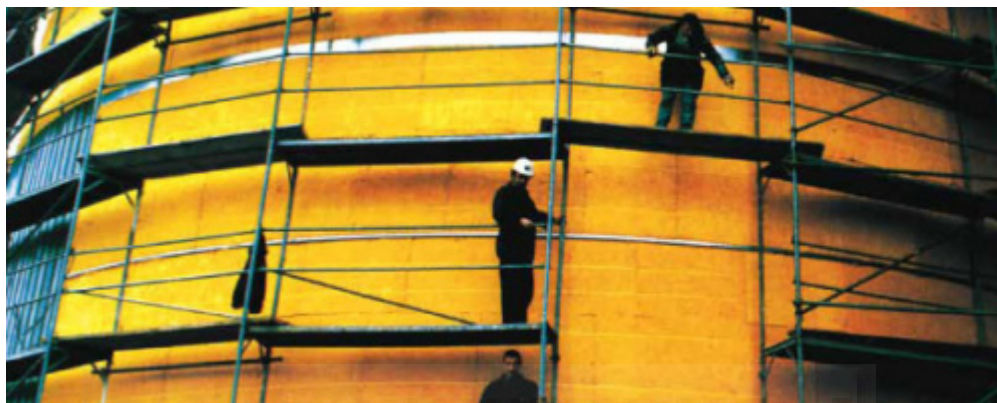
— El diámetro de las fibras.

— La densidad aparente del producto.

La conductividad térmica resulta, en la práctica, de la combinación de la transmisión gaseosa y de la radiación; siendo despreciables las otras dos.

El valor de dicha conductividad varía de 0,032 a 0,045 W/(mK) a 10 °C.

Los productos fabricados son ligeros (de 10 a 110 kg/m³) y fáciles de cortar y de manejar.



Fotografía 9: Revestimiento de depósitos con Fibra de vidrio. Repsol.

La lana de vidrio es incombustible, inatacable por los agentes exteriores: aire, vapor de agua, ácidos (excepto de fluorhídrico) y bases no concentradas. El pH de la composición, 7, aproximadamente, asegura a la fibra una estabilidad total, incluso en medio húmedo y garantiza al usuario la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ella.

Su débil calor específico permite puestas en régimen rápidas, en instalaciones intermitentes.

A todo ello se le puede añadir una fácil manipulación y montaje.

1.4.3. LANA DE ROCA

Otro tipo de lana mineral es la denominada “lana de roca”, elaborada a partir de rocas basálticas, obteniéndose un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio. Es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria (altas temperaturas).

La lana de roca es un producto natural descubierto por primera vez en Hawaii a principios del siglo XX, fruto de la acción natural de los volcanes. A raíz de este

descubrimiento, se da con la manera de fabricar este material de manera artificial. En el año 1937 la empresa Rockwool, comienza su producción en Hedehusene, Dinamarca.

El proceso de fabricación de la lana de roca pretende emular la acción natural de un volcán. La roca basáltica (diabasa) es fundida a más de 1600 °C en un horno (cubilote) para así retornarla a su estado inicial de lava.

El cubilote es el aparato encargado de fundir la escoria, utilizando como combustible carbón de coque. El chorro de fusión choca con el borde exterior de un rotor metálico que gira a gran velocidad, y se transforma en fibras debido al efecto de la fuerza centrífuga, produciéndose el estirado mecánico y la aparición de fibras que tienen un diámetro medio de 4 micras. Tras la pulverización de un ligante orgánico, se reúnen las fibras para formar un colchón de lana primaria.

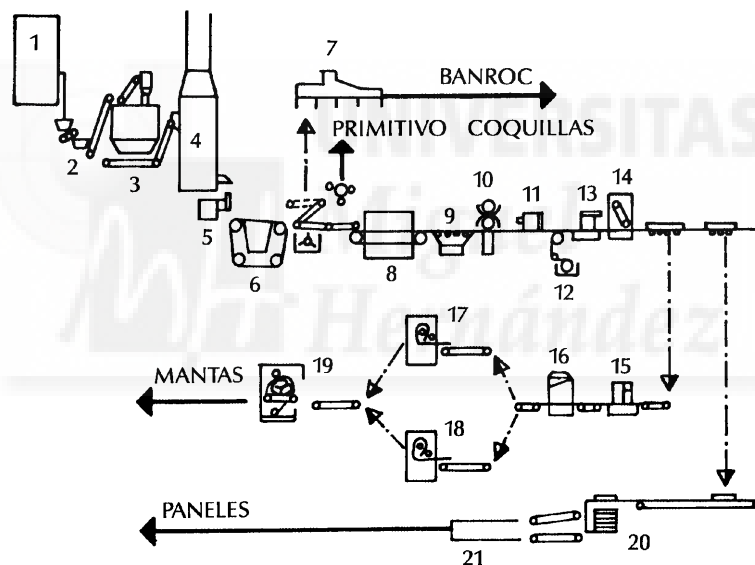


Figura 10: Esquema de la línea de fabricación de lana de roca. (Fuente: ISOVER)

Después de haber sido más o menos comprimido, dependiendo de las prestaciones buscadas, ese colchón pasa a la última fase de curado donde el producto adopta su forma final. La composición de la lana de roca fruto de este proceso es aproximadamente de 98% roca volcánica y 2% ligante orgánico.

1.	Depósito de materias primas	12.	Foso revestimiento
2.	Separación finos	13.	Corte transversal
3.	Pesada	14.	Enrolladota

4.	Cubilote	15.	Máquina de coser
6.	Recepción	16.	Guillotina
7.	Embaladora Banroc	17.	Enrolladora nº 1
8.	Estufa	18.	Enrolladora nº 2
9.	Enfriadora	19.	Empaquetadora
10.	Corte longitudinal	20.	Apiladora
11.	Corte espesor	21.	Embalado

Tabla 22. Tabla de la línea de fabricación de lana de roca. ISOVER.

1.4.3.1. COMPORTAMIENTO TÉRMICO

La lana de roca aísla eficazmente contra el frío y el calor. Gracias a su estructura multidireccional, la lana de roca contiene aire seco en su Interior que constituye una barrera al flujo de calor, unido al bajo nivel de conductividad térmica de los filamentos de roca que la componen, hacen de este producto una herramienta clave para alcanzar un excelente nivel de confort térmico. Aislar térmicamente las viviendas y los equipos industriales contribuye decisivamente al ahorro de energía y también a reducir la emisión a la atmósfera de gases contaminantes que deterioran la capa de ozono.

Comportamiento contra el fuego: la lana de roca no contribuye al desarrollo del incendio. Es un producto mineral, no orgánico e incombustible (A1) y no genera gases ni humos tóxicos (F0).

La lana de roca no funde hasta temperaturas superiores a los 1000 °C y conserva sus prestaciones mecánicas frente a altas temperaturas. Es termoestable y contribuye a la resistencia frente al fuego de los sistemas constructivos.

Los productos de lana de roca, tanto de la gama de industria, como de la gama edificación, son repelentes al agua de acuerdo con las normas aplicables. La lana de roca, no absorbe agua, ni atrae el agua hacia su interior.

En los productos de lana de roca, la absorción al vapor de agua es inapreciable. De acuerdo con: ASTM-C.1104 es de 0,02 vol %.

La lana de roca, debido a su estructura fibrilar, ofrece una fuerte permeabilidad al paso de vapor de agua (similar al aire), por lo cual no se altera por eventuales condensaciones en su interior.

Características	Valor
Densidad aparente DIN 53420	100 kg/m ³
Conductividad térmica a 75 °C 12667	0,037 W/m°C
Dilatación térmica μm/(m)	2.9
Temperatura resistencia al calor	1000 °C
Reacción al fuego DIN EN 13501-1	A2-s1, d0
Temperatura de uso	hasta +700 °C.
CORROSIVO. Según ASTM C-795 y C-871.	No

Tabla 23. Tabla de características de la Lana de Roca. ISOVER.

1.4.4. POLIURETANO.

1.4.4.1. ORÍGENES Y CARACTERÍSTICAS.

El descubrimiento del poliuretano se remonta al año 1937, gracias a las investigaciones desarrolladas por Otto Bayer. Se empezó a utilizar en la década de los 50, ya que hasta entonces no existieron maquinas capaces de procesarlo.

Las materias primas proceden de dos productos: el petróleo y el azúcar, para obtener, después de un proceso químico de transformación, dos componentes básicos, llamados genéricamente ISOCIANATO y POLIOL. La mezcla en las condiciones adecuadas de estos dos componentes nos proporcionará, según el tipo de cada uno de ellos y los aditivos que se incorporen, un material macizo o poroso, rígido o flexible, de celdas abiertas o cerradas (Fotografía 10).

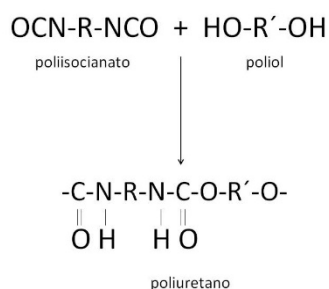
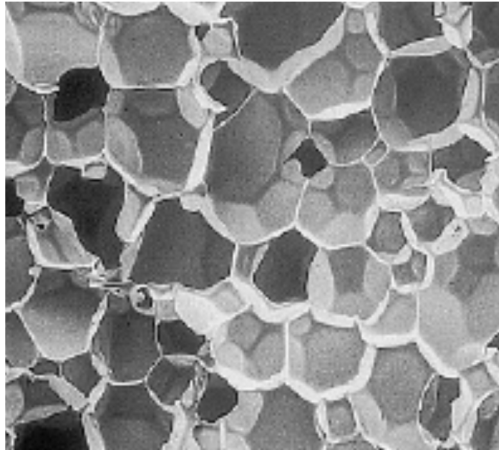


Figura 11: Esquema de formación de un poliuretano. (Bayer Material Science. Información técnica, 2004).



Fotografía 10: Vista microscópica de las celdas cerradas de la espuma de poliuretano. (ATEPA, 2010).

La mezcla de los dos componentes POLIOL e ISOCIANATO, que son líquidos a temperatura ambiente, produce una reacción química exotérmica. Esta reacción química se caracteriza por la formación de enlaces entre el poliol y el isocianato, consiguiendo una estructura sólida, uniforme y muy resistente. Si el calor que desprende la reacción se utiliza para evaporar un agente hinchante, se obtiene un producto rígido que posee una estructura celular, con un volumen muy superior al que ocupaban los productos líquidos. Es lo que denominamos espuma rígida de poliuretano, o PUR (Fotografía 11).



Fotografía 11: Proceso de espumación del poliuretano. (ATEPA, 2010).

La espuma rígida de poliuretano (Figura 12) es un material sintético duroplástico, altamente reticulado espacialmente y no fusible. En las densidades habituales, para aislamiento térmico, la espuma contiene solamente una pequeña parte del volumen de materia sólida (con una densidad de 35 kg/m^3 , sólo el 3% del volumen es materia sólida).

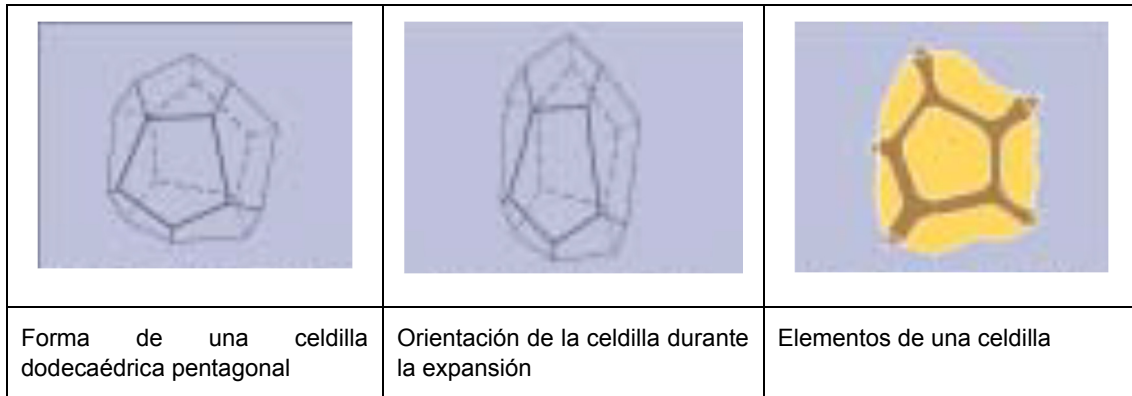


Figura 12: Estructura de una celdilla de espuma. (Bayer Material Science. Información técnica, 2004).

Existen dos sistemas de fabricación que conducen a dos productos diferenciados:

- Espuma rígida de poliuretano aplicada in situ por proyección, o poliuretano proyectado, que se obtiene mediante pulverización simultánea de los dos componentes sobre una superficie denominada sustrato.

- Espuma rígida de poliuretano aplicada in situ por colada, o poliuretano inyectado, en el que los dos componentes se mezclan físicamente por batido y se introducen en una cavidad donde se realiza la expansión.

1.4.4.2. PROPIEDADES.

a) Aislante térmico.

Posee una alta capacidad aislante. Esta característica especial se debe a la baja conductividad térmica que posee el gas espumante ocluido en el interior de las celdas cerradas.

El poliuretano proyectado no supera el valor de conductividad térmica inicial de $\lambda(10\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,022\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ (calculado según la Norma UNE 92202). Debido a que las celdas no impiden totalmente la difusión de gases a través de sus paredes, este valor de conductividad va aumentando ligeramente con el tiempo hasta llegar finalmente a estabilizarse. En la práctica, se considera como valor de cálculo de conductividad térmica de la espuma el obtenido después de 9 meses de envejecimiento acelerado $\lambda(10\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,028\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. (Procedimiento recogido en la Norma UNE 92120-1).

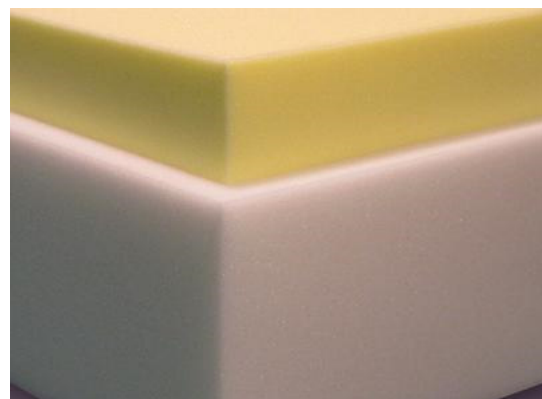
Espesor (mm)	Resistencia Térmica (m ² . °K/W)
20	0,71
25	0,89
30	1,07
35	1,25
40	1,43
45	1,61
50	1,79
55	1,96
60	2,14
65	2,32
70	2,50
75	2,68
80	2,86
85	3,04
90	3,21
95	3,39
100	3,57

Tabla 24: Valor de Resistencia Térmica en función del espesor. (ATEPA, Septiembre, 2010).

La conductividad térmica del poliuretano proyectado $\lambda = 0.028 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Así mismo, mediante la aplicación de recubrimientos que eviten la difusión de gases (barreras de vapor) es posible conseguir que la conductividad térmica de la espuma no presente alteraciones apreciables con el tiempo, manteniendo valores de $\lambda (10^\circ\text{C}) = 0,024 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Gracias a esta baja conductividad térmica, $\lambda (10^\circ\text{C}) = 0,028 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, el poliuretano proyectado alcanza los valores de aislamiento térmico exigidos en el CTE con el mínimo espesor, lo que permite dejar una mayor superficie habitable, con el consiguiente beneficio económico.

b) Aislante acústico.

El poliuretano proyectado tradicional es un material compuesto de celdas cerradas (>90%) y ligero, de baja densidad (Fotografía 12). Por tanto, no destaca por su capacidad de absorción acústica, ya que presenta una superficie de absorción limitada, ni tampoco destaca como absorbente elástico.



Fotografía 12: Poliuretano en espuma y Poliuretano en espuma.

No obstante, puede utilizarse combinado con otros materiales para reducir la transmisión de sonidos. Podemos señalar como muy positivo el efecto de sellado que realiza en los cerramientos por ser un Sistema Continuo Estanco, aportando por esta razón un buen resultado en cuanto al aislamiento al ruido aéreo, incrementando este aislamiento, según los casos, entre 7 y 9 dB. También en la construcción actúa muy eficazmente como amortiguador de vibraciones, ayudando a la eliminación de resonancias. En la Tabla 25 figura el coeficiente de absorción en función de la frecuencia. El coeficiente de reducción de transmisión de ruidos es 0,32.

Frecuencia (Hz)	Coefficiente de absorción
125	0,12
250	0,18
350	0,20
500	0,27
1000	0,19
2000	0,62
4000	0,22

Tabla 25: Coeficiente de absorción del poliuretano proyectado de celda cerrada en función de la frecuencia. (ATEPA, Septiembre, 2010).

Hoy en día, existe también otra gama de espumas de poliuretano proyectado de baja densidad y celda abierta, específicamente diseñadas para aislamiento y absorción acústica, que aumentan el coeficiente de absorción acústico hasta $\alpha = 0,5$. Sus características son:

- Densidad: $\rho < 15 \text{ kg/m}^3$ ($0,15 \text{ kN/m}^3$)
- Resistividad al Flujo del aire: $r = 5 - 6 \text{ kPa.s/m}^2$
- Rigidez Dinámica: $s' = 4.83 \text{ MN/m}^3$
- Coeficiente de Absorción acústica: $\alpha = 0,5$
- Conductividad térmica: $\lambda = 0,035 - 0.040 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
- Contenido en Celdas Cerradas: (CCC) $< 10\%$

c) Seguridad frente al fuego.

El poliuretano proyectado, como todos los polímeros, es un material orgánico y por tanto combustible. No obstante, existen espumas de poliuretano clasificadas desde C,s3-d0 (M1) hasta E (M3), según UNE-EN 13501 (UNE 23727), debiendo aplicarse unas u otras de acuerdo con el riesgo a que vayan a estar expuestas y de acuerdo a las exigencias del CTE DB-SI.

La Norma UNE 92120-1 de sistemas para poliuretano proyectado fija que su clasificación no puede ser más desfavorable que E (M3). Por otra parte, la clasificación

de productos según UNE-EN 13501 admite ensayos en condición de aplicación final de uso, esto es, si el poliuretano proyectado va a ir recubierto por otro material (yeso laminado, plancha metálica), el ensayo y la clasificación se realizara montando las muestras de esta forma.

Los fabricantes de sistemas tienen que acreditar mediante certificado de ensayo hasta qué espesor máximo cumplen sus diferentes sistemas en las diferentes clasificaciones según las diferentes condiciones o aplicaciones finales de uso.

d) Resistencia mecánica

En aquellas aplicaciones específicas donde la espuma vaya a estar sometida a carga (ej.: suelos, cubiertas, terrazas), la exigencia de la Norma UNE 92120-1 es que la resistencia a la compresión de la espuma, determinada según la Norma UNE-EN 826, no sea inferior a 200 kPa.

La resistencia a la compresión (Figura 13) oscila entre 150 kPa para una espuma de 35 kg/m³ (0,35 kN/m³) y 325 kPa para 60 kg/m³ (0,6 kN/m³). Por otra parte, la resistencia a tracción, siempre mayor, oscila entre 180 kPa para una espuma de 30 kg/m³ (0,3 kN/m³) y 820 kPa para una de 60 kg/m³ (0,6 kN/m³).

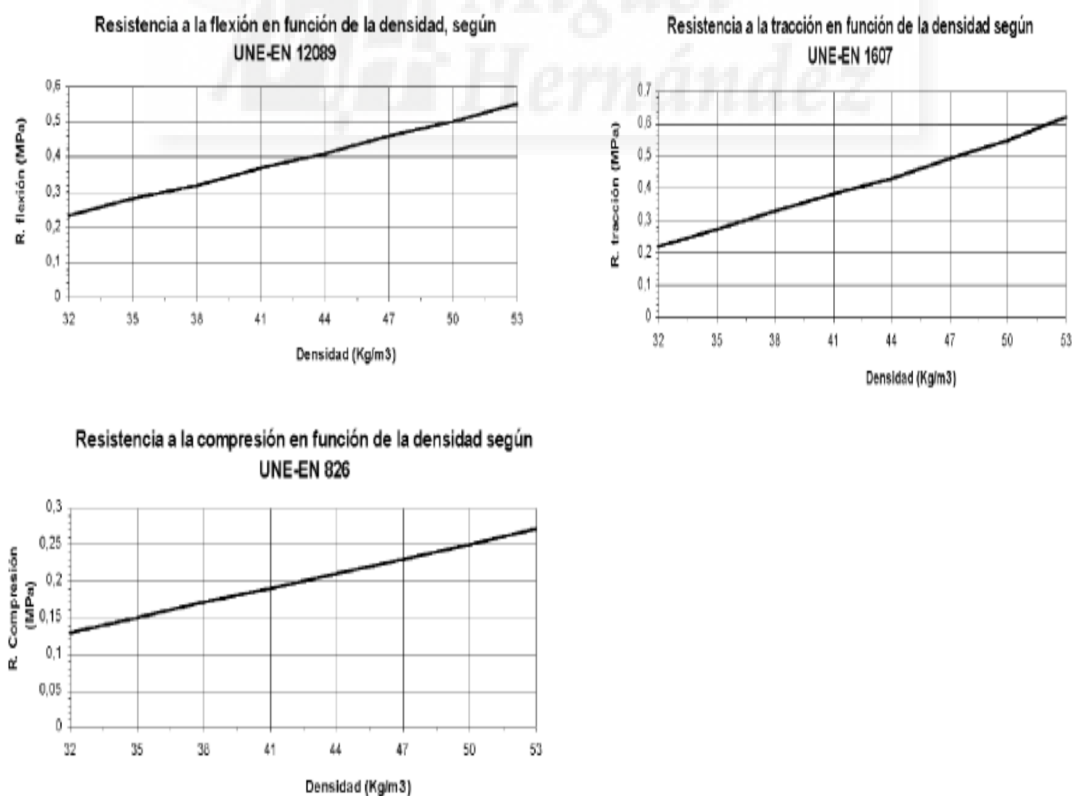


Figura 13: Valores de resistencia a Flexión, Tracción y Compresión para el poliuretano en función de la densidad. (ATEPA, 2010).

e) Estabilidad química.

El poliuretano proyectado es (Tabla 26):

- Resistente, en gran medida, a los disolventes utilizados en adhesivos, pinturas, pastas bituminosas, en conservantes para la madera y en masillas sellantes.
- Resistente al envejecimiento, contra la acción de las raíces e inerte bioquímicamente frente al ataque de mohos.
- Estable frente a los carburantes, aceites minerales y los ácidos y álcalis diluidos.
- Resistente contra la acción de los gases de escape o a la atmosfera industrial más agresiva.
- Impudrescible, estable ante el detritus, inodoro y fisiológicamente no presenta inconvenientes.
- Químicamente neutro.

Producto químico	Cambio de volumen	Comportamiento
Álcalis, ácidos y soluciones salinas		
Agua de mar	3%	Estable
Ácido clorhídrico concentrado.	-	Atacado
Ácido clorhídrico 10%	2%	Estable
Ácido sulfúrico 10	2%	Estable
Ácido nítrico concentrado.	-	Atacado
Ácido nítrico 10%	6%	Estable
Sosa caustica concentrada.	2%	Estable
Sosa caustica 10%	2%	Estable
Amoniaco concentrado.	6%	Estable
Amoniaco 10%	4%	Estable
Hidrocarburos alifáticos		
Gasolina	1%	Estable
Gasoil	2%	Estable
Aceite mineral	1%	Estable
Gasolina / benceno 60:40	1%	Estable
Hidrocarburos aromáticos		
Benceno	5%	Estable

Tolueno	2%	Estable
Clorobenceno	5%	Estable
Estireno monomero	2%	Estable
Otros disolventes orgánicos		
Etanol	13%	Hinchamiento
Metanol	12%	Inestable
Butanol	9%	Estable condicionado
Acetona	18%	Inestable
Acetato de etilo	16%	Hinchamiento
Tricloroetileno	14%	Hinchamiento
Cloruro metileno	17%	Inestable
Dimetilformamida	-	Atacado

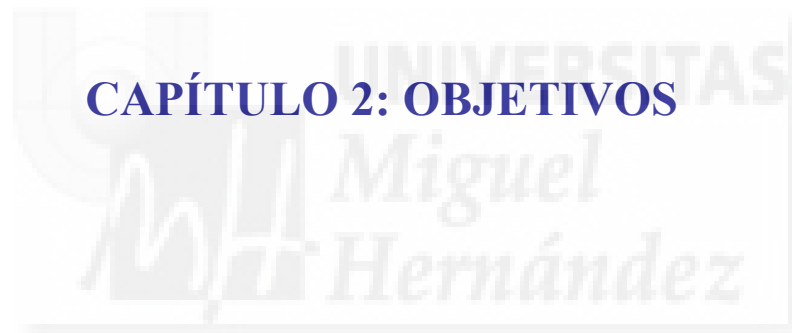
Tabla 26: Estabilidad química del poliuretano proyectado bajo condiciones de ensayo (Comportamiento después de 28 días a 20 °C). (ATEPA, Septiembre, 2010).

1.4.4.3. APLICACIONES.

Los sistemas de poliuretano, hoy en día, son muy versátiles y permiten una gama amplísima de aplicaciones que forman parte de nuestra vida.

- Industria automovilística: volantes, spoilers, alerones, asientos, salpicaderos, como amortiguación de vibraciones y ruidos.
- Industria del calzado (sobretudo deportivo).
- Industria de fabricación de muebles y ventanas.
- Industria de fabricación de pinturas y barnices.
- Ingeniería médica (fabricación de piezas para trasplantes y ortopedias, hemofiltros)
- Ingeniería aeroespacial
- Industria del frío (tuberías, cámaras frigoríficas, neveras, criogenia).
- Industria de la construcción.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS



2.- OBJETIVOS.

Se persiguen varios objetivos distintos en este trabajo.

- 1) Analizar un aditivo de base orgánica en seco, patentado por el equipo de investigación, y poder obtener una mezcla o mortero, que pueda ser empleado para fuegos de gran intensidad, y en particular, para evitar, reducir o retrasar, la aparición del efecto de una explosión catastrófica del tipo BLEVE.
- 2) Testar materiales existentes en el mercado y su comportamiento ante fuegos de gran intensidad, como elementos de protección o de mitigación de la BLEVE, que más se utilicen o empleen actualmente.
- 3) Observar el comportamiento del sulfato cálcico diversamente aditivado, con distintos espesores base, mediante ensayos que simulen fuegos de gran intensidad.
- 4) Ante la aportación de un aligerante, como la vermiculita a la pasta de sulfato cálcico, estudiar su comportamiento ante el fuego o acción térmica desarrollada.
- 5) Finalmente, se pretende estudiar el comportamiento de otros materiales compuestos, con el fin de buscar una solución/es que puedan ser empleadas en la práctica habitual de protección de elementos susceptible para evitar o reducir el fenómeno descrito.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOS

MH Miguel Hernández

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. OBSERVACIONES PREVIAS.

La base de una tesis de las denominadas tecnológicas, consiste en la evaluación de pruebas lo más parecido a las normalizadas, en este caso, bajo el procedimiento de las normas UNE-EN. En este sentido, se pretende recrear en laboratorio, procedimientos que se ajusten a dichas pruebas, lo cual constituye una aproximación a la norma. En este sentido, se establece un procedimiento no tipificado y no estadístico, ya que la elaboración del conjunto de pruebas para llegar a una determinación de qué materiales son los más adecuados, sería una tarea de dudosa viabilidad. La normalización para la homologación de productos relacionados con la construcción, establece procedimientos de validación con un único ensayo, lo cual deja clara la imposición de las normas UNE-EN, y todas en general, en este sentido de la poca variabilidad del comportamiento del material ante una situación concreta. No obstante, es sabido que no es cierta la bondad de todos los materiales, y finalmente, para aquellos cuyo comportamiento sea el más adecuado, se establecerá un procedimiento de evaluación estadística para evaluar dicha fiabilidad del ensayo y del material en cuestión.

Se indica, así mismo, en relación a los procedimientos, que la aplicación de normas en este sentido para el fenómeno de la BLEVE no existen, lo cual deja abierto el modelo de ensayo a metodologías racionales y por otra parte aproximadas lo más posible a las normas:

UNE EN 13501-2:2004 (Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de su comportamiento ante el fuego.); UNE EN 1363-2:2000, (Ensayos de resistencia al juego, requisitos generales); UNE-EN 1364-1:2000, (Ensayos de resistencia al fuego de elementos no portantes, paredes).

Se establecen también dos metodologías de ensayo: Una prueba de conducción de calor (radiación directa), en la que se establece un procedimiento de ensayo con una pared caliente sometida a una temperatura de 800 °C, y con mediciones que se describen en este documento. De este modo se evalúa la conductividad de calor del material a radiación directa; ensayo distinto a la determinación del parámetro λ (W/m·K) que mide la conductividad del material, observando la porosidad o densidad del mismo. Para fuegos de alta intensidad, y revestimientos de elementos que van a estar sometidos varias horas de fuego intenso, considerando que es necesario una evaluación distinta de la conductividad tradicional.

Un segundo procedimiento de ensayo en el que se intenta aproximar a la curva de calentamiento de hidrocarburos UNE-EN 1363:2000 en cuyo caso, la temperatura

alcanzada en la cara expuesta es de 1200 °C conseguida con gas propano.

La curva normalizada, se expresa por la ecuación $T=345 \log_{10} (8 t +1) + 20$

Siendo T: la temperatura del horno o la llama expuesta, y t, el tiempo de ensayo.

Otra curva a emplear, es la denominada curva de hidrocarburos, que se expresa:

$$T = 1080.(1 - 0,325.e^{-0,167.t} - 0,675.e^{-2,5.t}) + 20$$

La diferencia entre ambas curvas, es el mayor aporte calorífico de la segunda en los estadios iniciales del ensayo. Para la curva normal, el ensayo ante un fuego latente solo se debe utilizar cuando se prevea que la resistencia al fuego del elemento pueda reducirse para una exposición a temperaturas asociadas al tipo de crecimiento del fuego. Por lo cual, esto es especialmente aplicable a elementos cuyo comportamiento pueda depender, para obtener sus clasificaciones, de una alta velocidad del calentamiento hasta aproximadamente los 500 °C.

Para estos ensayos, nos aproximaremos a la curva normal.

Las características impositivas de la norma, que hacemos propias, son los siguientes:

Evaluación de la capacidad de un elemento constructivo de soportar la exposición al fuego en un solo lado, sin que se produzca la transmisión del incendio debido a la transferencia de calor significativa desde el lado expuesto al no expuesto.

Evaluación de: temperatura media de la cara no expuesta sobre la temperatura inicial, inferior a 140 °C. El incremento de la temperatura de cualquier termopar de la cara no expuesta sobre la temperatura inicial, será inferior a 180 °C

Modelo de ensayo:

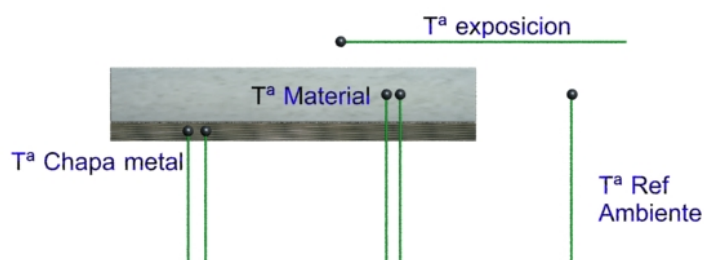


Figura 14. Esquema de mediciones chapa y material aislante. (Elaboración Propia)

Se trata de una chapa de acero empleado para la elaboración de esferas con designación ASME, SA 516.

El espesor de la chapa de acero es de 10 mm.

La medición de la temperatura, se realiza mediante termopares tipo K de cromel y alumel.

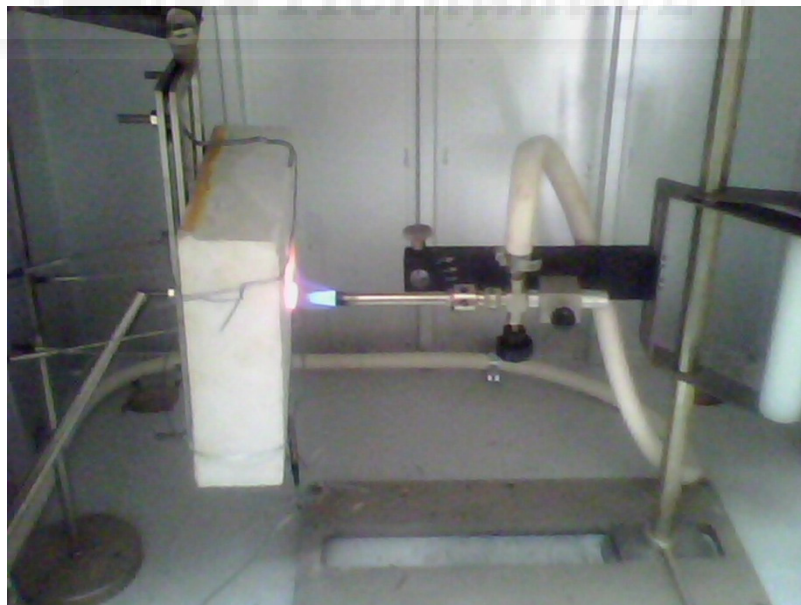
Justo en el centro de la chapa.

Justo en el centro del material de protección de la esfera.

Como referencias, la temperatura ambiente constante así como la de exposición del ensayo, es de 25 °C.



Fotografía 13. Ensayo de horno mufla. Test ensayo.



Fotografía 14. Ensayo de radiación directa localizada. Test de ensayo.

La medición se realiza con un Data Logger Omron ZR-RX 25 de 10 canales.

3.2. MATERIALES EMPLEADOS EN EL ENSAYO.

- Mortero aditivado, compuesto por: yeso negro (sulfato cálcico, más aditivo seco, patentado, con clasificación internacional de patente C04B24/04, a base de ácido poli carboxílico (ácido cítrico) y dióxido coloidal de silicona).

- Agua de la red.
- Vermiculita
- Vidrio celular
- Lana de roca
- Silicato cálcico

3.2.1. Yeso Moreno.

Además de los expuesto en el punto 1.3.1 y siguientes, del presente trabajo, consideramos conveniente exponer las particularidades de los materiales empleados en el ensayo y las consideración siguientes.

El aljez y la piedra de anhidrita natural son muy distintos estructuralmente.

Las variedades más importantes de aljez natural son: aljez espatado, también llamado espato de aljez escamoso (selenita), aljez fibroso, alabastro, aljez granular, piedra de aljez (aljez común), aljez compacto, aljez pórfido, aljez de tierras. El aljez puede ser de color blanco puro. Si contiene óxido de hierro, varía de un rojizo a un amarillento. Si la arcilla y/o el betún están presentes, varía del gris al negro. La anhidrita natural muy pura es de un blanco azulado, pero usualmente es gris con un matiz azul.

La anhidrita, siempre cristalina, puede ser espatada (espato de anhidrita) de grano grueso o incluso en forma de barra.

Las vetas blancas que a veces encuentra en la frontera entre el aljez y la anhidrita natural son principalmente glauberita ($\text{SO}_4\text{Ca} + \text{Na}_2\text{SO}_4$) o sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$).

El yeso moreno (yeso negro) se produce en el proceso de fabricación del yeso blanco. Una parte de él se reduce a polvo, mezclándose con las cenizas y subproductos de la combustión, o se trituran juntos, y el producto obtenido tiene color oscuro, por lo que recibe el mismo nombre.

El yeso negro, o también denominado basto o moreno, de molienda grosera se emplea en las obras que hayan de quedar enlucidas y guarnecidos y para abono de las tierras pobres en cal.



Fotografía 15. Yeso moreno listo para su uso en laboratorio. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

3.2.2. Aditivo.

El aditivo es un nuevo producto aditivo para yesos. Tiene un efecto fluidificante y retardador sobre el proceso del fraguado.

Es un aditivo en forma sólida y de tipo orgánico (puede estar compuesto por varios ácidos, pero se observa solo el cítrico en la mezcla), del tipo ácidos policarboxílicos). Añade a la mezcla dióxido de silicón coloidal, que actúa de fluidificante del ácido, además de impedir o retrasar su higroscopia evitando terrones y dificultando su dispersión.

La dosificación de mezcla aditivo-yeso (conseguida la formulación), es para cada 1000 g de yeso seco de entre 0,025 y 1 g de aditivo, variando la cantidad en función de las propiedades finales buscadas para la mezcla.

El aumento de la cantidad de aditivo en el yeso, provocará un aumento proporcional del tiempo de fraguado del yeso una vez mezclado con agua. Para el amasado de la mezcla será suficiente con una relación de 1 kg de yeso por cada 0,3 kg de agua, como mínimo en el caso óptimo de mezclado con medios mecánicos y energéticos, siendo lo habitual una relación de 0,5 kg de agua por 1 kg de yeso y estableciendo como relación máxima de 1 kg de yeso para 0,7 kg de agua.

Esta baja relación agua/yeso confiere a la mezcla propiedades de elevada resistencia mecánica, dureza superficial y resistencia a flexión y compresión. La baja red capilar de agua lo hace especialmente idóneo para mezclar con otros materiales y crear desarrollos de conjuntos constructivos en aras de conseguir aumentar propiedades de comportamiento según el uso (por ejemplo térmico, acústico, frente a llamas u ondas de choque o presión provocadas por explosiones, etc.).

Para los ensayos, se ha establecido la siguiente proporción: por cada 2 kg de yeso moreno, 0,2 grm de aditivo y 1 litro de agua.

Con esta proporción, se consiguen resistencias de rotura a flexión que oscilan ente 5,35 N/mm², y 6N/mm².

Con respecto a la vida útil del producto se puede decir que durante los controles que se han hecho a lo largo del proceso de ensayado, no se ha observado alteración ninguna de las características.

Propiedades	Descripción
Tipo de aditivo	Ácido policarboxílico y dióxido coloidal de sílica
Forma	Sólida
Color	Blanco
pH	≈1,5
Masa molar	192,124 g/mol
Densidad	1,66g/cm ³
Viscosidad a 28 °C	≈ 0,000833 kg/(m*s)
Reactividad	Inmediata
Patente Internacional	P201200897

Tabla 27: Resumen de las propiedades del aditivo. Elaboración propia.

3.2.3. El agua.

El agua no se considera, en este caso, como un elemento que aporte ventajas a priori por su composición intrínseca. Si hay que tener en cuenta, la temperatura a la que se aporta, ya que ésta puede tener efecto en la cantidad de sal disuelta que pueda llevar. Tiene influencia en el tiempo de fraguado. Además, a más agua que tengamos en el material de referencia (sulfato de calcio hemihidrato), fijada en humedad relativa y cuanto más agua aportemos al proceso de amasado del mortero, peor será el comportamiento de las propiedades mecánicas del producto obtenido. En nuestro proceso de fabricación, utilizaremos las cantidades de agua necesarias para la ejecución de los ensayos, obtenida directamente de la red de agua potable, para mezclar junto al yeso moreno (en una proporción A/Y de 0,5) y además el aditivo.

Parámetros	Métodos	RD 140/2003	Resultados	Unidades
Características organolépticas				
Color	A-A-PE-0032 Sonda multiparamétrica	15	< 1,0 ± 18%	Mg/L Pt/Co
Olor	A-A-PE-0014 Dilución	3 a 25 °C	1	Ind. de dil.
Sabor	A-PE-0015 Dilución	3 a 25 °C	1	
Turbidez	A-A-PE-0032 Sonda multiparamétrica	5	< 0,20 ± 19%	UNF
Caracteres Físico-Químicos				
Amonio	A-C-PE-0012 Espectrofotometría	0.5	< 0.10 ±15%	mg/L
Carbono orgánico	A-F-PE-0001 Combustión - IR		1.8 ±15%	mg/L
Cianuros totales	A-F-PE-0057 SFA	50	<5 ±28 %	µg/L
Indice de Langelier	A-F-PE-0044 Cálculo		0,46	-
Bicarbonatos	A-A-PE-0033 Valorador Metrohm		156.0 ±12%	mg/L
Calcio	A-D-PE-0026 Metales ICP-MS		96.4 ±12%	mg/L
Carbonatos	A-A-PE-0033 Valorador Metrohm		< 2.0 ±13%	mg/L
Conductividad	A-A-PE-0032 Sonda Multiparametrica	2500	931 ±12%	µS/cm
pH	A-A-PE-0032 Sonda Multiparametrica	6.5-9.5	7.9 ±0.1	U. pH.
Temperatura	A-A-PE-0032 Sonda Multiparametrica		18.7	°C
Cationes mayoritarios				
Sodio	A-D-PE-0026 Metales ICP-MS	200	54.7 ±12%	mg/L
Aniones				
Cloruros	A-BV-PE-0001 HPLC-Conductividad	250	90.0 ±13.0%	mg/L
Fluoruros	A-BV-PE-0001 HPLC-Conductividad	1,5	0.150 ±12.9%	mg/L
Nitratos	A-BV-PE-0001 HPLC-Conductividad	50	2.6 ±13.1%	mg/L
Sulfatos	A-BV-PE-0001 HPLC-Conductividad	250	270.8 ±13.1%	mg/L

Tabla 28: Análisis de agua de la zona de Orihuela. Fecha de emisión 13/01/2012. (Aquagest Levante, S.A.)

3.2.4. Vermiculita.

El uso de vermiculita, se asocia a una disminución del peso específico del mortero, si bien no aporta mejoras al mismo, ni con relación al comportamiento mecánico, sino todo lo contrario.

En los ensayos realizados para la obtención de resultados se han empleado dos de las tres granulometrías diferentes de vermiculita descritos en el punto 1.3.3 para mezclar con el yeso moreno y el aditivo (punto 3.2.2). El uso de estas dos vermiculitas

en concreto, se fundamente en que, a una de ellas, la laminada, se considera un subproducto de la fabricación, y la fina o media, como amortiguador para reducir el peso específico. La gruesa, que tiene una importante demanda para la agricultura y que además es más cara, se ha descartado. Las dos granulometrías utilizadas se han caracterizado mediante el método de los tamices (ISO 565), denominándolas de la siguiente manera:

- Vermiculita de grano medio (**VH**). Nos encontramos con un porcentaje de grano que no pasa por el tamiz nº 2 del 22%, y un porcentaje del 1% que pasa por el tamiz nº 0,125.

Tamiz (ISO 565)	VH (% que pasa)	VH (% retenido)	VH (% retenido- acumulado)
31,5	100,00	0,00	0,00
16	100,00	0,00	0,00
8	100,00	0,00	0,00
4	100,00	0,00	0,00
2	77,66	22,34	22,34
1	19,39	58,27	80,61
0,5	9,98	9,41	90,02
0,25	4,10	5,88	95,90
0,125	1,28	2,82	98,72
<0,125	0,00	1,28	-

Tabla 29: Granulometría de Vermiculita de grano medio (VH), según el ensayo de granulometría de ISO 565. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

- Vermiculita de grano fino (**VL**). Nos encontramos con un porcentaje de grano que no pasa por el tamiz nº 1 del 17%, y un porcentaje del 7,7% que pasa por el tamiz nº 0,125.

Tamiz (ISO 565)	VL (% que pasa)	VL (% retenido)	VL (% retenido- acumulado)
31,5	100,00	0,00	0,00
16	100,00	0,00	0,00
8	100,00	0,00	0,00
4	100,00	0,00	0,00
2	100,00	0,00	0,00
1	82,61	17,39	17,39
0,5	41,27	41,34	58,73
0,25	19,77	21,49	80,23
0,125	7,73	12,04	92,27
<0,125	0,00	7,73	-

Tabla 30: Granulometría de Vermiculita de grano fino o Laminada (VL), según el ensayo de granulometría de ISO 565. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

Para nuestras pruebas se han utilizado, por tanto, la más fina (VL) que se obtiene como subproducto (residuo) en la fabricación de la vermiculita exfoliada; y la de grado medio (VH). Con lo cual nos encontramos ante un producto que es aprovechado para otra actividad distinta a la de su producción, cuando ya iba a ser un problema destinado a ir a vertedero, por lo cual repercute ventajosamente en el precio final del producto.

3.2.5. Vidrio celular.

El vidrio celular está fabricado a partir de vidrio reciclado y materias primas naturales disponibles con abundancia (arena, dolomita, cal...). Es un aislamiento.

El utilizado en los ensayos, se suministra en placas.

Reacción al fuego (DIN EN 13501-1): El material es conforme con Euroclase A1, incombustible, sin humo tóxico.

Límites de la temperatura de servicio: De -260 °C a +430 °C

Temperatura de fusión (DIN 4102-17) >1000 °C.

Coefficiente de expansión térmica (EN 13471) $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Calor específico (EN ISO 10456) 1 kJ/(kg•K)

Difusividad térmica a 0: $4,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Módulo de elasticidad por flexión E = 700

Clasificación ecológica BRE: A

longitud x anchura [mm]	600 x 450							
grosor [mm]	30	40	50	60	70	80	90	100
unidades	32*	12	10	8	7	6	6	5
metro cuadrado [m ²]	4.32	3.24	2.70	2.16	1.89	1.62	1.62	1.35

longitud x anchura [mm]	600 x 450							
grosor [mm]	110	120	130	140	150	160	170	180
unidades	5	4	4	4	3	3	3	3
metro cuadrado [m ²]	1.35	1.08	1.08	1.08	0.81	0.81	0.81	0.81

Tabla 31: Propiedades de suministro del vidrio celular. (Foamlime)

3.2.6. Lana de Roca.

Ya descrita en el punto 1.4.3; en las pruebas empleamos un panel rígido de lana de roca. Protección contra incendios de elementos constructivos como: estructuras de acero, conductos de ventilación, puertas cortafuego, sellado de penetraciones, cajado de bandejas de cables, estructuras de madera, forjados, etc.

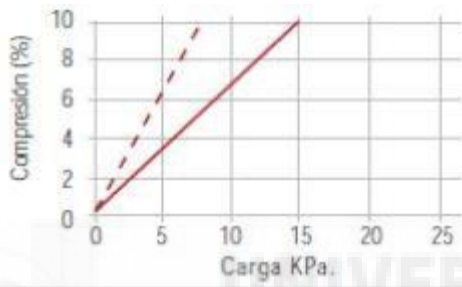
Característica	Valor	Norma									
Densidad nominal	180 kg/m ³	EN1602									
Conductividad térmica	0.041 W/(m*K)	UNE-EN 12667									
Calor específico	0.84 kJ/kg K a 20 °C										
Resistencia al paso del vapor de agua	$\mu \pm 1.3$ Por ser estructura abierta, la lana de roca ofrece una fuerte permeabilidad al vapor de agua y no se altera por eventuales condensaciones en la estructura del edificio.										
Reacción al fuego	A1	UNE-EN 13501.1									
Resistencia a la compresión	 <table border="1" data-bbox="502 1025 965 1120"> <tr> <td>Compresión</td> <td>5%</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>Carga en kPa</td> <td>7.5</td> <td>15.0</td> </tr> </table>	Compresión	5%	10%	Carga en kPa	7.5	15.0	DIN 52272			
Compresión	5%	10%									
Carga en kPa	7.5	15.0									
Dimensiones	<table border="1" data-bbox="502 1137 1220 1272"> <thead> <tr> <th>Largo (mm)</th> <th>Ancho (mm)</th> <th>Espesor (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1800</td> <td>1200</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>1800</td> <td>1200</td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table>	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	1800	1200	50	1800	1200	60	
Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)									
1800	1200	50									
1800	1200	60									
Resistencia a la compresión	<table border="1" data-bbox="502 1288 1220 1422"> <thead> <tr> <th>Compresión</th> <th>Carga en kPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>	Compresión	Carga en kPa	5	7,5	10	15	EN 826			
Compresión	Carga en kPa										
5	7,5										
10	15										
Resistencia a la difusión de vapor de agua	MU1 $\mu=1.3$	EN 12086									

Tabla 32: Propiedades de suministro de la lana de roca empleada en los ensayos. (Rockwool)

3.2.7. Silicato cálcico.

Placa mineral de silicato de calcio reforzado con celulosa para el aislamiento térmico.

Datos técnicos:

Material	Silicato de calcio
Dimensiones	1520 x 1000 mm por placa
Espesores	25, 30, 50 mm
Clasificación al fuego	no inflamable, A1 según la norma alemana DIN 4102
Densidad bruta	305 kg/m ³ ± 10 %
Resistencia a compresión	0,85 N/mm ²
Conductividad térmica	0,0805 W/mK
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ	4,61
Porosidad entera	84,2 Vol.-%
Valor pH	aprox. 10,5
Cambio de forma en almacenaje en agua	+0,149 Vol.-%

Tabla 33: Propiedades de suministro de las placas de silicato cálcico. (Promat)

3.2.8. Acero de la chapa.

Se pretende que el acero empleado en los ensayos, sea el mismo que el utilizado en las esferas de GLP.

La norma o materiales a utilizar se rigen por el código ASME VIII división 1.

En la norma ASME II parte D se detallan las tablas de los materiales con sus límites de uso en presión y temperatura y la tensión de cálculo en función del diseño.

En el cuadro siguiente se observan los materiales de Acero Carbono usados en el código de diseño para este tipo de elementos:

CARBON AND LOW ALLOY STEEL					
Spec. No.	Type/Grade	Spec. No.	Type/Grade	Spec. No.	Type/Grade
SA-36	...	SA-302	A, B, C, D	SA-516	55, 60, 65, 70
SA-53	E/A, E/B, S/A, S/B	SA-307	B	SA-524	I, II
SA-105	...	SA-320	L7, L7A, L7M, L43	SA-533	A Cl. 1 & 2, B Cl. 1 & 2, C Cl. 1 & 2, D Cl. 2
SA-106	A, B, C	SA-325	1	SA-537	Cl. 1, 2 & 3
SA-135	A, B	SA-333	1, 3, 4, 6, 7, 9	SA-540	B21, B22, B23, B24, B24V
SA-178	A, C	SA-334	1, 3, 6, 7, 9	SA-541	1, 1A, 2 Cl. 1, 2 Cl. 2, 3 Cl. 1, 3 Cl. 2, 3V, 3VCb, 22 Cl. 3, 22V
SA-179	...	SA-335	P1, P2, P5, P5b, P5c, P9, P11, P12, P15, P21, P22, P91	SA-542	B Cl. 4, C Cl. 4a, D Cl. 4a, E Cl. 4a
SA-181	...	SA-336	F1, F3V, F3VCb, F5, F5A, F9, F11 Cl. 2 & 3, F12, F21 Cl. 1 & 3, F22 Cl. 1 & 3, F22V, F91	SA-556	A2, B2, C2
SA-182	FR, F1, F2, F3V, F3VCb, F5, F5a, F9, F11 Cl. 1 & 2, F12 Cl. 1 & 2, F21, F22 Cl. 1 & 3, F22V, F91			SA-557	A2, B2, C2

SA-192	...	SA-350	LF1, LF2, LF3, LF5, LF9	SA-562	...
SA-193	B5, B7, B7M, B16	SA-352	LCB, LC1, LC2, LC3	SA-574	4037, 4042, 4140, 4340, 5137M, 51B37M
SA-202	A, B	SA-354	BC, BD	SA-587	...
SA-203	A, B, D, E, F	SA-369	FP1, FP2, FP5, FP9, FP11, FP12, FP21, FP22	SA-612	...
SA-204	A, B, C	SA-372	A, B, C, D, E Cl.65 & 70, F Cl. 70, G Cl. 70, H Cl. 70, J Cl. 65, 70 & 110, L, M Cl. A & B	SA-662	A, B, C
SA-209	T1, T1a, T1b	SA-387	2, 5, 11, 12, 21, 22, 91	SA-675	45, 50, 55, 60, 65, 70
SA-210	A-1, C	SA-414	A, B, C, D, E, F, G	SA-695	B/35, B/40
SA-213	T2, T5, T5b, T5c, T9, T11, T12, T17, T21, T22, T91	SA-420	WPL 3, WPL 6, WPL 9	SA-727	...
SA-214	...	SA-423	1, 2	SA-737	B, C
SA-216	WCA, WCB, WCC	SA-437	B4B, B4C	SA-738	A, B, C
SA-217	C12, C5, WC1, WC4, WC5, WC6, WC9	SA-449	...	SA-739	B11, B22
SA-225	C	SA-455	...	SA-765	I, II, III, IV
SA-234	WPB, WPC, WPR, WP1, WP5, WP9, WP11 Cl. 1, WP12 Cl. 1, WP22 Cl. 1	SA-487	1 Cl. A & B, 2 Cl. A & B, 4 Cl. A, B Cl. A	SA-832	21V, 22V, 23V
SA-250	T1, T1a, T1b	SA-508	1, 1A, 2 Cl. 1, 2 Cl. 2, 3 Cl. 1, 3 Cl. 2, 3V, 3VCb, 4N Cl. 3, 22 Cl. 3	SA-836	...
SA-266	1, 2, 3, 4	SA-515	60, 65, 70	SA-1008	CS-A, CS-B
SA-283	A, B, C, D			SA/AS 1548	7-430, 7-460, 7-490
SA-285	A, B, C			SA/CSA-G40.21	38W
SA-299	...			SA/EN 10028-2	P295GH
				SA/EN 10028-3	P275NH

GENERAL NOTE: Maximum allowable stress values in tension for the materials listed in the above table are contained in Subpart 1 of Section II, Part D (see UG-23).

Tabla 34: Propiedades de suministro de las placas de acero. (ASME Specifications)

Los materiales de las envolventes son chapas de acero, de baja aleación, alta resistencia y soldables de calidad ASTM SA 516 Gr. 60, 70 o similar, suministrado conforme a las especificaciones ASTM SA 20.

La especificación ASME SA516 Gr. 70 / ASTM A516 Gr. 70

A pesar de su gran uso, la especificación es bastante general y clara. Tiene 5 elementos químicos claves y 3 propiedades químicas. No necesita pasar por tratamientos térmicos.

Chemical Requirements

Element	Thickness	Composition (%)	Note
Carbon (max)	12.5 mm and under	0.27	A, B, C
	over 12.5 to 50 mm	0.28	A, B, C
	over 50 to 100 mm	0.30	A, B, C
	over 100 mm	0.31	A, B, C
Manganese		0.85 - 1.20	A, C
		0.79 - 1.30	B, C
Phosphorus (max)		0.025	A, B
Sulphur (max)		0.025	A, B
Silicon		0.15 - 0.40	A
		0.13 - 0.45	B

Tabla 35: Propiedades de las chapas empeladas. (ASME Specifications)

3.3. MAQUINARIA UTILIZADA.

En este apartado se pretende ver las características de la maquinaria utilizada en la confección de los distintos ensayos que se han llevado a cabo para la elaboración de ésta Tesis.

3.3.1. Máquina universal de ensayos.

Con esta máquina de ensayos se han efectuado las pruebas mecánicas de las probetas de pasta de yeso fabricadas según (EN 325), y obteniendo resultados directos de flexotracción y módulo de elasticidad (EN 310), así como la densidad (EN 323).



Fotografía 16. Máquina Universal de ensayos (Fuente: IMAL)

3.3.2. Durómetro escala Shore C

Se ha utilizado un durómetro portátil Baxlo Shore C, calibrado para ejercer la fuerza adecuada que se especifica en las normas DIN 53505, UNE-EN 150868 y ASTM D 2240, para la medida de la dureza Shore C. Posee una sensibilidad de 1 unidad Shore, con una capacidad de 0 a 100 unidades Shore. El pack está compuesto por un durómetro y un calibrador.



Fotografía 17: Durómetro portátil Baxlo Shore C. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

Este durómetro se utilizó para determinar la dureza Shore, escala C de probetas y artículos de goma de dureza media. Se usa también para plásticos de dureza media, yesos y escayolas.

3.3.3. Mufla y Datalogger.

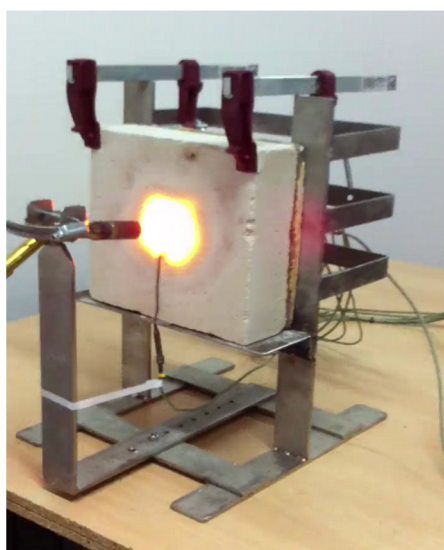


Fotografía 18: Horno mufla y datalogger con sondas.

3.3.4. Soplete.

El soplete se regula a una distancia fija de la placa a ensayar; de modo que la influencia de la llama sea siempre la misma.

El combustible empleado en los ensayos es el propano.



Fotografía 19: Ensayo de radiación directa. Soplete de propano.

Los GLP más comunes son el propano y el butano comerciales. Ambos se comercializan cumpliendo las especificaciones vigentes (BOE. núm. 303 de 19/12/84 y núm. 227 de 22/09/82). Son básicamente butano y propano y sus mezclas, como vemos en forma resumida en la siguiente tabla:

	PROPORCIONES EN VOLUMEN	
	Propano comercial	Butano comercial
Propano (C3)	mín. 80 %	max. 20 %
Butano (C4)	max. 20 %	mín. 80 %

Tabla 36: Propiedades del propano. (Gas Natural)

Las mezclas (C3/C4) utilizadas en automoción, una aplicación importante de los GLP, tienen una proporción que oscila entre 70/30 y 60/40.

Inflamabilidad y combustión. Ambos gases forman con el aire mezclas inflamables y necesitan una gran cantidad de aire para su combustión. Resultan inflamables en el aire solo cuando se mezclan en una cierta proporción:

Propano: entre el 2,2 y el 9,5 % de propano.

Presiones de utilización más usuales de los GLP:

Propano comercial 37 y 50 mbar

Valores característicos básicos de los GLP comerciales.

VALORES CARACTERÍSTICOS	PROPANO COMERCIAL		BUTANO COMERCIAL	
Tensión de vapor absoluta a 20° C	8,5 bar abs.		2,25 bar abs.	
Temperatura de ebullición a presión atm.	- 45° C		- 0,5° C	
Masa en volumen del gas a 20° C y presión atmosférica (ρ) (valores SEDIGAS)	2,095 kg/m ³		2,625 kg/m ³	
Densidad en fase gas (respecto al aire)	1,62		2,03	
Masa en volumen del líquido a 20° C (ρ)	506 kg/m ³		580 kg/m ³	
Densidad en fase líquida (respecto al agua)	0,506		0,580	
Poder Calorífico Superior -Hs-	12 000 kcal/kg	13,95 kWh/kg	11 900 kcal/kg	13,83 kWh/kg
	25 140 kcal/m ³	29,23 kWh/m ³	31 240 kcal/m ³	36,32 kWh/m ³
Poder Calorífico Inferior -Hi-	10 900 kcal/kg	12,67 kWh/kg	10 820 kcal/kg	12,47 kWh/kg
	22 835 kcal/m ³	26,55 kWh/m ³	28 400 kcal/m ³	33,02 kWh/m ³
Presión atmosférica = 1,01325 bar;				
Masa en volumen del aire ρ = 1,293 kg/m ³ ; Masa en volumen del agua ρ = 1000 kg/m ³ .				

Tabla 37: Valores característicos de los GLP comerciales. (CEPSA)

3.3.5. Otra maquinaria utilizada.

- **Recipientes para amasado.** Se han utilizado cubos de plástico 12L de capacidad, debido al poco volumen de pasta de yeso a utilizar en cada una de las

series sometidas a estudio.

- **Espátulas.** Utilizadas, tanto para el amasado como, para el relleno de los moldes usados a la hora de fabricar las probetas. Las espátulas son las recomendadas por la norma UNE EN 13279-2.

- **Desecador de gel de sílice** (SiO_2). También llamado Silica gel. Se emplea para atemperar las muestras sin que adquieran humedad, después de sacarlas de la estufa.

- **Estufa de secado.** Se utiliza para secar las muestras a una temperatura determinada.



Fotografía 20: Estufa de secado de las probetas. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

- **Moldes de silicona.** Utilizados para la fabricación de las probetas según las dimensiones aportadas en la norma UNE EN 13279-2. La silicona es especial, anti- retracción para que se deforme lo menos posible con el uso y no se falseen los datos.



Fotografía 21: Moldes de silicona. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

- **Calibre (Mitutoyo 150 mm).** Para medir dimensiones de probetas y longitud de la galleta de pasta. Calibre de precisión 0,1 mm



Fotografía 22: Calibre de precisión. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

- **Báscula.** Utilizada para el pesaje del yeso moreno a utilizar. Con precisión de 0,01 gr



Fotografía 23: Báscula. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

- **Regla metálica.** Para eliminar el sobrante de pasta de yeso de los moldes.

3.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Al tener referencias sobre trabajos desarrollados con yeso moreno y aditivos similares, se ha planteado la obtención de probetas y rotura de las mismas para la obtención del ajuste de mezcla en proporción al aditivo de síntesis en formato seco y al yeso de referencia. Esto se debe a que el contenido en inerte del yeso, modifica las proporciones de los mismos. Y dependiendo de su procedencia, la pureza del mismo es distinta; por tanto, se ajustará inicialmente, la mezcla y la proporción.

3.4.1. Parte I de ensayos. Estudio del aditivo seco y ajuste de la dosificación del mismo.

Para poder controlar el proceso de fabricación, y sobre todo para obtener un mortero con baja cantidad de agua que pueda ser considerado de alta resistencia, y que además, sea trabajable o manipulable en el tiempo, se hace necesario emplear aditivos especiales. Se pretende ajustar una dosificación de éste aditivo en base seca, patentado por el equipo de investigación.

3.4.1.1. Proceso de fabricación de probetas de yeso en laboratorio.

Se utiliza para toda la parte experimental, según la Norma UNE-EN 13279-2, moldes de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. Estos moldes se rellenan con la mezcla correspondiente de yeso, aditivo, adiciones y agua.

La mezcla se realiza, en general, incorporando en primer lugar el agua necesaria en un recipiente de amasado. En segundo lugar, la dosificación de aditivo es añadida al yeso en polvo, removiendo varios minutos. Posteriormente, se adiciona vermiculita, cuando ésta sea necesaria, dependiendo del ensayo. Después toda la mezcla se amasa manualmente con ligereza y se vierte sobre los moldes, intentando evitar que se produzcan burbujas de aire.

Se amasa con batidora.

Una vez se ha vertido la pasta de yeso en los moldes, se sacude diez veces sobre la mesa para eliminar las burbujas de aire y que se rellenen las esquinas. En ocasiones cuando la pasta, debido a la adición que se le incorpora, se encuentra poco fluida, se hace necesario, también, la vibración de la misma para asegurarnos el relleno total de la probeta y evitar coqueras. La aparición de coqueras hace que se deseche el ensayo.



Fotografía 24: Coqueras (Burbujas de aire junto a la pared del molde). Defecto en la fabricación de las probetas de yeso. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013)

Una vez realizada esta operación, se elimina la pasta sobrante mediante un movimiento de sierra por encima del molde con una regla, y se alisa la probeta sin ejercer presión sobre la pasta de yeso.

El desmoldado se realiza a las 24 horas después del enmoldado, siempre y cuando el mortero haya adquirido la resistencia suficiente para ser manejada sin riesgo de daño. Inmediatamente después del desmoldado, las probetas son identificadas, según ensayo correspondiente, con rotulador de tinta indeleble.



Fotografía 25: Probeta de yeso con aditivo recién desmoldada.

Las probetas así confeccionadas se introducen en estufa con atmósfera de laboratorio de ensayo de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ y una Humedad Relativa (HR) del $50\pm 5\%$ durante un periodo de 7 días. Pasado este tiempo, son colocadas las probetas en el horno de secado a temperatura de $40\pm 2^{\circ}\text{C}$. Del horno se sacan y se atemperan en desecador de gel de sílice, para después pesarla en la báscula. Esta operación se realiza las veces necesarias hasta que se consigue una masa constante. Una vez obtenida la masa constante se vuelve a atemperar en el desecador de gel de sílice a temperatura de laboratorio de ensayo y se someten a los ensayos previstos.

El amasado de las probetas se realiza de forma manual, y finaliza cuando no quedan grumos de yeso en la pasta.

Para la realización de las probetas se ha seguido el siguiente plan experimental:

- 1°.- Determinación del compuesto propuesto.
 - Elección de la relación A/Y mínima para el amasado que nos permita la trabajabilidad del producto.
 - Yeso aditivado a distintas dosis y sin adiciones de vermiculita de ningún tipo.
 - Yeso con la dosis óptima de aditivo y con adición a diferentes dosis de cada tipo de vermiculita.
- 2°.- Caracterización de los materiales compuesto elaborados.

3°.- Estudio estadístico de las características de los productos propuestos obtenidos.

3.4.1.2. Elección de la relación A/Y mínima para el amasado que nos permita la trabajabilidad del producto.

La relación A/Y óptima, se obtiene tomando como referencia estudios anteriores realizados en el Departamento de Ingeniería. Concretamente de la Tesis de Juan Manual Berna Serna, y de la suficiencia de investigación del ingeniero que suscribe este documento. Se realizaron distintos ensayos con diferente relación de A/Y, para analizar el comportamiento de los productos obtenidos y conocer cuál es la cantidad máxima y mínima de agua con la que podemos trabajar.

Las relaciones A/Y empleadas para la fabricación, se fija en la proporción de A/Y 0,5 que es la que mejores propiedades mecánicas ofrece. No obstante, al emplear la vermiculita como adición, la cantidad de agua aumenta ligeramente para conseguir mantener la trabajabilidad. La aportación de agua adicional no se tiene en cuenta en la elección de la proporción, es una consecuencia que mermará las propiedades mecánicas, pero es inevitable.

3.4.1.3. Yeso aditivado a distintas dosis.

Una relación A/Y de 0,5 conlleva la utilización de poca cantidad de agua en el amasado, lo que implica un aumento en la velocidad de fraguado de la pasta de yeso y un endurecimiento casi instantáneo, con la dificultad añadida de la falta de trabajabilidad del producto.

Con la adición del aditivo se pretende analizar la aportación de nuevas propiedades en el producto resultante.

Las distintas dosificaciones de aditivo a utilizar se muestran en la siguiente tabla, y son referidas al contenido en yeso seco en peso.

ADITIVO (gr)	YESO (gr)	AGUA (gr)
1,5	2.000,00	1.000,00
0.5	2.000,00	1.000,00
0.3	2.000,00	1.000,00
0.25	2.000,00	1.000,00
0.20	2.000,00	1.000,00
0.15	2.000,00	1.000,00
0.12	2.000,00	1.000,00
0,1	2.000,00	1.000,00

Tabla 38: Dosificaciones de aditivo utilizadas en los ensayos.

Se realizan tres probetas por cada serie, y de cada serie se realizan tres repeticiones resultando un total de nueve probetas fabricadas para cada ensayo realizado

Cada serie consta de un número de tres probetas. Sobre las series, se realizan ensayos de resistencia mecánica flexión, Dureza Shore C, Módulo de elasticidad y registro de pesos, y características longitudinales para su caracterización (Densidad).

3.4.1.4. Yeso con la dosis óptima de aditivo y con adición de Vermiculita a diferentes dosis.

Las dosificaciones en % de vermiculita utilizadas en los ensayos para analizar el comportamiento de los productos resultantes y que se observaron en la Tesis de Juan Manbuel Berna, se detallan en la siguiente tabla:

% Vermiculita Laminada (VL)	% Vermiculita Grano Medio (VH)
6	6
10	10
12	12
20	20
24	24
30	30
50	50
70	70

Tabla 39: Porcentajes de vermiculita añadida en los diferentes ensayos. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013).

Material	ρ (gr/l)
ρ yeso	1309
ρ agua	1000
ρ VL (laminada)	179,395
ρ VH	115,028
ρ VG	105,737

Tabla 40: Propiedades de los materiales base del mortero. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013).

Porcentaje de Volumen (litros)	gr de VL	gr de VH
6	1076,37	690,168
10	1793,95	1150,28
12	2152,74	1380,336
20	3587,9	2300,56

24	4305,48	2760,672
30	5381,85	3450,84
50	8969,75	5751,4
70	12557,65	8051,96

Tabla 41: Adiciones de Vermiculita Laminada (Elaboración Propia).

Las proporciones empeladas, de acuerdo con los resultados de Juan Manuel Berna han sido para la elaboración de pruebas en tres porcentajes que definimos en la siguiente tabla, referido a un saco de yeso de 17 kg como unidad de trabajo práctica.

Denominación	% vermiculita laminada	% vermiculita fina	Litros en volumen de vermiculita laminada	Litros en volumen de vermiculita laminada	Peso en gr de vermiculita laminada	Peso en gr de vermiculita fina
V6	50	50	3	3	538,185	345,08
V24	50	50	12	12	2152,74	1380,33
V48	50	50	24	24	4305,48	2760,67

Tabla 42: Dosificaciones empleadas.

3.1.1.1. Resumen del procedimiento de fabricación.

En este apartado, se resume la metodología para la fabricación de las probetas de mortero de yeso referentes a los ensayos de dosificación de aditivo seco:

- a) Amasado mecánico hasta la desaparición de grumos y actuación sobre el ensayo de tiempo de inicio de fraguado.
- b) Introducción del mortero resultante en los moldes correspondientes y posterior eliminación de burbujas de aire para evitar la formación de coqueas en el interior de las probetas.
- c) Fraguado y secado, durante el tiempo necesario hasta la finalización del fraguado, en condiciones de laboratorio de ensayo.
- d) Desmoldado de las probetas a las 24 horas después de su fabricación e introducción en estufa de secado durante 7 días.
- e) Introducción en horno de secado hasta masa constante y control de pesada y mediciones geométricas de las probetas. Primera actuación sobre el ensayo de "Densidad" de las probetas.
- f) Rectificación del mortero de yeso sobrante de la cara expuesta de las probetas.
- g) Proceso de ensayado de las probetas.

- h) Ensayo de Dureza escala Shore C.
- i) Ensayo a flexotracción en máquina universal de las diferentes probetas con los distintos resultados que ofrece la máquina.

El valor de la dureza consistiría en tomar la medida de tres pinchazos en cada una de las dos caras opuestas laterales, de forma que de los seis datos obtenidos se calcula la media, que será el valor final de la probeta.

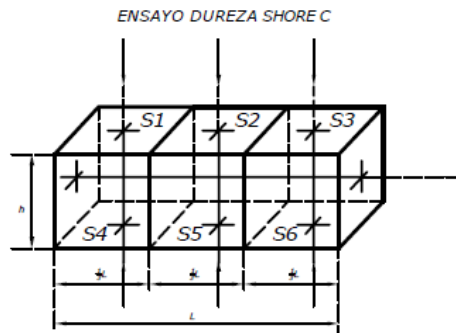


Figura 15: Ensayo normalizado de Dureza Shore C. Croquis de colocación de los pinchazos del durómetro. (UNE-EN-13279-2, 2006)

Todos los prefabricados han sido ensayados a **Flexotracción**. Se han llevado a cabo también según las normas UNE-EN 196-1 y UNE-EN 13279-2, 2006, en la máquina universal de ensayos, aplicados a cada probeta, de modo que cada tres probetas ensayadas (rotas) se obtiene un dato mediante la estimación de la media aritmética.

La medida, tanto de probetas, como de rodillos y entre los apoyos de los rodillos, vienen fijadas por las normas UNE-EN 196-1 y UNE-EN 13279-2, 2006. Probeta de 160 ± 1 mm, espesor de probetas de $40 \pm 0,2$ mm y entre apoyos de ensayo $100 \pm 0,5$ mm.

Los diámetros del cilindros de carga y de los de apoyo, están normalizados, y son de $10 \pm 0,5$ mm, tal y como se muestran en la Figura 16.

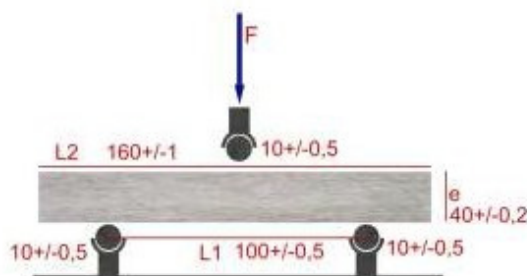
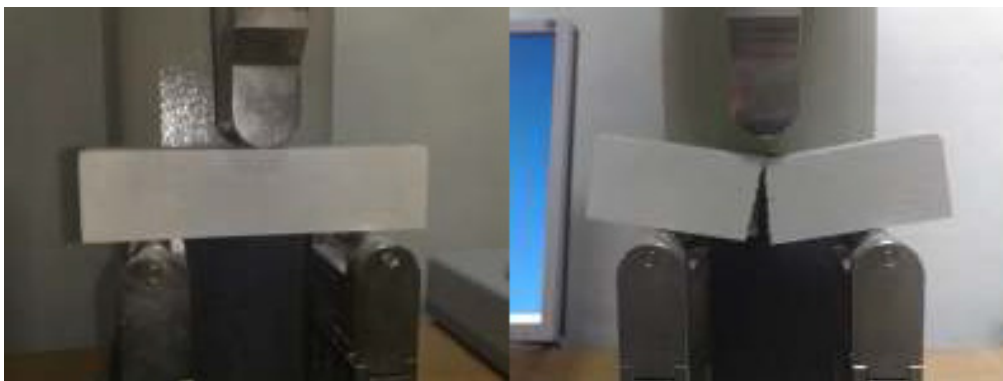


Figura 16: Ensayo normalizado (UNE-EN-13279-2, 2006). Croquis de colocación de rodillos.

Las probetas se definen con una anchura fija de 40 mm y una tolerancia de $\pm 0,2$ mm. El largo (L2) ha de tener una longitud de 160 mm y una tolerancia de ± 1 mm y el alto o profundidad (e) de 40,1 mm y una tolerancia de $\pm 0,1$ mm



Fotografía 26: Proceso de ensayo a Flexión en máquina universal de ensayos. (Tesis doctoral: Berná Serna, J.M. 2013).

Dichos valores de tensión de rotura nos los facilita directamente la máquina de ensayos.

La determinación del módulo de elasticidad E_m en N/mm, no viene recogido en la norma UNE EN 196-1, pero es la pendiente del diagrama de tensión-deformación que se efectúa en el ensayo de rotura. Para su evaluación, no se toma el valor total de dicha pendiente, sino que se estima un porcentaje entre los valores iniciales y finales del ensayo. Para este caso, se ha tomado como valor F1, el de la carga correspondiente a aproximadamente un 10% del valor de la carga máxima en Newton (N) que corresponde a un valor de a_1 de deformación en mm. F2, corresponde a aproximadamente un 40% del valor de la carga máxima y a_2 , es el valor de la deformación en dicho punto. El resto de valores ya han sido definidos.

3.4.2. Parte II de ensayos. Análisis y desarrollo de materiales frente a fuego de alta intensidad.

Esta segunda parte de ensayos, corresponde a la cuantificación de transmisión térmica (radiación) así como de fuego directo.

Para ello se fabrican, con procedimientos ya descritos, probetas de distinto espesor en dos formatos distintos, sobre placa de acero de 10 mm previamente taladrada en algunas zonas hasta su punto medio, y en otras en su totalidad, para la introducción de los termopares en la chapa y en el material a testar.

Se entiende que la temperatura máxima no puede llegar al límite indicado por la

norma indicada de procedimiento de ensayo de referencia EN 1363-2:2000.

También se pretenden testar los materiales que habitualmente se utilizan para la protección de recipientes que contienen gases y combustibles y que sirvan de referencia.

El poliuretano queda descartado de los ensayos desde el momento en que solo se puede emplear como aislante térmico ya que su punto de inflamación es tan bajo que no permite ensayos de alta temperatura o fuego.

3.1.1.1. Relación de ensayos.

1. Vidrio celular (concretamente el de la empresa Foamglas).
2. Lana mineral o Lana de roca.
3. Conglomerado de silicato cálcico con fibras.
4. Mortero sin vermiculita.
5. Mortero con Vermiculita V6.
6. Mortero con Vermiculita V24.
7. Mortero con Vermiculita V48.

Los ensayos, además, y sobre todo para los materiales a ensayar cuyo desarrollo pretende ser objeto de aplicación práctica, se refieren a varios espesores.

Ensayo de pared expuesta a 800 °C de temperatura

1. Vidrio celular.
2. Lana de roca
3. Silicato cálcico
4. Mortero sin vermiculita
5. Mortero con vermiculita

Ensayo de fuego directo a 1200 °C de temperatura

1. Vidrio celular (no puede ensayarse a fuego directo por descomposición)
2. Lana de roca
3. Silicato cálcico
4. Mortero sin vermiculita
5. Mortero con vermiculita

Aunque se ha tratado de unificar espesores, para los productos suministrados por los distintos proveedores, dichos espesores vienen condicionados por el fabricante

no pudiendo homogeneizar totalmente los resultados. Sin embargo para el desarrollo de los que pretende ser un nuevo material, los espesores los hemos condicionado a 3 cm y 6 cm de material efectivo.

3.4.3. Parte III de ensayos. Combinación de materiales.

Se pretende, así mismo, en base a los resultados, la posibilidad de buscar una combinación de varios materiales que puedan ser complementarios.

Los ensayos que se han realizado, han sido de un pack de vidrio celular de 5cm de espesor más mortero V24 de 3cm.

3.4.4. Tratamiento estadístico.

Como se indica, en una tesis de carácter tecnológico, la posibilidad de emplear repeticiones de ensayos, lleva a una cantidad ingente de datos. Es por tanto, que seleccionar el tratamiento estadístico para obtener unos resultados fiables, tendrá que acotarse a un experimento o un lote concreto. Se observa en la siguiente Tesis, que la aplicación del procedimiento estadístico, se realizará para el análisis de probetas con la cuantificación de aditivo más adecuado, y con el resultado de materiales y comportamiento térmico y/o fuego, que se observe más concluyente del trabajo.

Un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una o varias pruebas en las cuales se cambian las variables de entrada a un proceso, con el objetivo de observar e identificar las causas del cambio en las variables de salida (Montgomery, D. 1991).

Cuando en un experimento se intenta extraer información que está fuera del campo de la Física determinista, y en el que nos basamos en un gran número de datos e información que se corresponde con diversos factores y resultados de experimentación pertenecientes a una determinada población, se hace necesario el uso de la Estadística Aplicada a la experimentación.

Mendenhall (1991), establece que: la Estadística trata del diseño de experimentos o encuestas mediante muestras para obtener una cantidad determinada de información a un costo mínimo y del uso óptimo de esta información para hacer inferencias con respecto a la población. El objeto de la Estadística es deducir inferencias con respecto a una población a partir de la información de una muestra y proporcionar una media correspondiente para la exactitud de la inferencia.

Al realizar un experimento, aparentemente en condiciones iguales, no siempre

se obtienen los mismos resultados. Esto es debido a que existen una serie de condiciones o factores que el investigador no puede controlar. De esta manera se obtienen unos resultados que constituyen la muestra (número limitado de repeticiones realmente obtenidas) de un conjunto mayor denominado población (total de resultados posibles), intentando el experimentador, con ayuda de la Estadística, obtener conclusiones de la población a través de los datos de la muestra.

Esta información referida a la muestra irá por un lado dirigida a la obtención de valores medios de los resultados obtenidos así como de los errores (desviaciones respecto a la media); pero por otro lado, irá encaminada a realizar inferencias sobre si los errores obtenidos son debidos exclusivamente al azar, o por el contrario, pueden tener relación con otros factores diferentes a los que en la experimentación se hayan tenido en cuenta, además de otro tipo de deducciones.

Objetivamente, el proceso de análisis transforma una variable de entrada en una de salida o resultado. Algunas variables son controlables y otras no, en este caso se especifica cuales son:

- Determinar que variables tienen mayor influencia en la respuesta.
- Determinar el mejor valor de las variables controlables que generan una respuesta óptima.

En cualquier experimento, los resultados y conclusiones dependen de la forma en que los datos han sido recopilados.

Las ciencias empíricas, en general, dependen en gran medida de la demostración de la existencia de efectos a partir del análisis estadístico de datos (Batanero C, 2000).

La estadística se ha convertido en un método efectivo para describir con exactitud los valores de diferentes datos, sirviendo como herramienta para relacionar y analizar dichos datos.

Los diseños de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés, y si existe influencia de algún factor, tratar de cuantificarla.

La metodología del diseño de experimentos se basa propiamente en la experimentación. Es conocido que si se repite un experimento, en condiciones indistinguibles, los resultados presentan variabilidad, pudiendo ser grande o pequeña.

La variabilidad existente entre las unidades experimentales se denomina error experimental. En el contexto estadístico la palabra error se utiliza en sentido técnico no

peyorativo, refiriéndose a variaciones que a menudo son inevitables (Box, Hunter & Stuart, 1989).

Los resultados o datos experimentales son necesarios para la estadística pues permiten estimar de un modo adecuado las medias a ensayar y así poder realizar pruebas de significación basadas en el error experimental. Con estas pruebas de significación podremos estimar la probabilidad de que las diferencias encontradas, entre los distintos comportamientos, sean o no debidas al azar.

El análisis de los datos lo hemos separado o dividido en dos fases:

En primer lugar definir el **tamaño del experimento**, definiéndose como el número total de observaciones, réplicas o repeticiones que debemos realizar.

Cochran y Cox (1991), presentaron una fórmula o método para determinar el número de repeticiones (r) con una aproximación o probabilidad dada (β), requerida para obtener un resultado significativo.

Esta expresión es:

$$r \geq 2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\delta} \right)^2 \cdot (t_1 + t_2) \quad (4)$$

Siendo:

σ , coeficiente de variación del conjunto de observaciones.

δ , diferencia verdadera entre valores medios que se desea detectar expresada en % de la media general.

t_1 , es el valor de la t de Student para la prueba de significancia.

t_2 , es el valor de la distribución de la t de Student correspondiente a la probabilidad de $2 \cdot (1 - \beta)$, siendo β el poder de la prueba.

Aunque la norma UNE EN 196-1 (2005) fija el número de repeticiones para calcular el número de observaciones que se deben de tomar para poder alcanzar los objetivos del experimento primeramente se realizan mediante tanteo varios ensayos en función de los grados de libertad y las repeticiones, por lo que emplearemos la siguiente ecuación simplificada.

$$r \geq \frac{4 \cdot \sigma^2}{\delta^2} \quad (5)$$

Siendo:

r: número de repeticiones de la muestra.

σ : desviación típica o estándar de los datos de la variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Quedando dentro de la seguridad, para $0,90 \leq \beta \leq 0,95$ y $t_1 + t_2 \leq 2$.

δ : máximo error permitido respecto de la media con una probabilidad del 95% de no ser superado, y que es elegido en función de la naturaleza de las experimentaciones realizadas

La segunda fase ha consistido en realizar la estadística descriptiva de los datos muestrales para cada uno del conjunto de ensayos, así como la relación o correlación entre ellos.

El primer análisis realizado a los resultados obtenidos, aparte de la determinación de los parámetros muestrales descriptivos básicos, tiene relación con el estudio de su mayor o menor ajuste a la curva normal, así como a la detección de aquellos resultados que, por su excesiva desviación de la media, pueden ser considerados como erróneos o atípicos, y por tanto ser descartados del análisis. Para ello se han realizado los diagramas de cajas de los valores medios de cada serie, por grupos, en el que se identifican dichos valores atípicos.

Para detectar el ajuste a normalidad, se ha empleado, por un lado, el método gráfico, muy intuitivo, mediante los diagramas de funciones transformadas Q-Q normales entre variable independiente (factor) y la variable dependiente, para cada serie, así como la superposición de los diagramas de frecuencias con la curva normal. Por otro lado, y con el mismo objetivo, se ha utilizado también la prueba de contraste con el estadístico Z de Kolmogorov-Smirnov (diagrama K-S de normalidad) con una significación del 95%.

Se ha realizado la regresión lineal con su correspondiente coeficiente de correlación R^2 , que nos permite predecir el comportamiento del material en esa zona para cada una de las series.

En la mayor parte de los experimentos se estudian los efectos de una o varias variables independientes, que pueden ser controladas, denominadas *factores*, sobre una o varias respuestas dadas, o variables dependientes. A veces las variaciones en la respuesta pueden deberse a alteraciones desconocidas de otras variables que no

estamos controlando, más que al propio carácter aleatorio del experimento. Esta circunstancia es la que se pretende advertir precisamente con el denominado “Análisis de la varianza” (ANOVA).

El análisis de la varianza trata de analizar la variación en un evento, y asignar las partes o componentes de esta variación, a cada uno de los factores o variables independientes que la causan, incluso indagando sobre si existe alguna variable desconocida que pudiera estar “alterando” de alguna manera los resultados del experimento y por tanto estuviese restando aleatoriedad al mismo. Cuando una variable está muy relacionada con la respuesta dada en el experimento, su “porción” de la varianza está muy exagerada.

En nuestro caso, se han utilizado las diferencias de medias con significación mayor del 95% para estudiar si existe realmente causa efecto entre factores y resultados, o si la variabilidad se debe al azar, mediante el tratamiento de ANOVA. Para el caso de que las varianzas entre las series analizadas sean distintas, lo que comprobamos con el estadístico de Levene (con significación del 95%), aplicaremos la prueba robusta de igualdad de medias de Welch, con idéntica significación.

Con el objeto de contrastar diferencias de medias dos a dos entre las distintas series de resultados (al disponer de más de dos series por grupo) se ha empleado el test de *comparaciones múltiples* de Tukey, siempre con significación del 95%. Por su parte, en la identificación de comportamientos semejantes entre los distintos resultados obtenidos se han aplicado los análisis de Tukey y Duncan, de los que podemos extraer diversas conclusiones en función de su adaptación a los factores estudiados.

El software empleado para el tratamiento estadístico ha sido el programa SPSS 17 para Windows, usando manual de Camacho, J. (2002).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS



4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.

Como ya se ha expuesto, los resultados atienden a tres tipos de ensayo que diferenciamos como parte I, II y III.

1. Parte I de ensayos. Estudio del aditivo seco y ajuste de la dosificación del mismo.
2. Parte II de ensayos. Análisis y desarrollo de materiales frente a fuego de alta intensidad.
3. Parte III de ensayos. Combinación de materiales.

4.1. PARTE I. Estudio del aditivo seco y ajuste de la dosificación del mismo.

4.1.1. Evaluación del proceso de fabricación de probetas de yeso en laboratorio. Comportamiento del sulfato cálcico aditivado a distintas dosis.

Las distintas dosificaciones de aditivo a utilizar se muestran en la siguiente tabla, y son referidas al contenido en yeso seco en peso.

ADITIVO (gr)	YESO (gr)	AGUA (gr)
1,5	2.000,00	1.000,00
0.5	2.000,00	1.000,00
0.3	2.000,00	1.000,00
0.25	2.000,00	1.000,00
0.20	2.000,00	1.000,00
0.15	2.000,00	1.000,00
0.12	2.000,00	1.000,00
0,1	2.000,00	1.000,00

Tabla 43: Dosificaciones empleadas de aditivo seco. Test de ensayos.

Como se ha indicado, la proporción del contenido de aditivo, independiente de la dosificación expuesta en la patente de referencia, se ajusta al tipo de yeso. La proporción de inertes o la pureza del mismo, hará variar los resultados.

Los resultados del ensayo normalizado empleando la máquina universal de ensayos, son los siguientes:

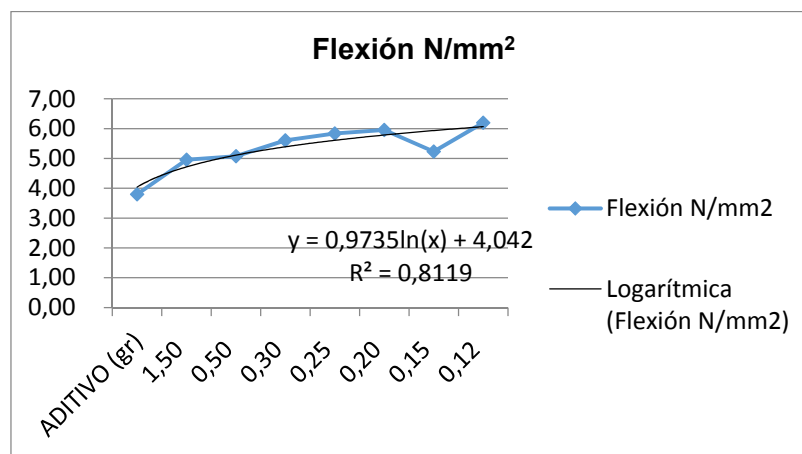
Dosificación	Dureza Shore C		Densidad Kg/m ³		Flexión N/mm ²		Elasticidad N/mm ²	
	Media	Desv. +/-	Media	Desv. +/-	Media	Desv. +/-	Media	Desv. +/-
ADITIVO (gr)								
1,50	87,04	0,62	1.371,57	9,80	3,80	0,26	553,22	18,17
0.5	89,88	0,85	1.365,06	3,59	4,96	0,06	565,53	25,39
0.3	89,67	0,40	1.362,97	3,80	5,07	0,32	604,77	53,00
0.25	90,15	1,01	1.362,18	2,46	5,61	0,10	609,77	24,58
0.20	89,29	1,11	1.363,88	4,38	5,84	0,26	592,18	8,20
0.15	89,96	1,12	1.365,15	1,51	5,96	0,08	638,48	13,20
0.12	90,10	0,75	1.361,99	3,44	5,23	0,19	638,34	11,12
0,10	89,83	0,45	1.365,06	3,59	6,20	0,13	682,31	24,45

Tabla 44: Resultados de propiedades mecánicas del mortero aditivado.

La cantidad de aditivo de 0,1 gr por 2 kg de yeso en peso, constituye el mejor resultado; no obstante la manipulación de esa mínima cantidad de aditivo en la mezcla, dificulta su empleo en laboratorio; el considerar más cantidad de aditivo, sin embargo, a pesar de conseguir menor resistencia, facilita su manejo. Finalmente, se establece en la metodología de trabajo la cantidad de 0.5 gr para poder mezclar adecuadamente, si bien, con una mezcladora de palas que garantice la dispersión, trabajar con un valor de 0,1gr sería el óptimo resultado con resistencia a flexión de 6,20 N/mm², que comparada con las del yeso sin aditivar normalizadas en torno a 1,2 N/mm², constituye un incremento más que importante en la aplicación del mortero.

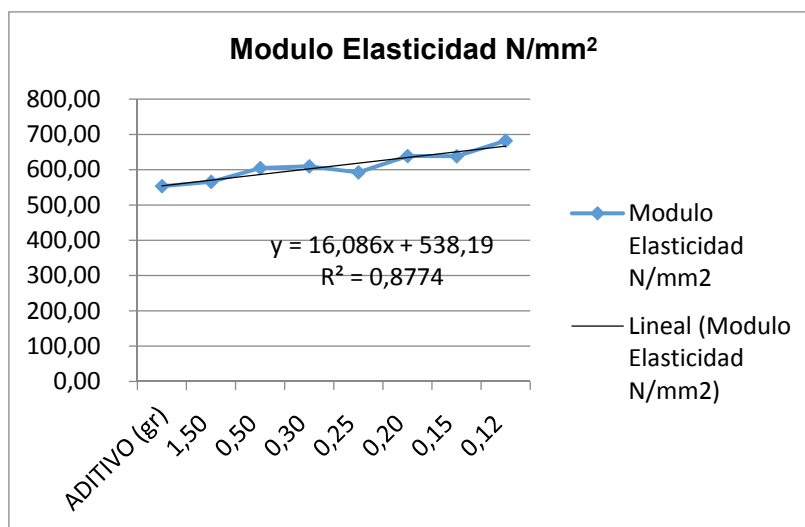
Los valores de Dureza Shore, se mantiene todos superiores a 80 uds, y alcanzan un valor de casi 90 en casi todos los ensayos. La dureza superficial desde el punto de vista del comportamiento a fuegos de alta intensidad no es un valor demasiado importante, pero sí lo es para la colocación de revestimientos superficiales adosados del tipo lámina de aluminio, o pinturas de protección para exteriores.

Si nos centramos en la resistencia a flexión, posiblemente el parámetro que más nos interesa de todos, además del módulo de elasticidad que nos indica la ductilidad del material.



Grafica 1: Evolución de la cantidad de aditivo con la resistencia a flexión.

Observamos la evolución de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,8.



Grafica 2: Evolución de la cantidad de aditivo con el módulo de elasticidad.

4.1.2. Estadística procesada con SPS 17 de la evaluación de aditivo seco.

Se evalúan dos propiedades consideradas según nuestro criterio como las más interesantes: Resistencia a flexión y módulo de elasticidad.

4.1.1.1. Resistencia a flexión. Descriptores. Valores extremos. Pruebas de normalidad.

Los valores medios de la serie, Desviación Estándar y el correspondiente Coeficiente de Variación, como cociente de ambos están reflejados en la misma tabla, con lo que se puede ver, a partir de los descriptores estadísticos que prácticamente no existe dispersión en los resultados obtenidos para cada una de las proporciones.

Aditivo		Estadístico	Error típ.
Resistencia a flexión	0,10	Media	6,1975
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	5,9982
		Límite superior	6,3968
		Media recortada al 5%	6,2011
		Mediana	6,2300
		Varianza	0,016
		Desv. típ.	0,12527
		Mínimo	6,02
		Máximo	6,31

	Rango	0,29	
	Amplitud intercuartil	0,23	
	Asimetría	-1,364	1,014
	Curtosis	2,210	2,619
0.12	Media	5,2325	,09295
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	4,9367	
	Límite superior	5,5283	
	Media recortada al 5%	5,2311	
	Mediana	5,2200	
	Varianza	0,035	
	Desv. típ.	0,18590	
	Mínimo	5,02	
	Máximo	5,47	
	Rango	0,45	
	Amplitud intercuartil	0,35	
	Asimetría	0,387	1,014
	Curtosis	1,081	2,619
0.15	Media	5,9575	,03902
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	5,8333	
	Límite superior	6,0817	
	Media recortada al 5%	5,9600	
	Mediana	5,9800	
	Varianza	0,006	
	Desv. típ.	0,07805	
	Mínimo	5,85	
	Máximo	6,02	
	Rango	0,17	
	Amplitud intercuartil	0,14	
	Asimetría	-1,197	1,014
	Curtosis	0,549	2,619
0.20	Media	5,8375	,12809
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	5,4299	
	Límite superior	6,2451	
	Media recortada al 5%	5,8417	
	Mediana	5,8750	
	Varianza	0,066	
	Desv. típ.	0,25617	
	Mínimo	5,50	
	Máximo	6,10	
	Rango	0,60	
	Amplitud intercuartil	0,49	
	Asimetría	-0,753	1,014

	Curtosis	0,343	2,619	
0.25	Media	5,0750	,04856	
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	4,9205		
	Límite superior	5,2295		
	Media recortada al 5%	5,0733		
	Mediana	5,0600		
	Varianza	0,009		
	Desv. típ.	0,09713		
	Mínimo	4,98		
	Máximo	5,20		
	Rango	0,22		
	Amplitud intercuartil	0,18		
	Asimetría	0,688	1,014	
	Curtosis	-,946	2,619	
	0.3	Media	5,6075	,16296
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	5,0889	
Límite superior		6,1261		
Media recortada al 5%		5,6122		
Mediana		5,6500		
Varianza		0,106		
Desv. típ.		0,32592		
Mínimo		5,20		
Máximo		5,93		
Rango		0,73		
Amplitud intercuartil		0,62		
Asimetría		-0,544	1,014	
Curtosis		-1,714	2,619	
0.5		Media	4,9600	,02944
Intervalo de confianza para la media al 95%		Límite inferior	4,8663	
	Límite superior	5,0537		
	Media recortada al 5%	4,9600		
	Mediana	4,9600		
	Varianza	0,003		
	Desv. típ.	0,05888		
	Mínimo	4,90		
	Máximo	5,02		
	Rango	0,12		
	Amplitud intercuartil	0,11		
	Asimetría	0,000	1,014	
	Curtosis	-4,891	2,619	
	1.5	Media	3,8000	,13070
	Intervalo de confianza	Límite inferior	3,3840	

para la media al 95%	Límite superior	4,2160	
	Media recortada al 5%	3,8067	
	Mediana	3,8600	
	Varianza	0,068	
	Desv. tít.	0,26141	
	Mínimo	3,46	
	Máximo	4,02	
	Rango	0,56	
	Amplitud intercuartil	0,48	
	Asimetría	-0,826	1,014
	Curtosis	-1,341	2,619

Tabla 45: Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo para el parámetro de resistencia a flexión.

El ajuste a normalidad de los resultados obtenidos de cada serie de ensayos se ha realizado por un lado mediante métodos gráficos (Gráficos Q-Q normal para la resistencia a flexión), como mediante métodos paramétricos, concretamente mediante la prueba K-S de normalidad (estadístico Z de Kolmogorov-Smirnov) cuyos resultados se muestran en las gráficas y tablas siguientes, poniéndose de manifiesto para todas las dosificaciones el ajuste a normalidad de dichos resultados, al obtenerse un nivel de significación $\geq 0,05$

Aditivo	Kolmogorov-Smirnova	
	Estadístico	gl
Resistencia a flexión 0,10	0,290	4
0.12	0,213	4
0.15	0,249	4
0.20	0,192	4
0.25	0,214	4
0.3	0,223	4
0.5	0,252	4
1.5	0,266	4

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla 46: Pruebas de normalidad 1.

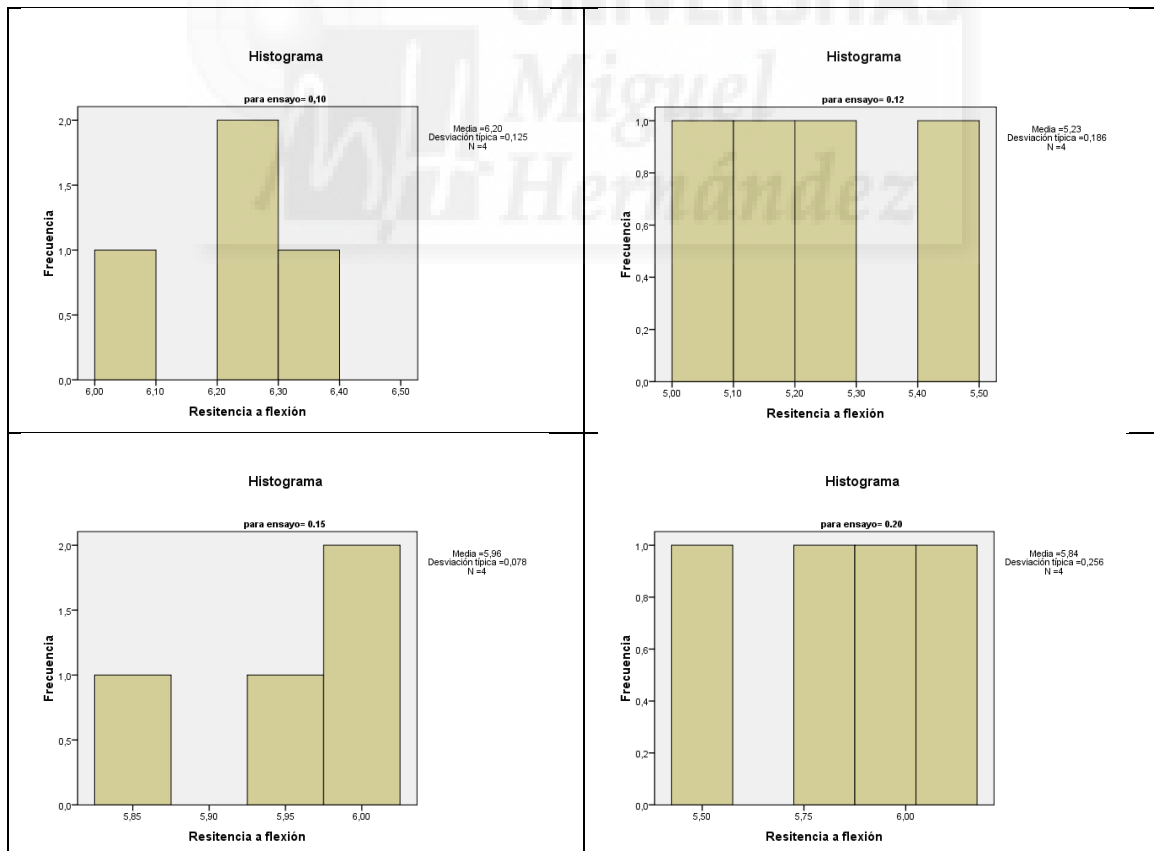
Aditivo	Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk		
	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a flexión 0,10	.	0,901	4	,437
0.12	.	0,983	4	,920
0.15	.	0,880	4	,339
0.20	.	0,971	4	,850
0.25	.	0,956	4	,755
0.3	.	0,955	4	,746
0.5	.	0,882	4	,348
1.5	.	0,894	4	,402

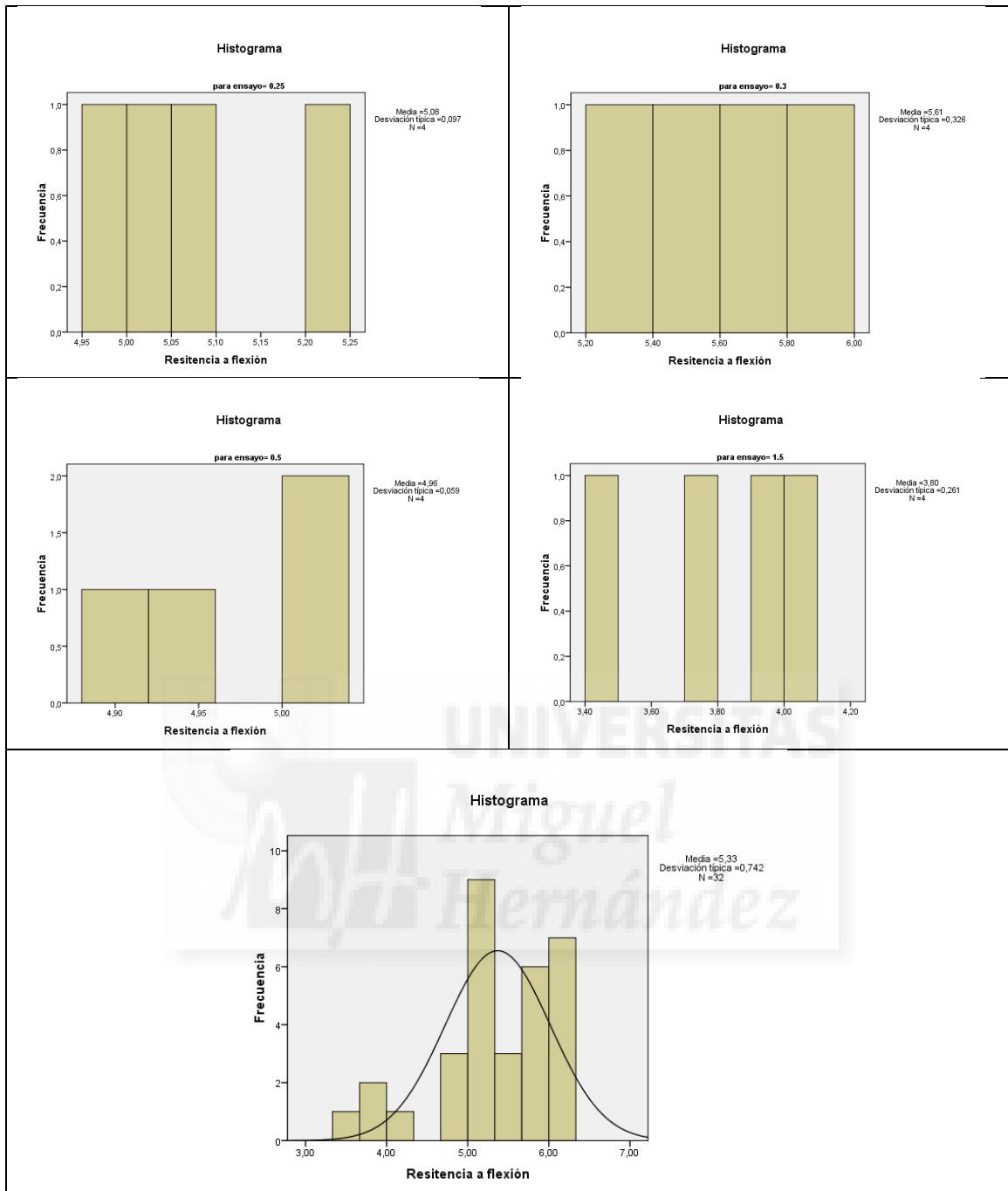
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla 47: Pruebas de normalidad 2.

4.1.1.2. Histogramas

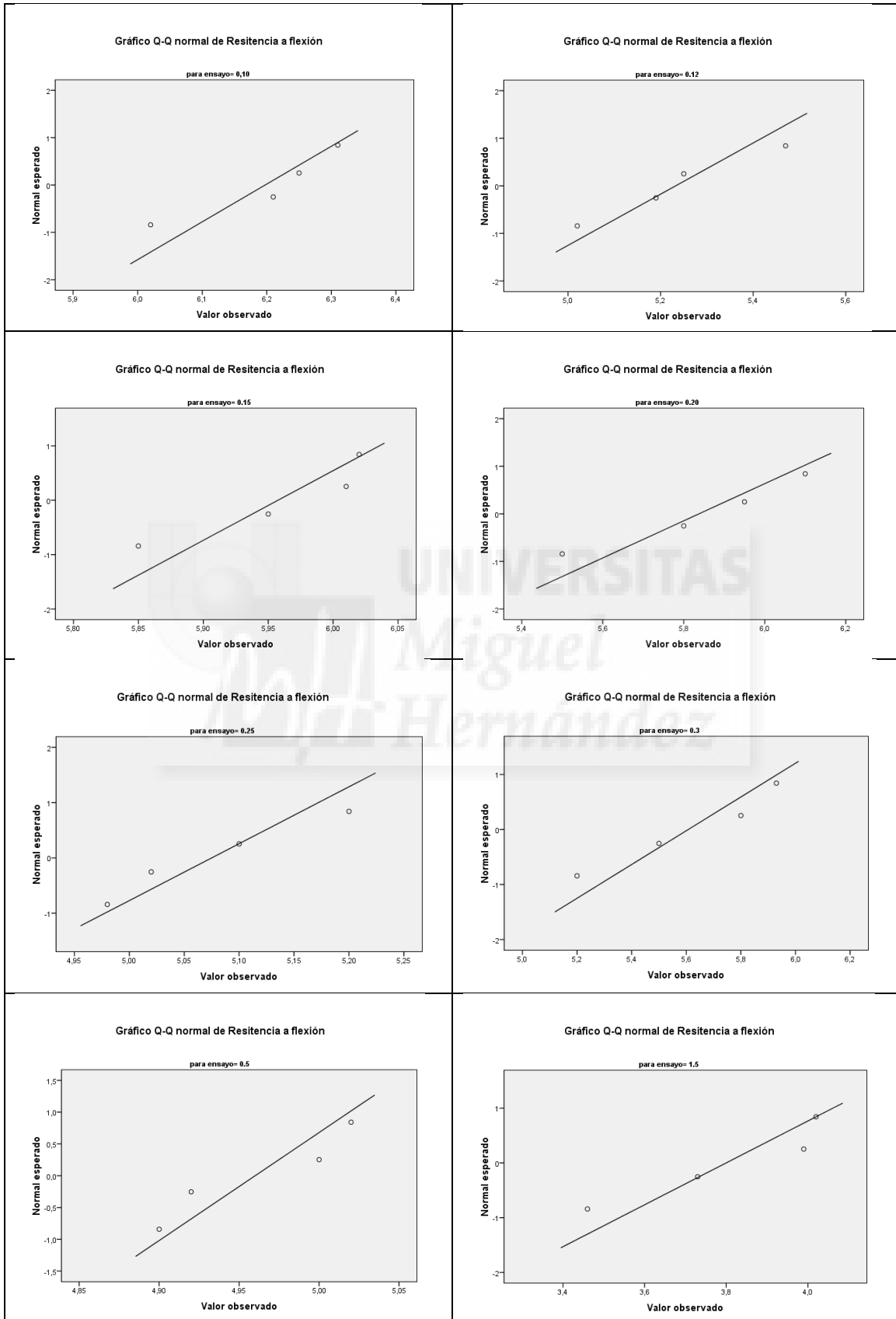
Se acompañan a continuación los histogramas de frecuencias; se ajustan con el contraste de la curva normal.





Grafica 3: Histogramas de frecuencias de las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno y general del grupo.

4.1.1.3. Gráficos Q-Q normales

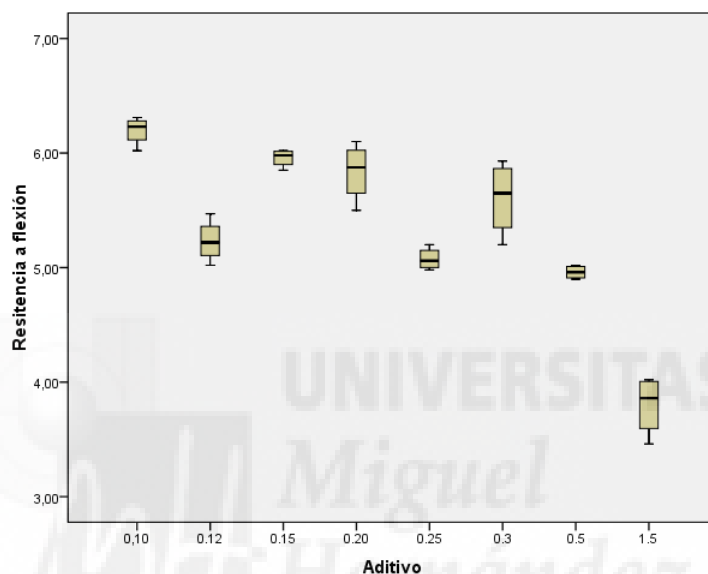


Gráfica 4: Gráficas Q-Q de ajuste a normalidad de las distintas concentraciones de aditivo.

Se pone de manifiesto que para todas las concentraciones, se produce ajuste a normalidad de dichos resultados, al obtenerse un nivel de significación $\geq 0,05$.

4.1.1.4. Gráficos Q-Q normales sin tendencia

Se ha tratado de identificar posibles resultados atípicos situados en las zonas muy extremas de los histogramas de frecuencias de los resultados de los ensayos. En la Gráfica donde se representan las gráficas de cajas de los resultados de Resistencia flexión de las ocho concentraciones, en las que se aprecia cómo no existen, para las mismas, resultados que puedan considerarse anómalos, y por tanto descartables.



Gráfica 5: Gráfica de cajas para las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno respecto al parámetro de Flexión.

4.1.1.5. Módulo elasticidad

Ahora la variable estudiada, es el módulo de elasticidad para las distintas concentraciones de aditivo.

Los valores medios de la serie, Desviación Estándar y el correspondiente Coeficiente de Variación, como cociente de ambos están reflejados en la misma tabla. Del mismo modo que en el caso anterior de resistencia a flexión, se observa que a partir de los descriptores estadísticos que no existe dispersión a tener en consideración en los resultados obtenidos para cada una de las proporciones.

Aditivo		Estadístico	Error típ.	
Módulo elasticidad 0,10	Media	682,3125	12,22481	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior		643,4077
		Límite superior		721,2173
	Media recortada al 5%	682,6667		
	Mediana	685,5000		
	Varianza	597,784		
	Desv. típ.	24,44962		
	Mínimo	650,00		
	Máximo	708,25		
	Rango	58,25		
	Amplitud intercuartil	46,34		
	Asimetría	-,715		1,014
	Curtosis	,939		2,619
	0.12	Media		638,3375
Intervalo de confianza para la media al 95%		Límite inferior	620,6409	
		Límite superior	656,0341	
Media recortada al 5%		637,9811		
Mediana		635,1300		
Varianza		123,685		
Desv. típ.		11,12138		
Mínimo		628,84		
Máximo		654,25		
Rango		25,41		
Amplitud intercuartil		20,00		
Asimetría		1,473	1,014	
Curtosis		2,390	2,619	
0.15		Media	638,4850	6,60115
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	617,4772	
		Límite superior	659,4928	
	Media recortada al 5%	638,3872		
	Mediana	637,6050		
	Varianza	174,301		
	Desv. típ.	13,20230		
	Mínimo	625,15		
	Máximo	653,58		
	Rango	28,43		
	Amplitud intercuartil	25,13		
	Asimetría	,221	1,014	
	Curtosis	-3,541	2,619	
	0.20	Media	592,1850	
Intervalo de confianza para la media al 95%		Límite inferior	579,1356	

	para la media al 95%	Límite superior	605,2344	
		Media recortada al 5%	592,2856	
		Mediana	593,0900	
		Varianza	67,254	
		Desv. típ.	8,20084	
		Mínimo	581,33	
		Máximo	601,23	
		Rango	19,90	
		Amplitud intercuartil	15,17	
		Asimetría	-,648	1,014
		Curtosis	1,668	2,619
0.25		Media	609,7725	12,28947
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	570,6619	
		Límite superior	648,8831	
		Media recortada al 5%	609,6400	
		Mediana	608,5800	
		Varianza	604,124	
		Desv. típ.	24,57894	
		Mínimo	584,92	
		Máximo	637,01	
		Rango	52,09	
		Amplitud intercuartil	46,57	
		Asimetría	,146	1,014
		Curtosis	-4,029	2,619
0.3		Media	604,7725	26,49854
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	520,4423	
		Límite superior	689,1027	
		Media recortada al 5%	605,9417	
		Mediana	615,2950	
		Varianza	2808,691	
		Desv. típ.	52,99708	
		Mínimo	534,92	
		Máximo	653,58	
		Rango	118,66	
		Amplitud intercuartil	99,85	
		Asimetría	-,862	1,014
		Curtosis	-,579	2,619
0.5		Media	565,5325	12,69560
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	525,1294	
		Límite superior	605,9356	
		Media recortada al 5%	565,6750	
		Mediana	566,8150	

	Varianza	644,713	
	Desv. típ.	25,39119	
	Mínimo	534,92	
	Máximo	593,58	
	Rango	58,66	
	Amplitud intercuartil	49,08	
	Asimetría	-,237	1,014
	Curtosis	-1,306	2,619
1.5	Media	553,2200	9,08585
	Intervalo de confianza para la media al 95%		
	Límite inferior	524,3048	
	Límite superior	582,1352	
	Media recortada al 5%	552,9161	
	Mediana	550,4850	
	Varianza	330,210	
	Desv. típ.	18,17169	
	Mínimo	534,92	
	Máximo	576,99	
	Rango	42,07	
	Amplitud intercuartil	34,63	
	Asimetría	,738	1,014
	Curtosis	-,117	2,619

Tabla 48: Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo para el parámetro de módulo de elasticidad.

Continuamos con el estudio del ajuste a normalidad de los resultados obtenidos de cada serie de ensayos. Del mismo modo que en el caso anterior, se sigue la misma pauta de análisis; se ha realizado por un lado mediante métodos gráficos (Gráficos Q-Q normal para el módulo de elasticidad), como mediante métodos paramétricos, concretamente mediante la prueba K-S de normalidad (estadístico Z de Kolmogorov-Smirnov) cuyos resultados se muestran en las gráficas y tablas siguientes, poniéndose de manifiesto para todas las dosificaciones el ajuste a normalidad de dichos resultados, al obtenerse un nivel de significación $\geq 0,05$

	Aditivo	Kolmogorov-Smirnova	
		Estadístico	gl
Módulo elasticidad	0,10	,216	4
	0.12	,298	4
	0.15	,240	4
	0.20	,270	4
	0.25	,245	4

0.3	,229	4
0.5	,174	4
1.5	,188	4

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla 49: Pruebas de normalidad 1

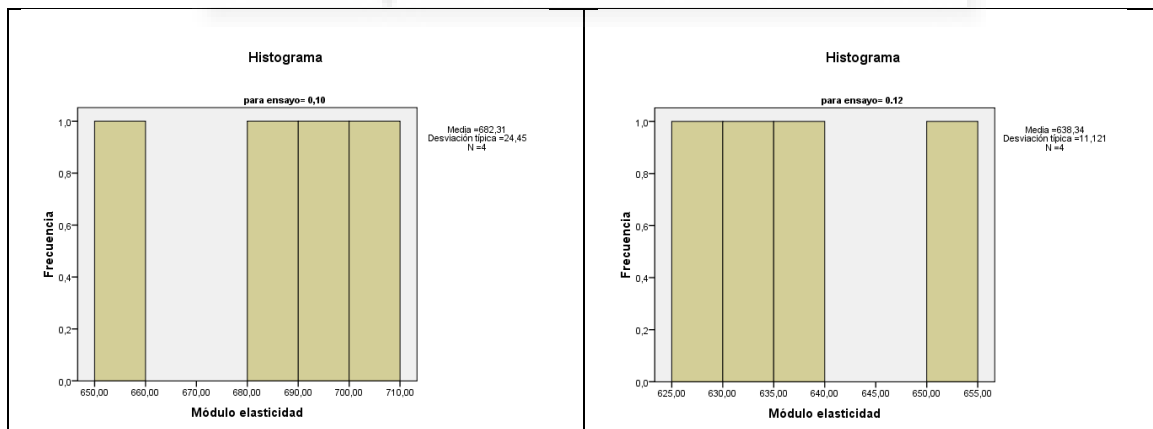
Aditivo	Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk		
	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Módulo elasticidad 0,10	.	,974	4	,867
0,12	.	,882	4	,346
0,15	.	,931	4	,603
0,20	.	,949	4	,712
0,25	.	,918	4	,526
0,3	.	,935	4	,626
0,5	.	,987	4	,944
1,5	.	,968	4	,827

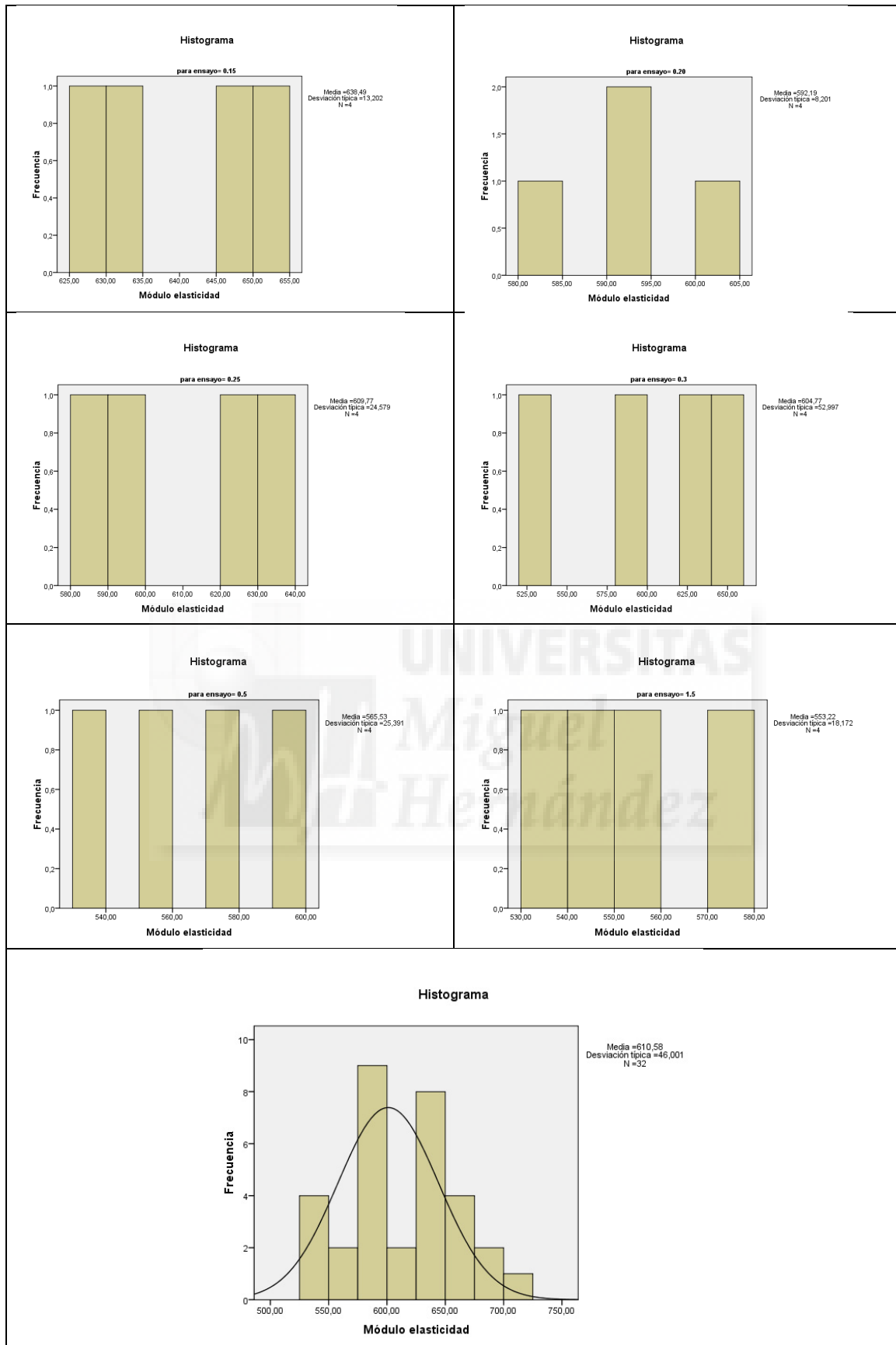
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla 50: Pruebas de normalidad 2

4.1.1.6. Histogramas

Se acompañan a continuación los histogramas de frecuencias; se indica que se ajustan con el contraste de la curva normal.

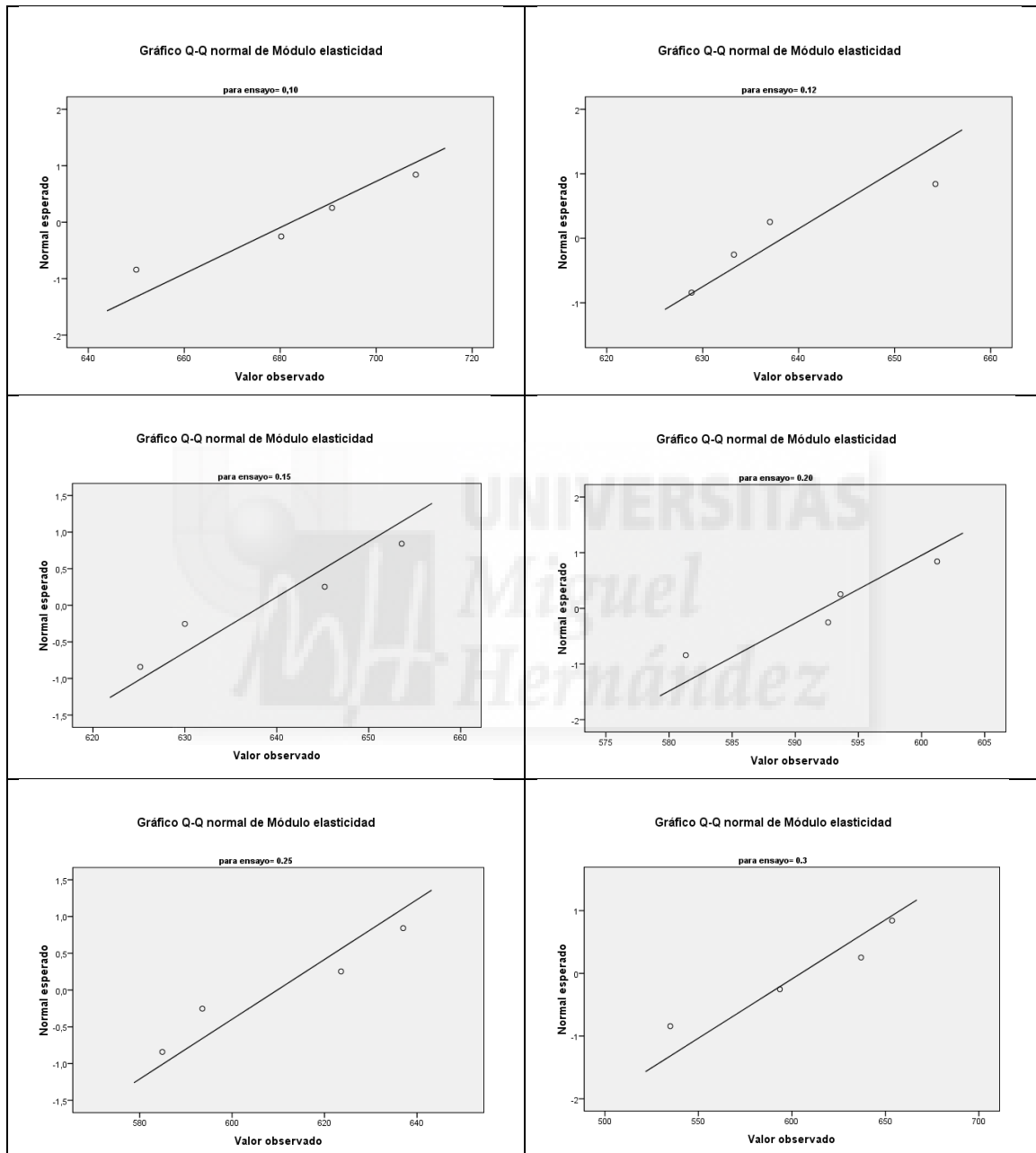


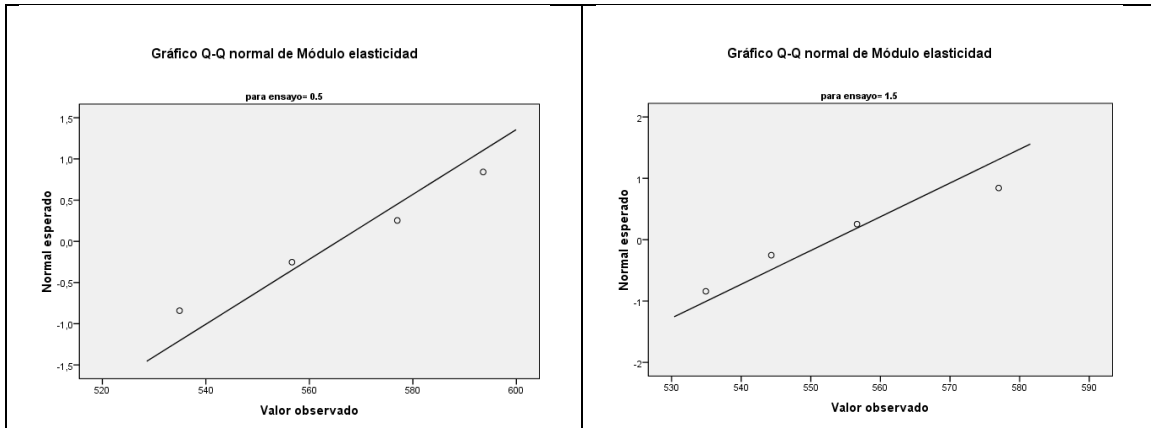


Grafica 6: Histogramas de frecuencias de las diferentes concentraciones de aditivo con yeso y general.

4.1.1.7. Gráficos Q-Q normales

Se pone de manifiesto que para todas las concentraciones, se produce ajuste a normalidad de dichos resultados, al obtenerse un nivel de significación $\geq 0,05$.

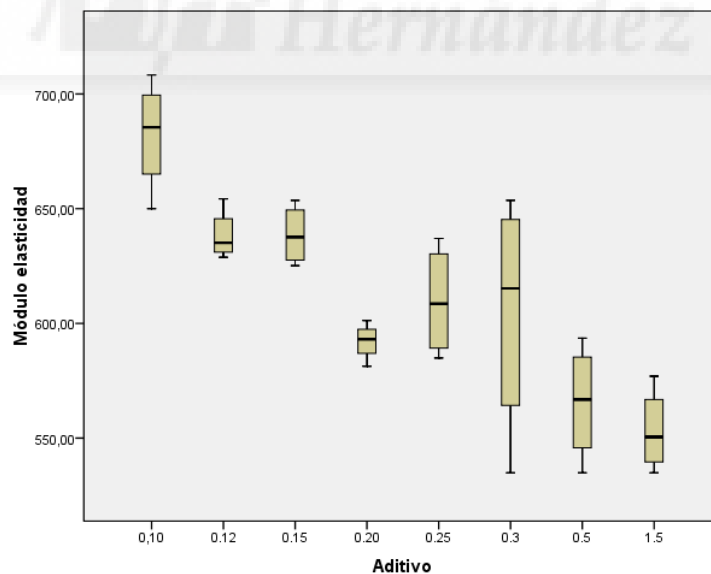




Gráfica 7: Gráficas Q-Q de ajuste a normalidad de las distintas concentraciones de aditivo.

4.1.1.8. Gráficos Q-Q normales sin tendencia

Se ha tratado de identificar posibles resultados atípicos situados en las zonas muy extremas de los histogramas de frecuencias de los resultados de los ensayos. En la Gráfica donde se representan las gráficas de cajas de los resultados de Resistencia flexión de las ocho concentraciones, en las que se aprecia cómo no existen, para las mismas, resultados que puedan considerarse anómalos, y por tanto descartables.



Gráfica 8: Gráfica de cajas para las diferentes concentraciones de aditivo con yeso moreno respecto al parámetro de módulo de elasticidad.

4.1.1.9. ANOVA de un factor.

Comenzaremos con el análisis de la resistencia a flexión y posteriormente el módulo de elasticidad. Se observan en el procedimiento, si hay diferencias significativas de varianzas según el estadístico de Levene, por lo que analizamos, además de ANOVA, la prueba de igualdad de medias de Welch.

Resistencia a flexión

					Intervalo de confianza para la media al 95%	
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Límite inferior	Límite superior
1	4	3,8000	,26141	,13070	3,3840	4,2160
2	4	4,9600	,05888	,02944	4,8663	5,0537
3	4	5,6075	,32592	,16296	5,0889	6,1261
4	4	5,0750	,09713	,04856	4,9205	5,2295
5	4	5,8375	,25617	,12809	5,4299	6,2451
6	4	5,9575	,07805	,03902	5,8333	6,0817
7	4	5,2325	,18590	,09295	4,9367	5,5283
8	4	6,1975	,12527	,06263	5,9982	6,3968
Total	32	5,3334	,74185	,13114	5,0660	5,6009

Tabla 51: Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Resistencia a flexión

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2,688	7	24	,033

Tabla 52: Prueba de homogeneidad de varianzas para las diferentes concentraciones de aditivo.

Como resultado, se aprecia que sí hay diferencias significativas de varianzas según el anterior estadístico de Levene, por lo que analizamos, además de ANOVA, la prueba de igualdad de medias de Welch.

ANOVA

Resistencia a flexión

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	16,132	7	2,305	59,585	,000
Intra-grupos	,928	24	,039		
Total	17,061	31			

Tabla 53: ANOVA de las series para las diferentes concentraciones de aditivo.

Pruebas robustas de igualdad de las medias

Resistencia a flexión

	Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
Welch	80,953	7	10,054	,000

a. Distribuidos en F asintóticamente.

Tabla 54: Prueba robusta de igualdad de medias de Welch para las diferentes concentraciones de aditivo.

Como puede observarse, tanto en la prueba robusta de Welch, como en la tabla de ANOVA, existen diferencias significativas entre alguna de las medias ($p \leq 0,000 \leq 0,05$) de cada concentración de aditivo.

4.1.1.10. Pruebas post hoc

Por otra parte, para poder detectar la existencia de series con comportamientos homogéneos se ha realizado la prueba de homogeneidad de subconjuntos mediante el método de Duncan.

Subconjuntos homogéneos

Resistencia a flexión

Duncan^a

Tipo. ensayo	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	4	3,8000				
2	4		4,9600			
4	4		5,0750			
7	4		5,2325			
3	4			5,6075		
5	4			5,8375	5,8375	
6	4				5,9575	5,9575
8	4					6,1975
Sig.		1,000	,075	,111	,397	,097

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,000.

Tabla 55: Prueba de subconjuntos homogéneos entre las distintas concentraciones de aditivo.

Como se puede apreciar en la Tabla, con el método Duncan se localizan cinco comportamientos diferenciados entre las ocho dosificaciones de aditivo para la resistencia a flexión.

4.1.1.11. ANOVA de un factor

Seguimos con el análisis del módulo de elasticidad. Se observan en el procedimiento, sí hay diferencias significativas de varianzas según el estadístico de Levene, por lo que analizamos, además de ANOVA, la prueba de igualdad de medias de Welch.

Descriptivos

Módulo elasticidad

					Intervalo de confianza para la media al 95%	
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Límite inferior	Límite superior
1	4	553,2200	18,17169	9,08585	524,3048	582,1352
2	4	565,5325	25,39119	12,69560	525,1294	605,9356
3	4	604,7725	52,99708	26,49854	520,4423	689,1027
4	4	609,7725	24,57894	12,28947	570,6619	648,8831
5	4	592,1850	8,20084	4,10042	579,1356	605,2344
6	4	638,4850	13,20230	6,60115	617,4772	659,4928
7	4	638,3375	11,12138	5,56069	620,6409	656,0341
8	4	682,3125	24,44962	12,22481	643,4077	721,2173
Total	32	610,5772	46,00139	8,13197	593,9919	627,1625

Tabla 56: Descriptores de las distintas concentraciones de aditivo.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Módulo elasticidad

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3,314	7	24	,013

Tabla 57: Prueba de homogeneidad de varianzas para las diferentes concentraciones de aditivo.

Como resultado, se aprecia que sí hay diferencias significativas de varianzas según el anterior estadístico de Levene, por lo que analizamos, además de ANOVA, la prueba de igualdad de medias de Welch.

ANOVA

Módulo elasticidad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	49547,685	7	7078,241	10,583	,000
Intra-grupos	16052,285	24	668,845		

ANOVA

Módulo elasticidad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	49547,685	7	7078,241	10,583	,000
Intra-grupos	16052,285	24	668,845		
Total	65599,970	31			

Tabla 58: ANOVA de las series para las diferentes concentraciones de aditivo.

Pruebas robustas de igualdad de las medias

Módulo elasticidad

	Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
Welch	15,324	7	10,086	,000

a. Distribuidos en F asintóticamente.

Tabla 59: Prueba robusta de igualdad de medias de Welch para las diferentes concentraciones de aditivo.

Como puede observarse, tanto en la prueba robusta de Welch, como en la tabla de ANOVA, existen diferencias significativas entre alguna de las medias ($p \leq 0,000 \leq 0,05$) de cada concentración de aditivo.

4.1.1.12. Pruebas post hoc

Por otra parte, para poder detectar la existencia de series con comportamientos homogéneos se ha realizado la prueba de homogeneidad de subconjuntos mediante el método de Duncan.

Subconjuntos homogéneos

Módulo elasticidad

Duncan^a

Tipo.e nsa	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	4	553,2200				
2	4	565,5325	565,5325			
5	4	592,1850	592,1850	592,1850		
3	4		604,7725	604,7725	604,7725	
4	4			609,7725	609,7725	
7	4				638,3375	
6	4				638,4850	
8	4					682,3125
Sig.		,054	,052	,373	,103	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,000.

Tabla 60: Prueba de subconjuntos homogéneos entre las distintas concentraciones de aditivo.

Como se puede apreciar en la Tabla, con el método Duncan se localizan cinco comportamientos diferenciados entre las ocho dosificaciones de aditivo para la resistencia a flexión.

4.2. Parte II de ensayos.

Como resumen se indica que la pauta de trabajo, es la adjunta, teniendo en cuenta que los ensayos, además, y sobre todo, para los materiales a ensayar, se refieren a varios espesores.

Ensayo de pared expuesta a 800 °C y 1000°C de temperatura

1. Vidrio celular.
2. Lana de roca
3. Silicato cálcico
4. Mortero sin vermiculita
5. Mortero con vermiculita

Ensayo de fuego directo a 1200°C de temperatura

1. Vidrio celular (no puede ensayarse a fuego directo por descomposición)
2. Lana de roca
3. Silicato cálcico
4. Mortero sin vermiculita
5. Mortero con vermiculita

Consideramos importante destacar, no obstante, que el objetivo de la Tesis no es la de obtener un mortero de alta resistencia, sino la de encontrar una aplicación que pueda establecerse como protocolo en la protección de elementos o recipientes con riesgo de explosión.

4.2.1. INCORPORACIÓN DE VERMICULITA. ANÁLISIS

La referencia de ensayo se obtiene de la Tesis de Juan Berna Serna, sin embargo, el aditivo empleado es distinto en esta ocasión, siendo los resultados similares de los test realizados, en cuanto a valor absoluto, y para la elección de la dosificación que nos permite un tiempo adecuado de manejo. Esto se debe a que el aditivo empleado en la tesis citada, es de proporción de resistencia mecánica similar al empleado en esta; la dosificación de 0,5, indica un resultado de resistencia a flexión equiparable al del empleo de ácidos orgánicos. Si la dosificación se reduce

umentando la resistencia, la posibilidad de incorporar mayores proporciones de vermiculita aumentan.

La disminución del peso en este caso, es un valor de compromiso entre la resistencia del material y la disminución del peso; de lo que podemos obtener y lo que realmente se puede o debe de manejar en la aplicación del mortero en una esfera por ejemplo de hidrocarburos o de gas natural.

Se observa, como se ha indicado, que la incorporación de vermiculita (igual que el aumento de la proporción de agua en la dosificación) no solo aligera el peso, además disminuye la resistencia mecánica. Al tener más porosidad, el tiempo de secado aumenta, la posibilidad de incluir agua en la matriz también. El agua es un conductor de calor que en los casos de grandes intensidades de fuego es favorecedora, puesto que en su evaporación se consume energía; pero el agua en la dispersión no nos conviene, puesto que también, provocaría corrosión en el soporte a base de chapa de acero, que si bien, debe ser protegida del propio sulfato cálcico, el agua aumenta dicha agresividad. En esferas de gases licuados, en los que el gas se mantiene a temperatura negativa, el agua tampoco incorpora nada favorable, ya que la pérdida de energía por transmisión sería alta. Es, por tanto necesario, llegar a un valor de compromiso entre el ahorro en el peso con el resto de propiedades. Debemos ante el resultado de los ensayos, fijar un valor de diseño que mantendremos en los ensayos para la evaluación térmica de la parte II.

Para no acotar el problema, se van a manejar tres proporciones de vermiculita en la matriz, que expresamos en litros de volumen para favorecer el uso y la posterior aplicación de los morteros en la práctica o uso habitual.

Como se indicó en el capítulo de Materiales y Métodos, será V6, V24, V48, siendo el número el que indica los litros por saco de yeso de 17 kg que se incorporan a la mezcla.

4.2.2. Vidrio celular.

Comenzamos con el primer ensayo de medición de temperaturas. Se han empleado 8 sondas que miden la temperatura de referencia en distintas partes del material; además se ha medido la temperatura ambiente que siempre es constante de 25 °C y que no aporta nada al ensayo, salvo la validez del mismo en mantener las condiciones de trabajo estables.

La temperatura de referencia del interior del Horno Mufla que se mantiene en el rango de temperatura en los ensayos de 800 °C, siempre que el material soporte dicha temperatura; y el resto de sondas, que nos aportan el resto de información de la

temperatura, se sitúan en el interior de la chapa así como en el material; concretamente en el centro del mismo.

Esquema de mediciones:

Sonda 1: interior del horno.

Sonda 2: temperatura ambiente/temperatura material interior

Sonda 3: interior material posición 1

Sonda 4: interior material posición 2

Sonda 5: interior material posición 3

Sonda 6: chapa posición 1

Sonda 7: chapa posición 2

Sonda 8: chapa posición 3

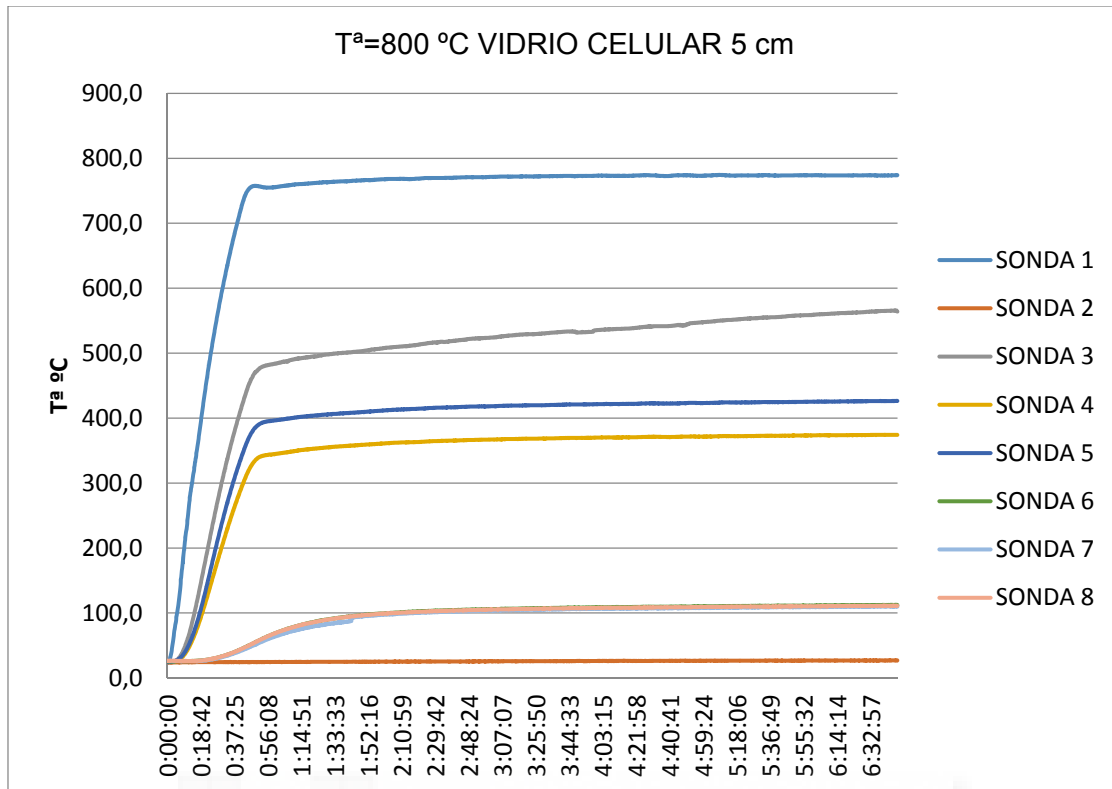
La duración de los ensayos es variable, pero se mantiene un mínimo de tres horas, continuando hasta cuatro o seis en la mayoría de los casos. No obstante solo se referencian valores tabulados de las tres primeras horas de ensayo.

T=800°C		Ensayo: Vidrio celular 50 mm + chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref 1)	SONDA (Ref 2)	Interior del material			Medición en chapa metálica		
			SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	755,5	24,5	483,7	344,7	396,6	68,7	63,8	68,7
120	767,6	25	507,4	360,8	411,6	99,2	97,1	98,8
180	771,2	25,7	523,7	366,9	418	105,7	103,6	105,3

Tabla 61: Tabla resumen del ensayo, vidrio celular 5 cm $T^a=800$ °C.

Como se observa en la tabla referenciamos los tres intervalos de tiempo, 60, 120, 180 minutos. La referencia 1, se refiere a la temperatura interior del horno mufla y la 2, se refiere a la temperatura ambiente. La evolución de las medidas en el centro del vidrio celular se observan siempre superiores a 300 °C ya en la primera hora. La evolución de la temperatura en la chapa que es la que protege al supuesto líquido o gas almacenado, o transportado, en la primera hora no llega a 70 °C, con un máximo de 68,7 °C.

El valor máximo se observa a los 180 minutos en la chapa de 105,7 °C.



Grafica 9: Evolución temperatura de ensayo del vidrio celular 5 cm $T^a=800$ °C.

En este ensayo el tiempo transcurrido de exposición del material ha sido de 6 horas y 40 minutos, pero como se ha indicado, la referencia máxima la tomaremos a las tres horas del ensayo.

La curva de temperatura va subiendo siguiendo una pendiente hasta alcanzar la temperatura del ensayo. Transcurren en este caso unos 48 minutos hasta la estabilización.

Como se observa en el gráfico, la temperatura en el interior del material, en la sonda 3, la que se sitúa en el punto más alto, es la que más valor recoge de $523,7$ °C a los 180 min llegando a casi 580 °C a las 6 horas. La temperatura en la chapa, se referencia en la sonda 6 (la que colocada en la parte superior) llegó a un valor máximo de $105,7$ °C (a las tres horas), valor que no supera en cualquier caso el límite elástico del acero.

Como observación a esta cuestión sobre el acero, se indica que las propiedades mecánicas del acero no son las mismas a 20 °C (temperatura que se suele considerar de referencia para el diseño de estructuras de acero), que las que pueda tener a 200 °C, 400 °C ó a 1000 °C. Según ensayos realizados en base a la Norma NFPA 251, el acero estructural colapsa al alcanzar los 538 °C. Así, y según la curva de la figura siguiente, en un incendio tipo esta temperatura se alcanzaría aproximadamente a los 5 minutos de originarse.

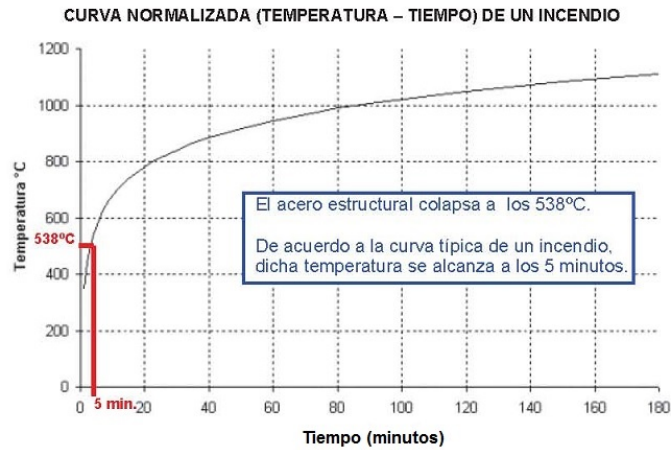


Figura 17: Curva normalizada Temperatura - Tiempo de un incendio

De acuerdo con el criterio normalizado que tomamos de referencia de pared no portante referenciado en norma UNE, se recuerdan los dos puntos más importantes:

- La evaluación de la temperatura media de la cara no expuesta sobre la temperatura inicial, debe ser inferior a 140 °C.
- El incremento de la temperatura de cualquier termopar de la cara no expuesta sobre la temperatura inicial, será inferior a 180 °C.

Como se observa en la tabla, se cumplen ambos supuestos. No obstante, observamos que se superaría el punto de ebullición (supuesto del contenedor con agua), transcurridos 180 minutos, luego para derivados del petróleo a presión atmosférica es un valor alto y para gases licuados, cuyos puntos de ebullición e ignición son muy bajos, pero que se mantienen a presión, este valor puede resultar adecuado.

Para la temperatura de 1000 °C, no se pudo realizar el ensayo; ni el de horno mufla ni el de fuego directo. El material se degrada descomponiéndose en una masa sólida. Concluimos que aunque el punto de fusión del fabricante indica 1000 °C, no es apto para fuego que superen los 800 °C; de hecho la temperatura indicada como rango de trabajo está en el intervalo de -260 °C y +430 °C.

En este ensayo, la sonda 2, se ha introducido en el interior del material; la temperatura ambiente es de 25°C ± 1.

T=1200°C		Ensayo: vidrio celular						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
0:02:40	1070,9	41,3	26,1	26,2	32,4	26,5	25,8	26
0:04:40	1141,3	553,9	448,1	330,1	236,7	27,2	26,7	27,2
0:05:20	1166,6	1034,7	703,7	484,7	307,2	30,6	27,7	28,4
0:06:00	1190,1	1133,8	809,7	588,9	359,8	37,7	30,3	30,8

Tabla 62: Tabla resumen del ensayo, vidrio celular 5 cm T^a=1200 °C.

Se observa que a los 4 minutos, el material ya se ha degradado por completo.

Se concluye que la utilización de este compuesto para proteger una esfera solo ofrece aislamiento térmico y de temperatura hasta cierto rango (sería “similar” a un aislamiento de poliuretano); al ser de aplicación habitual este producto en la protección de esferas, se concluye que no se están cumpliendo los mínimos exigibles de durabilidad ante un fuego de alta intensidad. No obstante, el ensayo de 800 °C si se ha podido reproducir, como se ha observado.

4.2.3. Lana de roca

La lana de roca es uno de los productos más empleados en la protección de elementos contra el fuego, además de uso como elemento acústico. Quizás el mayor inconveniente es su peso (oscila entre 30-80 kg/m³ y en placa rígida, desde 130-210 kg/m³) y su baja resistencia mecánica; pero también la capacidad de absorción de agua o mejor dicho, de que ésta quede en su matriz, aunque hay algunos paneles que ya incorporan alta densidades para evitar la entrada de agua.

Comenzamos analizando este material observando la gráfica de temperatura en horno a 800 °C

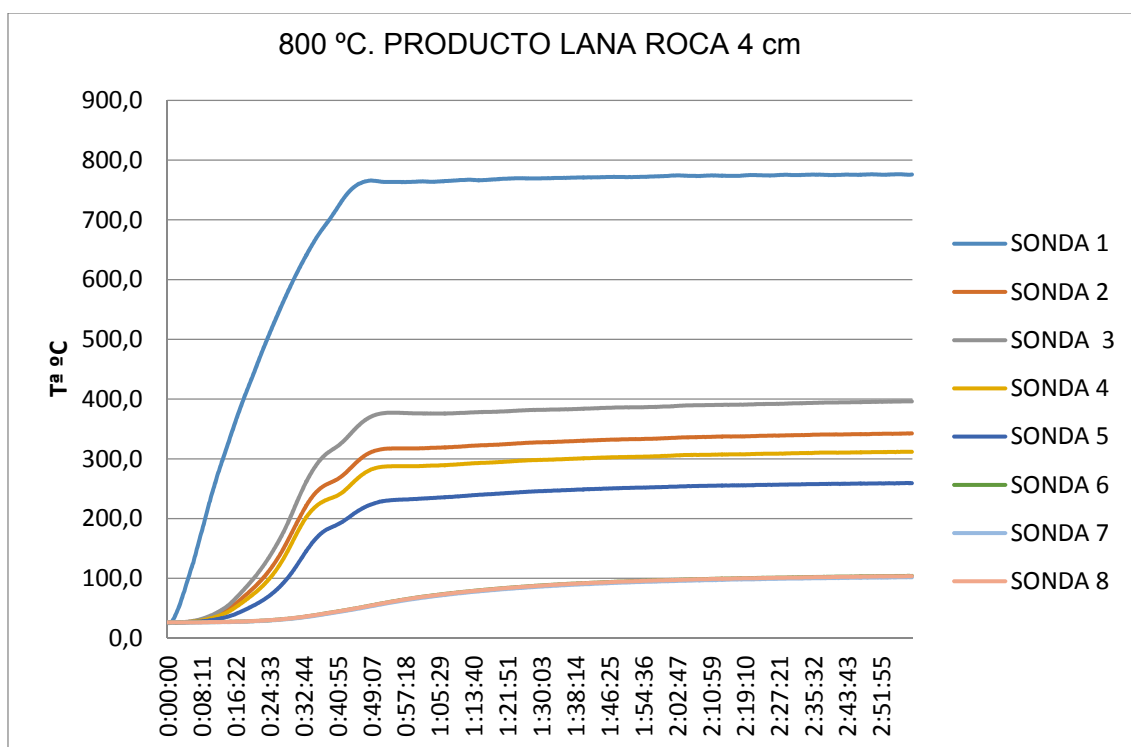
En este grupo de ensayos, la sonda 2, se ha introducido en el interior del material; la temperatura ambiente es de 25 °C ± 1

T=800°C		Ensayo: Lana de Roca 50 mm + chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref 1)	Interior del material				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	763,9	317,5	376	287,7	233	67,9	66,3	67,9
120	773,2	334,6	387,5	304,8	252,9	97	95,2	96,9
180	775,8	342,5	396,2	311,8	259,3	104	101,8	103,6

Tabla 63: Tabla resumen del ensayo, lana de roca 5 cm T^a=800 °C.

En el interior del material, se alcanzan 396,2 °C a los 180 minutos (sonda 3), llegando a una temperatura de 104 °C en la chapa (sonda 6).

La grafica de evolución de temperaturas evoluciona lentamente.



Grafica 10: Evolución temperatura de ensayo de la lana de roca 4 cm $T^a=800$ °C.

Para el ensayo de 1200 °C, a fuego directo, la evolución de temperaturas, es la siguiente:

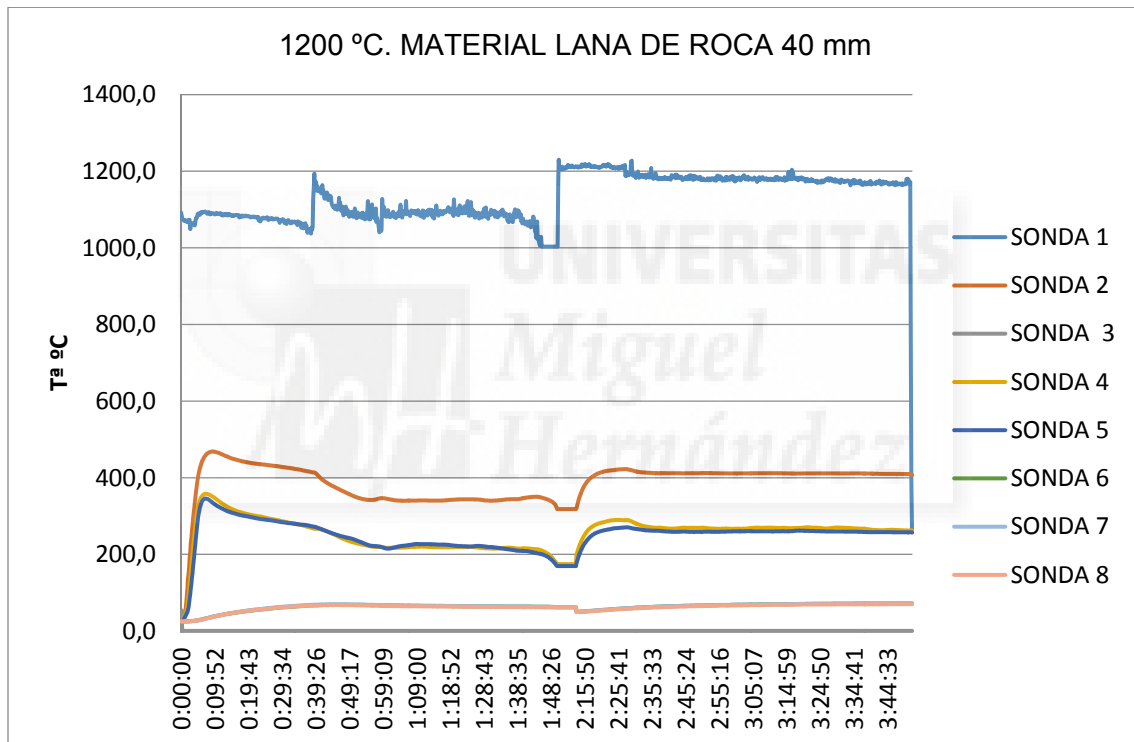
T=1200°C		Ensayo: Lana de Roca 50 mm + chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	1094,9	345,5	0	217	215,3	66,6	67,1	65,5
120	1170,8	67	0	56,7	57	50,7	51,1	50,6
180	1173,9	410,9	0,0	266,8	260,0	68,2	68,3	66,5

Tabla 64: Tabla resumen del ensayo, lana de roca 5 cm $T^a=1200$ °C.

La sonda número tres se rompió y así se indica en el cuadro resumen de los tres intervalos de tiempo. La temperatura alcanzada en la chapa, es menor que en el ensayo de radiación directa sobre toda la superficie. A pesar de ser más intenso el gradiente térmico, se localiza en una zona más concreta.



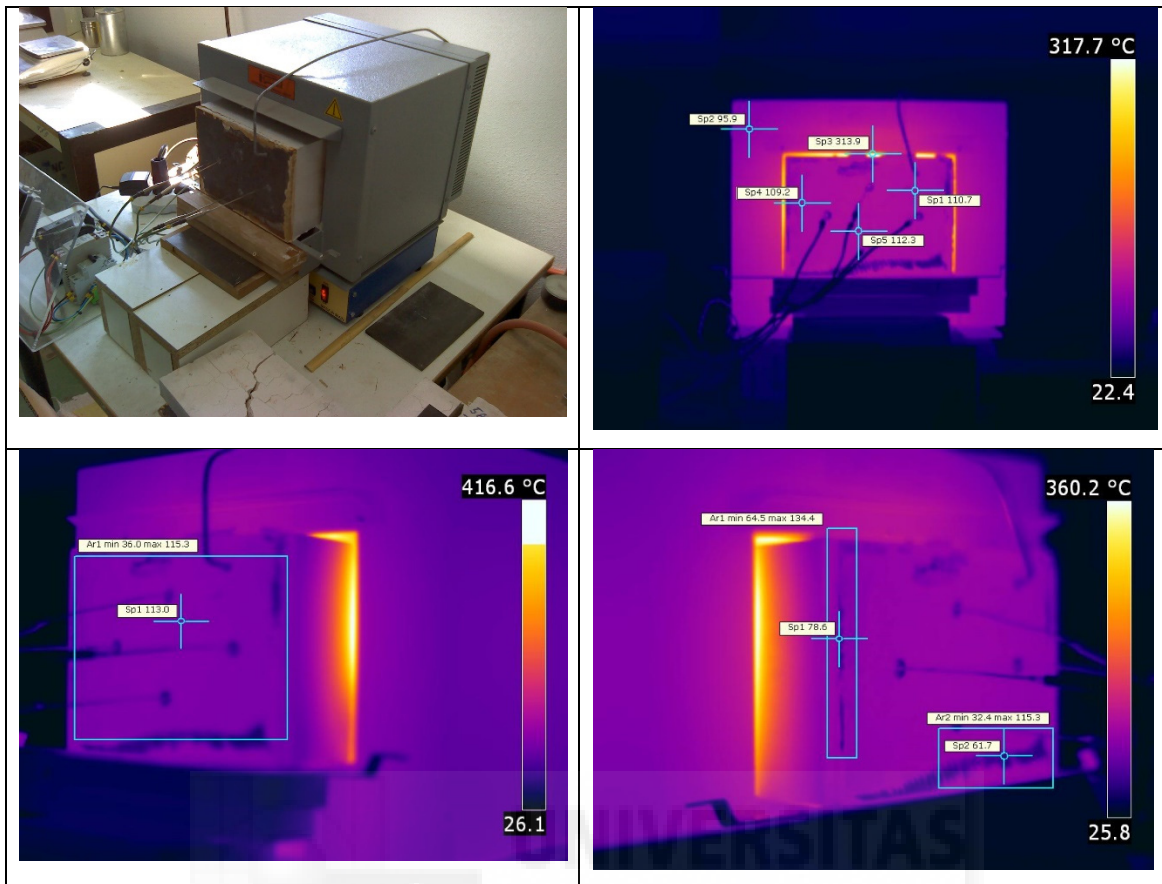
Fotografía 27: Localización del foco de calor con un soplete o llama directa. (Bomberos de Molina de Segura)



Gráfica 11: Evolución temperatura de ensayo de la lana de roca 4 cm $T^a=1200$ °C.

El pico de descenso, se debe a una bajada de la radiación del soplete sobre las dos horas.

Se observa en las termografías, cómo el ensayo de pared de horno, reparte la temperatura en toda la superficie; por tanto es menos agresivo para la estabilidad del material, pero mucho más para el flujo de calor.



Fotografía 28: Termografías de calor en placa situada en horno mufla.

Se observa visualmente, que el material (lana de roca) no se degrada y aguanta perfectamente el impacto de la llama de soplete.

Sin duda alguna, la lana de roca es un buen material para colocación ante un fuego de alta intensidad; quizás su hándicap, sea su falta de rigidez que hace que su colocación necesite de elementos auxiliares que mantengan la integridad; dichos elementos son los que, en algunos casos, causan el fallo estructural. Por ejemplo se encuentra en los paneles de compartimentación de lana de roca, donde el elemento que da rigidez es la chapa, elementos no capaces de aguantar el fuego; o los soportes metálicos y estructuras auxiliares que del mismo modo soportan dichos paneles.

En el caso de esferas, el elemento rigidizador y aislante de la lluvia y degradación es una lámina de aluminio exterior. Dicha lámina, como ha quedado expuesto, no será capaz de garantizar la integridad en caso de incendio.

4.2.4. Silicato cálcico

Los paneles de silicato, al menos los ensayados, son paneles rígidos. Del mismo modo que los paneles de vidrio celular, requieren para su colocación, un medio adherente, tipo betún o pegamentos que fije a la superficie (en este caso nos referimos

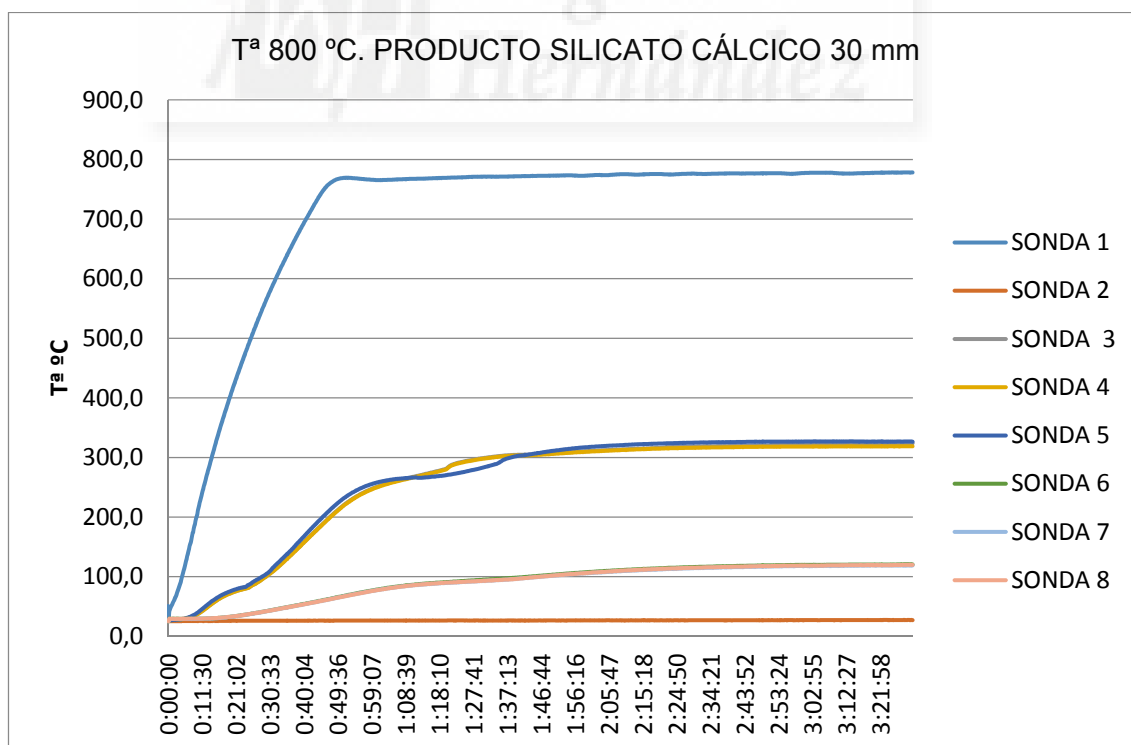
a una esfera), dichos paneles. También la directriz de la esfera, mantiene un ángulo en su desarrollo, por lo cual dichos paneles, deberían adaptarse a la misma, lo que supone un sobre costo; no obstante, es asumido por las empresas suministradoras.

Los paneles, se disponen como mínimo en dos capas, para no dejar un hueco en la unión de los mismos. Dicho hueco producido por la unión, constituye el punto débil para afrontar un fuego de alta intensidad. Es el mismo caso de los paneles de cartón yeso (comúnmente denominados paneles de pladur por ser líder de fabricación de placas de yeso laminado); la unión y el soporte, constituyen el punto débil donde se produce el colapso del elemento.

Una vez expuesto el desarrollo de montaje, pasamos a describir el comportamiento térmico del material.

T=800°C		Ensayo: Silicato cálcico 50 mm + chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	765,5	25,4	249,8	248,8	257,1	77,8	77	76,8
120	773,1	25,6	310,7	309,7	317,4	107,6	106,1	106,5
180	777	26	323,2	318,2	326,8	119,9	117,9	118,6

Tabla 65: Tabla resumen del ensayo, Silicato Cálcico 5cm T^a=800 °C.

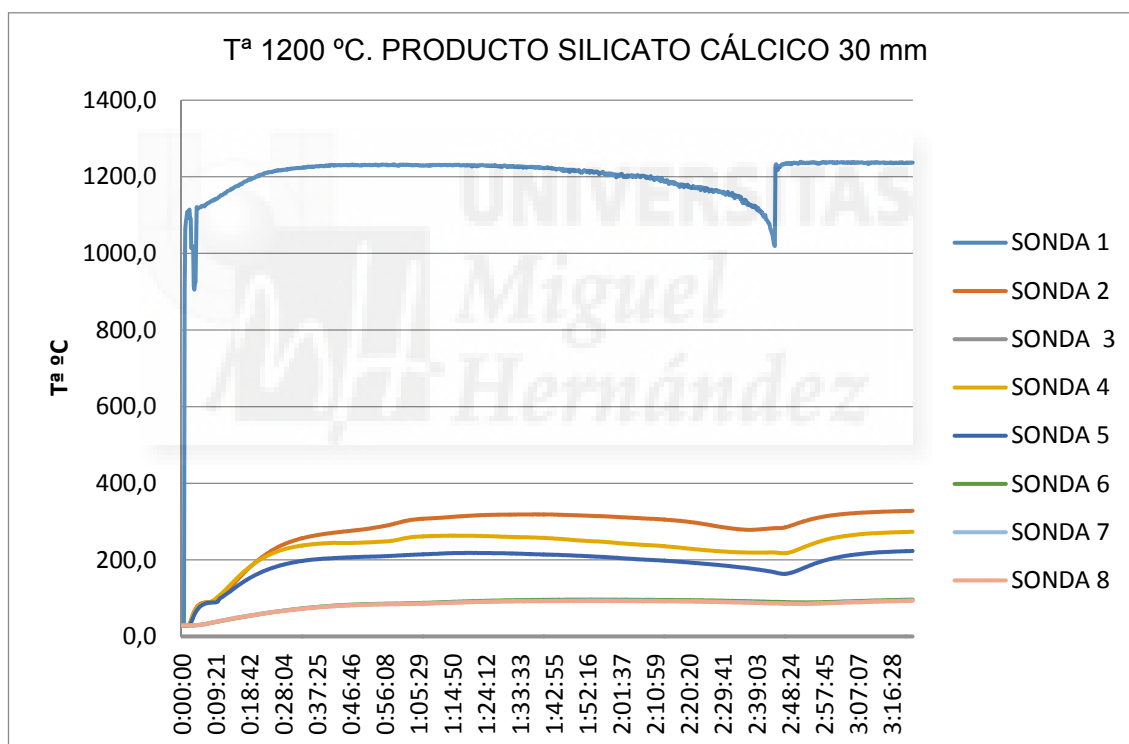


Grafica 12: Evolución temperatura de ensayo del Silicato Cálcico T^a=800 °C.

T=1200°C		Ensayo: Silicato cálcico 30 mm + chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	1229,7	297,3	486,2	253,4	211,5	85,9	85,1	84,3
120	1204,8	312,2	0,0	244,5	205,5	96,1	93,6	92,6
180	1237,3	316,3	0,0	256,8	203,6	90,4	88,0	87,3

Tabla 66: Tabla resumen del ensayo, Silicato Cálcico 3cm T^a=1200 °C.

A pesar de ser algo más bajo el espesor del panel de Silicato que el de los materiales ensayados en comparación, el comportamiento es muy bueno; similar al de la lana de roca y el vidrio celular. También y por el contrario es un material mucho más caro, entre 3 y 4 veces más que la referencia por ejemplo de la lana de roca.



Grafica 13: Evolución temperatura de ensayo del Silicato Cálcico T^a=1200 °C.

Antes de pasar al mortero a base de sulfato cálcico, hagamos un pequeño resumen. Si nos referimos a la prueba de temperatura, en relación con la obtenida en la chapa metálica, se observa que el mejor comportamiento de los materiales empleados, corresponde a la lana de roca, con 101,8 °C a las 3 horas de ensayo, si bien el espesor de los materiales no es el mismo.

T=800°C		Ensayo: Vidrio celular (Foamglas) 50 mm + chapa 10 mm							
		TEMPERATURA SONDAS °C							
tiempo (min)	SONDA (Ref 1)	SONDA (Ref 2)	Interior del material			Medición en chapa metálica			
			SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8	
60	755,5	24,5	483,7	344,7	396,6	68,7	63,8	68,7	
120	767,6	25	507,4	360,8	411,6	99,2	97,1	98,8	
180	771,2	25,7	523,7	366,9	418	105,7	103,6	105,3	
T=800°C		Ensayo: Lana de Roca 50 mm + chapa 10 mm							
		TEMPERATURA SONDAS °C							
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8	
60	763,9	317,5	376	287,7	233	67,9	66,3	67,9	
120	773,2	334,6	387,5	304,8	252,9	97	95,2	96,9	
180	775,8	342,5	396,2	311,8	259,3	104	101,8	103,6	
T=800°C		Ensayo: Silicato cálcico 30 mm + chapa 10 mm							
		TEMPERATURA SONDAS °C							
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material				Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8	
60	765,5	25,4	249,8	248,8	257,1	77,8	77	76,8	
120	773,1	25,6	310,7	309,7	317,4	107,6	106,1	106,5	
180	777	26	323,2	318,2	326,8	119,9	117,9	118,6	

Tabla 67: Tabla resumen del ensayos, vidrio celular, lana de roca y Silicato Cálcico a la $T^a=800$ °C.

4.2.5. Mortero sin vermiculita

Para el desarrollo de esta parte, vamos a trabajar con dos espesores: 30 mm y 60 mm.

La ventaja que se propone en la utilización de morteros, es la opción de poder realizarlo en formato prefabricado o el empleo de vertidos o aplicados in situ. Del mismo modo, la colocación o unión de placas unas con otras ofrece la versatilidad de que el mismo mortero es el que se utiliza para la unión.



Fotografía 29: Placas prefabricadas de mortero base de sulfato cálcico. Departamento de

Ingeniería.



Fotografía 30: Enlucido de pared a base de mortero de sulfato cálcico. Departamento de Ingeniería.

Observamos una gran diferencia si se compara con los ensayos anteriormente, a excepción de la lana de roca, que al ser tipo manta, podemos solapar una con otra. No obstante incluso en este caso, la unión constituye un elemento a estudiar y tenemos en cuenta que en muchos casos, es por donde el sistema colapsa.

A priori se sobreentiende que los materiales anteriormente descritos, y comercializados por las empresas, disponen de una amplia gama de pruebas y documentación técnica, pero no es así, al menos, en la parte que se pretende desarrollar a continuación. Porque para poder tener referencias fidedignas válidas, es precioso que la prueba y ensayo, sean idénticos, para así poder compararlas. Por lo tanto, como se ha indicado, siguiendo la misma pauta de trabajo, desarrollamos pruebas de horno de mufla y de soplete, para dos espesores distintos, de 30 y de 60 mm de morteros sin vermiculita, como se ha dicho.

Ensayo 1. Chapa de 10 mm con 30 mm de mortero. T^a de ensayo 800 °C

Para el primer ensayo, se muestra la tabla 68 de comportamiento de las temperaturas.

Ensayo 1: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	811,7	117,1	102,3	107	106,9	92,5	52,6	48,9
120	802,1	284,2	261,9	269,2	250,3	108,2	61,6	55,4
180	800,4	322	315,3	320,9	316,1	146	78	71,3

Tabla 68: Tabla resumen del ensayo, mortero de 3 cm T^a=800 °C. Test 1.

La sonda (número 6) situada en la chapa (en la posición más alta), aporta un incremento de temperatura máximo que llega hasta los 146 °C.

Teniendo en cuenta la norma UNE EN 13501-2:2004, la evaluación de la temperatura media de la cara no expuesta, sobre la temperatura inicial, tiene que ser inferior a 140 °C y el incremento de la temperatura de cualquier termopar de la cara no expuesta sobre la temperatura inicial, será inferior a 180 °C

Superamos algo el valor puntual de 140 °C, pero no se supera el valor medio, y tampoco el máximo exigido por esta norma. No obstante, con relación a los ensayos anteriores (con un espesor de 3cm), obtenemos valores mayores de temperatura.

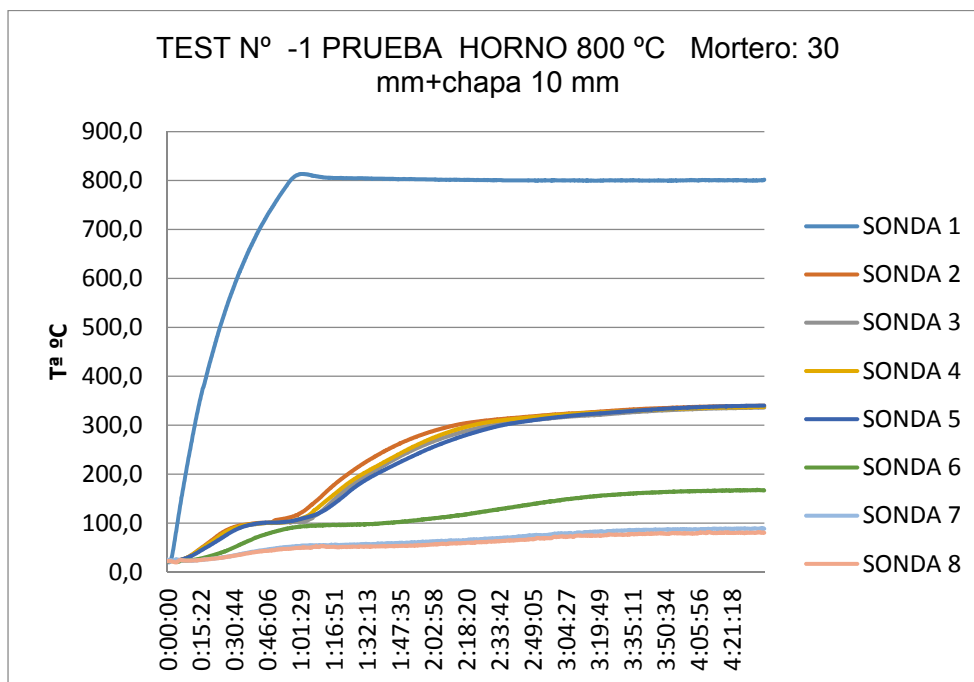
Ensayo 2. Se realiza una repetición del ensayo, con los mismos elementos (mortero fabricado nuevamente) y proceso, obteniendo valores similares.

Ensayo 2: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	809,1	101,9	100,8	100,6	101	93,5	56,8	52,2
120	799,8	252,9	214,4	219,2	204,3	106,3	63,8	57,2
180	800,9	286,5	262	263,3	271,4	147,6	84,2	76,6

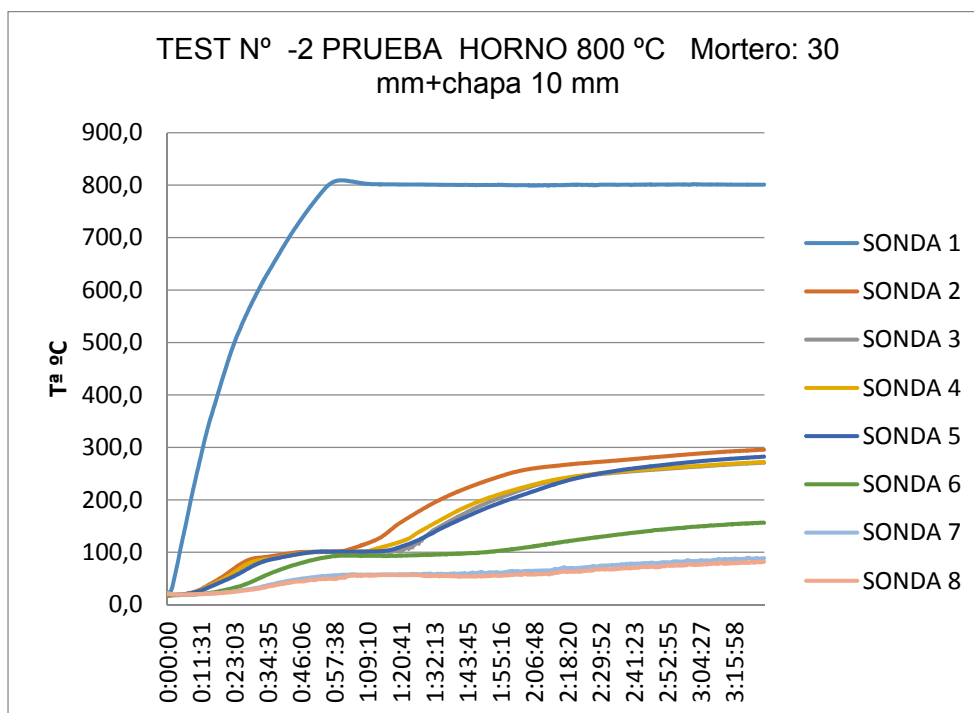
Tabla 69: Tabla resumen del ensayo, mortero de 3 cm $T^a=800$ °C. Test 2.

En este segundo ensayo o repetición, la temperatura de 100 °C se alcanza a 1:49 horas, pero se siguen “alcanzando” valores de 147 °C a las tres horas, sonda 6.

Comparando ambos ensayos, se observa que las temperaturas finales son muy similares.



Grafica 14: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30 mm $T^a=800$ °C. Test 1.



Grafica 15: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30 mm $T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Test 2

Para las pruebas de fuego directo, se realizaron tres ensayos previos.

Ensayo 1: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS $^{\circ}\text{C}$								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	972,6	100,6	82,6	88,9	70,8	81	73,8	73,7
120	956,9	154,5	95,8	99,5	87,2	96,7	90,4	90,2
180	953,2	219,5	104,3	123	92,1	101,1	94,6	94,3

Tabla 70: Tabla resumen del ensayo, mortero de 3 cm $T^a=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Test 1.

Ensayo 2: mortero 30mm + chapa 10mm								
TEMPERATURA SONDAS $^{\circ}\text{C}$								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	977,3	100,2	86,7	80,9	73,5	77,3	68,3	72
120	990,4	126,5	98,9	94	87,6	92,6	82,9	86,8
180	993,7	181,9	110,1	100,1	92,8	97,1	87,5	91,2

Tabla 71: Tabla resumen del ensayo, mortero de 3 cm $T^a=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Test 2.

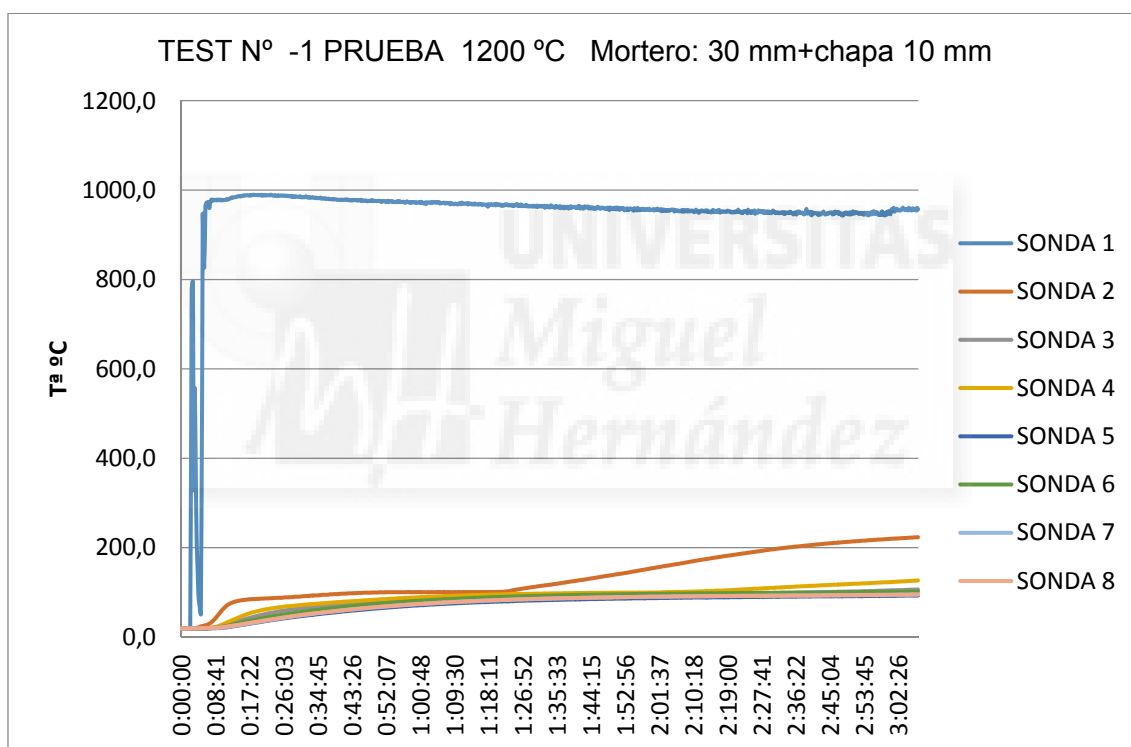
Se sigue observando la diferencia del ensayo a fuego directo de gran intensidad con relación al del horno mufla en toda la pared.

La temperatura máxima en la chapa, en el punto más desfavorable de los

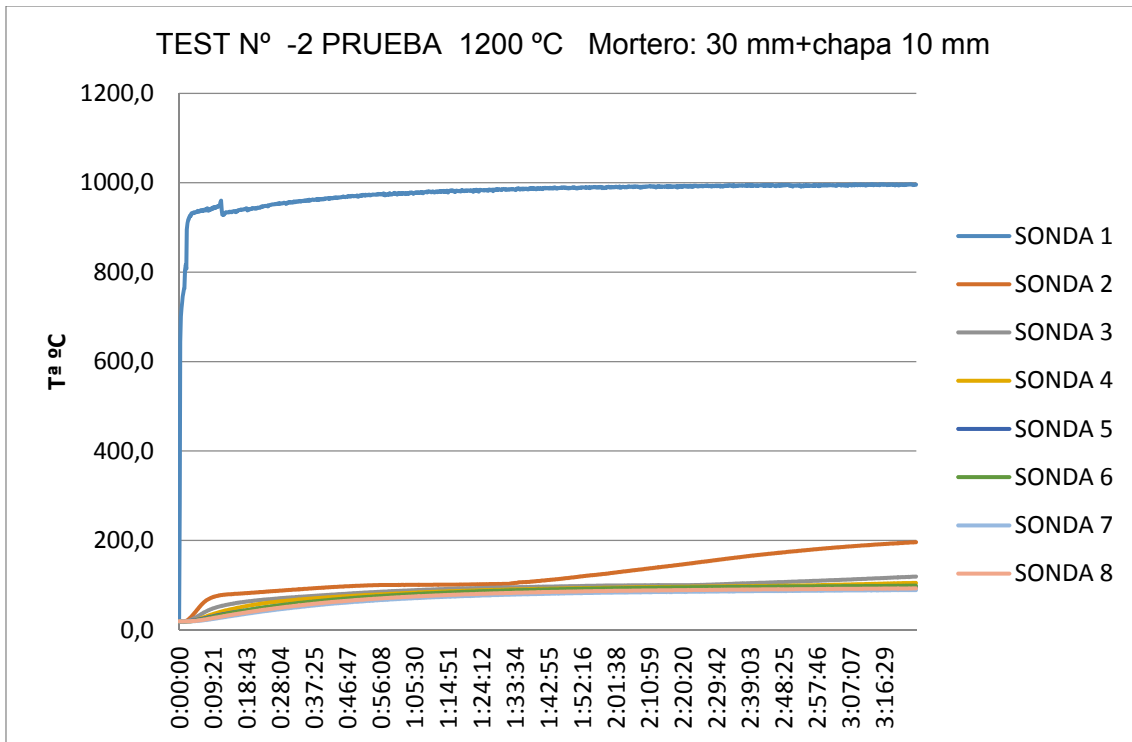
ensayos es de 97,1 °C.

Se indica, como nota y observación, que la diferencia en el comportamiento del material (el mortero), y la temperatura en el centro del mismo, tras 180 minutos, no supera los 219,5 °C.

Se observa, así mismo, que el fuego que incide sobre la pared siempre es el mismo, las diferencias en la lectura del termopar de medida directa en llama, comparadas con otros ensayos, depende de cómo se coloque la sonda. Para evitar roturas de la misma, se optó en algún caso de alejarla un poco de la llama directa. En este sentido, las diferencias en la medida, oscilan entre los 900 °C y los 1200 °C, sin embargo, la distancia del soplete a la pared de ensayo siempre es la misma, y el gas empleado: propano, también es el mismo.



Gráfica 16: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30 mm $T^a=1200$ °C. Test 1



Gráfica 17: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 30 mm $T^a=1200^{\circ}\text{C}$. Test 2

En los ensayos siguientes, se aumenta el espesor del mortero a 60mm. Comenzamos con la prueba de horno mufla de 800°C .

Test 1

Ensayo 1: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS $^{\circ}\text{C}$								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	637,3	71,2	54,4	70,8	62,6	24,1	24,2	24,6
120	791	100,6	97,3	100,4	100,3	69,8	68,6	69,8
180	789,7	127	100,4	128,5	117,6	80,8	79,4	80,9

Tabla 72: Tabla resumen del ensayo, mortero de 6 cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1.

Test 2

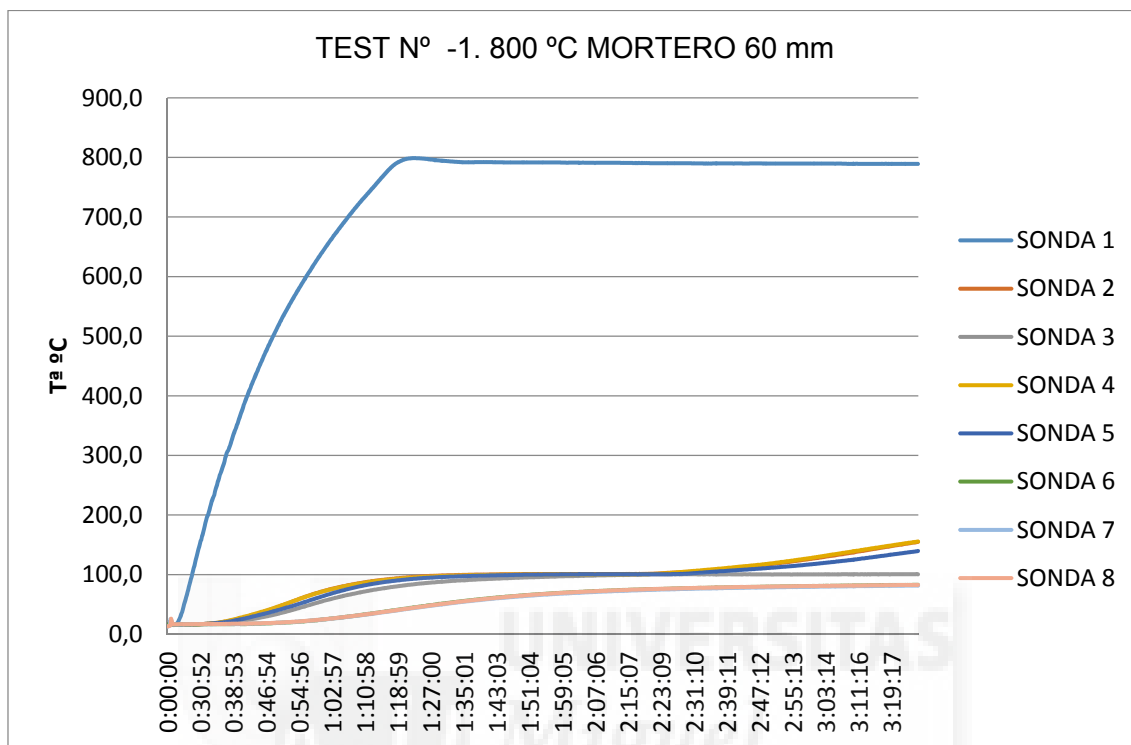
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS $^{\circ}\text{C}$								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	807,2	93,5	91	94,5	90,7	47,4	47,3	47,6
120	797,9	101	100,5	100,6	100,3	75,6	75,5	75,5
180	796,9	132,6	129,5	135,1	107,1	81,2	80,8	80,1

Tabla 73: Tabla resumen del ensayo, mortero de 6 cm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2.

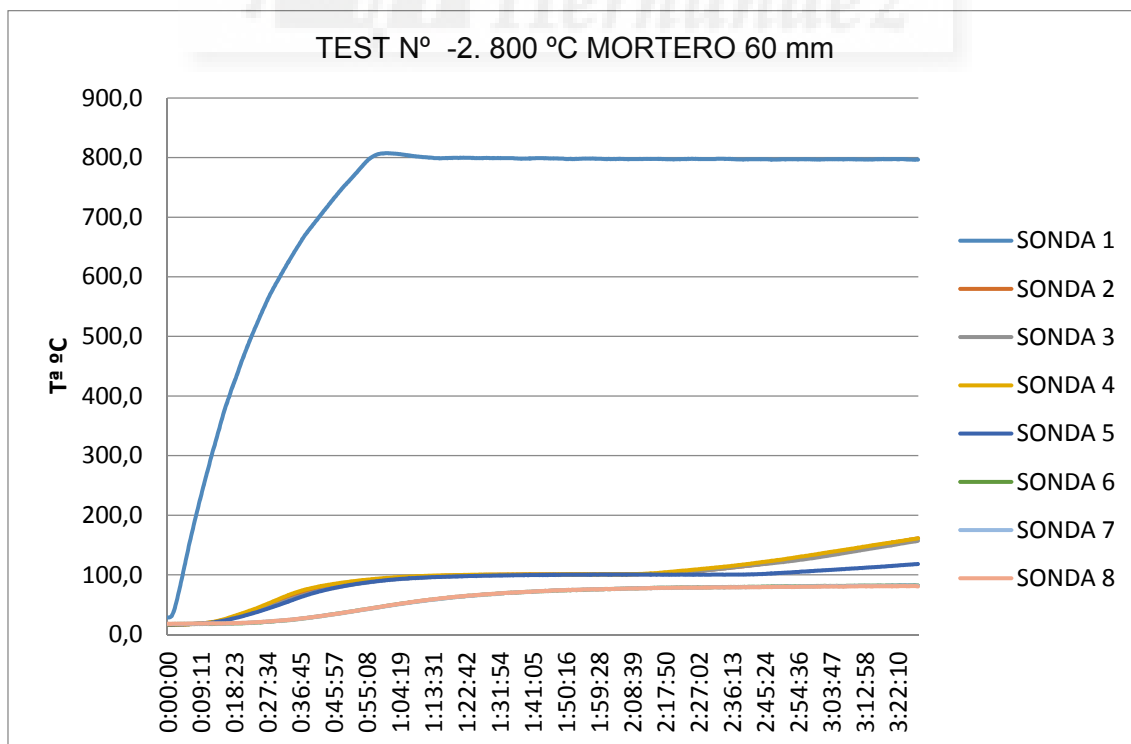
Tanto en el test 1 como en el 2, el resultado de temperaturas es considerablemente menor. La máxima es de $81,2^{\circ}\text{C}$ en la chapa, mientras que el

centro del mortero, la máxima es de 135,1 °C. Nos encontramos ante un resultado que dista mucho del cumplimiento de la norma UNE.

Las gráficas de evolución de temperatura, son las siguientes:



Gráfica 18: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60 mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 1



Gráfica 19: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60 mm $T^a=800^{\circ}\text{C}$. Test 2

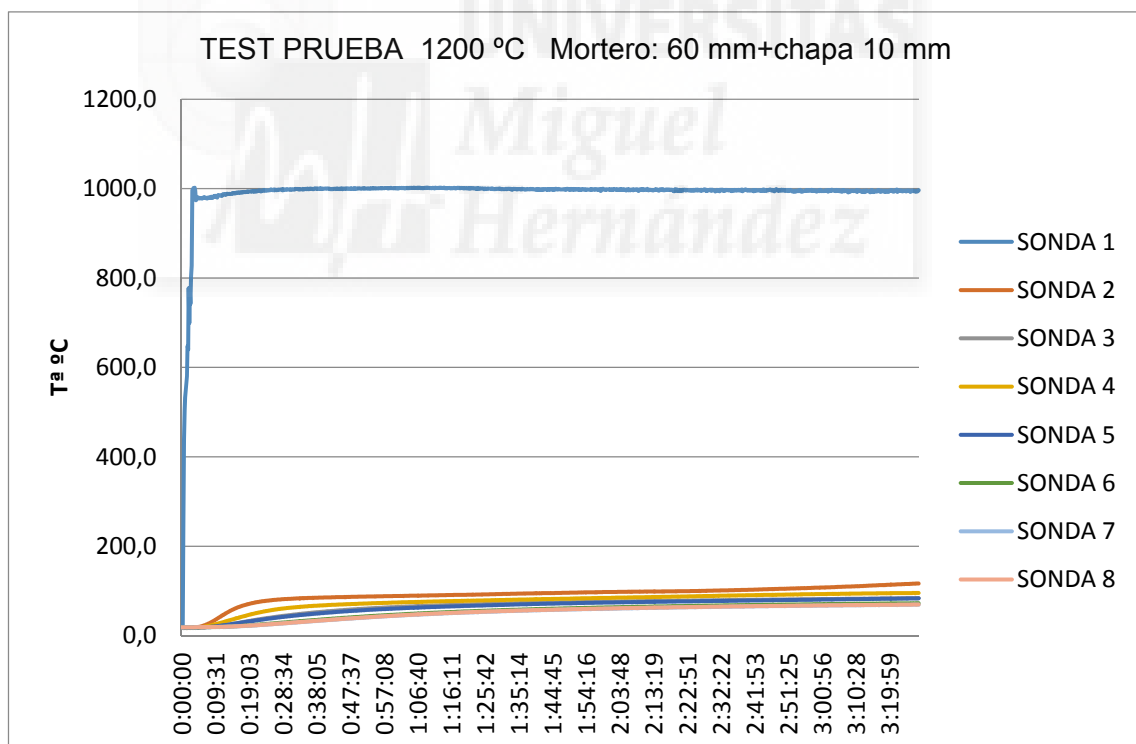
Para exposición de fuego, ensayo menos restrictivo a pesar de ser más intenso, tenemos los siguientes resultados:

Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	1001	88,4	63,6	73,7	60,4	46,6	44,3	44,5
120	998,5	97,4	75,9	84,3	73,9	63,1	60	60,5
180	995,4	107,3	81,5	92,9	80,5	70,2	67	67,3

Tabla 74: Tabla resumen del ensayo, mortero de 3 cm $T^a=1200$ °C. Test 1.

Un valor de 70,2 °C es la máxima temperatura que registra uno de los termopares situado en el punto más alto.

La evolución de temperaturas en todo su rango de tiempo, se adjunta:



Grafica 20: Evolución temperatura de ensayo del Mortero de 60 mm $T^a=1200$ °C.

Vamos a comparar los resultados del mortero para temperatura 800 °C, con el resto de materiales ensayados, para ambos espesores. Para simplificar, solo nos vamos a 180 minutos.

T=800°C								
Ensayo: Vidrio celular (Foamglas) 50 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA (Ref 1)	SONDA (Ref 2)	Interior del material			Medición en chapa metálica		
			SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	771,2	25,7	523,7	366,9	418	105,7	103,6	105,3
Ensayo: Lana de Roca 50 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	775,8	342,5	396,2	311,8	259,3	104	101,8	103,6
Ensayo: Silicato cálcico 30 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA (Ref)	Interior del material			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	777	26	323,2	318,2	326,8	119,9	117,9	118,6
Ensayo 1: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	800,4	322	315,3	320,9	316,1	146	78	71,3
Ensayo 2: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	800,9	286,5	262	263,3	271,4	147,6	84,2	76,6
Ensayo 1: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	789,7	127	100,4	128,5	117,6	80,8	79,4	80,9
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero			Medición en chapa metálica			
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	796,9	132,6	129,5	135,1	107,1	81,2	80,8	80,1

Tabla 75: Tabla resumen de ensayos, materiales de base y morteros T^a=800°C.

El mejor resultado se obtiene para el mortero a base de sulfato cálcico de 60mm con temperatura máxima obtenida en la chapa de acero de 81,2 °C a los 180 minutos de duración del ensayo. En el centro del material, también se obtiene una reducción significativa. 135,1 °C como máxima.

4.2.6. Mortero con vermiculita

El empleo de morteros a base de sulfato cálcico, tiene un hándicap, y es el elevado peso específico del mismo. La densidad media de este tipo de morteros, está sobre 1330 kg/m³; valor muy alto comparado con la lana de roca incluso. Si se indicaba que uno de los problemas precisamente de la lana de roca es su elevado peso específico, utilizando mortero de yeso el problema se incrementa notablemente.

La incorporación de un elemento como la vermiculita, intenta paliar el problema, reducir el peso específico del mortero lo máximo posible.

En aplicaciones para fuegos de gran intensidad, o protección de elementos con posibilidad de ser expuestos a fuegos de alta intensidad, a veces, es importante reducir ese peso específico; otras en cambio, dará igual y lo que se busca es resistencia mecánica. Por ejemplo en una pared de sectorización, el elemento portante en este caso no supone un problema en cuanto al peso, pero en una esfera de hidrocarburos, donde la chapa se calcula para alojar un líquido o gas a una presión, un peso sobre la misma, puede no hacer viable la aplicación de la misma.

Se hace imprescindible buscar una solución al problema de la alta densidad. Como ya se indicaba, vamos a realizar tres pruebas en las que se aumenta la dosis de vermiculita y así, observar su comportamiento.

Caso I. Mortero adicionado con vermiculita, tipo V6. 6 litros de vermiculita adicionado a 17 kg de yeso (un saco)

Temperatura de ensayo 800 °C en pared.

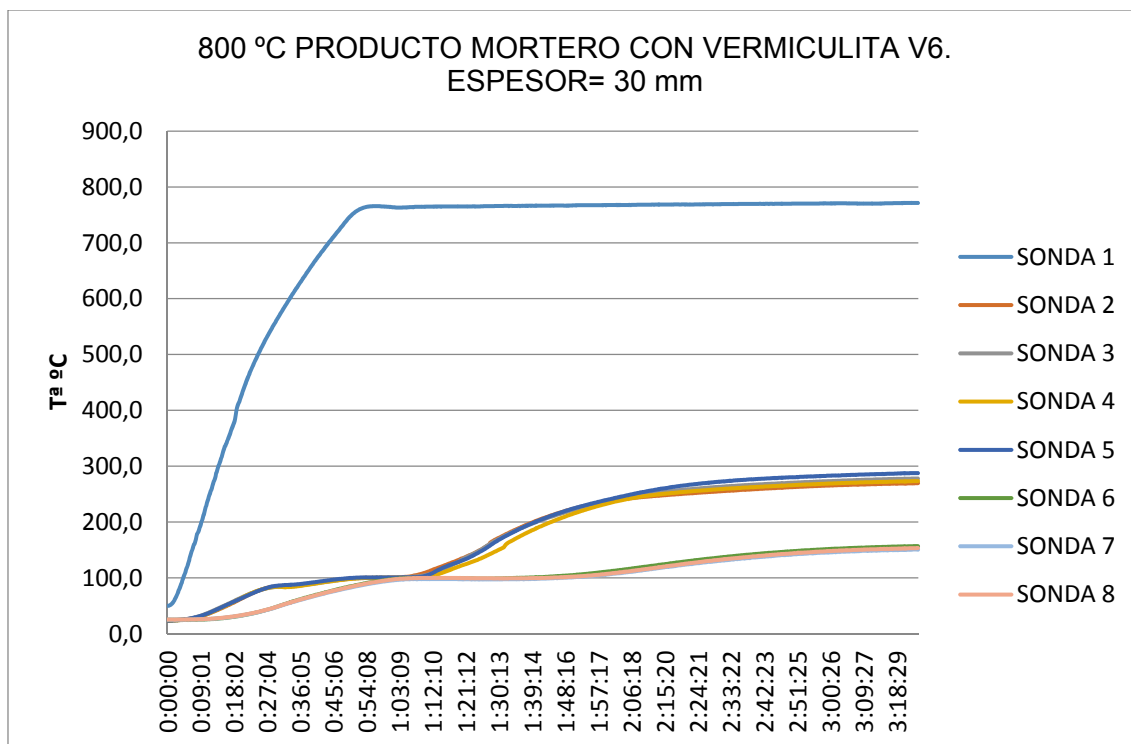
Ensayo: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	764,3	100,5	100,1	100,1	100,9	96,9	94,7	96,3
120	767,4	237,5	237,4	233,9	240,6	111,7	106,6	107,5
180	770,4	265,4	273,2	268,8	282,8	151,7	146,1	148,1

Tabla 76: Tabla resumen del ensayo, mortero V6 de 3 cm $T^a=800$ °C.

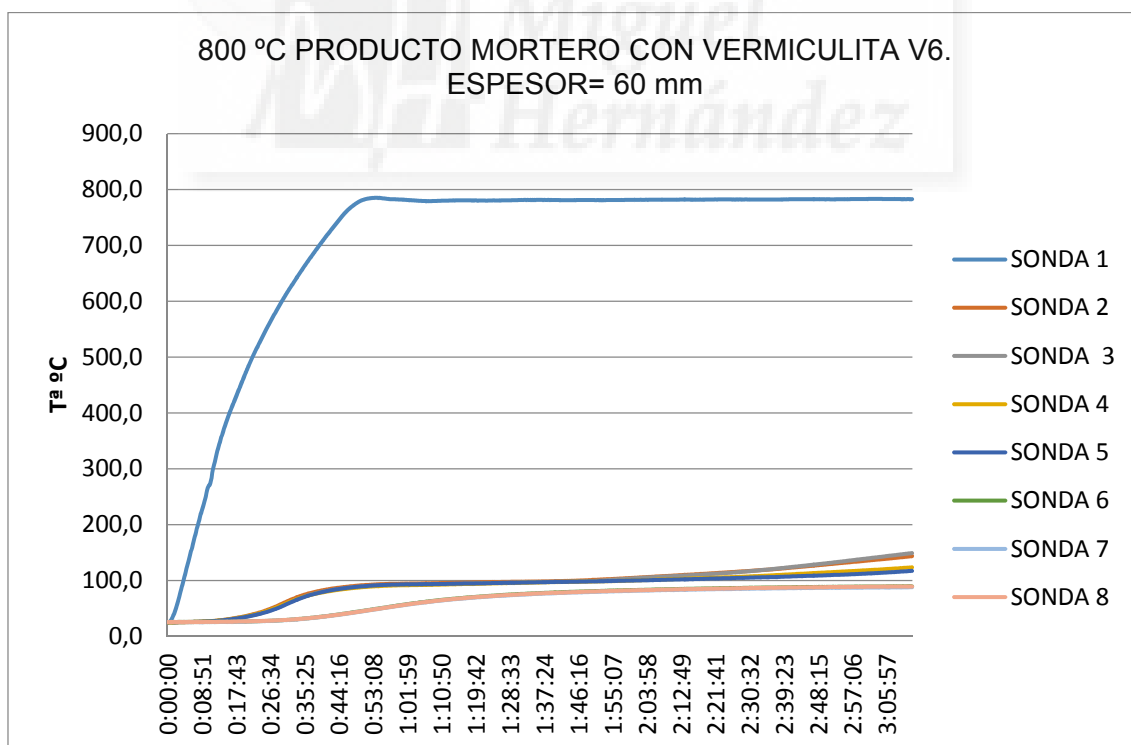
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	782	94,2	92,1	91,4	92,7	56	55,2	55,4
120	781,3	104,5	103,6	99,9	99,9	82,9	81,6	82,3
180	782,8	135,1	138,8	118	112,1	89	87,6	88,5

Tabla 77: Tabla resumen del ensayo, mortero V6 de 6 cm $T^a=800$ °C.

La evolución de temperaturas, es la siguiente para ambos casos.



Gráfica 21: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V6 de 30 mm $T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gráfica 22: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V6 de 60 mm $T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

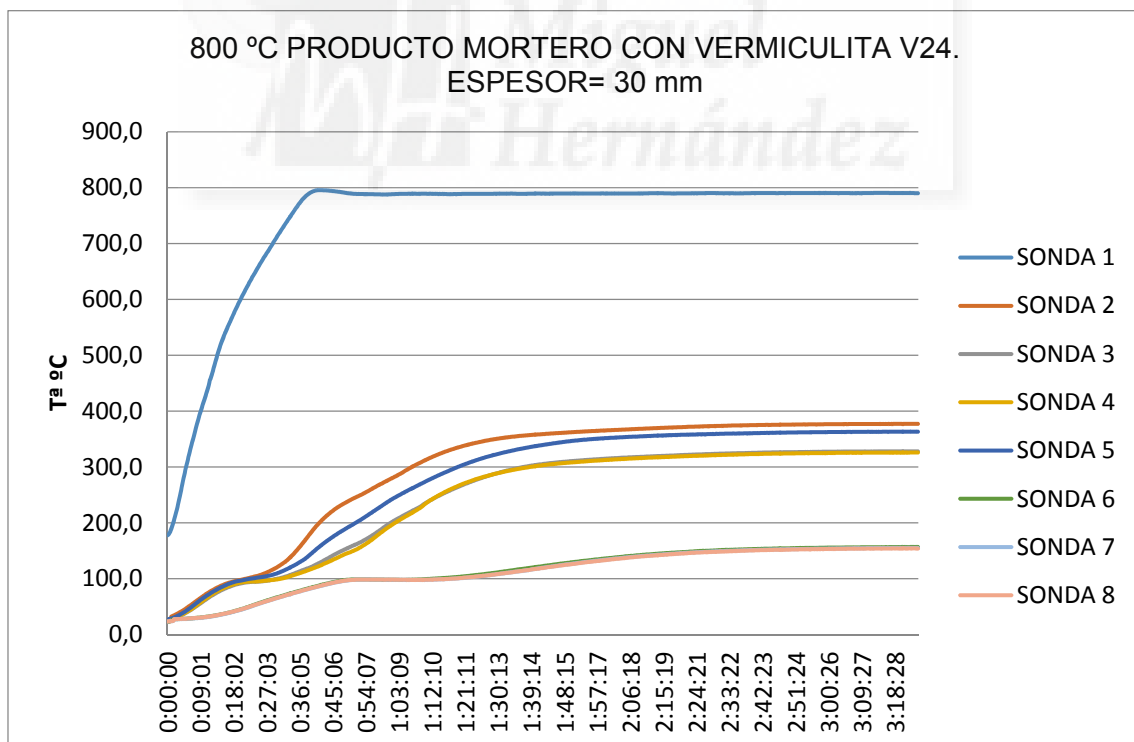
Caso II. Mortero adicionado con vermiculita, tipo V24. 24 litros de vermiculita adicionado a 17 kg de yeso (un saco)

Ensayo: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	787,9	276,3	197,1	191,7	237,9	98,1	98,1	98,1
120	789,4	365,5	314,9	312,7	351,8	136,6	134,4	133,6
180	790,3	376,3	327	324,8	362,4	155,4	153,8	153,1

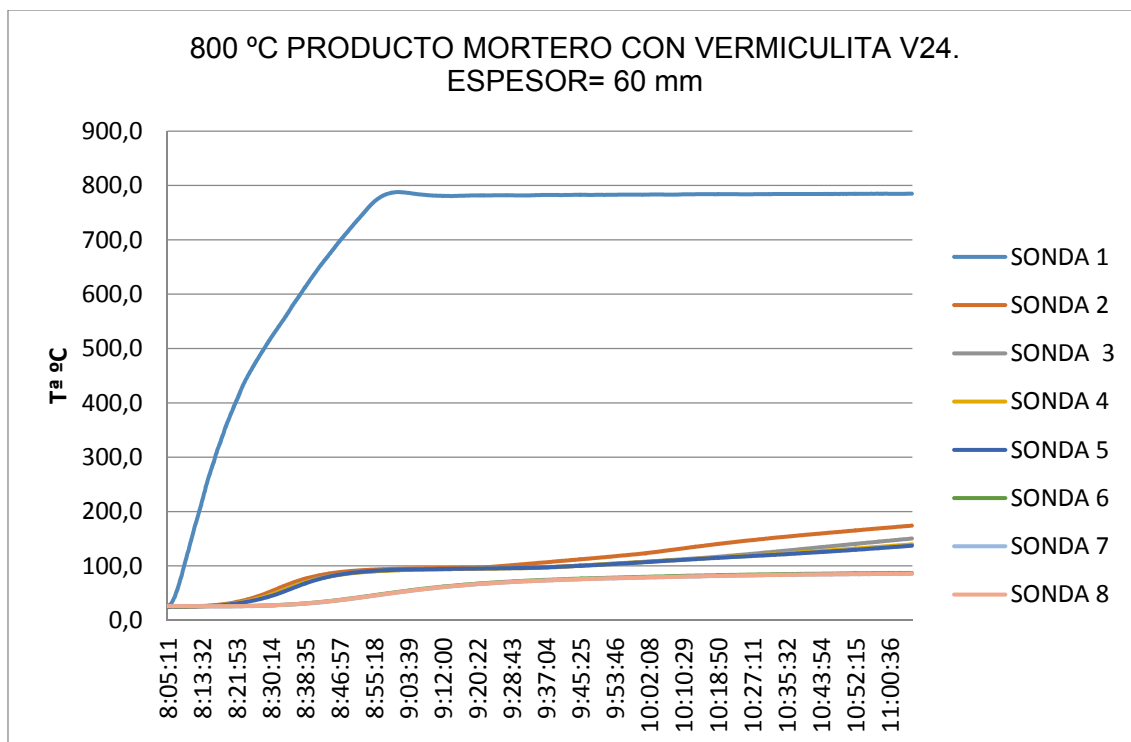
Tabla 78: Tabla resumen del ensayo, mortero V24 de 3 cm $T^a=800$ °C.

Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	784,5	95,2	92,9	92,7	93,5	56,1	55,1	55,3
120	783,3	127	109,3	109	108,7	80,5	79,2	79,2
180	784,6	173,5	149,7	138,9	136,6	87	85,4	85,4

Tabla 79: Tabla resumen del ensayo, mortero V24 de 6 cm $T^a=800$ °C.



Grafica 23: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 de 30 mm $T^a=800$ °C.



Grafica 24: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 de 60 mm $T^a=800\text{ }^\circ\text{C}$.

Caso III. Mortero adicionado con vermiculita, tipo V48. 48 litros de vermiculita adicionado a 17 kg de yeso (un saco)

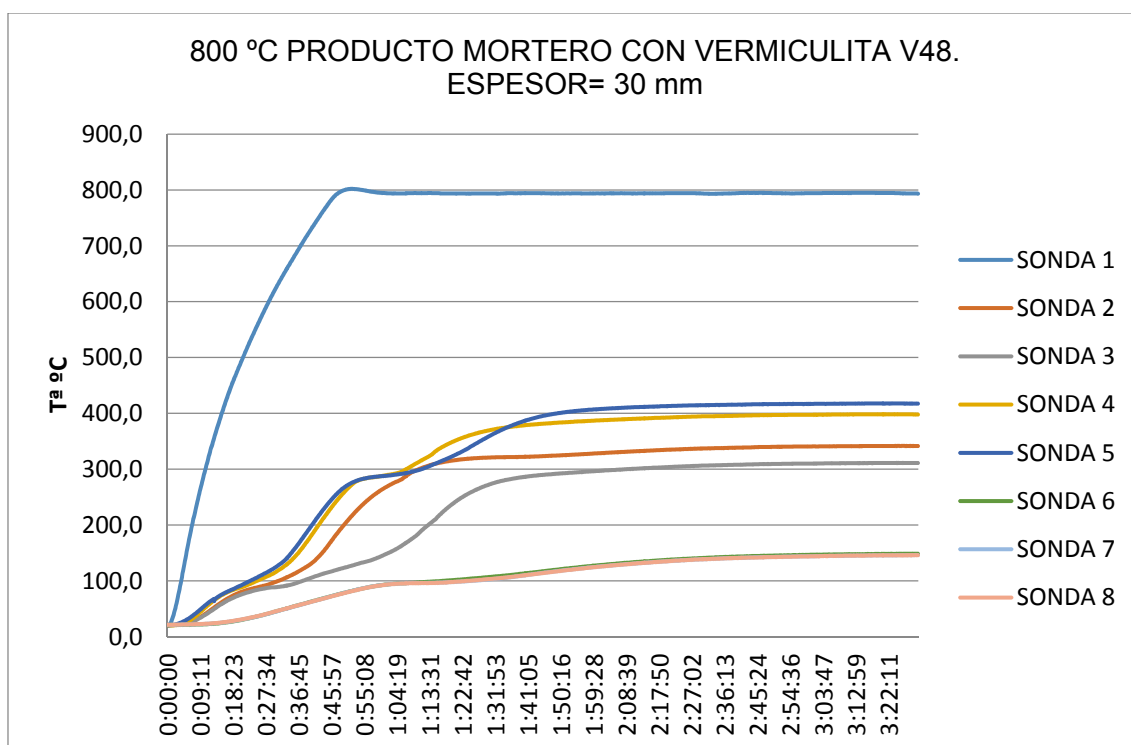
Ensayo: mortero 30 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	794,5	264	145	288	287,5	92,6	92,7	92,4
120	793,8	328,2	296,6	387,1	407	127,5	125,1	125
180	794	340,6	310	397,4	416,8	146,7	144,1	143,9

Tabla 80: Tabla resumen del ensayo, mortero V48 de 3 cm $T^a=800\text{ }^\circ\text{C}$.

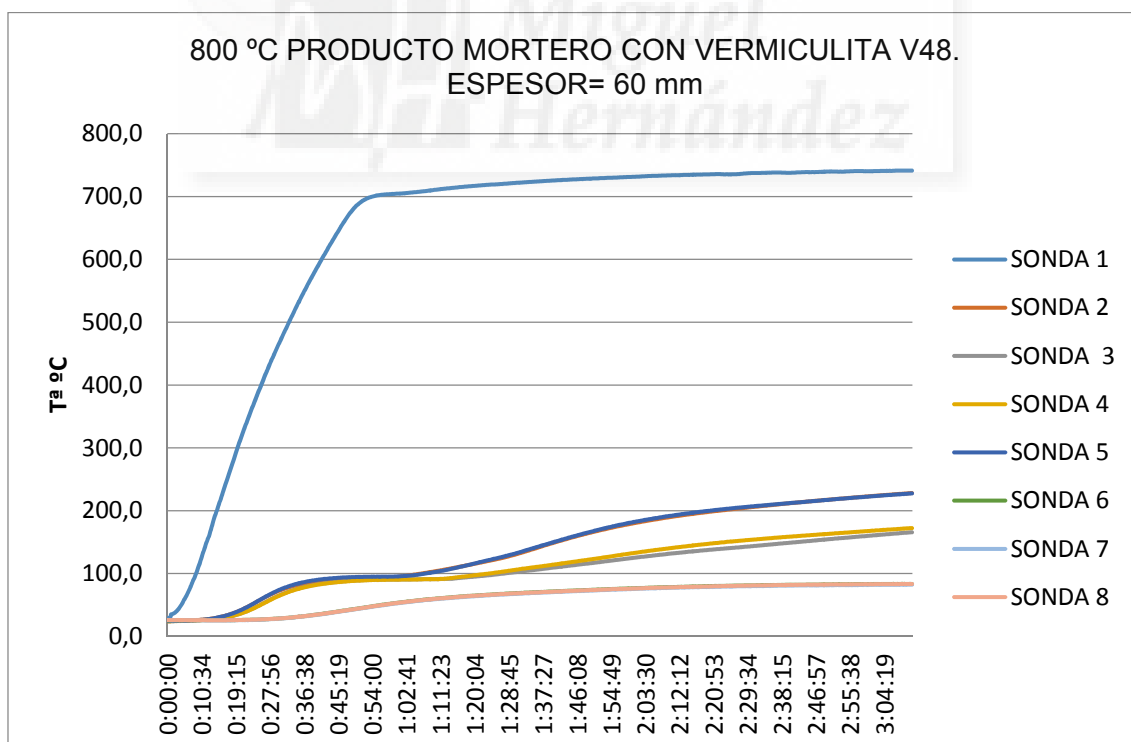
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
TEMPERATURA SONDAS °C								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	704,4	94,4	90,1	90,1	95,2	53,2	52,5	53
120	731,3	179,4	124,5	132,2	181,4	76,5	75,3	76
180	740,1	222,8	159,9	167,5	222,4	83,1	81,9	82,8

Tabla 81: Tabla resumen del ensayo, mortero V48 de 6 cm $T^a=800\text{ }^\circ\text{C}$.

La evolución de temperaturas:



Grafica 25: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V48 de 30 mm $T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Grafica 26: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V48 de 60 mm $T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Si compramos la evolución de las tres aportaciones de vermiculita, para el espesor de 6cm, quizás el más representativo puesto que aporta una protección mayor, tenemos:

Mortero								
Ensayo 1: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	789,7	127	100,4	128,5	117,6	80,8	79,4	80,9
Mortero								
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	796,9	132,6	129,5	135,1	107,1	81,2	80,8	80,1
V6								
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	782,8	135,1	138,8	118	112,1	89	87,6	88,5
V24								
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	784,6	173,5	149,7	138,9	136,6	87	85,4	85,4
V48								
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
180	740,1	222,8	159,9	167,5	222,4	83,1	81,9	82,8

Tabla 82: Tabla resumen de ensayos, mortero con vermiculita y sin vermiculita.

$T^a=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La aportación de vermiculita no solo disminuye el peso específico, sino que mantiene la capacidad de aislamiento térmico. Se mantienen los ensayos en torno a 85 °C de valor medio. Solo se aprecia un aumento en la sonda 2 del interior del mortero en el V48 de 222,8 °C que no se refleja en el valor final de las sondas que miden el valor en la chapa.

Como dicha aportación implica un sobre costo del material ya que debe ser mezclado, además de que merma sus propiedades mecánicas, el empleo de vermiculita será necesario cuando el peso específico sea un requisito adicional de utilización, no siendo necesario en el resto de casos ya que no aporta mejoras en el comportamiento térmico.

4.3. PARTE III

Vamos a considerar la posibilidad de mezclar materiales.

Se observa en el desarrollo de la fase de experimentación, que la unión del vidrio celular de textura rugosa con el sulfato cálcico es compatible. Además, también se indica que el V48, cuyo peso específico es el más bajo, se trata de un material extremadamente frágil y difícil de trabajar. El V24 será por tanto el más adecuado de mezclar, con una rigidez adecuada, una reducción del peso específico y con un

comportamiento térmico que ha sido expuesto y que es similar a los otros con más vermiculita y con menos.

El vidrio celular, se caracteriza por un bajo peso específico y por un comportamiento térmico adecuado a bajas y medias temperaturas.

Al unir los dos materiales, se obtienen dos consecuencias directas: se consigue que sea resistente a la exposición al fuego directo de gran intensidad en la cara expuesta (mortero de sulfato cálcico) y aislamiento térmico (vidrio celular) necesario por ejemplo para esferas de gases licuados que se mantienen a temperatura negativa, en la cara en contacto con el elemento a proteger.

Para este caso, como ya se observó el vidrio celular no admitía ensayos a fuego directo; en este sentido, como la temperatura de la cara no expuesta en cualquiera de los ensayos no llegó a 180 °C, no se superará nunca la temperatura de fusión del vidrio, con lo que el ensayo no debe tener problema alguno. No obstante, se ensayarán a temperatura directa de horno mufla y a fuego directo.

Los ensayos que se han realizado, han sido de un pack de vidrio celular de 5cm de espesor más mortero V24 de 3cm.

Las sondas se han colocado del siguiente modo:

En el mortero, la sonda 2; en el vidrio celular, la 3, 4 y 5. El resto en la chapa.

800°C		Ensayo: mortero 30mm + vidrio celular 50 mm +chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	806	128,5	111,8	67,3	97,9	36,7	36,5	37,1
120	801,7	326,7	277,3	168,1	229,7	55,5	54,8	55,5
180	801,8	337,1	287,1	177,7	241,6	64,1	63,6	64,2

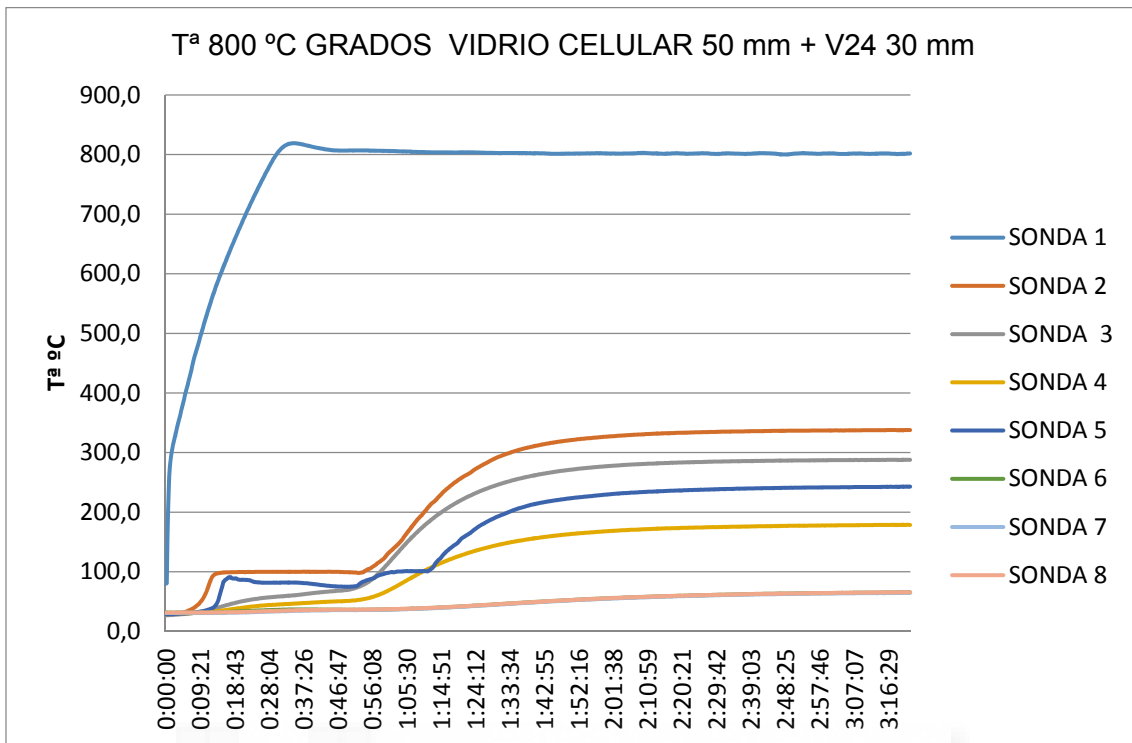
Tabla 83: Tabla resumen del ensayo, composite mortero vermiculita más vidrio celular
T^a=800 °C.

1200°C		Ensayo: mortero 30mm + vidrio celular 50 mm +chapa 10 mm						
		TEMPERATURA SONDAS °C						
tiempo (min)	SONDA 1 (Ref)	Interior del mortero				Medición en chapa metálica		
		SONDA 2	SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
60	1164,3	407,3	100,4	128,9	114,4	38,9	38,7	38,7
120	1167,7	486	159,3	201,4	197,9	51,7	51,3	51
180	1170,6	496	167,1	217,3	208,1	55,3	54,7	54,2

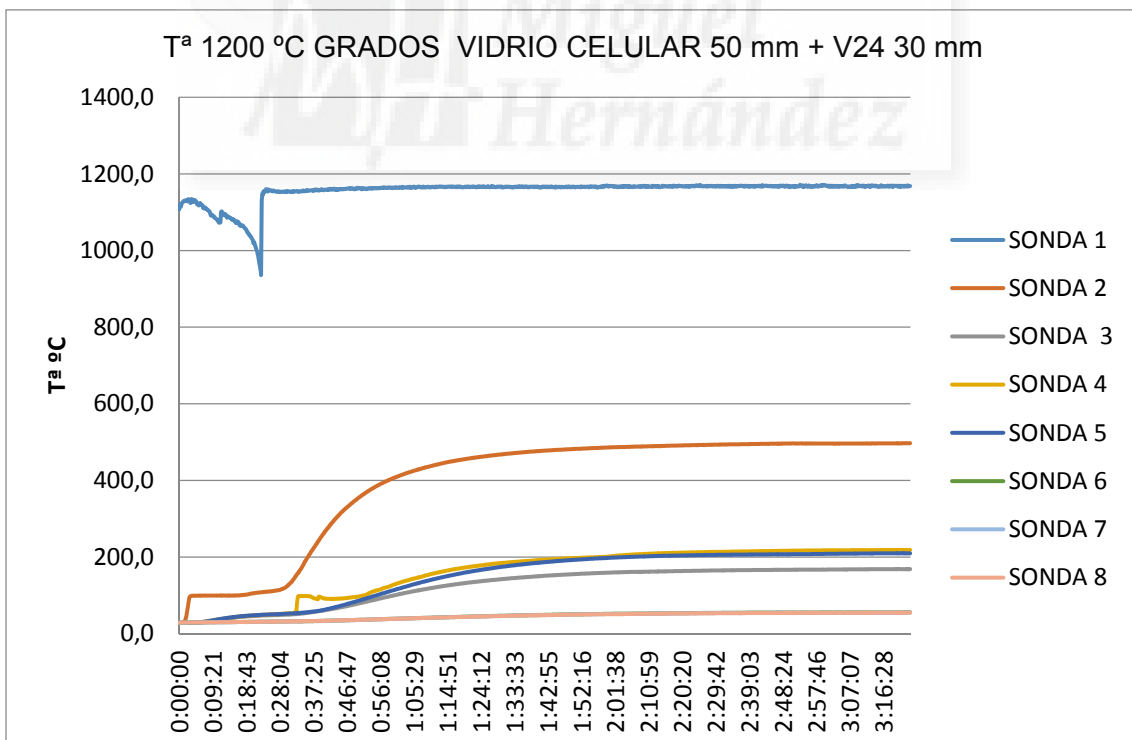
Tabla 84: Tabla resumen del ensayo, composite mortero vermiculita más vidrio celular
T^a=1200 °C.

Se observa que la temperatura solo es de 64,2 °C en el ensayo de pared de horno mufla y de 54,7 °C en el de fuego directo. No hay degradación del producto en ningún caso, como ya se había indicado y era de prever. El comportamiento ante el fuego, es el más interesante de todos los expuestos hasta el momento.

La evolución de las temperaturas, se observa en las gráficas siguientes.



Grafica 27: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 más vidrio celular de 30 mm $T^a=800\text{ }^\circ\text{C}$.



Grafica 28: Evolución temperatura de ensayo de Mortero con vermiculita V24 más vidrio celular de 30 mm $T^a=1200\text{ }^\circ\text{C}$.

Vamos a comparar con el resto de materiales; nos centraremos en el ensayo de 800 °C de exposición total.

T=800°C tiempo (min) 180	Ensayo Materiales, comparativa							
	SONDA Ref	SONDA (Ref 2)	Interior del material			Medición en chapa metálica		
			SONDA 3	SONDA 4	SONDA 5	SONDA 6	SONDA 7	SONDA 8
Ensayo: Vidrio celular (Foamglas) 50 mm + chapa 10 mm								
771,2	25,7	523,7	366,9	418	105,7	103,6	105,3	
Ensayo: Lana de Roca 50 mm + chapa 10 mm								
775,8	342,5	396,2	311,8	259,3	104	101,8	103,6	
Ensayo: Silicato cálcico 30 mm + chapa 10 mm								
777	26	323,2	318,2	326,8	119,9	117,9	118,6	
Ensayo 1: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
789,7	127	100,4	128,5	117,6	80,8	79,4	80,9	
Ensayo: mortero 60 mm + chapa 10 mm								
796,9	132,6	129,5	135,1	107,1	81,2	80,8	80,1	
Ensayo: mortero V6 60 mm + chapa 10 mm								
782,8	135,1	138,8	118	112,1	89	87,6	88,5	
Ensayo: mortero V24 60 mm + chapa 10 mm								
784,6	173,5	149,7	138,9	136,6	87	85,4	85,4	
Ensayo: mortero V48 60 mm + chapa 10 mm								
740,1	222,8	159,9	167,5	222,4	83,1	81,9	82,8	
Ensayo: mortero 30 mm + vidrio celular 50 mm +chapa 10 mm								
801,8	337,1	287,1	177,7	241,6	64,1	63,6	64,2	

Tabla 85: Tabla resumen del ensayos, comparativa todos los materiales. T^a=800 °C.

El comportamiento del pack vidrio celular y mortero con vermiculita, tienen un comportamiento más que aceptable. A las tres horas, la temperatura máxima en la cara expuesta de 800 °C se reduce en la chapa a una de 64,2 °C frente a los 80,9 °C del mortero de 60 mm o los 93,1 °C del mortero con 48 litros de vermiculita.

La solución mixta es la que ofrece un comportamiento más adecuado.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

MH **UNIVERSITAS**
Miguel
Hernández

5.- CONCLUSIONES.

Los resultados de la presente Tesis, nos llevan a conclusiones muy relacionadas con la aplicación práctica.

- 1) Se ha conseguido una pasta de sulfato cálcico con una resistencia a flexotracción de 6,2 N/mm² y un módulo de elasticidad de 682,31 N/mm²; considerados valores excepcionales para un yeso negro si se compara con la referencia del mismo de 1,2 N/mm².
- 2) Para el mortero sin vermiculita y para una temperatura en superficie de exposición de 800 °C, con un espesor de 60 mm de material, a las tres horas de ensayo, se había alcanzado la temperatura en la chapa de 80 °C
- 3) Para el mismo mortero sin vermiculita y para una temperatura en superficie de exposición de 800 °C, con un espesor de 30mm de material, a las tres horas de ensayo, se había alcanzado la temperatura de 147,6 °C de valor máximo, siendo los otros valores de 78 y 84,2 °C
- 4) La adición de vermiculita a la mezcla de compuesto, lleva a valores similares de comportamiento térmico, no aportando ventajas que no sean las de una disminución del peso específico. Para un espesor de 60 mm, la chapa alcanza un valor a las tres horas, de 89 °C máximo, y en torno a los 80 °C como temperatura de referencia.
- 5) Los materiales analizados tienen un buen comportamiento al calor, el vidrio celular no es apto para fuego directo, pero sí tiene un comportamiento térmico adecuado; pero los valores de medición de temperatura en chapa no expuesta, están por encima del mortero de 60 mm que como se indicaba está en torno a 80 °C de media.
- 6) La conjunción mortero más vidrio celular, tiene una buena unión mecánica, debido a la porosidad del material y a la facilidad de llenar los huecos el mortero líquido. Además, se consigue reducir la temperatura de chapa no expuesta a un valor mínimo de 63,6 °C, utilizando un mortero de 30 mm más 50 de vidrio celular.

The image features a large, faint watermark of the Universidad Miguel Hernández logo in the background. The logo includes a stylized sun or globe icon and the university's name in Spanish. Overlaid on this watermark is the chapter title in a dark blue, bold, serif font.

CAPITULO 6: BIBLIOGRAFIA

6. BIBLIOGRAFIA.

- A. M. Birk and J. D. J. VanderSteen (2002) On the Transition From Non-Bleve to Bleve Failure for a 1.8 m³ Propane Tank. ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference. Emerging Technologies in Fluids, Structures and Fluid Structure Interactions. Volume 2, Shock, Wave Propagation, Tube Bundle Dynamics, and Structural Dynamics. Vancouver, BC, Canada, August 5–9, 2002. Conference Sponsors: Pressure Vessels and Piping Division. ISBN: 0-7918-4657-1. Copyright © 2002 by ASME
- A. Oliver, F. J. Neila, A. García (2010). Caracterización térmica de placas de yeso con material de cambio de fase incorporado. *Informes de la Construcción*, Vol 62, No 519.
- A.M. Birk, M.H. Cunningham (1994). The boiling liquid expanding vapour explosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Volume 7, Issue 6, November 1994, Pages 474–480.
- AENOR. UNE 23727 (1990) Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Clasificación de los materiales utilizados en la construcción.
- AENOR. UNE 83.200 (2012). Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Clasificación.
- AENOR. UNE 83101 (1990). Áridos para hormigones, definiciones y clasificaciones.
- AENOR. UNE 92120-1 (1998). Productos de aislamiento térmico para construcción. Espuma rígida de poliuretano producida in situ por proyección. Parte 1: Especificaciones para los sistemas de poliuretano antes de la instalación.
- AENOR. UNE 92202 (1989) Materiales aislantes térmicos. Determinación de la Conductividad Térmica. Técnica del medidor del flujo de calor.
- AENOR. UNE EN ISO 11654:1998 (2012). Acústica. Absorbentes acústicos para la utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica.
- AENOR. UNE EN ISO 354:2004 (2012). Medición de la absorción acústica en una cabina reverberante.
- AENOR. UNE-102-001 (2008). Aljez o piedra de yeso. Clasificación. Características. Noviembre 1986. 26-9-2008.
- AENOR. UNE-102032 Yesos y escayolas de construcción. Métodos de análisis químico.
- AENOR. UNE-EN 102031. Yesos y escayolas de construcción. Métodos de ensayos físicos y mecánicos.
- AENOR. UNE-EN 13279-2 (2010). Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

- AENOR. UNE-EN 13279-2: Yesos de construcción y conglomerados a base del yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- AENOR. UNE-EN 13501 (2007). Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación.
- AENOR. UNE-EN 196-1 (2008). Métodos de ensayos de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
- AENOR. UNE-EN 933 (2012). Ensayos para la determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- Almagro, A. and I. Arce (1996). El Alcazar Omeya de Ammam, crisol de técnicas constructivas. 26-30. 1996. Madrid, I Congreso Nacional de Historia de la Construcción.
- Andrews, T. (1869). Lecture Bakerian: Sobre la continuidad de la gaseosa y los Estados de la Materia líquida. Proceedings de la Royal Society de Londres, 18 (114-122), 42-45.
- Antequera, P. (1991). Procesos de transformación de la fibra de vidrio.
- Antón Maicas, V. and J. Parras Simón (1987). Cálculo estructural. UNED.
- Arexpan. Manual de Arexpan. Ficha técnica.
- Arlita. Manual de Arlita (2000). Optivoc Aridos Ligeros, S.A.
- Arredondo, F. (1977). Dosificación de hormigones. Manuales y normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. 1977. Madrid, CSIC.
- Arredondo, F. Materiales de construcción II (1961). El yeso. 1961. Madrid, Instituto Eduardo Torroja.
- ATEDY (2008). Ejecución de revestimientos con yeso.
- ATEPA (2010). Libro Blanco del Poliuretano Expandido. ATEPA (Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado).
- Batanero, C. (2000). Controversies around the role of stadistical test in experimental research. Mathematical Thinking and Learning, 2(1-2). 78-98. 2000. Brian Greer.
- Bayer Material Science (2004). Information Tecnica.
- Berná Serna, J.M. (2013). Evolución de las propiedades mecánicas de los morteros aditivados de yeso con vermiculita. Tesis doctoral. E.T.S. de Orihuela. Universidad Miguel Hernández.
- Bestratén, M.; Turmo, E (1991). Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica. Notas técnica de prevención NTP-293. Inst Nac. Seg. Hig. Trab., pp. 1-6. Barcelona.

- Bestratén, M.; Turmo, E (1991). Explosiones BLEVE (II): medidas preventivas. INSHT, NTP-294. Barcelona.
- Birk, A. M. (1995). Scale effects with fire exposure of pressure-liquefied gas tanks. *Journal of loss prevention in the process industries*, 8(5), 275-290.
- Bowers and Wilkins (2010). Bowers and Wilkins.
- Box, G. E., W. Hunter, and J. H. Stuart (1989). *Estadísticas para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*. 1989. Barcelona (España), Editorial Reverte, S. A.
- Brakke, K. A. Minimal surface corners and wires (1992). *Journal of Geometric Analysis* 2.
- BS. Gypsum building plasters (1973). Premixed lightweight plasters. Part 2.
- Camacho, J (2002). *Estadística con SPSS para Windows*. Madrid, Ed. RA-MA.
- Carty, P. *Fiber properties* (1996). U.K., Business Development Center.
- ChiersTechniques (1973-74). París.
- Cohran, W. G. and G. M. Cox. (1991) *Diseños experimentales*. México.
- D.A. Neeper, (2000). Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Solar Energy*. Volume 68, Issue 5, 2000, Pages 393–403
- De L'Home, P. (1567). *Traites d'architecture Nouvelles Inventions pour bien bastir et a petits fraiz*. Premier tomo de l'Architecture. París (Francia), Léonce Laget Libraire-Editeur.
- Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (1999). *Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos*. Tesis doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).
- Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (2000). Reinforced plaster by means of the synergic action between concrete additives (superfluidifiers, fluidifiers and airing-plasticizers) and E glass fibres. *Materiales de Construcción*, Vol. 50, n ° 260 (2000)
- Del Río Merino, M., P. Comino (2001) Dispersebility degree influence of glass fibre E in the mechanical behaviour and workability of plaster *Materiales de Construcción*, Vol 51, No 261 (2001)
- Del Río Merino, M., P. comino. (2002) Analysis of the strengthenings of mixed glass fibers E and fibers AR in plaster, as an alternative to monofiber (homogeneous) *Materiales de Construcción*, Vol. 52, n ° 268 (2002)
- Doménech Carbó, M. T. (2006). *Aspectos físico-químicos de la pintura mural y su limpieza*. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia.
- EUROPERLITA, S. A. (2010). *Ficha Técnica de Perlita y Vermiculita*.

- Feldman D., B. D., Hawes D., Ghanbari E. (1991). "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard". *Solar Energy Materials*. 22 231-242. doi: 10.1016/0165-1633(91)90021-C
- Fengel, D. and G. Wegener (2010). *Wood chemistry, ultrastructure and reactions*. Berlin/ New York, Walter de Gruyter.
- Fernandez-Cámara, A (1990). *Explosión de recipientes. Teoría y cálculo aproximado de las consecuencias de la radiación térmica*. Prevención, núm. 114, pp. 48-56. 1990.
- Ferrán, M. (2001). *SPSS para Windows. Análisis estadísticos*. Madrid, McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Fisher, R. A (1958). *Statistical methods for research workers (13ª edición)*. New York, Hafner.
- Forg G. (1989). *Einfluß von verschiedenen Verzögerern auf die Kristallisation und die Festigkeiten von Stuckgips*. EDITION B.
- Fornell, T. C. (1990). *Widespread adventive plant in Catalina, in Biological Invasions in Europe and the Mediterranean basin*. 85-104. Boston, USA, Academia Publishers.
- Foster, N (1964). *Yesos aligerados*. Conferencia en el IV Congreso de Eurogypsum. Madrid.
- G. Bundyra-Oracz, W. Kurdowski, (2011). *Effect of the cement type on compatibility with carboxylate superplasticisers*. *Materiales de Construcción*, Vol 61, No 302
- G.A. Pinhasi, A. Ullmann, A. Dayan (2007). *1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE)*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 50, Issues 23–24, November 2007, Pages 4780–4795
- Gibson, L. J. and M. F. Ashby (1999). *Cellular solids. Structure and properties*. Cambridge University Press.
- Giles, B. and P. Cooke (1961). *Cork and the cork tree*. London (Inglaterra), Pergamon Press.
- Gomis Yagüe, V (2013). *El yeso como materia prima*. Universidad d'Alacant.
- González Madariaga, F. J (2005). *Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción*.
- González Madariaga, F. J. and J. Lloveras Macia (2009). *Mezcla de residuos de poliestireno (EPS) conglomerado con yeso o escayola para su uso en la construcción*. *Informes de la Construcción* 60, 35-43.

- Granulex, S. L (2010). Información Técnica.
- Guarín, N (2002). Estadística aplicada. Universidad Nacional de Colombia.
- Hayde, S. J. (1997). Industrial Process to expand clay, 1917. Dossier Tecnico. Magazine. LWAC Material Propertier. State of Art.
- Hearle, J. W. (1993). Can fabric hand enter the dataspace. Part 2. Textile Horizons.
- HEXCEL FIBERS, S. L (2013). Información Técnica.
- Hooke, R (1664). Micrographica Royal Society. London.
- Hull, D (1987). Materiales Compuestos. Editorial Reverte, S.L.
- Ignacio de la Cruz, Tomás Vázquez, Olga Fernández-Peña (1983). Sulfatos en el cemento portland y su incidencia sobre el falso fraguado: Estado actual del conocimiento. *Materiales de Construcción*, No 192 doi:10.3989/mc.v33.i192.967
- IMAL. (2012). Board property tester. IB 600.
- ISOVER (2013). Información Técnica.
- J. C. Ochoa, M. Bonilla, M. V. Borrachero, J. Payá (2013). Effect of an admixture from Agave americana on the physical and mechanical properties of plaster. *Materiales de Construcción*, Vol 63, No 309 (2013)
- J.E.S. Venart, G.A. Rutledge, K (1993). To BLEVE or not to BLEVE: Anatomy of a boiling liquid expanding vapor explosion. Article first published online: 17 JUN 2004. Process safety progress.
- K. Darkwa, J.S. Kim, (2004). Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall. *Journal of power and energy*.
- Kapps, M. and S. Buschkamp (2004). Fabricación de espuma rígida de poliuretano (PUR). Bayer Material Science.
- King, A. (1980). Effects of JP-4 Pool Fire Environments on 1/5 Linear Scale LPG-Tanks CContaining Explosafe Foil. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- Kronert, W. and N. Ukal (1979). Investigaciones de la transformación técnica orientada del talco y del caolín por medio de un goniómetro de difracción de rayos X.
- Landa Avilés, G (2002). Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante material compuesto. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos.
- Lehmann, H. and K. Rizke (1973). Anhidritas "solubles" de sulfato cálcico. Tonind Ztg Keram Rdsch.
- Leza, E. y. a. (2009). Ignifugacion. El comportamiento de las pinturas intumescentes sobre estructuras metálicas. Alternativas. Circular 07/2006.

- Lihou, D. A., & Maund, J. K (1982). Thermal radiation hazard from fireballs. In IChemE Symp. Series (No. 71, pp. 191-224).
- Londiche H., Guillemet R (1991). Comparison of three protective devices for BLEVE prevention. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, vol. 1, pp. 551-564.
- Londiche, H., Guillemet, R. (1991). Comparison of three protective devices for BLEVE prevention. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, vol. 1, pp. 551-564.
- Lord Kelvin (1887). Kelvin's Conjecture.
- M. M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas, A. G. de la Torre, M. A. G. Aranda (2007). Effect of polycarboxylate admixture structure on cement paste rheology. *Materiales de Construcción*, Vol 57, No 286.
- Maddern, K. and French I (1994). The potential application of non_wood fibers in papermaking an Australian perspective.
- Manuales de soluciones constructivas. Saint Gobain Placo Ibérica, S.A., 2010
- Mañas Lahoz, J. L (1991). Las explosiones "BLEVE". Riesgos y medidas preventivas Protección Civil. España. Seminario sobre explosiones BLEVE, Madrid.
- Mañas Lahoz, J. L. (1984). BLEVEs, their nature and prevention. *Fire International*, 87(8), 27-39.
- Marcos, C (2012). Productos resultantes de vermiculitas expandidas térmicamente a 1000°C.
- Maxit. Arlita (2010). Ficha técnica.
- Mendenhall, W., D. D. Wackerly, and R. L. Cheaffer (1991). *Estadística matemática con aplicaciones*, 2ª Edición. 1991. México, D.F., G. E. Iberoamericana.
- Miravete, A (2007). *Materiales compuestos. Volumen I*. Barcelona (España), Editorial Reverte, S.A.
- Montenegro Formiguera, L (1987). Las explosiones BLEVE y el gas natural licuado Comunicación 14-87. XIII Asamblea Nacional del Gas. Madrid, 27, 28 y 29 mayo 1987
- Montgomery, D. C (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. 1991. México, Grupo Editorial Iberoamericana.
- Murat, M. and M. Foncault (1977). Structure, cristalochimie, et reactivity des sulfates de calcium. RILEM International Simposia Calcium Sulfates derives materials.
- Múzquiz Ramos, E.M., Juan G. Osuna, Alma Solís y Silvia Solís (2009). Influencia de los aniones Cl-1, Br-1 y SO4-2 sobre el tiempo de fraguado y propiedades del

- yeso cerámico. Sociedad Química de México. ISSN 1870-1809. Bol. Soc. Quím. Méx. 2009, 3(2), 73-78
- Neeper, D. A. (2000). Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Solar Energy* 68 (5): 393-403. doi:10.1016/S0038-092X(00)00012-8
- Oggiano, N., L. G. Angelini, and P. Cappellitto (1957). Pulping and paper properties of some fiber crops. *Industrial crops and products*.
- OGISO, C (1972). Loos and safety Symposium PACHECo, Japon
- Ormea, G. B (1975). La teoría y la práctica en la construcción. Barcelona, Oepli. Ed. Científico Médica.
- P. Kittll, J.H. Castro (1975). Mortar cohesión. The effect of additives. *Materiales de Construcción*, Vol. 25, n ° 160
- Patente Nacional 201200897 (2013). Aditivo seco para yesos y procedimiento para su preparación. Universidad Miguel Hernández.
- Perliindustria (2002). Ficha Técnica. Perliindustria.
- Perlita y Vermiculita SL (2008). Vermiculita Ficha Técnica.
- Phelan, R. and D. Weaire (1994). A counter-exemple to Kelvin's Conjeture on minimal surface. *Philosophical Magazine letter* 69(2).
- Phillips, R. W (1983). La ciencia de los materiales dentales. 9ª Edición. McGraw Hill.
- Polunin, O. and A. Huxley (1987). *Flowers of the Mediterranean*. 1987. London, Hogarth Press.
- Prugh, R. W (1991). "Quantify BLEVE hazards". *Chem. Eng. Progr.*, pp. 66-72.
- Recuero, M (2012). Acústica arquitectónica. Soluciones prácticas.
- Reid, R. C. (1976). Superheated liquids. *American Scientist*, 64, 146–156.
- Reid, R. C. (1979). Possible mechanism for pressurized-liquid tank explosions or BLEVEs. *Science*, vol. 203, p. 1263. 1979.
- Richard W. Prugh (1991). Quantify BLEVE hazards. *Journal of fire protection engineerin*. *Chem. Eng. Progr.* pp. 66-72.
- Rivero Fernández, L. M. (1997). Fabricación de productos de base yeso y sus aplicaciones industriales. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.
- Rockwool Firesafe Insulation (2013). Información Técnica. Rockwool Firesafe Insulation.
- Ronette, H.-K (2012). *Enciclopedia of textile finishing* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Rouette, H.-K (2001). *Enciclopedia of Textile finishing*. 3, 2499-2500. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ruiz, B.A. (2009). Aplicación del yeso en exteriores: análisis de dosificaciones en la ciudad de Cuenca. Laboratorio y estudio de campo en la ciudad de Cuenca.

- Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Valencia, 21-24.
- Saint Gobain Placo Ibérica, S. A (2010). Manuales de soluciones constructivas.
- SIKA (1998). Manual de aditivos para el hormigón. SIKA.
- Sjöström, E (1981). Wood chemistry. Fundamentals and applications. London, Academic Press.
- SNIP (1982). La plâtre SNIP. Paris, Ed. Eyrolles.
- Speller, C (1993). The potential for growing biomass crops for fuel on Suplus Land in the U.K. Outlook on agriculture. U.K.
- Steel, R. G. and J. H. Torrie (1985). Bioestadística. Principios y procedimientos. 2ª edición. México, McGraw-Hill.
- Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. Journal of Hazardous Materials. Volume 141, Issue 3, 22 March 2007, Pages 489–519
- Texsa (1974). Hormigones y aditivos. Texsa.
- Torres Balbas, L (1995). Precedentes de la decoración mural hispano musulmana. Crónica arqueológica de la España musulmana XXXVII. Obra dispersa I. Instituto de España.
- Torres Balbás, L. and A. Momplet Mínguez (1995). El arte hispanomusulmán. Arte-Encuentro.
- V. Galvan Llopis, M. Soriano Cubells, L. Palaia Pérez, A. Mas Tomas, V. Monzo Hurtado. (1990). Influencia de un aditivo no comercial sobre la calidad de los yesos en construcción. Materiales de Construcción, Vol 40, No 218
- Vermizol (2009). Vermiculita. Ficha técnica. 2009.
- Villanueva, L. d. (1982). Estudios de yeso, resistencia al fuego. Boletín del yeso.
- Villanueva, L. d. (1996). Yeserías españolas. Propuesta de tipología histórica. I Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Actas del Congreso. 537-544. Madrid.
- Villanueva, L. d. (2004). Evolución histórica de la construcción con yeso. Informe de la construcción. 493.
- Villanueva, L. d. (2005). La investigación actual en su inserción histórica. I Jornadas de Investigación en Construcción. Actas de las jornadas. 673-679. Madrid.
- Villanueva, L. d. (2009). El yeso: material de construcción primitivo y actual. Boletín yeso cemento. 2.
- Villanueva, L. d. and A. García Santos (2009). Manual del yeso de ATEDY. Editorial Cie Dossat, 2000. Madrid.

- Villanueva, L. d. and Del Rio Merino M. (1994). Cielorraso de escayola reforzada. Catedra de materiales de construcción ETSAM-UPM.
- Walls, W. L (1979). The BLEVE, partes I y II 1979. Fire Command, 46.
- White, G. A. and C. G. Cook (2010). Inventory of Agro-Mass. 2010. Boca Raton U.S.A., CRC Lewis Publishers.
- Wyman, J (1865). Fisiología comparada.

