

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN RECURSOS Y TECNOLOGÍAS
AGRARIAS, AGROAMBIENTALES Y ALIMENTARIAS**

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS
MORTEROS DE YESO ADITIVADOS CON GRAFENO Y
ACIDO POLICARBOXILICO**

Autor de la Tesis: Luis Miguel Serna Jara

Director de la Tesis: Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez

Codirector de la Tesis: Dr. José Antonio Flores Yepes

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

TESIS DOCTORAL



**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LOS
MORTEROS DE YESO ADITIVADOS CON GRAFENO Y
ACIDO POLICARBOXILICO**

Autor: Luis Miguel Serna Jara

DIRECTOR DE TESIS	CODIRECTOR DE TESIS	TUTOR DE TESIS
Joaquín Julián Pastor Pérez Dr. Ingeniero Agrónomo Catedrático de Escuela Universitaria Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)	José Antonio Flores Yepes Dr. Ingeniero Industrial Profesor Colaborador Departamento de Ingeniería EPSO (UMH)	Dr. Angel Antonio Carbonell Barrachina Catedrático de Universidad Departamento de Tecnología Agroalimentaria EPSO (UMH)

INDICES DE CALIDAD

Esta Tesis Doctoral, se presenta en formato tradicional con los siguientes indicios de calidad, que se anexa al final de la misma:

1. Publicación de artículo de investigación en revista indexada

Título: "Study of compressive strength of gypsum with graphene addition".

Autores: Luis M. Serna Jara, Joaquín Pastor Pérez, José A. Flores Yepes.

Publicación: CEMENT WAPNO BETON

Área Temática: Materiales de construcción

Editor: Stowarzyszenie Producentow Cementu

Año de publicación: 2020

ISSN: 1425-8129.

Artículo de investigación, incluido en Open Access





CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR Y CODIRECTOR DE LA TESIS DOCTORAL

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

CERTIFICAN:

Que la Tesis Doctoral que lleva por título “Estudio de las propiedades mecánicas de los morteros de yeso aditivados con Grafeno y ácido policarboxílico”, de la que es autor el Graduado en Ingeniería Mecánica D. Luis Miguel Serna Jara ha sido realizada íntegramente bajo la dirección de ambos, en el Departamento Ingeniería, dentro del grupo de investigación Nuevos Materiales de Construcción “N.M.,C” perteneciente al programa de Doctorado de Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias, “Retos-AAA” en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández, durante el periodo comprendido entre los años 2016 y 2018.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en el Real Decreto 99/2011, de 28 de enero (B .O. E. nº 35 de 10 de febrero de 2011), autorizamos su presentación.

Y para que conste a todos los efectos, expido el presente certificado en Orihuela, a 28 de Noviembre de 2020

PASTOR PEREZ
JOAQUIN JULIAN
Firmado digitalmente por
PASTOR PEREZ JOAQUIN
JULIAN -
Fecha: 2020.12.04
12:20:27 +01'00'

FLORES YEPES
JOSE ANTONIO
Firmado digitalmente
por FLORES YEPES JOSE
ANTONIO -
Fecha: 2020.12.04
18:47:00 +01'00'

Fdo: Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez

Director de la Tesis

Fdo: Dr. Jose Antonio. Flores Yepes

Codirector de la Tesis



CERTIFICACIÓN DEL COORDINADOR DEL PROGRAMA DE DOCTORADO

Dra. Juana Fernández López, Catedrática de Universidad y Coordinadora del Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias (Retos-AAA) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (U.M.H.)

CERTIFICA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Estudio de las propiedades mecánicas de los morteros de yeso aditivados con grafeno y ácido policarboxílico”, de la que es autor el graduado en Ingeniería Mecánica y Master Universitario en Gestión y Diseño de Proyectos e Instalaciones D. Luis Miguel Serna Jara, ha sido realizada bajo la dirección de los doctores D. Joaquín Julian Pastor Pérez y D. Jose Antonio Flores Yepes, profesores de la Universidad Miguel Hernández de Elche; actuando como tutor el doctor D. Angel Antonio Carbonell Barrachina.

Considerando que la tesis es conforme en cuanto a contenido y forma a los requerimientos del Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias (Retos-AAA); por tanto, es apta para su exposición y defensa pública.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente certificado en Orihuela, a 28 de Noviembre de 2020

JUANA|
FERNANDEZ|LOPEZ
Fdo.: Dra. Juana Fernández López

Firmado digitalmente por
JUANA|FERNANDEZ|LOPEZ
Fecha: 2020.12.05 17:42:25
+01'00'

Coordinadora del Programa de Doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias,
Agroambientales y Alimentarias (Retos-AAA)

INDICE

INDICE.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	8
INDICE DE GRAFICAS	11
INDICE DE ILUSTRACIONES	14
INDICE DE FOTOGRAFÍas.....	15
LISTADO DE ABREVIATURAS	17
RESUMEN	19
ABSTRACT.....	20
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	21
1.1. INTRODUCCION.....	22
1.2. EL YESO. DEFINICION Y NATURALEZA.....	23
1.2.1. SISTEMA SULFATO CALCICO-AGUA.....	25
1.3 EVOLUCION HISTORICA DEL YESO.	29
1.4. CLASIFICACION DE TIPOLOGIA DE YESO EN FUNCION DE SU EVOLUCION A LO LARGO DE LA HISTORIA.....	32
1.4.1. YESO ARTESANAL.....	32
1.4.2. YESO INDUSTRIAL.	33
1.4.3. YESO DE TERCERA GENERACION.	35
1.5. CARACTERISTICAS DEL YESO.	36
1.6. PROPIEDADES DEL YESO.	38
1.7. PROCESO DE FABRICACION DEL YESO.....	40
1.8. FRAGUADO DEL YESO.	46
1.8.1. TEORIAS DEL FRAGUADO.	46
1.8.2. EXPANSION DE FRAGUADO.	47
1.8.3. MECANISMOS DE FRAGUADO.	47
1.8.4. RESISTENCIAS MECÁNICAS.....	54
1.8.5. TIEMPO DE FRAGUADO.....	55

1.9. TIPOS DE YESO.....	56
1.10. TIPOS DE MORTEROS.....	58
1.10.1. SEGÚN CONGLOMERANTE O CARACTERÍSTICA ESPECÍFICA.....	58
1.10.2. SEGÚN SU USO O APLICACIÓN.....	59
1.10.3. SEGÚN SU MÉTODO DE FABRICACIÓN.....	59
1.10.4. SEGÚN SU FORMA DE SUMINISTRO.....	60
1.10.5. SEGÚN EL USO AL QUE VAN DESTINADOS.....	60
1.11. ADITIVOS.....	61
1.11.1. REDUCTORES DE AGUA.....	62
1.11.2. ACELERANTES DEL FRAGUADO.....	62
1.11.3. RETARDADORES DEL FRAGUADO.....	63
1.11.4. INCLUSORES DE AIRE.....	64
1.12. ESTADO ACUAL DE LA PRODUCCION DE YESO EN ESPAÑA.....	65
1.12.1. ZONAS YESIFERAS EN ESPAÑA.....	65
1.12.2. PRODUCCION DE YESO EN ESPAÑA.....	70
1.13. GRAFENO.....	75
1.13.1. DESCRIPCION DEL GRAFENO.....	75
1.13.2. CARACTERISTICAS DEL GRAFENO.....	77
1.13.3. OBTENCION DE GRAFENO.....	79
1.14. ACIDO POLICARBOXILICO.....	81
1.15. ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS.....	82
1.15.1. YESO CON FIBRA CELULOSA.....	82
1.15.2. APLICACIONES DEL CORCHO EN EL CAMPO DE LA EDIFICACIÓN.....	82
1.15.3. MEZCLAS DE RESIDUOS DE POLIETILENO EXPANDIDO (EPS) CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA PARA SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN.....	82
1.15.4. INCORPORACIÓN DE LA CÁSCARA DE MEJILLÓN EN EL YESO Y EL MORTERO.....	83
1.15.5. UTILIZACIÓN DE ADITIVOS EN LA CONFECCIÓN DEL MORTERO PROCEDENTES DE RESIDUOS.....	84
CAPITULO 2: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....	86
2.1. OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACION.....	87
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS DE LA INVESTIGACION.....	88

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	89
3.1. METODOLOGIA	90
3.2. MATERIALES	91
3.2.1. AGUA	91
3.2.2. YESO.....	93
3.2.3. ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO	95
3.2.4. ADITIVO GRAFENO.....	97
3.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS UTILIZADOS	99
3.3.1. MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS	99
3.3.2. DURÓMETRO ESCALA SHORE C	100
3.3.3. APAREJOS	101
3.4. METODOS	103
3.4.1. CONFECCIÓN DE PROBETAS.....	103
3.4.2. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA....	109
3.4.3. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO.	111
3.4.4. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ACIDO POLICARBOXILICO.....	112
3.4.5. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.....	113
3.5. ENSAYOS.....	114
3.5.1. ENSAYO DE DUREZA SHORE C.....	114
3.5.2. ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN.....	114
3.5.3. ENSAYO DE COMPRESION.....	119
3.6. ANÁLISIS ESTADISTICO	120
3.6.1. TAMAÑO DEL EXPERIMENTO.....	121
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	124
4.1. ENSAYOS DE LOTES PARA LA OBTENCION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	125
4.1.1. DENSIDAD LOTE N° 1 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 1,5).	125
4.1.1.1. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOTE N° 1 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,5).....	125

4.1.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE DENSIDAD LOTE N° 2 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,86).	129
4.1.3. DENSIDAD LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 2,33).	130
4.1.3.1. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 2,33).	130
4.1.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE DENSIDAD LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 2,33).	131
4.1.4. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOS DISTINTOS LOTES PARA LA OBTENCION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	132
4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	134
4.2.1. DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	134
4.2.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	134
4.2.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA SHORE C DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	135
4.2.2 RESISTENCIA A FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	137
4.2.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	137
4.2.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	138
4.2.3. RESISTENCIA A COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	139
4.2.3.1 RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	139
4.2.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.	140
4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.	141
4.3.1. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,05 %.	141
4.3.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO (0,05 %).	141
4.3.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,05 %).	143
4.3.2. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,08 %.	143
4.3.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE GRAFENO (0,08 %).	143
4.3.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,08 %).	144

4.3.3. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,10 %	145
4.3.3.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE GRAFENO (0,10 %).....	145
4.3.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,10 %).....	147
4.3.4. COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.	147
4.3.4.1. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.	147
4.3.4.2. DISCUSION DE COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE POLVO DE GRAFENO.....	149
4.3.5. ENSAYOS DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.	150
4.3.5.1. RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXION, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.	150
4.3.5.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.	152
4.3.6. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.....	155
4.3.6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.	155
4.3.6.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.....	157
4.4. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	160
4.4.1. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,10 %	160
4.4.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO (0,10 %).....	160
4.4.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,10 %) . .	162
4.4.2. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,16 %	162
4.4.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,16 %).....	162
4.4.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,16 %) . .	164
4.4.3. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,20 %	165

4.4.3.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,20 %).	165
4.4.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,20 %).	167
4.4.4. COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	167
4.4.4.1. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	167
4.4.4.2. DISCUSION DE COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO.	169
4.4.5. ENSAYOS DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	170
4.4.5.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	170
4.4.5.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO.	172
4.4.6. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	173
4.4.6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	173
4.4.6.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	175
4.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	176
4.5.1. ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	176
4.5.1.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	176
4.5.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	182
4.5.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	183
4.5.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	183
4.5.2.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	186

4.5.3. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	187
4.5.3.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.	187
4.5.4.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.....	190
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	191
5.1. CONCLUSIONES.....	192
5.2. POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	194
BIBLIOGRAFIA	195
ANEXO 1: Publicación de ARTICULO DE INVESTIGACION	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS.....	¡Error! Marcador no definido.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las fases del sulfato de calcio	26
Tabla 2: Productos del resultado de la calcinación del aljez.	45
Tabla 3: Valores de expansión de hidratación de diversos ensayos.	49
Tabla 4: Valores aproximados de la relación de Agua/ Yeso de amasado a saturación para diferentes productos	50
Tabla 5: Valores aproximados de la relación de Agua/ Yeso a consistencia normalizada para diferentes productos	51
Tabla 6: Influencia de la relación yeso/agua y de la duración del amasado sobre el tiempo de fraguado.....	52
Tabla 7: Pérdida de resistencia del yeso en función del % de agua añadida	54
Tabla 8: Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción. (fuente: UNE-EN 13279-1, 2009) [37]	57
Tabla 9: Especificaciones para los yesos de construcción.....	57
Tabla 10: Tipos de morteros según su composición.	59
Tabla 11: Especies de vegetación en zonas yesíferas de España.....	68
Tabla 12: Producción de yeso en España del periodo 2007-2015	71
Tabla 13: Valor monetario del Yeso	72
Tabla 14: Producción de Yeso por Comunidades autónomas en 2015	73
Tabla 15: Número de empleos directos en explotaciones de Yeso en España en 2015 (Fuente Ministerio de Industria, Energía y Minas, 2017) [45].	74
Tabla 16: Análisis de agua	93
Tabla 17: Especificaciones técnicas del Yeso empleado.....	95
Tabla 18: Resumen de las propiedades del aditivo Acido Policarboxílico.	96
Tabla 19: Especificaciones del polvo de grafeno.	98
Tabla 20: Datos de referencia muestras de mortero de yeso.....	109
Tabla 21: Dosificaciones y porcentajes de mezcla de agua y yeso para muestra de referencia.....	110

Tabla 22: Dosificaciones, cantidad y nomenclatura de probetas con aditivo de grafeno.	111
Tabla 23: Dosificaciones, cantidad y nomenclatura de probetas con aditivo de ácido policarboxílico.	112
Tabla 24: Dosificaciones, cantidad y nomenclatura de probetas con la mezcla de aditivos conjunta.	113
Tabla 25: Resultados de densidad de las probetas para la determinación del mortero base de referencia Lote 1.	126
Tabla 26: Resultados de densidad de las probetas para la determinación del mortero base de referencia Lote 2 (Y/A= 1,86).	128
Tabla 27: Resultados de densidad de las probetas para la determinación del mortero base de referencia Lote 3.	130
Tabla 28: Comparativo de los resultados de densidad de los 3 lotes de probetas para la determinación del mortero base de referencia.	132
Tabla 29: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso de referencia.	135
Tabla 30: Resultados de ensayo de Flexión para mortero de yeso de referencia.	137
Tabla 31: Resultados de ensayo de Compresión para mortero de yeso de referencia.	139
Tabla 32: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,05%.	142
Tabla 33: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,08%.	143
Tabla 34: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,10%.	145
Tabla 35: Resultados Dureza Shore C de mortero de yeso aditivado con polvo de grafeno en distintas proporciones.	148
Tabla 36: Resultados de ensayo de resistencia a flexión de mortero de yeso aditivado con polvo de grafeno (aditivo 1).	151
Tabla 37: Resultados de ensayo de resistencia a compresión de mortero de yeso aditivado con polvo de grafeno (aditivo 1).	156

Tabla 38: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con ácido Policarboxílico al 0,10%	160
Tabla 39: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con ácido Policarboxílico al 0,16%	163
Tabla 40: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico al 0,20%.....	165
Tabla 41: Comparativo de resultados de Dureza Shore C con el aditivo ácido policarboxílico	168
Tabla 42: Resultados de ensayo de resistencia a flexión de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico.....	170
Tabla 43: Resultados de ensayo de resistencia a Compresión de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico.	173
Tabla 44: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,05%) y ácido policarboxílico (0,06%).	177
Tabla 45: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,10%) y ácido policarboxílico (0,06%).	179
Tabla 46: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,15%) y ácido policarboxílico (0,06%).	181
Tabla 47: Tabla de resultados de Resistencia a Flexión para la mezcla de mortero de yeso, grafeno y ácido policarboxílico.....	184
Tabla 48: Tabla de resultados de Resistencia a Compresión para para la mezcla de los dos aditivos empleados.	187

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1: Diagrama de fases del sulfato cálcico.....	27
Gráfica 2: Diagrama de solubilidad del sulfato cálcico	28
Gráfica 3: Diagrama de fases del sulfato cálcico en función de T ^a y % de agua. (fuente: Alfonso García Santos, 1988) [6].....	28
Gráfica 4: Evolución de la producción de yeso en España durante el periodo 2007-2015.....	71
Gráfica 5: Densidad de Lote 1 de mortero de referencia base (Y/A= 1,5).....	127
Gráfica 6: Densidad de Lote 2 de mortero de referencia base (Y/A= 1,86).....	129
Gráfica 7: Densidad de Lote 3 de mortero de referencia base (Y/A= 2,33).....	131
Gráfica 8: Comparativo de los 3 lotes de probetas para la determinación del mortero base de referencia, para distintas relaciones Yeso-Agua.	133
Gráfica 9: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso de referencia.....	136
Gráfica 10: Resultados de ensayo de Resistencia a Flexión del mortero de yeso de referencia.....	138
Gráfica 11: Resultados de ensayo de Resistencia a Compresión del mortero de yeso de referencia.....	140
Gráfica 12: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,05%.....	142
Gráfica 13: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,08%.....	144
Gráfica 14: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con grafeno al 0,10%.....	146
Gráfica 15: Resultados de Dureza Shore C para distintos porcentajes de polvo de grafeno.....	149
Gráfica 16: Gráfica de resultados de ensayo a Flexión de mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.....	151

Gráfica 17: Gráfica de barras de resultados de ensayo a Flexión de mortero de yeso con grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 %, 0,10 %.....	152
Gráfica 18: Gráfica lineal de resultados de ensayo a Compresión de mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.	157
Gráfica 19: Gráfica de barras de resultados de ensayo a Compresión de mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.....	158
Gráfica 20: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con Acido Policarboxilico al 0,10%.	161
Gráfica 21: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con ácido Policarboxilico al 0,16%.	164
Gráfica 22: Resultados de ensayo de Dureza Shore C para mortero de yeso aditivado con ácido policarboxilico al 0,20%.	166
Gráfica 23: Comparativo de resultados de Dureza Shore C para distintos porcentajes de ácido policarboxilico.....	169
Gráfica 24: Gráfica de resultados de ensayo a Flexión de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxilico en distintas proporciones.....	171
Gráfica 25: Gráfica de valores promedio de resultados de ensayo a Flexión de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxilico.....	172
Gráfica 26: Resultados de ensayo a Compresión de la mezcla de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxilico en distintas proporciones.	174
Gráfica 27: Resultados de Resistencia a Compresión para distintos porcentajes de ácido policarboxilico.....	175
Gráfica 28: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,05%) y ácido policarboxilico (0,06%).....	178
Gráfica 29: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,10%) y ácido policarboxilico (0,06%).....	180
Gráfica 30: Resultados de ensayo de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso, grafeno (0,15%) y ácido policarboxilico (0,06%).....	182
Gráfica 31: Resultados de ensayo de resistencia a flexión de la mezcla de mortero de yeso, grafeno y ácido policarboxilico.	185

Gráfica 32: Resultados de ensayo a flexión de mortero de yeso con mezcla de los dos aditivos en distintas proporciones.....	186
Gráfica 33: Gráfica lineal de resultados de ensayo a Compresión de mortero de yeso con la mezcla de los 2 aditivos en distintas proporciones.....	188
Gráfica 34: Gráfica de barras de resultados de ensayo a Compresión de mortero de yeso con la mezcla de los 2 aditivos en distintas proporciones.	189



INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Fabricación del yeso (Fuente: Gomis Yagües, Vicente, 2013) [26]	41
Ilustración 2: Horno discontinuo.	44
Ilustración 3: Mapa de las unidades yesíferas y límite de la “España yesífera” (fuente: Riba y Macau, 1962) [41].....	66
Ilustración 4: Zonas donde hay presencia de vegetación gipsícola	69
Ilustración 5: Explotaciones mineras de yeso según.....	70
Ilustración 6: Estructura del grafeno	76
Ilustración 7: Ensayo normalizado.....	115
Ilustración 8: Modelo físico de viga biapoyada sometida a flexión debido a una carga puntual.....	116
Ilustración 9: Punto de medida para determinación del espesor.....	118



INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Variedad de piedras del Aljez.....	24
Fotografía 2: Detalles decorativos de Yeso en Alhambra de Granada.	31
Fotografía 3: Detalle decoración de Yeso en la sinagoga de Santa María la Blanca... 31	
Fotografía 4: Anhidrita natural,	35
Fotografía 5: Horno rotatorio para la calcinación de yeso	42
Fotografía 6: Microestructura del yeso fraguado	48
Fotografía 7: Yeso moreno.	94
Fotografía 8: Ácido Policarboxílico	96
Fotografía 9: Polvo de grafeno	97
Fotografía 10: MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS (FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO).....	99
Fotografía 11: DETALLE DE MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DEL LABORATORIO (fuente: laboratorio de construccion de la epso).....	99
Fotografía 14_ Durómetro escala Shore C.....	100
Fotografía 15: Cubo de plástico.....	101
Fotografía 16: Báscula de precisión	101
Fotografía 17: Moldes de acero.....	102
Fotografía 18: Espátulas.....	102
Fotografía 19: Pesada de la cantidad de yeso	104
Fotografía 20: Maquina mezcladora	105
Fotografía 21: Mezcla terminada	105
Fotografía 22: Agitador de hélice.....	106
Fotografía 23: Amasado de mezcla.....	106
Fotografía 24: Pasta mezclada.....	106
Fotografía 25: Probetas en el molde	107
Fotografía 26: Probetas desmoldadas.....	107

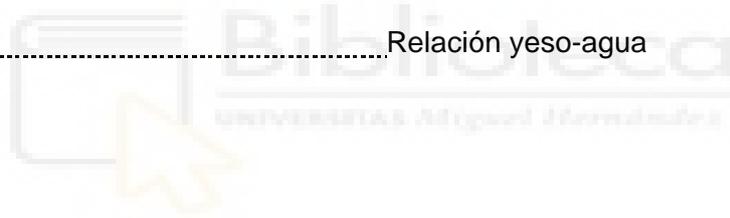
Fotografía 27: Probetas identificadas	108
Fotografía 28: Probeta ensayada a flexión.....	115
Fotografía 29: Determinación de la densidad.....	118
Fotografía 30: Determinación del peso.....	119



LISTADO DE ABREVIATURAS

α	.....	Alfa
β	.....	Beta
γ	.....	Gamma
Å	.....	Ángstrom
a.C.	.....	Antes de Cristo
A/Y	.....	Relación Agua-Yeso
AH	.....	Anhidrita
ASTM	.....	American Society of Testing Materials
BS	.....	British Standards
Cal	.....	Calorías
CNT	.....	Carbón nano tubos
°C	.....	Grados centígrados
DIN	.....	Deutsches Institut für Normung
DH	.....	Dihidrato
Dpto.	.....	Departamento
EPSO	.....	Escuela Politécnica Superior de Orihuela
F	.....	Fuerza
FC	.....	Fraguado Controlado
GPa	.....	Gigapascales
H (escala Mohs)	.....	Hardness (dureza)
HR	.....	Humedad relativa
kWh	.....	Kilowatio hora
L	.....	Longitud
M	.....	Mortero
MJ	.....	Megajulios
NF	.....	Normalización Francesa

NMC	.....	Nuevos materiales de construcción
NP	.....	Normalización Portugal
P	.....	Presión
Ref	.....	Referencia
RP	.....	Reglamento particular
SH	.....	Semihidrato
SIA	.....	Normativa de Suiza
T ^a	.....	Temperatura
Tm	.....	Tonelada métrica
UMH	.....	Universidad Miguel Hernández
UNE	.....	Una Norma Española
UNI	.....	Unificación Italiana Nacional
Y/A	.....	Relación yeso-agua



RESUMEN

En este siglo XXI, se están desarrollando nuevos materiales, para su uso desde el punto de vista industrial, tecnológico y de precisión hasta sus usos más cotidianos en el día a día de las personas. La principales objetivos de esta búsqueda sin interrupción es la de conseguir materiales con mejores propiedades mecánicas, así como el abaratamiento de costes de producción, sin olvidar la reducción de su impacto en el medio ambiente mediante la disminución de las emisiones de dióxido de carbono a la hora de la producción de los mismos.

Los morteros a base de sulfato cálcico están teniendo un nuevo auge en la actualidad debido a sus destacadas propiedades tanto de resistencia al fuego, como térmicas y acústicas. Los desarrollos para absorción de ondas de presión entre otros, permiten obtener materiales que consideremos de nueva generación.

Estos desarrollos van ligados al uso de nuevos aditivos que permiten manejar tanto los tiempos de fraguado como el contenido en agua de la mezcla, y además, la posibilidad de incluir al mortero distintos agregados que mejoren aún más sus propiedades de resistencia.

El objetivo fundamental del presente trabajo fue el de obtener resultados significativos comparando algunas propiedades mecánicas de morteros formados con yeso moreno aditivado mediante la adición de distintos porcentajes de polvo de grafeno y ácido policarboxílico.

Estudiaremos las propiedades de dureza superficial, resistencia a flexión, densidad del conjunto así como resistencia a la compresión.

La necesidad de utilizar aditivos, tiene por objeto el de aumentar las propiedades mecánicas intrínsecas con respecto al mortero convencional, así como, los tiempos de fraguado reduciendo la cantidad de agua del soporte; por lo que la aportación de dichas aditivos mejorarían las propiedades mecánicas, si no de deformación.

ABSTRACT

In this 21st century, new materials are being developed, for use from the industrial, technological and precision point of view to their most daily uses in people's daily lives. The main objectives of this search without interruption is to obtain materials with better mechanical properties, as well as lower production costs, not forgetting the reduction of their impact on the environment by reducing carbon dioxide emissions to the time of production of the same.

Mortars based on calcium sulfate are of increasing interest due to their outstanding properties, because of their fire resistance and thermal and acoustic properties. The developments for the absorption of pressure waves among others, allow us to obtain materials considered of new generation.

These developments are linked to the use of new additives that allow handling both the setting times and the water content of the mixture, and also the possibility of including different aggregates to the mortar that lead to further improvements of its resistance properties.

The main objective of this work was to obtain significant results by comparing some mechanical properties of mortars formed with brown plaster additivated with studies are the percentages of graphene powder and polycarboxylic acid.

The properties surface hardness, flexural strength, density of the assembly as well as resistance to compression.

The purpose of using additives is to increase the intrinsic mechanical properties with respect to conventional mortar, thus supporting setting times by reducing the amount of water in the support; This additives would contribute to improve mechanical properties, but also the deformability.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES



1.1. INTRODUCCION.

En este mundo tan desarrollado y globalizado con el avance tecnológico de nuevas técnicas o perfeccionamiento de las existentes, se está en continua investigación y desarrollo de nuevos materiales, principalmente de materiales ya existentes que han ido evolucionando; siempre con el objetivo de mejorar su propiedades mecánicas, optimización de su producción, o simplemente, por conseguir una mejora económica.

El caso que se presenta en este trabajo, es el análisis de las propiedades mecánicas del sulfato cálcico aditivado con un material, como es el grafeno, y así como al estudio de dichas propiedades de la mezcla del sulfato cálcico con otro aditivo como es el ácido policarboxílico (retardante del tiempo de fraguado).

Desde hace algún tiempo y desde que se descubriera el grafeno, por los físicos Andre K. Geim y Konstantin Novoselov [1], investigadores de la Universidad de Manchester, que obtuvieron el premio Nobel por sus experimentos pioneros sobre el material bidimensional grafeno, se está llevando a cabo una carrera por distintos instituciones, centros de investigación, universidades, en relación a la investigación de este material y sus aplicaciones.

Por todo ello, se pretende estudiar si se producen mejoras en las propiedades mecánicas del sulfato cálcico añadiendo este material como aditivo.

En este estudio se parte de la premisa que el elemento base, el mortero a base de sulfato cálcico ya está desarrollado, y es ampliamente conocido en el mundo de la construcción; sin embargo, en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, se lleva trabajando más de diez años en la mejora de las propiedades del mismo.

Con estos morteros aditivados se pretende obtener mejores propiedades de: trabajabilidad, aumento de dureza, resistencia a flexión y compresión, para conseguir un material innovador de mejores características para las

aplicaciones en la industria en general y más específicamente en el de la construcción, como material de revestimiento continuo en cerramientos interiores en edificaciones de uso industrial y residencial, o el uso de prefabricados, o como sustituto del ladrillo cerámico por suponer un ahorro de las emisiones de CO₂ significativo.

En el presente trabajo se describirá y analizará el mortero aditivado en su composición y dosificación para la obtención de los mejores resultados desde el punto de vista mecánico.

1.2. EL YESO. DEFINICION Y NATURALEZA.

El yeso se define como mineral roca denominada aljez o piedra de yeso. Está constituida principalmente por sulfato de calcio con dos moléculas de agua, denominado sulfato de calcio dihidratado o dihidrato. Su fórmula química es CaSO₄ • 2H₂O. Su color generalmente es blanco pero debido a impurezas minerales como arcilla, sílice, caliza y otros, puede tener colores rosados, castaños y grises. El yeso natural se encuentra en la naturaleza en diversas formas, p.ej. alabastro, yeso sedoso, yeso fibroso, yeso de nieve, yeso terroso, rosa del desierto, etc.

La palabra yeso también engloba otra acepción. A partir del yeso como mineral roca se obtiene un producto industrial que se utiliza como material para revestimientos, uniones y fabricaciones de diversas preformas. El yeso de construcción es un producto pulverulento, molido, que se obtiene de la cocción de la piedra de yeso y que una vez mezclado con agua es capaz de fraguar en el aire. Este yeso se denomina sulfato de calcio hemihidratado o semihidrato (CaSO₄ • ½ H₂O).

El aljez o piedra de yeso, es una roca sedimentaria que forma parte de las evaporitas, ya que tiene su origen geológico en la desecación, por evaporación, de lagos salados o mares interiores sin aliviaderos al mar, con láminas de agua de poco espesor, bajo un clima árido. (Diez Reyes, M.C., 2004) [2].

Podemos encontrarla bajo diferentes estados de cristalización, siendo selenitas o espejuelos (monocristales hexagonales transparentes), siendo puntas de flecha o rosas del desierto (maclas), alabastros (policristalinas) siendo esta variedad muy pura, masiva, compacta, translúcida con tonos grises o rosáceos. También existen variedades como los berrugones, siendo estos más impuros, ya que son estructuras policristalinas en las que aparecen elementos monocristalinos mezclados con formaciones masivas. Existe también una variedad de aspecto fibroso denominado yeso sedoso.



Selenita o espejuelo



Selenita o espejuelo



Punta de flecha o rosas del desierto



Alabastro



Anhidrita o karstenita



Basanita

FOTOGRAFÍA 1: VARIEDAD DE PIEDRAS DEL ALJEZ

(FUENTE: VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, 2014; DIEZ REYES, 2004; SANZ ARAUZ, 2009) [3] [2]
[4]

1.2.1. SISTEMA SULFATO CALCICO-AGUA.

De la palabra yeso se designan en castellano varios productos. Por una parte la piedra natural, denominada aljez o piedra de yeso, compuesta principalmente por sulfato de calcio cristalizado con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), denominado sulfato de calcio dihidratado o dihidrato, en la deshidratación la roca no debe estar sometida a temperaturas superiores a 180°C . Por otra parte, el producto polvo obtenido de la calcinación y molienda de la piedra antes descrita, este está compuesto por varias fases anhidras o semihidratadas del compuesto $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que al amasarse con agua, tiene la propiedad de poder endurecerse mediante un proceso físico-químico denominado fraguado. (Del Rio Merino, Mercedes, 1999) [5].

El producto en estado plástico formado por la mezcla de yeso y agua, se denomina pasta de yeso. Si se añade arena o carga, se llama mortero de yeso. Por último, una vez endurecido, este vuelve a transformarse en yeso, es decir, en sulfato cálcico dihidratado. Algunos autores utilizan el término de rehidrato para denominar a este último, ya que su composición química es igual a la inicial pero su estructura física es más porosa.

Empleamos términos como el de escayola, para designar un yeso de especial pureza, blancura y finura, o estuco referido a un revestimiento imitando al mármol utilizando yeso, cal o ambos. (Diez Reyes, M.C., 2004) [2]

Esta roca, aljez, es la única materia prima para la fabricación del yeso. Si la temperatura de tratamiento es superior a la antes citada (300°C - 600°C), el dihidrato llega a perder toda el agua de cristalización dando como resultado anhidrita soluble (sulfato cálcico anhidro), siendo esta muy inestable ya que al absorber agua de la atmósfera pasa fácilmente a hemidriato, en raras ocasiones este se encuentra en la naturaleza con el nombre de Basanita. Si la temperatura es todavía más elevada (superior a 700°C) el resultado sería anhidrita insoluble, esta es estable y no fragua si no se le añaden determinados acelerantes, en la naturaleza se encuentra con el nombre de Karstenita, siendo compacta, sacaroidea similar al alabastro y al mármol estatuario, blanca o ligeramente coloreada en tonos grises, azules o rojos.

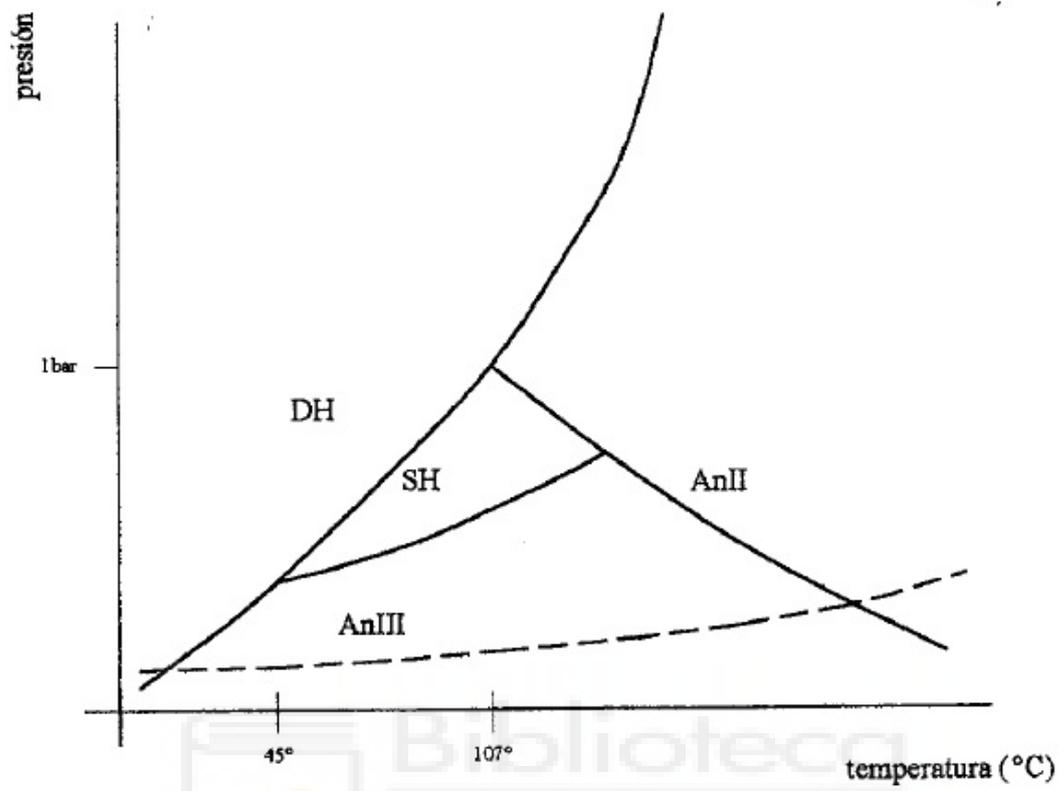
Como se ha indicado, existen cinco fases en estado sólido, en el sistema sulfato cálcico-agua: el sulfato cálcico dihidratado, el sulfato de calcio semihidrato (o hemidrato), anhidrita III, anhidrita II (estas cuatro fases existen a temperatura ambiente, y la quinta fase, solo existe a temperaturas superiores a los 1180°C, las características de las diferentes fases se muestran en la tabla nº 1:

CARACTERÍSTICAS DE LAS FASES DEL SULFATO DE CALCIO						
Nombre	Dihidrato	Semihidrato α	Semihidrato β	Anhidrita III	Anhidrita II	Anhidrita I
Otros nombres	Aljez, Piedra de yeso, Doble hidrato	Hemihidrato α , Semihidrato cristalizado	Hemihidrato β , Semihidrato microporoso	Anhidrita soluble, Anhidrita III	Anhidrita insoluble, Anhidrita β Sobrecocido	Anhidrita alta temperatura. Anhidrita α
Símbolo	DH	SH α	SH β	An III	An II	An I
Fórmula química	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \text{minH}_2\text{O}$	SO_4Ca	SO_4Ca
Sistema cristalino	Monoclínico	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal	Ortorrómbico	Ortorrómbico
Agua (%)	20,29	6,21	6,21	< 1	0	0
Peso específico (gr/cm ³)	2,31	2,75	2,63	2,58	2,93 – 2,97	
Peso molecular	172,17	145,15	145,15	136,14 + E	136,14	
Solubilidad (gr/l) a 20°C						
Ref. A |	2,05|2,58	6,65|7,11	8,90|9,52	6,95	3,00	
Ref. All						
Calor de hidratación (Cal/mol)		4100±20	4600±20	6150±20 7210±20	4030±20	

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LAS FASES DEL SULFATO DE CALCIO

(DEL RÍO MERINO, M. TESIS DOCTORAL, 1999) [5]

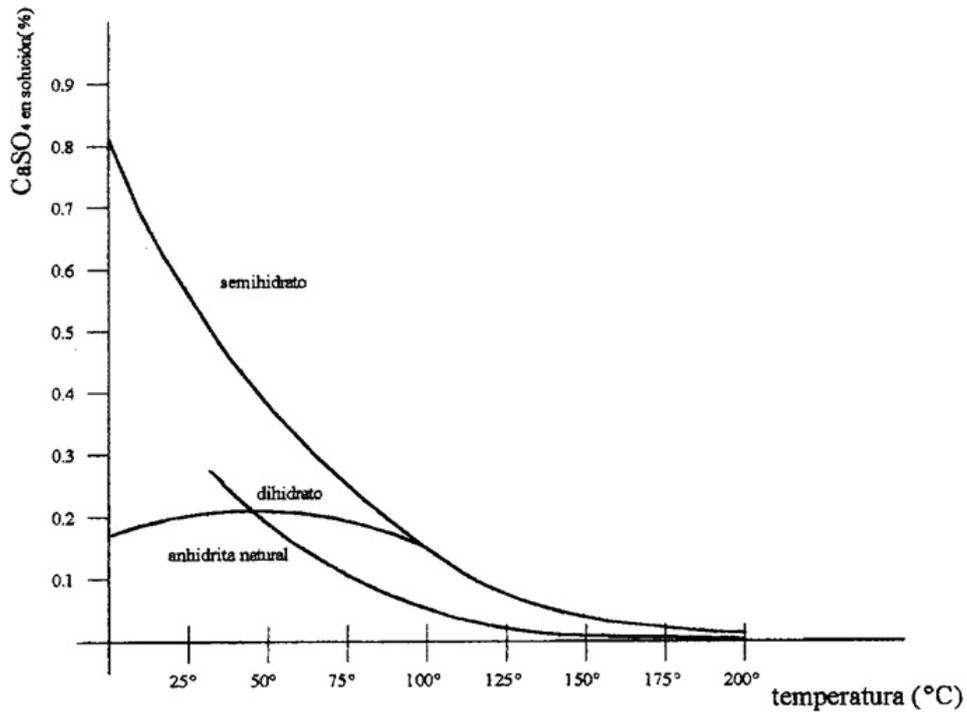
La representación de las distintas fases en un diagrama P-T^a, es:



GRÁFICA 1: DIAGRAMA DE FASES DEL SULFATO CÁLCICO

(FUENTE: ALFONSO GARCÍA SANTOS, 1988) [6]

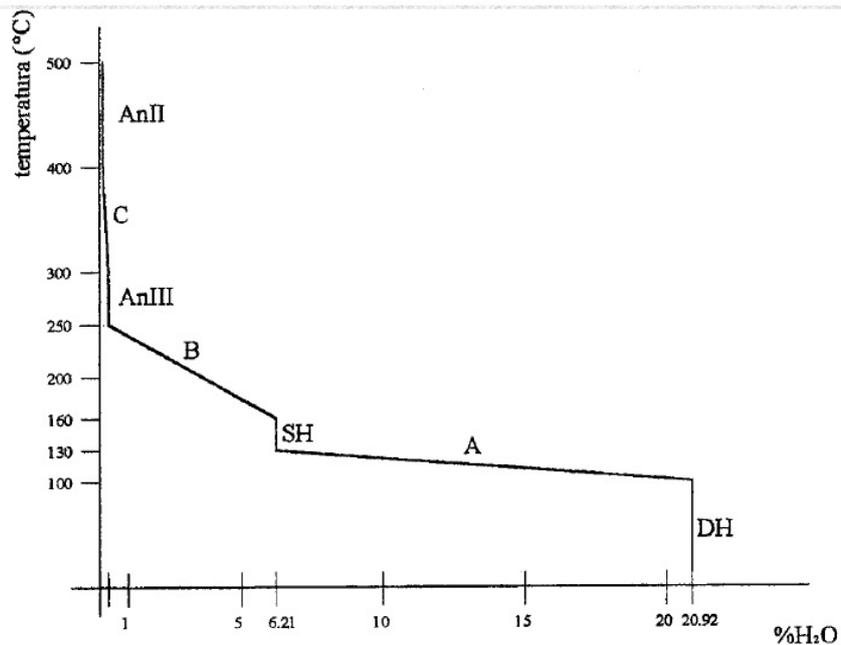
En función del contenido de agua y la temperatura, se muestran en el siguiente diagrama los porcentajes de solubilidad del sulfato de Calcio:



GRÁFICA 2: DIAGRAMA DE SOLUBILIDAD DEL SULFATO CÁLCICO

(FUENTE: ALFONSO GARCÍA SANTOS, 1988). [6]

Gráficamente se puede observar el contenido de agua de las distintas fases en función de la temperatura:



GRÁFICA 3: DIAGRAMA DE FASES DEL SULFATO CÁLCICO EN FUNCIÓN DE Tª Y % DE AGUA. (FUENTE: ALFONSO GARCÍA SANTOS, 1988) [6].

1.3 EVOLUCION HISTORICA DEL YESO.

El yeso forma parte de los materiales de construcción más antiguos conocidos, en sus inicios el hombre Neolítico desarrollaba morteros de barro aunque obteniendo escasos resultados, cuando este alcanzó el nivel tecnológico mínimo como para dominar el fuego a baja temperatura pasó a revestir las paredes de sus cabañas y a realizar las juntas de sus primitivas fábricas de piedra con yeso, mejorando notablemente sus resultados.

En el período Neolítico, con el dominio del fuego, comenzó a elaborarse yeso calcinando aljez, se utilizó para unir las piezas de mampostería, sellar las juntas de los muros y para revestir los paramentos de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro. En Çatal Hüyük (Turquía), durante el milenio IX a. C., encontramos guarnecidos de yeso y cal, con restos de pinturas al fresco. En la antigua Jericó, en el milenio VI a. C., se usó yeso moldeado.

También los Egipcios hicieron ferviente uso del yeso, tal y como se muestra en diversos monumentos de la región, formando las juntas de los sillares en la pirámide de Keops 2800 años a.C, formando parte de revestimientos y suelos en el palacio de Knossos, además de este uso conglomerante, los Egipcios hicieron uso del yeso en gran cantidad de tumbas revistiendo la piedra del terreno como base de pintura y realizando materiales de decoración y moldes. (Villanueva, 2004) [3], (Berná Serna, Juan Manuel, 2013) [7].

Hay que aclarar que su uso estaba unido al de la cal, por la analogía que presentan, ya que nacen de un origen geológico similar, tratándose en ambos casos de evaporitas, que aparecen en estratos próximos cuyos yacimientos en muchos casos están mezclados. También puede originar confusión el proceso de fabricación, ya que si la piedra de yeso 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 en las caleras. Por último, en muchas aplicaciones tradicionales se ha mezclado yeso y cal tratando de combinar la mayor velocidad de fraguado del yeso con la mejor estabilidad de la cal.

Actualmente, con el desarrollo de la química nadie puede confundir el yeso con la cal

También se encuentran estatuas realizadas con Aljez en el Museo Arqueológico de Madrid, como la figura de una diosa de la fertilidad realizada en alabastro u datada en el siglo V a.C.

El yeso también ocupó su lugar en la Antigua Grecia, el escritor griego Teofrasto, siglos IV-III a.C, discípulo de Platón y Aristóteles, ya hablaba del yeso (en griego gypsos) en su tratado de piedra, donde entre otras peculiaridades indica la posibilidad de que puede volverse a recocer.

Cabe destacar las citas de Plinio el viejo, en su libro XXXVI, las cuales se refieren al yacimiento de lapis specularis, espejuelo, localizado alrededor de Segóbriga, en Saeciles, indicando que la calidad de este es superior a la de Sicilia, y su exportación a Roma para usos tales como el acristalamiento de huecos.

Aunque en la capital del Imperio se hizo poco uso del yeso (en latín gypsum), este se empleó en la decoración interior de los muros de Pompeya y encontramos restos de yeserías clásicas en Roma y en otras regiones del imperio, por ejemplo en Villajoyosa (Alicante). La gran tradición en el uso del yeso nos viene heredada de las culturas mesopotámicas, sobretodo en regiones con climas secos, donde es muy abundante y el clima favorece su conservación. Estas desarrollaron una destacada cultura constructiva en albañilería, caracterizada por el uso del yeso (en persa gatch).

Ya que los sumerios y asirios lo utilizaban abundantemente, podemos establecer su origen en el Medio Oriente.

Como ya hemos hecho referencia en el punto anterior, cerca del 52% de la superficie Española se encuentran yesos, en los ocho siglos de denominación Árabe en España (Torres Balbás, L. and A. Momplet Mínguez) [8] [9], el yeso se convirtió en el principal material de decoración (en manos de alarifes árabes), teniendo su máximo esplendor en época de sultanes nazaritas; como ejemplo, nos podemos encontrar la Alhambra de Granada, Santa María la Blanca en Toledo o el Alcázar de Sevilla.



FOTOGRAFÍA 2: DETALLES DECORATIVOS DE YESO EN ALHAMBRA DE GRANADA.

(FUENTE: PATRONATO DE LA ALHAMBRA)

[10]



FOTOGRAFÍA 3: DETALLE DECORACIÓN DE YESO EN LA SINAGOGA DE SANTA MARÍA LA BLANCA.

(FUENTE: TOLEDO MONUMENTAL) [11]

Cabe destacar que, en el norte de África, los bereberes llegan a construir canales y presas con yeso en el oasis de Mزاب.

En Europa, durante la Edad Media, también se hizo uso del yeso, especialmente en la región de París, empleado en revestimientos, forjados combinados con viguetas de madera, en tabiquería y en chimeneas.

En la decoración del Renacimiento se usa profusamente el yeso, y a partir del Barroco, el estuco de yeso se utiliza a gran escala junto con la técnica de staff y las yaserías tradicionales, facilitando muchas decoraciones del Rococó.

Durante la Edad Media, principalmente en la región de París, donde existían 18 canteras de yeso en explotación en 1292, se empleó el yeso en revestimientos, forjados, tabiques y chimeneas. En el Renacimiento para decoración. Durante el periodo Barroco fue muy utilizado el estuco de yeso ornamental y la técnica del staff, muy empleada en el Rococó. El producto se exportó a Inglaterra, a partir del siglo XVII después del incendio de Londres.

A partir del siglo XVIII, el empleo del yeso es generalizado en toda la cultura europea. En el 1768 es presentado el primer estudio científico de los fenómenos que prestan base a la preparación del yeso en la Academia de Ciencias por Lavoisier. Poco tiempo después, Le Chatelier y Van t'Hoff dan una explicación científica a la deshidratación de este material, empezando así, su estudio ininterrumpido. (Villanueva, 2004) [3] o (Arredondo, 1961) [12]

A pesar de su extensa historia, hasta principios del siglo veinte, la industria yesera no empieza perfeccionarse, tanto en sus métodos de fabricación como en el incremento de su calidad, desarrollando como consecuencia un aumento en el número de productos.

1.4. CLASIFICACION DE TIPOLOGIA DE YESO EN FUNCION DE SU EVOLUCION A LO LARGO DE LA HISTORIA.

La producción de yeso a lo largo de la historia se puede clasificar en tres tipos, los cuales se detallan a continuación.

1.4.1. YESO ARTESANAL.

Tradicionalmente se producen tres tipos de yesos artesanales.

- El yeso negro es el producto que contiene más impurezas, de grano grueso, color gris, y con el que se da una primera capa de enlucido.
- El yeso blanco con pocas impurezas, de grano fino, color blanco, que se usa principalmente para el enlucido más exterior, de acabado.
- El yeso rojo, muy apreciado en restauración, que presenta ese color rojizo debido a las impurezas de otros minerales.

El yeso tradicional, descrito hasta ahora, científicamente es un producto multifase producido por la calcinación del aljez o piedra de yeso (La Spina Vincenzina, 2014) [13]. Esta calcinación se llevaba a cabo en hornos artesanos tradicionales, también llamados en España morunos o árabes, produciendo un producto de varias fases en función de la temperatura alcanzada.

Aunque muy pocos, aún quedan algunos hornos morunos donde se fabrica el yeso de forma tradicional, cabe destacar el horno de Albarracín donde se fabrica el yeso rojo, muy apreciado en restauración. Este tipo de yesos los podemos denominar yesos artesanos o tradicionales.

1.4.2. YESO INDUSTRIAL.

La evolución de la industrialización del proceso de fabricación del yeso es lenta, y se produce por desigual en los países. Lo cual hace que convivan durante un tiempo prolongado los yesos artesanos y los yesos industriales o de segunda generación.

En el siglo XVIII el uso del yeso en construcción se generaliza en Europa. Además comienza el conocimiento científico de este material. En 1768 Lavoisier presenta el primer estudio científico del yeso en la Academia de Ciencias. Posteriormente Van t'Hoff y Le Chatelier aportaron estudios describiendo los procesos de deshidratación del yeso, sentando las bases científicas del conocimiento ininterrumpido posterior (De Villanueva Domínguez, Luis y García Santos, Alfonso Manual, 2001). [14]

A principios del siglo 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. Igual ocurre con los prefabricados de escayola, donde la plancha lisa sustituye a los tradicionales encañizados en diferentes tipos de techos, así como toda una serie de productos prefabricados como complementos y decoración de techos, como molduras, cornisas interiores, cortijeros, fosas, plafones, etc.

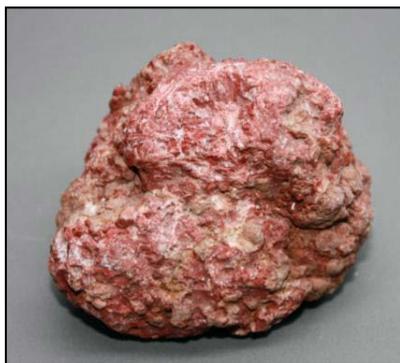
A partir de la mitad del siglo XX, los hornos continuos o intermitentes en instalaciones fijas, se empleaban para la fabricación de yesos o escayolas por sistemas industrializados. Así, estos pasaron a denominarse yesos industriales o de segunda generación. También a partir de esta época comienza a utilizarse el autoclave para la fabricación industrial de yeso alfa, para usos especiales.

Desde finales de los años 60 y principios de los 70, empezaron a mezclarse agregados ligeros como la perlita, además empezaron a usarse de manera generalizada los aditivos, en su mayoría retenedores de agua, espesantes, reguladores de fraguado, con la finalidad de formular adhesivos para la colocación de prefabricados y para aumentar la duración del fraguado de yesos manuales o para la obtención de yesos para proyección mecánica. Así este tipo de yesos se denominan yesos de tercera generación, cuyo empleo cada vez es más frecuente.

En España, es a finales de los 50 y principios de los 60, cuando se deja el sistema tradicional de fabricación, a base de hornos morunos como procedimiento habitual, (La Spina Vincenzina, Grau Giménez Carles Jordi, 2017) [15], y se comienza a fabricar yesos y escayolas por sistemas industrializados, mediante hornos continuos o intermitentes en instalaciones fijas. Así se obtienen productos de características mucho más uniformes, que son los denominados yesos industriales. También desde esta época se fabrica industrialmente, en autoclaves el denominado yeso alfa, que se utiliza en aplicaciones especiales.

Con la industrialización aparecen las normas de calidad, ya que se pueden tipificar los productos de modo que sus características se mantengan constantes dentro de unos límites, así como se pueden obtener más tipos de productos solo con modificar parcialmente las condiciones de su fabricación.

Surge así una normativa sobre yeso en los principales países industrializados, entre las 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.



FOTOGRAFÍA 4: ANHIDRITA NATURAL,
(FUENTE: MORENO RAMÓN, HÉCTOR, IBÁÑEZ ASENSIO,
SARA, GISBERT BLANQUER, JUAN MANUEL; 2011) [16].

1.4.3. YESO DE TERCERA GENERACION.

Después de la II Guerra Mundial, se comienza a estudiar más científicamente las modificaciones producidas en las características del yeso mediante el empleo de aditivos y adiciones (Arredondo, 1961) [12].

En Reino Unido, para la reconstrucción de los edificios dañados durante el conflicto bélico, se comienzan a utilizar productos aligerados, con perlita y vermiculita, hasta el punto de llegar a normalizar una serie de productos aligerados (Foster, N.; 1964) [17]; que completan el panorama normativo de los yesos densos. 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. Por otra parte, 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 de 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. (Rivero Fernández, L. 1997) [18].

También 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 "FC"*. 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.

Estos yesos de tercera generación están concebidos para revestimientos interiores y pueden colocarse sobre diferentes tipos de soportes, siempre que se prepare adecuadamente la base y se tengan en cuenta las correspondientes reglas de colocación (Eurogypsum, 1988). [19]

1.5. CARACTERÍSTICAS DEL YESO.

El uso más extendido del yeso es en la construcción, debido a las siguientes propiedades: (Novo de Miguel, Luciano. 1970) [20].

- La utilización de yeso en los revestimientos interiores de las edificaciones puede aumentar en un 35% la capacidad de aislamiento térmico frente a construcciones no revestidas.

- Debido a su elasticidad y estructura finamente porosa, el yeso ofrece una excelente capacidad de insonorización. Disminuye ecos y reverberaciones, mejorando las condiciones acústicas de las edificaciones.
- Por sus excelentes cualidades higrométricas el yeso es el más eficaz y natural regulador de la humedad ambiental en los interiores de las edificaciones. Absorbe la humedad excesiva y la libera cuando hay sequedad.
- El yeso es completamente incombustible y resistente al fuego. Al exponerse al calor se produce una gradual liberación del agua de cristalización en forma de vapor que retrasa la elevación de temperatura absorbiendo el calor, sin emanar gases tóxicos que son la principal causa de accidentes fatales en la mayoría de incendios.
- La blancura natural del yeso conforma el soporte más adecuado para aplicar cualquier tipo de acabado posterior, tanto en blanco como en otros colores.
- El yeso, debido a su excelente plasticidad y moldeo, posee infinidad de posibilidades en decoración. Es compatible con casi todos los elementos de decoración: papel, tapíz, madera, pintura, texturizados, etc.
- El yeso, una vez formada la red cristalina en el fraguado, es estable en el tiempo e inalterable ante las variaciones ambientales.
- El yeso en estado plástico es muy manejable, modelable y liviano y se adhiere fácilmente a las superficies.

El yeso se encuentra abundantemente en la naturaleza, no es tóxico, es respetuoso con el medio ambiente y sus residuos son biodegradables; esto entre otras características lo hace un material natural y ecológico. Por lo tanto dentro del gran auge que tiene hoy día las construcciones verdes (Green Buildings, 2008) [21], el yeso es uno de los componentes que ayuda a darle a las construcciones esta categoría.

Además del uso en la construcción, su utilización está ampliamente extendida por otros campos, como son:

- En **medicina** se utiliza en traumatología para elaborar vendas de yeso, en la fabricación de moldes quirúrgicos y odontológicos y en la producción de pasta dentífrica, (Díaz Díaz, Pedro; 2014) [22]
- En la **industria de alimentos** en el tratamiento de agua, limpieza de vinos, refinación de azúcar, vegetales enlatados y alimentos para animales.
- En la **agricultura** para mejorar las tierras de cultivo, como abono y desalinizador.
- En la **industria química y farmacéutica** como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales.

1.6. PROPIEDADES DEL YESO.

Según Luis de Villanueva y García Santos (2001) [14], las principales propiedades del aljez son:

- Baja dureza superficial ($H=2$, en la escala Mohs siendo posible rayarlo con la uña), salvo las variedades alabastrinas;
- Bajo peso específico $2,32 \text{ g/cm}^3$;
- Exfoliabilidad;
- Solubilidad en agua caliente a razón de $2,05 \text{ g/l}$ a 20°C .

Además, en su estado natural se encuentra en diferentes estados de cristalización en la corteza terrestre dando lugar a una gran variedad de piedras (Villanueva Domínguez, Luis de; 2009) [23]; Díez Reyes, Mari Carmen; 2004; [2] y Sanz Arauz, David; 2009; [4]); como alabastro, selenita o espejuelo, rosas del desierto, anhidrita o karstenita o basanita.

Las propiedades del yeso se pueden describir, como:

DURABILIDAD

Las acciones a las que están sometidas los revestimientos interiores, las podemos clasificar en mecánicas destacan las debidas a impactos o choques. Por tanto, una de las propiedades que más interesa conocer es la de su dureza superficial que por regla general y en condiciones normales de utilización es suficiente. (García Figuerero, July Altagracia; 2011) [24].

SEGURIDAD

Protección contra el fuego: El yeso es un material incombustible. Además tiene una baja conductividad térmica. Lo que evita la propagación del calor producido en los incendios y contiene agua libre y agua química de composición que absorbe energía calorífica para evaporarla. (Villanueva, Luis de; 1982) [25].

En su propia constitución contiene dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico y absorbe calor para transformarse de dihidrato en anhidrita, lo que supone otras calorías invertidas en su descomposición y en la evaporación del agua combinada.

TRABAJABILIDAD

Es un material adecuado y de fácil manipulación para ser usado en múltiples derivados prefabricados y directamente en obra. Su trabajabilidad depende de la moldeabilidad, la consistencia variable, el fraguado rápido regulable, la expansión de fraguado, la adherencia, las resistencias iniciales y la modificabilidad o facilidad de trabajo sobre elementos ya fraguados. (García Figuerero, July Altagracia; 2011) [24].

HABITABILIDAD

Se pueden considerar los revestimientos de yeso como elementos constructivos que colaboran eficazmente en el acondicionamiento térmico, higrométrico, acústico y lumínico de los edificios. (García Figuerero, July Altagracia; 2011) [24].

1.7. PROCESO DE FABRICACION DEL YESO.

Como se ha mencionado, la piedra de yeso o aljéte, se extrae tanto de canteras a cielo abierto como de canteras subterráneas. Esta materia prima, primero se tritura mediante maquinaria apropiada como molinos de rodillos o machacadores de mandíbulas. El tamaño del grano tras la trituración estará determinado principalmente por el método o sistema de cocción que se empleará en la fabricación.

El proceso productivo (Ilustración 1) del yeso es el siguiente:

1. Extracción de la piedra de aljéz en minas subterráneas o canteras a cielo abierto.
2. Trituración de la materia prima.
3. Almacenado en silos de la materia prima.
4. Calcinación (mediante hornos) a elevadas temperaturas para deshidratar la piedra y de esta forma eliminar el agua y la humedad que pueda tener la piedra; la deshidratación puede ser parcial o total dependiendo de la temperatura y la presión.
5. Molienda y cribado del yeso fabricado.
6. Almacenado en silos del yeso fabricado.
7. Zona de carga directa del yeso en camiones cisterna.
8. Zona de ensacado automático del yeso.

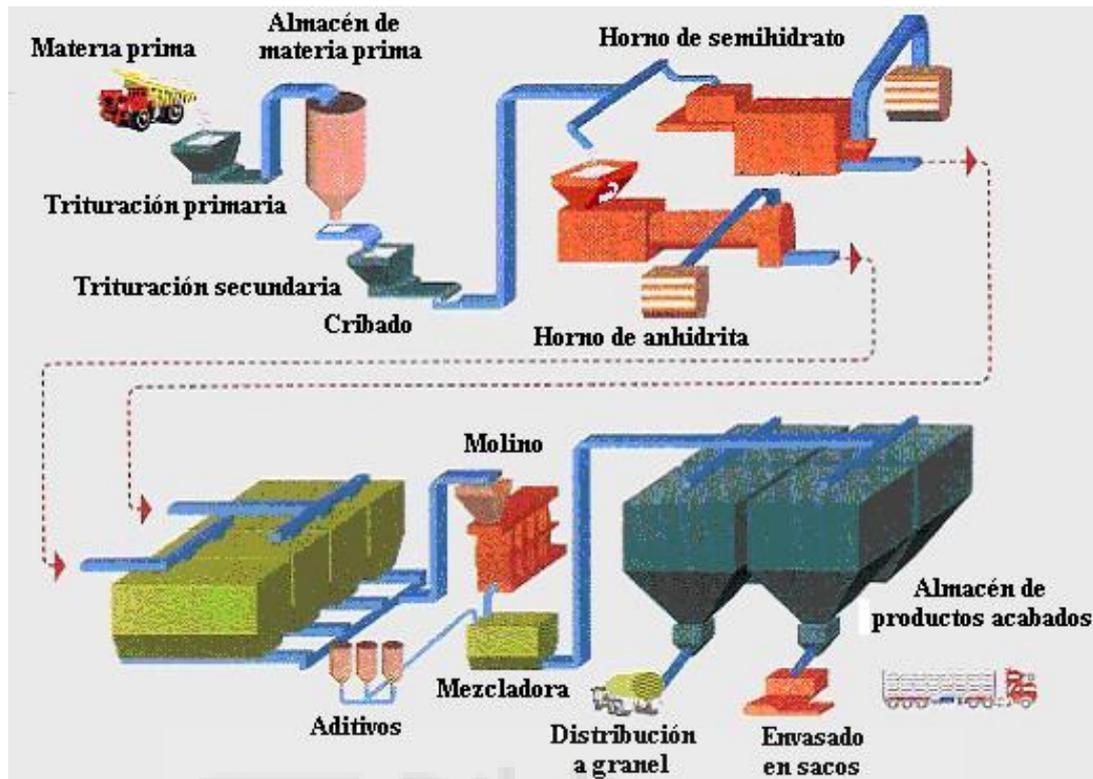
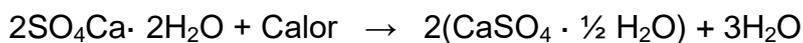


ILUSTRACIÓN 1: FABRICACIÓN DEL YESO (FUENTE: GOMIS YAGÜES, VICENTE, 2013) [26]

Durante la fabricación del yeso se produce una reacción química que condiciona su posterior uso. Esta reacción se produce en el horno durante la cocción, por lo que esta fase es básica y trascendente.

La reacción química que se produce es:



La elección del horno es función principalmente de la calidad del producto final que se quiere obtener. Los diversos sistemas de cocción del yeso se dividen en dos grandes grupos, según si los gases de combustión están o no en contacto con la materia prima. Entre ellos destacamos los hornos rotatorios, los hornos de caldera y los autoclaves.

- *Horno Rotatorio*: Está particularmente indicado para la calcinación de la piedra de aljez granulada con diámetro entre 0 y 25 mm. No es preciso un presecado del mineral, que alimenta continuamente al horno en contracorriente con los gases calientes mediante un alimentador de cinta por peso. Los gases

calientes se producen en una cámara de combustión de ladrillo. El exterior del horno no es de ladrillo sino que consiste en gruesas chapas de acero que garantizan una distribución uniforme de las partículas a lo largo de la sección transversal del horno. Se consigue una eficiencia térmica elevada debido a la transferencia directa del calor de los gases calientes al sólido.

La producción de estos hornos puede alcanzar las 600 Tm/día. Se utilizan para la producción de semihidrato β , con temperaturas de calcinación entre 120°C y 180°C, y para la anhidrita temperaturas entre 300 y 800°C. Su mezclado mutuo posterior, en las proporciones adecuadas para obtener las características que se le quiera dar al producto final, permite obtener los llamados yesos multifásicos.

El consumo de energía calorífica de estos hornos suele ser del orden de 1000 MJ/Tm de material deshidratado en los de semihidrato y de 1400 MJ/tm en los de anhidrita a los que hay que adicionar un consumo eléctrico de 15 - 20 kWh/tm que equivalen a 54 - 72 MJ/tm.



FOTOGRAFÍA 5: HORNO ROTATORIO PARA LA CALCINACIÓN DE YESO

(FUENTE: EMISON S.A., 2018) [27]

- *Horno Flash*. En este tipo de horno, los gases calientes a 650°C y elevada velocidad se ponen en contacto en una cámara con el material que está finamente molido. El material es arrastrado por los gases y llevado a ciclones donde se separa el producto. El proceso de deshidratación ocurre en sólo unos pocos segundos (entre 1,5 y 2 s) obteniéndose un producto a una temperatura media del orden de 160°C. Existen calcinadores donde la cámara inicial de contacto gases de combustión - producto es un molino con objeto de reducir más el tamaño de partícula.

El producto obtenido suele llevar un elevado contenido en anhidrita III lo que hace que sea muy reactivo y capaz de endurecer en sólo unos minutos cuando es hidratado. Por ello se utiliza en la fabricación de prefabricados tales como cartón - yeso al incrementar la velocidad de producción.

- *Marmita y otros hornos de fuego indirecto*. La marmita es una unidad de calcinación en donde el yeso es calentado indirectamente a través de tubos o a través de una doble cámara exterior por los que circulan los gases de combustión calientes: se trata de hornos en los que los gases de combustión no se ponen en contacto directo con la piedra de yeso.

El material colocado en el interior para ser calcinado suele ser agitado mecánicamente para mejorar la transferencia de energía y la homogeneidad del producto.

Los hornos suelen ser discontinuos en los que el material a calcinar se carga en el horno, se calcina y finalmente se descarga aunque también existen hornos con carga y descarga de material continua. El control de las temperaturas a las que queda sometido el producto es mayor y con ello la homogeneidad del producto obtenido. Sin embargo la eficiencia térmica es menor que en los hornos rotatorios de fuego directo. Suelen utilizarse para la producción de semihidrato beta que posteriormente va a ser utilizado en la fabricación de escayola.

En la ilustración 2, se muestra una fotografía de un horno discontinuo de fuego indirecto que utiliza como combustible gas natural. En la parte inferior se observan los quemadores. La parte central superior consiste de un cilindro con paletas deflectoras en su interior donde se carga el material a calcinar. El cilindro gira de forma similar a un horno rotatorio pero a diferencia de éste, el material no está entrando y saliendo continuamente sino que se realizan operaciones discontinuas de carga, calcinación y descarga del producto.

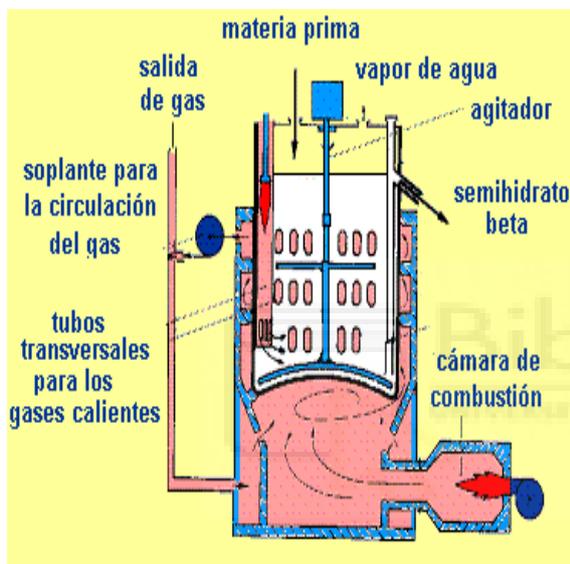


ILUSTRACIÓN 2: HORNO DISCONTINUO.

(FUENTE: GOMIS YAGÜES, VICENTE) [26]

- *Autoclave*: Se utiliza para obtener yeso alfa, sometiendo al yeso a calefacción a presión en atmósfera saturada de vapor de agua y en ciclos de cocción largos (14 a 16 horas).

El resultado es una escayola de cristales mucho más perfectos y por tanto, de menor superficie específica, lo que hace que se necesite una menor cantidad de agua para su amasado.

El calor actúa sobre la piedra de yeso, según se desarrolla la reacción anterior, para obtener las distintas variedades que se utilizan en la construcción (Tabla 2). En la reacción la piedra de yeso cristaliza con dos moléculas de agua. Del dihidrato (Van t'Hoff, 1907) [3] si estas dos moléculas, una y media está combinada débilmente y media molécula fuertemente combinada. Esto se traduce en que cien partes de dihidrato contienen 79.07 de sulfato cálcico, 15.70 de agua débilmente combinada 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 combinada

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

TABLA 2: PRODUCTOS DEL RESULTADO DE LA CALCINACIÓN DEL ALJEZ.

(FUENTE: J.M. BERNAL, 2013) [7]

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.

1.8. FRAGUADO DEL YESO.

1.8.1. TEORIAS DEL FRAGUADO.

El fraguado del yeso es debido a la cristalización de una solución sobresaturada. Esta teoría se debe a Le Chatelier (1.887) [28] es sencilla e intuitiva y consiste, en esencia, en lo siguiente:

Al amasar yeso cocido (Hemihidrato) con agua, se forma alrededor de las partículas del mismo, una disolución que está saturada con respecto al hemihidrato [$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$], pero fuertemente sobresaturada respecto al dihidrato [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]. Esto es debido a que el hemihidrato es, aproximadamente, 5 veces más soluble que el dihidrato, 10 g/dm^3 por 2 g/dm^3 , respectivamente.

Comienza así rápidamente la cristalización de dihidrato, que puede ser homogénea o heterogénea sobre núcleos de dihidrato que han permanecido sin transformarse durante el proceso de cocción, lo que en general es más probable. Se disuelven, entonces, nuevas cantidades de hemihidrato, continuando este proceso hasta su hidratación y cristalización total en forma de dihidrato. En realidad, estos fenómenos tienen lugar simultáneamente. Así, la disolución continua de nuevas cantidades de yeso cocido compensa el empobrecimiento de la solución, causado por la separación, también continua, de cristales de dihidrato.

Los cristales de dihidrato se desarrollan en muchos puntos contiguos, dando lugar a agrupaciones de forma radial y la interposición de estas, formando una especie de fieltro, es una de las causas de la resistencia de la masa fraguada.

Desde un punto de vista muy distinto, se ha propuesto que el fraguado del yeso consiste en un proceso coloidal. Según CAVAZZI (1913) [29], cuando se mezcla el yeso cocido con agua se forma un gel intermedio a partir del cual se desarrollan los cristales aciculares de yeso. TRAUBE (1919) [30], igualmente mantiene que el fraguado del yeso cocido es debido a la coagulación del gel de yeso.

Las dos explicaciones del fraguado que se han ofrecido son, al menos, parcialmente, ciertas, y una teoría más completa debiera, quizá, comprender ambas (García Santos, Alfonso; 1988) [6].

1.8.2. EXPANSION DE FRAGUADO.

La formación del dihidrato por cristalización va acompañada de una expansión de volumen, denominada expansión de fraguado. En esto se diferencian el yeso y la escayola de otros conglomerantes, como la cal y el cemento, que experimentan una retracción de volumen al fraguar.

Durante el proceso inicial de fraguado aparece una retracción temprana debida a la formación del dihidrato que queda compensada por el rápido crecimiento de los cristales que comienza poco después. También hay otra retracción debida al secado del agua sobrante químicamente, hasta que se alcanza la humedad de equilibrio, que también queda compensada con la mayor expansión.

El aumento de volumen es relativamente importante y prolongado. Varía en cada fase del sistema. De modo muy general, se puede decir que ésta es tanto mayor, cuanto más lento es el proceso de hidratación.

El desarrollo y aumento organizado de la cristalización y, por tanto, el buen endurecimiento, exige además que la malla cristalizada, que se está organizando, lo haga libremente sin ser sometida a acciones externas. Lo que en términos corrientes se indica, con la regla práctica, de no reamasar nunca una pasta de yeso mientras fragua.

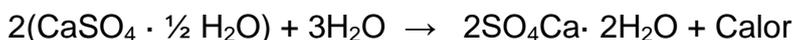
1.8.3. MECANISMOS DE FRAGUADO.

El fraguado del yeso, en su proceso, se puede considerar como un conjunto de fenómenos químicos y físicos estrechamente relacionados entre sí.

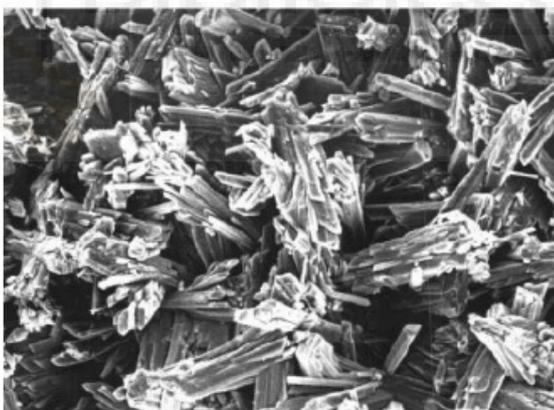
El aspecto químico consiste en una reacción de hidratación, por el que las fases anhidras y hemihidratadas de sulfato cálcico, en contacto con el agua, se

disuelven y reaccionan con ella para transformarse en una masa de cristales de sulfato cálcico dihidrato que actúan como elementos de unión. Esta reacción se hace con desprendimiento de calor.

La reacción que tiene lugar puede representarse como:



La estructura de la pasta endurecida de yeso es altamente cristalina. Los cristales individuales presentes están en forma de finas agujas de dihidrato (Fotografía 6) de tal manera que la estructura resultante corresponde a una disposición tipo fieltro en la que hay poros muy finos y en la que el entrelazamiento de las agujas cristalinas entre sí proporciona la resistencia mecánica. La cantidad de porosidad residual depende de la cantidad de agua presente en la mezcla original, así si el contenido de agua aumenta, la porosidad también lo hace con lo que la capacidad de absorción de la pasta endurecida será mayor y su resistencia mecánica y durabilidad menor.



FOTOGRAFÍA 6: MICROESTRUCTURA DEL YESO FRAGUADO

(FUENTE: DAVID SANZ ARAUZ, 2009) [4]

El aspecto físico, íntimamente ligado con el anterior, consiste en una disolución inicial de las fases anhidras o hemihidratadas en agua y de una cristalización y solidificación del dihidrato formado en la reacción química, a partir de una disolución sobresaturada de este. La diferente capacidad de solución en agua de las diferentes fases hace posible que la disolución esté saturada para el dihidrato y no para el resto de las fases; por lo que el dihidrato precipita cristalizando. Este proceso de cristalización va acompañado de una

expansión de volumen. En general, la expansión es tanto mayor cuanto más lenta es la velocidad de hidratación (Tabla 3). Suele ser del orden de 1 a 2 mm/m para un yeso de construcción, a los dos días.

EXPANSION DE FRAGUADO		
FASE AISLADA	TIEMPO DE HIDRATACIÓN	EXPANSIÓN DE FRAGUADO
SEMIHIDRATO	1 hora	0,3 mm/m
ANIDRITA II s	15 días	0,55 mm/m
ANIDRITA II i	1 año	1,45 – 1,63 mm/m

TABLA 3: VALORES DE EXPANSIÓN DE HIDRATACIÓN DE DIVERSOS ENSAYOS.

(FUENTE MONEO PECOS, LUIS; 2014) [31]

El amasado como fase del fraguado es básico e imprescindible para la rehidratación del hemihidratado con agua. Gracias a esta operación acabará siendo dihidratado. Su 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. Existen dos formas de amasado, manual y mecánica.

Para el amasado es necesaria más agua que para la estricta rehidratación, ya que el proceso de fraguado comienza por una disolución en agua de las fases anhidras y hemihidratadas, contenidas en el producto en polvo. Considerando una molécula-gramo de yeso hemihidrato, o sea, 145 gramos, necesitara para reaccionar molécula-gramo y media de agua, es decir, 27 gramos.

Esto quiere decir que, teóricamente, para que se realice la reacción, hará falta añadir al yeso hemihidrato un 18.6% de agua. En la práctica esto no es posible por la imposibilidad de amasado y la rapidez de fraguado de la pasta de yeso que llega a estar en contacto con el agua. Es necesario añadir mucha

más agua de la teóricamente necesaria. Cuanta más agua de amasado se emplee, mayor será la facilidad de la operación y más se retrasará el fraguado.

El agua necesaria para el amasado viene condicionada por el tipo de producto y su granulometría (Tabla 5). Hay dos sistemas de determinación: mediante el amasado a saturación o a través del agua correspondiente a una consistencia normal. Ambos están normalizados, entre otras normas, en la UNE 102.031 [32].

El amasado a saturación consiste en espolvorear el producto sobre el agua sin tocar el recipiente, hasta que el yeso sacia el volumen de agua y se queda enrasado con su superficie.

RELACION AGUA/YESO PRODUCTOS TRADICIONALES	
PRODUCTOS TRADICIONALES	AGUA DE AMASADO A YESO SATURACION
Yeso de construcción fino	0,7
Escayola	0,8
Yeso α	0,4

TABLA 4: VALORES APROXIMADOS DE LA RELACIÓN DE AGUA/ YESO DE AMASADO A SATURACIÓN PARA DIFERENTES PRODUCTOS

(FUENTE: DEL RÍO MERINO, MERCEDES, 1999) [5]

El agua de consistencia normal es la cantidad necesaria para que la pasta adquiriera la consistencia determinada por una norma. Se suele utilizar para fijar la consistencia una penetración del cono de Vicat o un determinado diámetro en la mesa de sacudidas.

En pastas puras de yeso o escayola, la relación entre el agua amasado a saturación y la correspondiente a consistencia normal suele ser fija y determinada, para cada tipo de producto. El amasado en obra por medios manuales se suele hacer a saturación o forzando un poco la cantidad de agua.

Sin embargo, en productos aditivados o adicionados, de los que se han denominado de tercera generación, el amasado a saturación no es tan representativo y suele producir exceso de agua si se utiliza, por lo que generalmente se indica la cantidad de agua que debe emplearse, que está relacionada con una consistencia normalizada (Tabla 5).

RELACION AGUA/YESO PRODUCTOS NO TRADICIONALES			
PRODUCTOS TRADICIONALES	NO	AGUA RECOMENDADA PARA YESO CONSISTENCIA	PARA
Yeso manual aligerado		0,50 – 0,70	
Yeso retardado manual		<1,0	
Yeso de proyectar		0,60 – 0,70	
Yeso aligerado de proyección		0,60	
Yeso de alta dureza, normal y de		0,55 – 0,60	

TABLA 5: VALORES APROXIMADOS DE LA RELACIÓN DE AGUA/ YESO A CONSISTENCIA NORMALIZADA PARA DIFERENTES PRODUCTOS

(FUENTE: DEL RÍO MERINO, MERCEDES, 1999) [5]

Una de las propiedades más características del yeso es la rapidez de su fraguado, lo que obliga al operario a trabajar con apresuramiento y únicamente permite amasar de una vez pequeñas cantidades, puesto que, de otro modo, se obtienen con facilidad pérdidas de material, al fraguar este prematuramente, si no es aplicado al instante.

La técnica moderna ofrece la solución a este problema con el empleo de retardadores de fraguado, que son compuestos químicos que actúan catalíticamente sobre la velocidad de fraguado, permitiendo regular, casi a voluntad, la duración del mismo. Así, hoy en día, es corriente el suministro de yeso retardado, de acuerdo con las necesidades del comprador. Además de poder regular velocidad de fraguado del yeso por adición de compuestos

químicos muy diversos, se sabe que determinados factores físicos influyen sobre la duración del fraguado. Entre ellos se deben mencionar los siguientes:

- Temperatura del agua de amasado.
- Relación yeso - agua.
- Tiempo transcurrido desde la cocción y desde la molienda.
- Tamaño de las partículas.

Según L. E. Chassevent [33], si se amasa el yeso con agua caliente, de modo que la temperatura de la masa permanezca por encima de los 60°C, se puede mantener fluida durante horas, si se evita la evaporación del agua. Al enfriar a 40°C tiene lugar un fraguado rápido. La explicación es inmediata, si se tiene en cuenta que el dihidrato es inestable por encima de 42°C.

El tiempo de fraguado disminuye al aumentar la relación = Yeso/Agua y también prolongando el amasado, según afirma Gibson, C. S., and Johnson, R. N., (1932) [34]. Este da los valores de la Tabla 6 que sirven de ilustración sobre la magnitud de la variación que puede producirse.

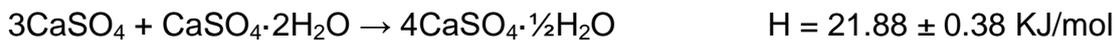
RELACION YESO/AGUA (g/cm³)	DURACIÓN DE AMASADO Min.	TIEMPO DE FRAGUADO (Min.) AGUJA DE VICAT
100/80	1	10,50
100/80	2	7,75
100/80	3	5,75
100/60	1	7,25
100/45	1	3,25

TABLA 6: INFLUENCIA DE LA RELACIÓN YESO/AGUA Y DE LA DURACIÓN DEL AMASADO SOBRE EL TIEMPO DE FRAGUADO

(FUENTE: GIBSON, C. S., Y JOHNSON, R. N. ,1932) [34]

Se puede observar que la velocidad de fraguado se triplica al aumentar la relación Yeso/Agua de 100/80 a 100/45. Un aumento de la misma de 100/80 a 100/60 produce, aproximadamente, el mismo efecto que prolongar el amasado de la primera mezcla durante un tiempo total de 2 minutos.

Ostwald W. y Wotski P. (1920) [35] afirma que el yeso recién cocido fragua más rápidamente que el mismo material después de transcurrido algún tiempo. Esto puede explicarse por la destrucción de los gérmenes de dihidrato que ordinariamente contiene el yeso cocido y que aceleran el fraguado. Dichos gérmenes son destruidos por la acción de la anhidrita, que también suele acompañar al yeso cocido hemihidrato. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



Una molienda adecuada liberará el dihidrato que pueda estar contenido en el interior de los granos, y podrá entonces reaccionar con la anhidrita según la reacción anterior, con lo que se prolongará el tiempo de fraguado.

La influencia del tamaño de las partículas está clara, ya que la velocidad de disolución de una sustancia depende de la finura de la misma.

La presencia de un cuerpo extraño en solución, o en suspensión, en el agua de amasado, puede aumentar o disminuir la solubilidad y, con ello la velocidad de disolución del $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Puede igualmente aumentar o disminuir la solubilidad del $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, con lo que aumenta o disminuye el grado de saturación preciso para que comience la cristalización.

De acuerdo con lo anterior, Rohland Z. (1914) [36] afirma que, generalmente, las sustancias que disminuyen la solubilidad del hemihidrato son retardadoras, mientras que aquellas que la aumentan son acelerantes.

Traube J. (1919) [30], de acuerdo con las ideas coloidales del fraguado del yeso, mantiene que la coagulación del gel de yeso es acelerada por la adición de electrolitos y retardada por los coloides.

1.8.4. RESISTENCIAS MECÁNICAS.

A medida que avanza el proceso de fraguado y se va formando el entramado cristalino de rehidrato aumenta la resistencia mecánica, hasta un máximo que en probetas situadas en laboratorio (20 ± 2 °C y 60 - 70 % de humedad relativa) se suele producir sobre los quince días, cuando puede considerarse que se ha llegado a la humedad de equilibrio, si bien los ensayos normalizados, se establecen a partir del día número 7.

El contenido en humedad incide decisivamente en la resistencia del yeso ya que el vapor de agua libre situado en los poros, que deja el entramado cristalino, actúa como lubricante entre los cristales posibilitando movimientos relativos de los mismos ante sollicitaciones exteriores y, en resumen, disminuyendo su resistencia. El fenómeno se ha estudiado experimentalmente para llegar a la conclusión de que la resistencia baja a la mitad, cuando el contenido de humedad pasa del 0 al 1% (Tabla 7). Esto da una idea de la importancia que tiene evitar la absorción de agua por el yeso.

En lo anterior radica el comportamiento del yeso ante la humedad, y no la disolución del yeso en agua como vulgarmente se cree, ya que si bien es cierto que el dihidrato se disuelve en el agua, el valor de dicha solubilidad a 20 °C es de 0.21 g por 100 g de solución, o sea un valor bajo.

PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL YESO EN FUNCIÓN DEL % DE AGUA AÑADIDA	
Agua añadida (%)	Pérdida de resistencia
0	0
0,04	33
1	52
5	56
25	56

TABLA 7: PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL YESO EN FUNCIÓN DEL % DE AGUA AÑADIDA

(FUENTE: GIBSON, C. S., AND JOHNSON, R. N, 1932) [34]

Lo anterior hace que, experimentalmente, siempre se determine el valor de las resistencias del yeso sobre probetas completamente secas.

La razón fundamental del fracaso del yeso ante el agua, se encuentra en la rápida pérdida de resistencia que experimenta el material fraguado al absorber agua a través de su red capilar. La resistencia del yeso fraguado es debida, en parte, al entrecruzamiento de los cristales aciculares del dihidrato. El efecto perturbador del agua absorbida con posterioridad al fraguado, consiste en una acción lubricante entre dichos cristales que disminuye la resistencia de rozamiento y, por tanto, la resistencia del material.

1.8.5. TIEMPO DE FRAGUADO.

El tiempo de fraguado final es el tiempo comprendido desde el inicio de la mezcla hasta el endurecimiento total de la masa.

Para su medición existen varios métodos de penetración:

- Método de Gillmore: se ocupan 2 agujas, una fina y liviana y otra gruesa y pesada. Cuando la primera no logra penetrar en la superficie del yeso se dice que es el tiempo de fraguado inicial; cuando la gruesa no logra penetrar, se habla de tiempo final.
- Método de Vicat: se ocupa solo una aguja; cuando no atraviesa todo el espesor, se encuentra en el fraguado inicial del yeso.
- Método del cuchillo, expuesto en la norma U.N.E. 13279-2, Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción Parte 2: métodos de ensayo. El tiempo de principio de fraguado es el tiempo, en minutos, en que los bordes de una hendidura producida por la hoja de un cuchillo sobre la pasta de yeso dejan de acercarse. Método que emplearemos en los ensayos del documento.

1.9. TIPOS DE YESO.

Las especificaciones del yeso están actualmente reguladas por la norma UNE 13279-1 [37], 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 definiciones.

Cuando las características de los yesos para la construcción se determinan según lo especificado en la Norma UNE 13279-1 [37], deben identificarse según lo establecidos en la Tabla nº 8.

TIPOS DE YESO PARA LA CONSTRUCCION	
Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso, por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> - para uso directo o para su transformación (producto en polvo,secos) - para su empleo directo en la obra - para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placa de yeso laminado, en placas para techo) 	A - - -
Yeso para la construcción: <ul style="list-style-type: none"> - yeso de construcción. - mortero de yeso. - mortero de yeso y cal. - yeso de construcción aligerado. - mortero aligerado de yeso. - mortero aligerado de yeso y cal. - yeso de construcción de alta dureza 	B B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
Yeso para aplicaciones especiales:	C

- yeso para trabajos con yeso fibroso.	C1
- yeso para morteros de agarre.	C2
- yeso acústico.	C3
- yeso con propiedades de aislamiento térmico.	C4
- yeso para protección contra el fuego.	C5
- yeso para su aplicación en capa fina.	C6

TABLA 8: TIPOS DE CONGLOMERANTES A BASE DE YESO Y DE YESOS PARA LA CONSTRUCCIÓN. (FUENTE: UNE-EN 13279-1, 2009) [37]

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS YESOS DE CONSTRUCCION						
Yeso para la construcción	Contenido de conglomerante de yeso (%)	Tiempo de principio de fraguado (min.)		Resistencia a flexión (N/mm ²)	Dureza superficial (N/mm ²)	Adherencia (N/mm ²)
		Yeso de aplicación normal	Yeso de proyección mecánica			
B1	>50	>20	>50	≥1.0	≥2.0	La rotura se manifiesta 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	*					
B4	>50					
B5	<50					
B6	*					
B7	>50					
* Según los apartados 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6						

TABLA 9: ESPECIFICACIONES PARA LOS YESOS DE CONSTRUCCIÓN.

(FUENTE: UNE-EN 13279-1, 2009) [37]

1.10. TIPOS DE MORTEROS.

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos o revocos.

Los morteros pueden ser clasificados en función de diferentes variables:

- Según conglomerante o característica específica
- Según su uso o aplicación
- Según su método de fabricación
- Según su forma de suministro

1.10.1. SEGÚN CONGLOMERANTE O CARACTERÍSTICA ESPECÍFICA.

Podemos clasificar los morteros según el conglomerante que se incorpora a éstos (Tabla 9). Así, los morteros pueden denominarse según la composición y proporción de sus componentes, o según una característica especificada que, según las normas UNE-EN 998-1:2010 [38] y UNE-EN 998-2:2012 [39], definen la resistencia a compresión a 28 días.

TIPOS DE MORTEROS		
Conglomerante	Composición	Resistencia
Morteros de cemento	cemento:arena (1:3)	P.e.: M-5 (5N/mm ² a 28 días) M-20 (20N/mm ² a 28 días)
Morteros de cal hidráulica	cal:arena (1:3)	
Morteros de cal aérea	cal:arena (1:3)	
Morteros mixtos de cemento y cal hidráulica	cemento:cal:arena (1:1:3)	

Morteros mixtos de cemento y cal aérea	cemento:cal:arena (1:1:3)	
Mortero de yeso aditivado	Yeso:arena (1:1)	3 N/mm ²

TABLA 10: TIPOS DE MORTEROS SEGÚN SU COMPOSICIÓN.

(FUENTE: UNE EN 998-2: 2012) [39]

En cuanto a la composición de los morteros, cabe resaltar la importancia de especificar si las proporciones han sido establecidas en peso o en volumen. Además, también es importante detallar la cantidad de agua de amasado a utilizar para dicha mezcla.

1.10.2. SEGÚN SU USO O APLICACIÓN.

- Según la aplicación Morteros para obras de fábrica
- Morteros de revestimiento
- Morteros para solados
- Morteros cola
- Morteros de reparación
- Morteros impermeabilizantes de los morteros, éstos se clasifican en:

Estos pueden ser de cualquiera de las composiciones de conglomerante anteriormente mencionadas, excepto los morteros mixtos de cemento y cal aérea que se aplicarán únicamente en obras de fábrica y revestimientos.

1.10.3. SEGÚN SU MÉTODO DE FABRICACIÓN.

La norma UNE EN 998-2: 2012 [39] clasifica también los morteros según su método de fabricación:

- Mortero para albañilería hecho en obra: la dosificación de los componentes y el amasado se realiza en obra.

- Mortero para albañilería semiterminado hecho en fábrica. Pueden ser morteros que se dosifican en fábrica y se mezclan en obra; morteros cuya cal y arena se dosifica en fábrica y se mezclan en obra, añadiendo otros componentes suministrados o bien especificados por el fabricante.
- Mortero para albañilería hecho en fábrica, o mortero industrial: la dosificación de los componentes y el amasado se realiza en fábrica.

1.10.4. SEGÚN SU FORMA DE SUMINISTRO.

También pueden clasificarse según su forma de suministro:

- Mortero seco en sacos o silos: el fabricante proporciona uno o varios sacos o silos de mortero especificado y sólo es necesario añadir el agua indicada para realizar la mezcla en obra. La utilización de sacos o silos dependerá de la cantidad de mortero requerida.
- Mortero húmedo: generalmente son morteros de cal en pasta, que se suministran en sacos o bidones según la cantidad de mortero requerido.

1.10.5. SEGÚN EL USO AL QUE VAN DESTINADOS.

A pesar de no contener arena, en general (si bien puede contenerla) denominamos mortero a la formación de materiales a base de sulfato cálcico aditivado con distintos elementos y cuyas aplicaciones no son las naturales de la aplicación del yeso común, es decir, como revestimientos ignífugos, protección ante ondas de presión y/o balística, además de prefabricados con comportamiento térmico y acústico.

1.11. ADITIVOS.

Aditivos son aquellas sustancias o productos (inorgánicos u orgánicos) que, incorporados al yeso durante el amasado, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento (facilitar su puesta en obra, regular su proceso de fraguado y endurecimiento, aumentar su durabilidad, etc.).

Su influencia se determina de acuerdo al agua y a la cantidad del agua que es necesario añadir a la mezcla para obtener la docilidad y compactación necesaria.

Nos sirven para:

- Una mejor trabajabilidad.
- Para regular el proceso de fraguado.

Además de su acción principal o específica, los aditivos suelen ejercer otras acciones secundarias, favorables o desfavorables. Como tales acciones dependen fundamentalmente del resto de los componentes y de las condiciones ambientales.

Existen en el mercado multitud de aditivos que, con el nombre de aceleradores, retardadores, plastificantes, etc. Los aditivos de uso más generalizado son:

- Reductores de agua (fluidificantes) y agentes de retención de agua (plastificantes): El fin de estos aditivos es permitir una reducción en la relación agua-yeso mientras se conserva la trabajabilidad, o aumentar la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir efectos negativos en el resultado del producto.
- Acelerantes del fraguado: su función principal es reducir o adelantar el tiempo de fraguado del yeso.
- Retardadores de fraguado: son aquellos aditivos que retrasan el tiempo de fraguado del yeso.

- Inclusores de aire: su función es la de producir en el yeso un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, reduciendo su densidad, para mejorar su comportamiento.

De todos los aditivos anteriores los más usados son los que tienden a controlar el tiempo de fraguado como forma más eficaz y práctica de controlar este.

1.11.1. REDUCTORES DE AGUA.

Son aditivos que aumentan la docilidad y trabajabilidad del yeso. Esto permite emplear masas que de otra forma sería casi imposible trabajar, o bien reducir el agua de amasado del yeso en beneficio de su resistencia. Actúan mediante procesos físico-químicos.

Se trata de productos orgánicos de molécula muy compleja, con una extremidad hidrófuga y otra hidrófila. Actúan como lubricantes de la pasta, produciendo en los granos un efecto como de cepillo, que facilita el deslizamiento y evita la formación de grumos, al individualizar a los granos de yeso. El efecto general, es una disminución de la tensión superficial del agua, y por consiguiente, de la relación agua/yeso para una misma plasticidad.

1.11.2. ACELERANTES DEL FRAGUADO.

Son productos que añadidos al yeso adelantan el fraguado y endurecimiento del mismo.

Son acelerantes del fraguado todos los sulfatos: ácido sulfúrico, dicromato potásico, silicato sódico, clorhídrico, nitratos. Debe decirse también que el calor es un acelerador, así como la cantidad de agua de amasado, cuya disminución acelera el fraguado.

Hay dos grupos de productos:

- Los que actúan como gérmenes en la cristalización, suprimiendo la primera fase del fraguado consistente en la formación de los hidratos primarios. El más utilizado es el yeso crudo dihidrato.
- Los que disminuyen la solubilidad del dihidrato o aumentan la del semi o hemihidrato, con lo que aumentan la diferencia de solubilidad y aceleran la reacción de fraguado. Sulfatos, excepto el de hierro, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico, cloruros, bromuros y yoduros alcalinos, bicromato de potasio.

Hay que tener en cuenta que aunque las sales inorgánicas suelen ser aceleradores, si se agrega más cantidad de la necesaria puede convertirse en retardadores. Así, por ejemplo, el cloruro sódico es un acelerador en concentraciones del 2% del hemihidrato, pero en concentraciones mayores se comporta como un retardador. Igualmente ocurre con el sulfato sódico que tiene su máximo efecto acelerador a concentraciones del 3,4% y en concentraciones más altas se convierte en retardador.

El sulfato de potasio (K_2SO_4) es el acelerante más eficaz. Hace más soluble a las fases anhidras, al estabilizar las láminas de agua que lo recubren durante el proceso. Pero también modifica la morfología y con ello se reducen las propiedades mecánicas del yeso fraguado.

En la actualidad pueden darse yesos doblemente aditivados con un retardador que alarga el tiempo de terminación del fraguado y un acelerador o espesante que adelanta la llegada del estado plástico. De este modo se aumenta el tiempo de utilización de la pasta.

1.11.3. RETARDADORES DEL FRAGUADO.

Son sustancias que retardan la disolución de los constituyentes anhidros del yeso o su difusión. La creencia general es que algunos productos químicos cubren las partículas del hemihidrato, evitando que este forme parte de la solución normalmente.

El empleo de retardadores es delicado debido a que, si se emplean en dosis incorrectas, pueden inhibir el fraguado y endurecimiento del yeso; por esta razón se utilizan con más frecuencia fluidificantes o reductores de agua de amasado, que al mismo tiempo actúan como retardadores. Por otra parte los retardadores reducen las resistencias mecánicas del yeso.

Hay tres grupos de productos:

- Productos con elevado peso molecular que actúan como coloides y retrasan la formación de cristales: colas animales, caseína, pepsina, albúmina, gelatina, proteínas hidrolizadas, etc. La mayoría de ellas son también espesantes.
- Productos que disminuyen la solubilidad del semi o hemihidrato en agua. Se igualan las solubilidades y disminuye la velocidad de reacción. Alcohol etílico, ácido cítrico, ácido acético, ácido fosfórico, ácido bórico, ácido láctico y sus sales, acetona y carbonato sódico. Son los que se utilizan con mayor frecuencia.
- Productos que modifican la estructura cristalina del dihidrato: acetato de calcio, carbonato de calcio y de magnesio.

1.11.4. INCLUSORES DE AIRE.

Son aditivos que producen burbujas esféricas de aire, uniformemente repartidas. Generalmente la conversión de un material sólido en uno celular se realiza mediante la incorporación en el mismo de aditivos espumantes apropiados, los cuales consiguen disminuciones de peso de hasta cuatro o cinco veces el peso inicial.

Estas microburbujas permanecen durante el endurecimiento del material, mejora la puesta en obra, a consecuencia de añadir docilidad en la masa y lógicamente debido a la reducción de peso. Aunque como consecuencia se disminuye la resistencia mecánica.

El yeso, en su proceso de fraguado crea poros, siendo, como hemos visto, un punto negativo a la resistencia final del material. Por lo que hay que tener muy 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. Con una menor relación agua-polvo, da por resultado un menor excedente de agua y, por tanto, disminuye la cantidad de poros de este tipo.
- 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. Una relación agua-polvo baja, aumenta el efecto de crecimiento cristalino durante el fraguado, por tanto aumenta la cantidad de este tipo de poros.

1.12. ESTADO ACUAL DE LA PRODUCCION DE YESO EN ESPAÑA

1.12.1. ZONAS YESIFERAS EN ESPAÑA

La roca llamada aljez o piedra de yeso, se encuentra abundantemente en la naturaleza, especialmente en España, donde en su mitad oriental, el suelo llega encontrarse en proporciones de un 12% de yeso natural según datos del Servicio Geológico de Obras Públicas [40].

En concreto, la superficie yesífera en la Península está tasada en 298,502 km², lo que supone el 58,5% y el terreno yesífero es de 35.487 km² que representa un 7,2% del total, en un estudio por Riba y Macau en 1962 [41]; en él también se indica, que la mayor parte se localizada en la mitad oriental del España, además de Asturias, Valladolid, Palencia, Cádiz, Málaga, Sevilla y Córdoba y que englobaba la zona de España donde era posible encontrar materiales yesíferos. Representándolo en un mapa de España:

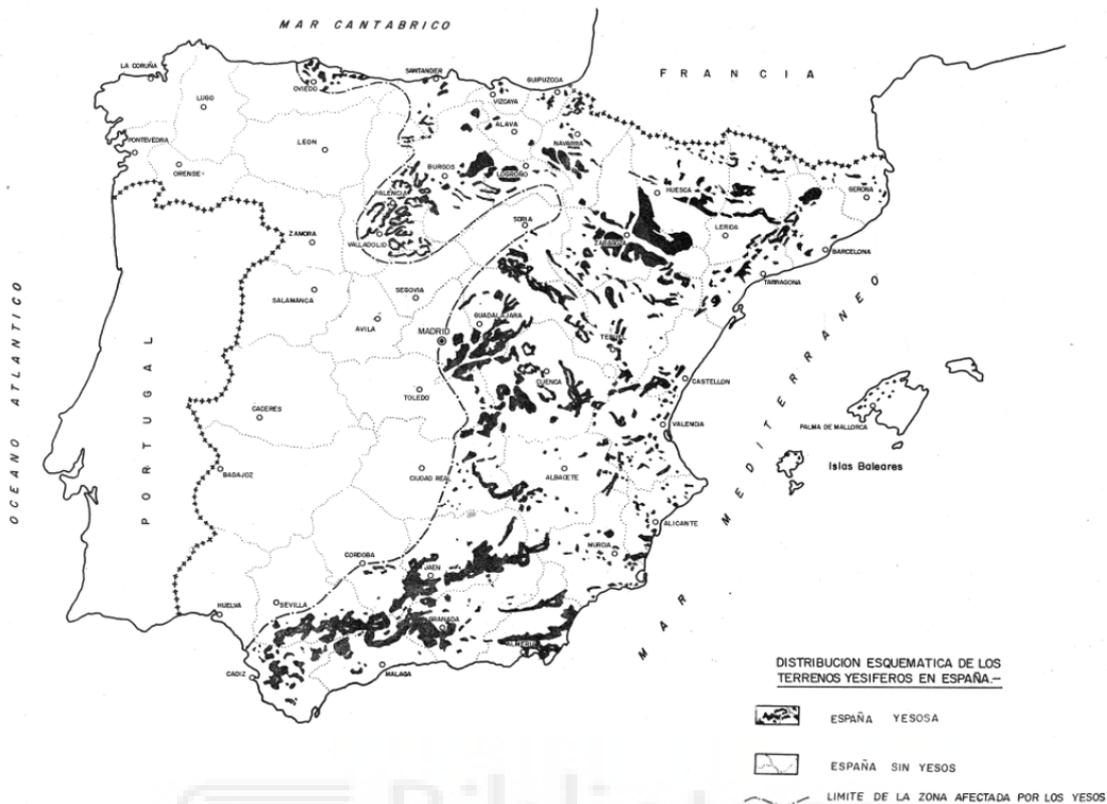


ILUSTRACIÓN 3: MAPA DE LAS UNIDADES YESÍFERAS Y LÍMITE DE LA “ESPAÑA YESÍFERA” (FUENTE: RIBA Y MACAU, 1962) [41]

Las zonas donde se ubica este mineral en España según Vincenzina La Spina, (2016) [42] [43]; queda caracterizada por una vegetación específica que recibe el nombre de vegetación gipsícola (Gypsophiletalia) que su presencia es un indicador para poder detectar la presencia de yeso en una determinada zona; según dicha publicación, *“la vegetación gipsícola de la península queda incluida dentro de las estepas continentales halólicas y gipsícolas. Este tipo de hábitat caracteriza las zonas de España con suelos ricos en yesos, y se localizan fundamentalmente en la mitad oriental, sobre todo en el Valle del Ebro, Meseta sur (la Mancha) y en los territorios cálidos de Levante, sureste peninsular y Andalucía oriental. El suelo contiene sulfatos, bien yesos más o menos puros o bien margas yesíferas y otros sustratos mixtos, por lo que la vegetación típica se compone de matorrales y tomillares dominados por una gran cantidad de especies leñosas, de portes medios o bajos, casi siempre endémicas de determinadas regiones peninsulares o de la Península en su conjunto. Entre las especies más extendidas están Gypsophila*

struthium, Ononis tridentata, Helianthemum squamatum, Lepidium subulatum, Jurinea pinnata, Launaea pumila, L. resedifolia o Herniaria fruticosa. Entre los endemismos fundamentalmente manchegos cabe mencionar Teucrium pumilum y Centaurea hyssopifolia. En el valle del Ebro, gypsophila struthium se diferencia en una subespecie propia (subsp. hispánica). Pero es en el sureste ibérico semiárido donde estas formaciones alcanzan mayor diversidad y riqueza endémica, con especies como Thymus membranaceus, T. moroderi, Teucrium libanitis, T. balthazari, Santolina viscosa, Helichrysum decumbens o Teucrium turredanum, T. lepicephalum y Helianthemum alypoides.”



Gypsophila struthium



Ononis tridentata
(Quebraollas)



Helianthemum squamatum



Lepidium subulatum



Jurinea pinnata



Launaea pumila



L. resedifolia



Teucrium pumilum



Centaurea hyssopifolia



Thymus membranaceus

T. moroderi

Teucrium libanitis



Santolina viscosa

Helichrysum decumbens

Helianthemum alypoides

TABLA 11: ESPECIES DE VEGETACIÓN EN ZONAS YESIFERAS DE ESPAÑA

(FUENTE: VINCENZINA LA SPINA, 2016) [42] [43]

En la ilustración nº 4, se muestran las áreas dentro de la península ibérica donde se localiza la presencia de esta vegetación:



ILUSTRACIÓN 4: ZONAS DONDE HAY PRESENCIA DE VEGETACIÓN GIPSÍCOLA

(FUENTE: LA SPINA VINCENZINA, 2016) [42]

En la base de datos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) de rocas y minerales industriales [44], las explotaciones mineras de yeso en España se pueden apreciar gráficamente en la ilustración nº 5.:

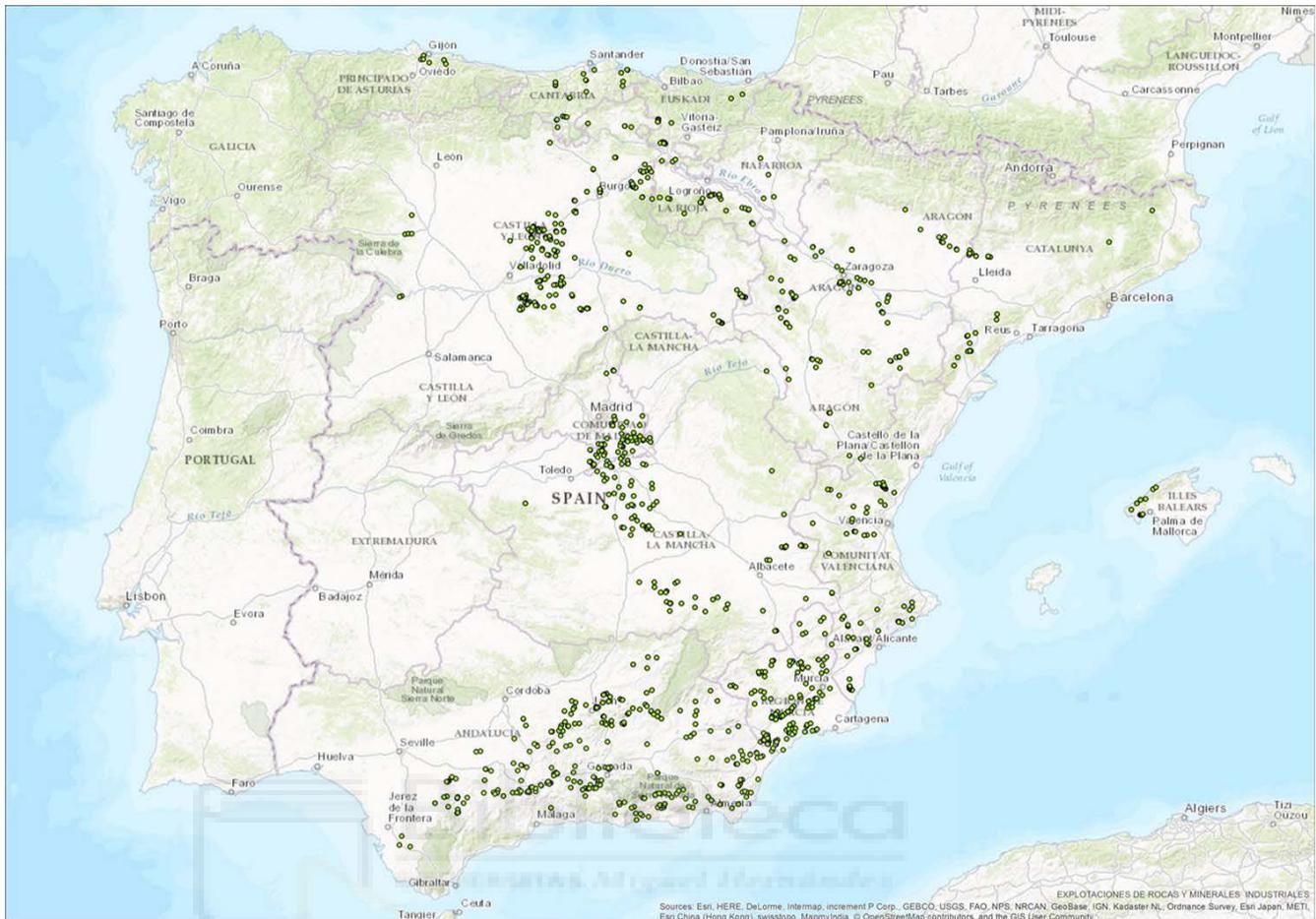


ILUSTRACIÓN 5: EXPLOTACIONES MINERAS DE YESO SEGÚN
(FUENTE: IGME) [44].

1.12.2. PRODUCCION DE YESO EN ESPAÑA.

La producción de yeso a nivel nacional contemplados en la base de datos oficiales del Ministerio de Industria, Energía y Minas de España [45] goza de buen estado así como de reservas suficientes, resultando ser un material en abundancia en nuestra geografía, así como económico para su utilización.

La evolución de esta materia prima en los últimos años, expresada en miles de toneladas anuales es de:

PRODUCCION DE YESO EN CANTERAS EN ESPAÑA DE 2007 A 2015									
Producto de cantera	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Yeso (MTn/año)	14.535	11.769	8.181	6.990	7.826	6.360	7.389	6.925	7.404

TABLA 12: PRODUCCIÓN DE YESO EN ESPAÑA DEL PERIODO 2007-2015

(FUENTE MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS) [45].

En la gráfica nº 4, que se muestra a continuación se aprecia el descenso de dicha producción a lo largo del periodo 2007-2015, en gran medida atribuible al descenso y crisis de la construcción:



GRÁFICA 4: EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE YESO EN ESPAÑA DURANTE EL PERIODO 2007-2015.

(FUENTE: MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS, 2017) [45]

El valor monetario consolidado para el año 2015 de este material según base de datos del ministerio de Industria, Energía y Minas [45] es de:

VALOR ECONOMICO DEL YESO					
Producto de Cantera	Año	Unidad	Cantidad	Valor (€)	Valor Unitario (€/Tn)
Yeso	2015	Tn	7.403.767	54.008.689	7,29

TABLA 13: VALOR MONETARIO DEL YESO

(FUENTE: MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS, 2017) [45]

La producción por Comunidades autónomas para el año 2015, fue de:

PRODUCCION DE YESO POR COMUNIDADES AUTONOMAS			
CC.AA	Producto	Cantidad (Tn)	Valor (€)
Andalucía	Yeso	5.032.756	36.097.510
Aragón		329.901	2.203.486
Baleares		15.547	--
Castilla y León		231.668	2.645.835
Castilla La Mancha		220.531	795.416
Cataluña		381.338	1.879.491
La Rioja		95.004	352.403
Madrid		729.281	2.802.542
Murcia		69.789	305.141
Navarra		14.413	--
Valencia		283.539	6.660.973

TABLA 14: PRODUCCIÓN DE YESO POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS EN 2015

(FUENTE MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS, 2017) [45].

El sector de producción de yeso a nivel nacional da empleo, especificado por provincias a un total de:

EMPLEOS DIRECTOS POR EXPLOTACIONES DE YESO EN ESPAÑA		
Provincia	Explotaciones	Nº Empleados
ALICANTE/ALACANT	3	10
ALMERÍA	8	124
BALEARES	2	6
BARCELONA	4	11
BURGOS	2	23
CÁDIZ	2	6
CASTELLÓN/CASTELLÒ	3	24
CÓRDOBA	1	1
CUENCA	4	13
GIRONA	2	10
GRANADA	3	22
GUADALAJARA	2	6
JAÉN	4	19
LLEIDA	4	26
MADRID	7	49
MÁLAGA	2	7

MURCIA	3	9
NAVARRA	1	3
RIOJA (LA)	4	23
SEGOVIA	1	1
SEVILLA	7	19
TERUEL	3	6
TOLEDO	9	34
VALENCIA/VALÈNCIA	2	10
ZARAGOZA	5	29
Totales	88	491

TABLA 15: NÚMERO DE EMPLEOS DIRECTOS EN EXPLOTACIONES DE YESO EN ESPAÑA EN 2015 (FUENTE MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS, 2017) [45].

El sector español del yeso está mayoritariamente en manos de empresas multinacionales de matriz europea tales como Saint Gobain y Lafarge (Francia) [46], Knauf (Alemania) [47], etc. que o bien han adquirido los activos productivos de empresas nacionales preexistentes, o se han instalado directamente en nuestro país.

El Grupo Saint Gobain opera a través de Saint Gobain Placo Ibérica S.A [46], cuenta con 8 centros de fabricación tanto de yeso en polvo como de placa de yeso laminado (PYL), así como 7 canteras distribuidas por toda la geografía peninsular.

El grupo Uralita [48], es líder en España en el mercado de placas de yeso y segundo mayor productor de yeso en polvo. El grupo posee instalaciones productoras de yeso en polvo en Martos (Jaén), Alicante, Mañeru (Navarra), Beuda (Gerona) y Valdemoro (Madrid), fabricando además en el municipio madrileño placas de yeso.

La empresa alemana Knauf [47], uno de los líderes mundiales del sector, cuenta con cantera y fábrica en Guixers (Solsones, Lleida), donde consume 240 000 t/año de yeso, con una capacidad productiva de 30 Mm²/año, (66 metros lineales por minuto). La instalación de Escúzar (Granada) cuenta con una capacidad productiva de 50 millones de m²/año, a una velocidad de 100 m lineales/minuto. Entre ambas instalaciones proporcionan a la empresa Knauf un 35 % de cuota de mercado entre España y Portugal.

1.13. GRAFENO.

1.13.1. DESCRIPCION DEL GRAFENO.

El grafeno ya fue descrito y se conocía desde la década de 1930 [49] y en 1889 ya se mencionaba la posibilidad de formar filamentos de carbono por descomposición térmica de hidrocarburos gaseosos. Además, la palabra grafeno fue oficialmente adoptada en 1994 después de haber sido usada como monocapa de grafito en las ciencias superficiales. Pero no ha sido hasta hace unos años cuando se ha descubierto su verdadera utilidad.

Fue en 2004 cuando se produjo el impulso definitivo en el estudio del grafeno, Andre Geim y Konstantin Novoselov [50], profesor y alumno doctorado de la Universidad de Manchester aislaron las primeras muestras de grafeno a partir de grafito mediante un proceso de exfoliación mecánica. Geim y Novoselov extrajeron el grafeno de un trozo de grafito, como el que se encuentra en cualquier mina de lápiz, utilizando una cinta adhesiva que les permitió extraer una lámina de un solo átomo de carbono.

El grafeno es un alótropo [51], (propiedad de algunos elementos químicos de poseer estructuras químicas diferentes) del carbono, un teselado hexagonal plano (como un panal de abeja) formado por átomos de carbono y enlaces covalentes que se forman a partir de la superposición de los híbridos sp(2) de los carbonos enlazados.

En realidad, la estructura del grafito es una pila de gran cantidad de láminas de grafeno superpuestas y los enlaces entre las distintas capas de grafeno apiladas se deben a las fuerzas de Van der Waals e interacciones de los orbitales π de los átomos de carbono.

Se puede considerar, que el grafeno, es la unidad fundamental de todas las formas de grafito. El grafeno es el material de construcción bidimensional para los materiales carbonáceos de todas las otras dimensiones, se puede curvar en fullerenos 0D [52], enrollar en nanotubos 1D y apilarse en grafito 3D., como se muestra en la ilustración nº 6:

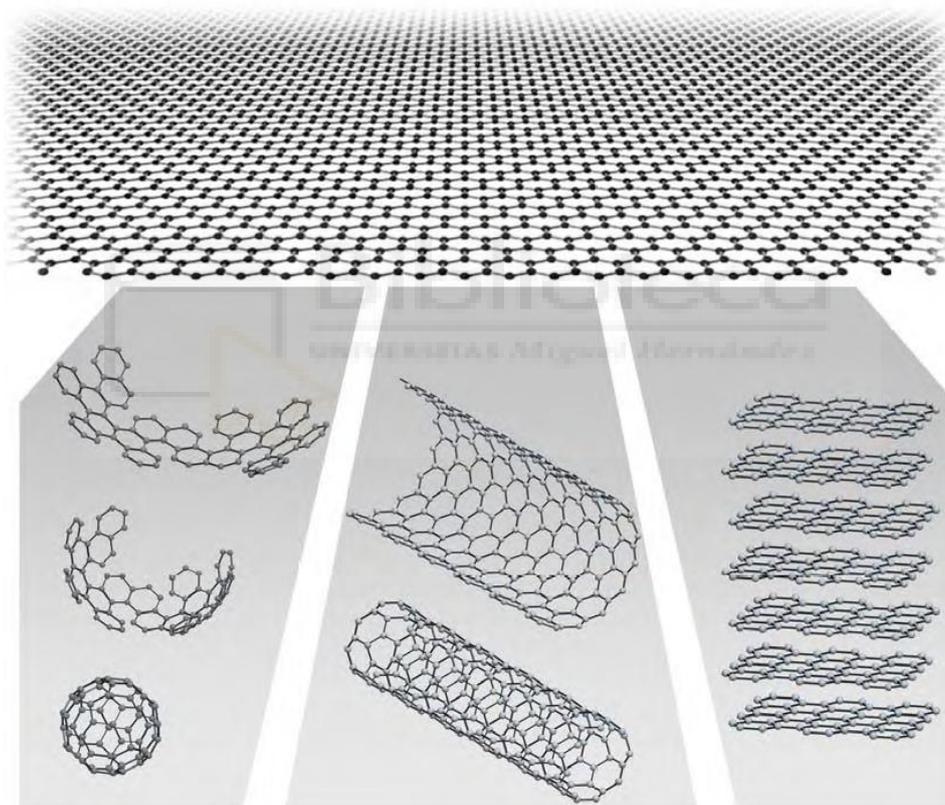


ILUSTRACIÓN 6: ESTRUCTURA DEL GRAFENO

(FUENTE: GEIM, A. K. AND K. S. NOVOSELOV, 2007) [53].

Los parámetros básicos del grafeno, según Prasanna Chandrasekhar, 2018) [54], son:

- Distancia de enlace C-C de aproximadamente 1.42 Å.
- Espesor de aproximadamente 3,35 Å (está cerca del espaciado interplanar en grafito 3-D).

- Peso por unidad de área alrededor de 0.77 mg / m².
- Área de superficie específica de aproximadamente 2600 m² / g (similar a la del carbón activado y significativamente más grande que el de los CNT).

Entre las propiedades más sobresalientes se encuentran que es transparente, flexible, extraordinariamente resistente, impermeable, abundante, económico y conduce la electricidad mejor que ningún otro metal conocido, el grafeno tiene muchas propiedades que no se habían encontrado antes en ningún otro material, en la actualidad el grafeno tiene fascinados a científicos y a la industria debido a sus fantásticas propiedades.

Aunque fue sintetizado por primera vez en 2004, saltó a la fama en 2010 cuando sus descubridores, los investigadores de origen ruso Andre Geim (Sochi, 1958) y Konstantin Novoselov (Nizhny Tagil, 1974) [1] recibieron el Premio Nobel de Física.

La hibridación sp² (ángulos de 120°) explica la estructura hexagonal del grafeno. Cada uno de los carbonos contiene cuatro electrones de valencia en el estado hibridado, tres de esos electrones se alojan en los híbridos sp², y forman enlaces covalentes simples. El electrón sobrante se aloja en un orbital atómico de tipo «p» perpendicular al plano de los híbridos. El solapamiento lateral de dichos orbitales da lugar a formación de orbitales de tipo π.

Algunas de estas combinaciones propician un gigantesco orbital molecular deslocalizado entre todos los átomos de carbono que constituyen la capa de grafeno.

1.13.2. CARACTERÍSTICAS DEL GRAFENO.

Entre las propiedades más destacadas de este material [55], se incluyen:

- Alta conductividad térmica y eléctrica, el material es semiconductor.
- Entre las propiedades físicas del material se pueden observar:
- Alta elasticidad, dureza y resistencia, ya que es el material más resistente.

- Es un material muy flexible, y es casi transparente, y es altamente elástico, y sobre todo duro (200 veces mayor que el acero, casi igual al diamante).
- Es muy ligero, como la fibra de carbono pero más flexible.
- El grafeno puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades, lo que da a este material un fuerte desarrollo.
- Soporta la radiación ionizante.
- Es muy ligero, como la fibra de carbono, pero más flexible, y también es muy denso, ni una partícula de helio lo puede atravesar.
- Se calienta menos el material al conducir los electrones, por lo que posee un menos efecto Joule, por lo que no se recalentaría al usarlo como aparato electrónico, y también consume menos electricidad, incluso menos que el silicio, por lo que su uso será más eficiente.
- Autoenfriamiento, el material se podría autoenfriar el mismo (según algunos científicos de la Universidad de Illinois)
- Su ratio superficie/volumen es muy denso, por lo que hace que el grafeno tenga un buen futuro en el campo de los condensadores.
- Se puede dopar introduciendo impurezas para cambiar su comportamiento primigenio de tal manera que se pueda hacer que no repela el agua o que incluso mejore todavía más la conductividad.

Desde el punto de vista teórico, el grafeno posee propiedades interesantes [56]:

- Comportamiento como cuasipartículas sin masa de los electrones que se trasladan sobre el grafeno. Son los denominados fermiones de Dirac, que se mueven a velocidad constante, de manera independiente de su energía (como ocurre con la luz), en este caso a unos 10⁶ m/s. A este respecto, la importancia del grafeno consiste en que propicia el estudio experimental de este comportamiento, predicho teóricamente hace más de 50 años.

-Efecto Hall cuántico, por el cual la conductividad perpendicular a la corriente toma valores discretos, o cuantizados. Esto permite medirla con suma precisión. La cuantización implica que la conductividad del grafeno nunca puede ser nula (su valor mínimo depende de la constante de Planck y de la carga del electrón).

-Hay una movilización libre de electrones por todas las partes del grafeno por lo que no quedan aislados en zonas de las que no puedan salir. Es el efecto conocido como localización de Anderson, que representa un problema en sistemas bidimensionales con impurezas.

-Aunque no deja pasar el helio, sí permite paso al agua: en un recipiente de grafeno cerrado se evapora prácticamente a la misma velocidad que si estuviese abierto.

Generalmente las propiedades del grafeno como norma general varían dependiendo del sustrato sobre el cual se deposita.

Entre los inconvenientes del grafeno, muchos investigadores creen que el grafeno puede rivalizar con el principal producto de la electrónica, el silicio, pero a pesar de sus numerosas y prometedoras propiedades, se tienen que superar ciertas barreras asociadas a la misma naturaleza del material, sobre todo en lo que se refiere a sus posibles aplicaciones en electrónica. Por ejemplo, a diferencia del silicio, el grafeno no es un material que se pueda detener fácilmente el flujo de la corriente eléctrica, por lo que el Grafeno “puro” no es apropiado para su uso en electrónica.

En contra de esto numerosos investigadores están intentado saltarse este tipo de “barreras”, como por ejemplo intentando alterar químicamente las propiedades del material para hacerlo más apto y funcional.

1.13.3. OBTENCION DE GRAFENO.

Las formas de obtención de grafeno en la actualidad según cita Carlos Jorge Saldivar Larré [49], Luca Ottaviano y Vittorio Morandi [57], son:

a.- Exfoliación mecánica.

Es una técnica sencilla, y es necesario contar con una superficie limpia de grafito, el cual como está constituido por varias capas superpuestas de grafeno unidas. El método consiste en someter el grafito a un fino raspado y posteriormente extraer hojas extremadamente delgadas al descascarar repetidamente utilizando cinta adhesiva.

b.- Obtención Epitaxial en Carburo de Silicio.

Este método consiste en calentar el carburo de silicio (SiC) a temperaturas mayores a 1100° C para reducir al grafeno. Este proceso produce grafeno epitaxial.

c.- La reducción del óxido de grafito.

Este método de síntesis se basa en la reducción de óxido de grafito en escamas monocapas de óxido de grafeno

d.- Obtención con metal-carbono derretido.

El objetivo general de este proceso es la disolución de átomos de carbono en el interior de un metal de transición fundido a una cierta temperatura, y luego permitir que el carbono disuelto se precipite a bajas temperaturas como grafeno de una sola capa.

e.- A partir de nanotubos

Los métodos experimentales para la producción de cintas de grafeno consisten en cortar los nanotubos. Los nanotubos de carbono en uno de los métodos se cortan en por acción de permanganato de potasio y ácido sulfúrico. En otro método nanocintas de grafeno se producen mediante grabado en plasma de nanotubos parcialmente incrustados en una película de polímero.

f.- A partir de grafito por ultrasonidos.

Consiste en la dispersión de grafito en un medio líquido adecuado que luego mediante ondas sonoras por ultrasonidos se hace agitar las partículas. El grafito no exfoliado es finalmente separado del grafeno por centrifugación.

1.14. ACIDO POLICARBOXILICO.

Este aditivo se compone de una base de ácido policarboxílico, más concretamente ácido cítrico, a la cual se le añade dióxido coloidal de silicón en proporción de entre un 0,8% y 1,2% del peso referido al ácido. El aditivo está presentado en forma de polvo seco, de manera que la mezcla con el yeso cuyas propiedades se pretenden mejorar se realizará antes de la mezcla con agua, pudiendo incorporar el aditivo en la masa seca de yeso durante su fabricación. El procedimiento para su obtención pasa por la disposición de una base de ácido cítrico presentado en forma de cristales sólidos a la que se le adiciona dióxido coloidal de silicón en la proporción indicada. Patentes: 201200897, 201700812.

Las ventajas que ofrece el aditivo [31], son:

- Reducción de la cantidad de agua de mezcla necesaria pudiendo realizar relaciones agua/yeso aditivado de 0,3; es decir se puede llegar a fabricar composiciones de 300 gramos de agua por 1000 gramos de sulfato aditivado.
- Mejora de la trabajabilidad de la mezcla y facilidad de control del tiempo de fraguado. A medida que se aumenta la dosificación del aditivo aumenta el tiempo de fraguado o el tiempo de trabajabilidad de la mezcla.
- Posibilidad de aportación, como se ha indicado, de otros materiales o sustancias como fibras o elementos aligerantes, debido a la alta compacidad de la mezcla.
- Obtención de una matriz final de baja capilaridad. Una vez fraguado, mejora de la resistencia a cambios bruscos de temperatura.
- Elevada resistencia mecánica. - Alta dureza superficial y mecánica a la flexión compresión.
- Elevada resistencia al fuego.
- Alto índice de aislamiento a las ondas de presión para soportar explosiones. Esta propiedad se deduce de las pruebas efectuadas con explosiones reales en ensayos de campo.

1.15. ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS.

En el estudio realizado sobre el estado del conocimiento sobre temas relacionados con los yesos, se aprecia un número importante de referencias a trabajos científicos [58], donde se incorporan distintos materiales en los yesos para modificar y mejorar alguna de sus propiedades físicas o mecánicas; entre los cuales destacamos los siguientes.

1.15.1. YESO CON FIBRA CELULOSA.

El panel de fibra-yeso Intergypsum [59], es una mezcla homogénea de yeso escayola y fibra celulósica procedente de papel reciclado, que se mezcla con agua para el fraguado del yeso, sin añadirle colas ni otros productos aglutinantes, aparte de una ligera impregnación superficial que le permite ser pintado, empapelado o alicatado inmediatamente después de su puesta en obra. El yeso envuelve a la fibra. La fibra arma al yeso, mejorando sustancialmente sus propiedades mecánicas.

1.15.2. APLICACIONES DEL CORCHO EN EL CAMPO DE LA EDIFICACIÓN

Esta investigación se realizó en un proyecto más amplio, cuyo objetivo fundamental era la búsqueda de nuevas aplicaciones del corcho, principalmente de los desechos generados por su industria, en el campo de la construcción de edificios. Por ello el proyecto de partida persigue el estudio de nuevos materiales compuestos a base de desechos de corcho y los conglomerantes utilizados más frecuentemente en la construcción de edificios: hormigón, mortero y yeso/escayola. (Mercedes del Río Merino, 2005) [60].

1.15.3. MEZCLAS DE RESIDUOS DE POLIETILENO EXPANDIDO (EPS) CONGLOMERADOS CON YESO O ESCAYOLA PARA SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN.

Consiste en mezclar yeso o escayola y agua para constituir pastas que contienen residuos de EPS que se moldean como placas y paneles para la construcción [61]. Los ensayos que se reportan aquí, son para la aplicación en placa constructiva: carga máxima a la flexión, resistencia al impacto, absorción de agua por inmersión, reacción al fuego, determinación de su masa por unidad de superficie. Esto se permite señalar que con las pastas con residuos de EPS se pueden fabricar placas y paneles con algunas ventajas en relación a los existentes, a lo que se le suma el beneficio medioambiental de reciclaje de EPS. (Francisco Javier González Madariaga y Joaquín Lloverás Macia, 2008) [62].

1.15.4. INCORPORACIÓN DE LA CÁSCARA DE MEJILLÓN EN EL YESO Y EL MORTERO.

Estudia la viabilidad de la incorporación de la cáscara de mejillón como sustituto de la materia prima, con la intención de aprovechar las propiedades mecánicas que la misma naturaleza le concede a las cáscaras de este molusco, debido a la especial composición y estructura de la cutícula de la concha que le confiere propiedades particulares. Se trata de una fina monoestructura, de entre 2 y 4 micras de espesor, combinado de proteínas con una composición un tanto peculiar pues contienen secuencias repetitivas de aminoácidos poco frecuentes de este tipo de polímeros, como la hidroxiprolina o la dihidroxifenilalanina. Esto permite destacar que las propiedades de la cáscara del mejillón, lo convierte en un material muy convenientemente para ser incorporado como árido, la cáscara de mejillón como áridos, supone una opción factible para la valoración del material, la cual además de eliminar el vertido de este material, ayuda a reducir el consumo de un recurso natural que cada día se hace más escaso. (García Figuerero, July Altagracia, 2011) [24].

1.15.5. UTILIZACIÓN DE ADITIVOS EN LA CONFECCIÓN DEL MORTERO PROCEDENTES DE RESIDUOS.

Existen trabajos orientados a la confección de yeso a través de la adición de materiales procedentes de la valorización de varios tipos de residuos como son:

- Agregados binarios de fibras de polipropileno y dispersiones de melaninaformaldehído
- Fibra de vidrio E
- Agregado de sisal
- Aditivos plastificantes o superplastificantes
- Aditivos espumantes
- Aditivos inclusotes de aire o aireantes
- Vidrio celular
- Agregado de fibras de papel
- Agregados de aserrín

La utilización de residuos en la construcción ofrece una serie de ventajas como son:

- Tecnológicas: aumento de la resistencia y durabilidad.
- Económicas: menor inversión económica del producto del uso de un residuo.
- Ecológicas: disminución del consumo energético y reducción de emisiones CO₂.

Actualmente, en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, se estudian distintas aplicaciones relacionadas con desarrollos de morteros en base al sulfato cálcico. Siendo las líneas de trabajo, relacionadas con el mortero aplicado en:

- Desarrollo de morteros aditivados para la protección de estructuras ante el fuego.
- Desarrollo de morteros para la protección térmica de estructuras de aluminio.
- Desarrollo de elementos ignífugos para la protección de estructuras de aluminio.
- Desarrollo de elementos para la absorción de ondas de presión y protección de edificaciones ante explosiones.
- Desarrollo de cajas perfiladas de aluminio o acero, para transportes de carácter especial.
- Desarrollo de elementos para la protección de fuegos de alta intensidad.
- Desarrollo de elementos resistentes a impactos de balística.
- Desarrollo de elementos para protección de esferas de GLP e hidrocarburos.
- Desarrollo de elementos para la protección de plataformas petrolíferas.

CAPITULO 2: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.



2.1. OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACION.

Una de las líneas del grupo de investigación de “Nuevos Materiales para la Construcción, N.M.C.” del Departamento de Ingeniería de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, E.P.S.O. de la Universidad Miguel Hernández, U.M.H.; es la de búsqueda y desarrollo de aplicaciones de morteros a base de sulfato cálcico con aditivos. Estos desarrollos se distribuyen en varias líneas de trabajo de aplicación directa, como:

- Materiales ignífugos de alta resistencia al fuego.
- Materiales capaces de absorber ondas de presión.
- Materiales capaces de absorber impactos de balística.
- Materiales con alto comportamiento térmico
- Materiales con alto comportamiento acústico.
- Materiales con mejores propiedades mecánicas.

Estas aplicaciones se basan en el uso de los aditivos aplicados al sulfato cálcico que mejoran notablemente su capacidad de trabajo, así, podemos manejar tiempos de fraguado con pequeñas aportaciones de agua que confieren a la matriz una extraordinaria dureza y resistencia.

Como síntesis podemos establecer el objeto del presente trabajo de investigación, en mejorar los morteros actuales de sulfato cálcico mediante la adición de un aditivo específico como es el grafeno, y el ácido carboxílico.

Analizándose las propiedades mecánicas del mortero de sulfato de calcio con distintos porcentajes de los aditivos mencionados, con el fin de poder emplear el mortero en soluciones concretas que mejoren la resistencia mecánica y la ductilidad del mismo.

Así, el objetivo principal de este trabajo es estudiar el uso del grafeno y el ácido carboxílico como aditivo al mortero de sulfato cálcico, analizando su comportamiento y propiedades mecánicas para diferentes porcentajes de estos aditivos tanto de forma individual de cada uno de los aditivos, como de forma conjunta.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS DE LA INVESTIGACION.

Los objetivos específicos que se desean alcanzar con esta investigación es el de analizar las propiedades mecánicas del mortero de yeso con los aditivos añadidos de grafeno y ácido policarboxílico en distintas proporciones de forma independiente; así como la mezcla de estos dos aditivos en distintas proporciones en conjunto.

Las propiedades mecánicas que se van a estudiar de este material, es:

- Densidad
- Evaluación de la dureza superficial
- Resistencia a flexión
- Resistencia a compresión



CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS



3.1. METODOLOGIA

En este capítulo, se pretende ver las características y especificaciones de todos los materiales que van a ser utilizados para la elaboración de esta Tesis, también, se expondrán los procedimientos de ensayo y los métodos a seguir, para la obtención de resultados.

El desarrollo de estos compuestos viene determinado por la consecución del objetivo de la Tesis, es decir, definir las propiedades mecánicas del mortero aditivado, a base de yeso con grafeno y ácido policarboxílico, estudio de las dosificaciones para optimizar el comportamiento mecánico del compuesto obtenido.

Para conseguir los objetivos propuestos, se actuará con el fin de obtener un amplio abanico de datos para poder contrastarlos:

- Materiales de mortero de yeso.
- Materiales de mortero de yeso aditivado con grafeno.
- Materiales de mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico.
- Materiales de mortero de yeso aditivado con mezcla de grafeno y ácido policarboxílico.

Dentro de los estudios llevados a cabo, se exponen los propuestos en el fundamento de esta Tesis:

- Estudio del sistema A/Y como referencia.
- Estudio del sistema A/Y aditivado con grafeno en distintas proporciones
- Estudio del sistema A/Y aditivado con ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio del sistema A/Y aditivado con la mezcla de grafeno y ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de dureza del mortero de yeso sin aditivar en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de dureza del mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de dureza del mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico en distintas proporciones.

- Estudio de las propiedades mecánicas de dureza del mortero de yeso aditivado con grafeno y ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de flexión del mortero de yeso sin aditivar en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de flexión del mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de flexión del mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de flexión del mortero de yeso aditivado con grafeno y ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de compresión del mortero de yeso sin aditivar en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de compresión del mortero de yeso aditivado con grafeno en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de compresión del mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico en distintas proporciones.
- Estudio de las propiedades mecánicas de compresión del mortero de yeso aditivado con grafeno y ácido policarboxílico en distintas proporciones.

3.2. MATERIALES

3.2.1. AGUA

El agua es obtenida directamente de la red de agua potable para mezclar juntos, el yeso moreno y el aditivo con el cual obtendremos el mortero para él ensayo. Se han utilizado las cantidades de agua necesarias para la ejecución de los ensayos. El agua en proporciones adecuadas, facilita el asiento y la distribución del mortero sobre los moldes en la realización de las probetas. Un factor muy a tener en cuenta es la posible formación de coqueras (Burbujas de aire en el interior de las probetas) y que producirían un efecto engañoso sobre las propiedades mecánicas del mortero a evaluar. El agua no aporta ninguna propiedad por su composición a la mezcla, sino todo lo contrario, hay que tener en cuenta que cuanto más agua aportemos al proceso

de amasado del mortero, peor será el comportamiento de las propiedades mecánicas del producto obtenido.

PARAMETROS Y PROPIEDADES DEL AGUA				
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 absorción	0.5	< 0.10 ±15%	mg/L
Carbono orgánico total	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 20°C	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 16: ANÁLISIS DE AGUA
(FUENTE: AQUAGEST LEVANTE, S.A.) [63]

3.2.2. YESO.

Se ha utilizado yeso moreno (también denominado yeso negro) para el desarrollo del trabajo. Sus características nominales vienen definidas según la Norma UNE-EN 13279-1 [37], como B1 denominación de Yeso para construcción, siendo las siguientes:

- Yeso grueso constituido por semihidrato ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) con más del 50% de hemihidrato
- Posible incorporación de aditivos reguladores del fraguado
- Resistencia mecánica mínima a flexión de 1 N/mm² y de 2 N/mm² a compresión
- Se utiliza para pasta de agarre en la ejecución de tabicados, en revestimientos interiores y como conglomerantes auxiliar de obra.



FOTOGRAFÍA 7: YESO MORENO.

(FUENTE: PROPIA)

Este yeso se ha utilizado principalmente atendiendo a razones económicas, ya que se considera un yeso barato frente a otros yesos de más pureza que sin duda ofrecen mejores resultados pero encarecerían el objetivo final, que es el empleo de dichos morteros en el campo civil e industrial.

El yeso que se ha utilizado, tiene las siguientes especificaciones técnicas:

ESPECIFICACIONES DEL YESO EMPLEADO	
MATERIAL	YESO
Denominación	IBERPLAST
Clasificación (según norma UNE-EN-13.279-1:2009)	Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción
Tipo	B1 (Yeso de construcción) según la denominación europea y como YG (Yeso grueso o rápido) según la denominación tradicional.
Reacción al fuego	Euroclase A1 (no contribución al fuego), al tener menos de un 1% en peso o volumen de materia orgánica, según la directiva 89/106/CEE relativa a productos de construcción

Índice de pureza (%)	>75
Granulometría (mm)	0-2
Relación A/Y (VA, GA, SN)(Litros/Kg)	1,0-1,2
Dureza superficial (unidades Shore C)	≥45 (Valor medio en laboratorio, según Anexo K del RP 35.01 (Reglamento particular de Yesos para la construcción B1))
Resistencia mecánica a compresión	> 2 N/mm ²
Resistencia mecánica a flexión	> 2 N/mm ²

TABLA 17: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL YESO EMPLEADO

(FUENTE: PLACO S.A.)

3.2.3. ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO.

El ácido policarboxílico es un nuevo aditivo de yesos. Tiene un efecto fluidificante y retardador sobre el proceso del fraguado. Está sujeto a patente.

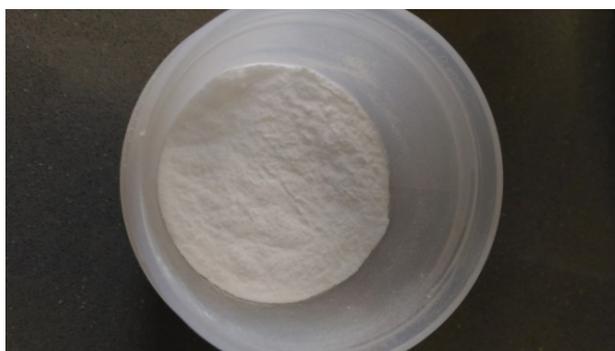
Es un aditivo en forma sólida y de tipo orgánico, compuesto por varios ácidos de origen orgánico de los denominados policarboxílicos, en un 98 % de ácido cítrico y 2 % de dióxido de silicio coloidal. El líquido es sólido, de color blanco.

Tiene una densidad similar a la del agua destilada. Su pH está en torno a 3. Tiene un efecto casi inmediato sobre el fraguado desde el momento que se empieza a amasar la mezcla de agua yeso moreno y el aditivo.

ESPECIFICACIONES ADITIVO ACIDO POLICARBOXILICO	
Propiedades	Descripción
Nombre del producto:	TAINOX-68
Uso de la sustancia:	Acido cítrico fluidificado : Aditivo
Fabricante:	3A ANTIOXIDANTS
Número de registro (Reglamento 1907/2006):	01-2116457026-42-xxxx
Componentes:	Ácido cítrico anhidro 99 - 100% y
Riqueza:	100%
Apariencia:	Sólido
Color:	Blanco
Olor:	Inodoro
pH:	1.8 (50 g/l; 20°C)
Punto/Intervalo fusión:	135 –152 °C
Inflamabilidad (sólido, gas):	No arde
Densidad:	1.54 g/cm ³ (20 °C)
Solubilidad en agua:	676 g/l (25 °C)
Descomposición térmica:	> 170 °C

TABLA 18: RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DEL ADITIVO ACIDO POLICARBOXILICO.

(FUENTE: ANTIOXIDANTS 3A S.L.) [64]



FOTOGRAFÍA 8: ÁCIDO POLICARBOXILICO

(FUENTE: 3A ANTIOXIDANTS)

3.2.4. ADITIVO GRAFENO.

El grafeno, como se ha mencionado en el capítulo I, es un alótropo (propiedad de algunos elementos químicos de poseer estructuras químicas diferentes) del carbono, un teselado hexagonal plano (como un panal de abeja) formado por átomos de carbono y enlaces covalentes que se forman a partir de la superposición de los híbridos $sp(2)$ de los carbonos enlazados

Se puede considerar, que el grafeno, es la unidad fundamental de todas las formas de grafito.

En realidad, la estructura del grafito es una pila de gran cantidad de láminas de grafeno superpuestas y los enlaces entre las distintas capas de grafeno apiladas se deben a las fuerzas de Van der Waals e interacciones de los orbitales π de los átomos de carbono.

En la actualidad, el grafeno se comercializa bajo las siguientes formas:

- Grafeno en lámina: es de alta calidad, la producción de grafeno en lámina tiene un coste elevado, y se emplea en campos como la informática, la electrónica, o incluso la aeronáutica, donde se requiere un material muy resistente.
- Grafeno en polvo: es de menor calidad que el grafeno en lámina, su producción es mayor y de menor coste.

El grafeno constituye el objetivo principal de este trabajo, suministrada en polvo en envase de plástico:



FOTOGRAFÍA 9: POLVO DE GRAFENO

(FUENTE: EMPRESA LUCASLED SMART SAVINGS) [65]

ESPECIFICACIONES ADITIVO GRAFENO	
MATERIAL	GRAFENO
Composición	polvo sólido
Color:	Negro
Olor:	Inodoro
Materias sólidas	98%
Tamaño medio de partículas	10 micras
Densidad	2.2Gr/cm ³
Propiedades mecánicas:	1.060 GPa
Análisis elemental:	C (%): 77-87% H (%): 0-1% N (%): 0-1% S(%): 0% O (%): 13-22%

TABLA 19: ESPECIFICACIONES DEL POLVO DE GRAFENO.

(FUENTE LUCASLED SMART SAVING) [65]

En el presente trabajo se pretende analizar cómo se comporta el yeso aditivado al mezclarlo con el polvo de grafeno en diferentes proporciones, las cuales se exponen en el apartado nº 3.5.

3.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.3.1. MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

Se han efectuado las pruebas sobre las probetas de yeso con una máquina universal de ensayos, para la obtención de la resistencia y módulo de elasticidad y densidad de las probetas por flexotracción, de forma automática.



FOTOGRAFÍA 10: MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS (FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)



FOTOGRAFÍA 11: DETALLE DE MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DEL LABORATORIO (FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCION DE LA EPSO)

Para un mejor funcionamiento de los elementos de la máquina de ensayos, se ha instalado dentro de una habitación, aislada con cerramiento de aluminio y cristal, del resto del laboratorio de ensayos, junto con el compresor de trabajo.

3.3.2. DURÓMETRO ESCALA SHORE C

Para conocer los valores de resistencia a la penetración en superficie, o dureza, se ha empleado el método Shore, con un aparato de la escala C, según recomienda la Norma UNE-EN 13279-2 (2014) [66].

Se ha utilizado un durómetro portátil que posee una sensibilidad 5 unidades shore, con una capacidad de 0 a 100 unidades shore.



FOTOGRAFÍA 12_ DURÓMETRO ESCALA SHORE C

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

Para determinar la dureza Shore, escala C de probetas y artículos de goma de dureza media. Se utilizan en materiales como gomas y plásticos de dureza media, yesos y escayolas.

3.3.3. APAREJOS

Cubos de plástico: para el pesaje de los materiales y el amasado del yeso.



FOTOGRAFÍA 13: CUBO DE PLÁSTICO

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

Báscula electrónica: con una resolución del 2×10^{-6} del alcance máximo de la pesada, equivalente a una precisión de 0,01 g.



FOTOGRAFÍA 14: BÁSCULA DE PRECISIÓN

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

Moldes de acero: para las probetas de yeso, según lo establecido en la norma, de 160x40x40 mm.



FOTOGRAFÍA 15: MOLDES DE ACERO

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

Material auxiliar de laboratorio: pipeta, espátula, rejillas para secado, etc.



FOTOGRAFÍA 16: ESPÁTULAS

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

3.4. METODOS

Al no haber muchas referencias sobre trabajos realizados con mortero de yeso aditivado con grafeno y ácido policarboxílico. Se plantea la siguiente metodología de trabajo en el laboratorio, que se han desarrollado y que a continuación se detallan.

Se ha procedido a la elaboración de 3 lotes de 9 probetas, de dimensiones 40x40x160 mm, cada lote del mortero de yeso; para la obtención de datos que nos sirvan de referencia a la hora de comparar los resultados obtenidos con los morteros de yesos aditivados; con un total de 27 probetas

Posteriormente, se ha procedido a la elaboración de 3 lotes de 9 probetas cada lote, con las mismas dimensiones, para la obtención de datos del mortero de yeso aditivado con grafeno; con un total de 27 probetas.

A continuación, se ha procedido a la elaboración de 3 lotes de 9 probetas cada lote, con las mismas dimensiones, para la obtención de datos del mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico; con un total de 27 probetas

Para finalizar, los trabajos de laboratorio, se ha procedido a la elaboración de 3 lotes de 9 probetas cada lote, con las mismas dimensiones, para la obtención de datos del mortero de yeso aditivado con grafeno y ácido policarboxílico; con un total de 27 probetas.

3.4.1. CONFECCIÓN DE PROBETAS.

Para la confección de las probetas se ha seguido el siguiente planning 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.
- Yeso con la dosis óptima de aditivo y con adición a diferentes dosis de cada tipo.
- Yeso con la dosis fijada de aditivo y mezcla física con diferentes dosis del otro aditivo.

2°.- Caracterización de los materiales compuesto elaborados.

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas, se han fabricado una serie de probetas 40x40x160mm, en base a la Norma UNE-EN 13279-2 [66]. Se han realizado 9 probetas por ensayo en el laboratorio 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. El amasado de las probetas se realiza de forma automática con la batidora, realizando movimientos en forma de "8", y finaliza cuando no quedan grumos de yeso en la pasta, siguiendo los siguientes pasos:

a.- Se pesan mediante la báscula, las cantidades de yeso, agua y polvo de grafeno, en función de las relaciones calculadas.



FOTOGRAFÍA 17: PESADA DE LA CANTIDAD DE YESO
(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

b.- Se añade el aditivo al agua de amasado. La cantidad de aditivo va en porcentaje referido a la cantidad de agua. Se mezclan las cantidades de yeso con el polvo de grafeno de cada muestra, hasta quedar completamente mezclado.



FOTOGRAFÍA 18: MAQUINA MEZCLADORA

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)



FOTOGRAFÍA 19: MEZCLA TERMINADA

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

c.- Se realiza la pasta mezclando el agua con el aditivo en el recipiente de amasado. La pasta formada se mezcla con un agitador de hélice hasta quedar la masa sin grumos y con el menor número de burbujas de aire en ella.



FOTOGRAFÍA 20: AGITADOR DE HÉLICE

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)



FOTOGRAFÍA 21: AMASADO DE MEZCLA

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)



FOTOGRAFÍA 22: PASTA MEZCLADA

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

d.- Inmediatamente después de la preparación se rellena el molde con la ayuda de una espátula. Para eliminar las burbujas de aire, se coge el molde por los extremos y se sacude diez veces sobre la mesa, a fin de evitar la formación de coquetas. Se elimina la pasta sobrante con una herramienta que alise la probeta pero sin ejercer presión sobre la pasta de yeso.



FOTOGRAFÍA 23: PROBETAS EN EL MOLDE
(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

e.- Cuando la pasta haya adquirido un grado adecuado de resistencia, se desmoldan las probetas y se identifican.



FOTOGRAFÍA 24: PROBETAS DESMOLDADAS
(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)



FOTOGRAFÍA 25: PROBETAS IDENTIFICADAS

(FUENTE: LABORATORIO DE CONSTRUCCIÓN DE LA EPSO)

f.- Transcurrido un periodo de fraguado suficiente de las probetas, estas se pesan, obteniendo la densidad seca según la siguiente expresión:

$$\text{Densidad seca } (\gamma) = \frac{\text{Peso de secado}}{\text{volumen probeta}}$$

g.- Antes de realizar los ensayos hay que rectificar las probetas por la cara superior mediante una lija, hasta que esta cara sea comparable con las demás caras.

3.4.2. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Para la elaboración de estos ensayos se ha realizado unas muestras de referencia de mortero de yeso para que sirvan de base para referenciar las distintas muestras de los yesos aditivados que se obtengan a distintas proporciones, como viene indicado en la Tabla nº 20:

MORTERO DE YESO BASE DE REFERENCIA					
Denominación	Peso de la Muestra (kg)	Nº Lote	Porcentaje de Yeso (%)	Porcentaje de Agua (%)	Relación Y/A
Mortero de Yeso (Referencia)	3	1	60	40	1,5
		2	65	35	1,86
		3	70	30	2,33

TABLA 20: DATOS DE REFERENCIA MUESTRAS DE MORTERO DE YESO.

(FUENTE: PROPIA)

Para la realización de las muestras se utilizó para cada amasada o lote, una muestra base de mortero de yeso, para que sirviese de referencia, preparándose para ello 3 lotes con 9 probetas cada uno, como se muestra en la Tabla nº 21:

DOSIFICACIONES E IDENTIFICACION DE LAS PROBETAS DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA							
LOTE	MASA DE YESO (grs)	MASA DE AGUA (grs)	MASA MEZCLA (grs)	% YESO	% AGUA	PROBETA	
1	1800	1200	3000	60	40	P1-1 P1-2 P1-3 P1-4 P1-5	P1-6 P1-7 P1-8 P1-9
2	1950	1050	3000	65	35	P2-1 P2-2 P2-3 P2-4 P2-5	P2-6 P2-7 P2-8 P2-9
3	2100	900	3000	70	30	P3-1 P3-2 P3-3 P3-4 P3-5	P3-6 P3-7 P3-8 P3-9

TABLA 21: DOSIFICACIONES Y PORCENTAJES DE MEZCLA DE AGUA Y YESO PARA MUESTRA DE REFERENCIA

3.4.3. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO.

Se han realizado 3 lotes de 9 probetas por cada muestra para evaluar la repercusión en las propiedades mecánicas de la mezcla, añadiendo el aditivo de polvo de grafeno en los porcentajes de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %, con la nomenclatura que se indica en la Tabla nº 22:

DOSIFICACIONES E IDENTIFICACION DE PROBETAS DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO						
Denominación	Aditivo	Porcentaje (%)	Peso (grs)	Identificación Ensayo		
Lote G1	Polvo de grafeno	0,05	1,5	Pg ₁₋₁	Pg ₁₋₆	
				Pg ₁₋₂	Pg ₁₋₇	
				Pg ₁₋₃	Pg ₁₋₈	
				Pg ₁₋₄	Pg ₁₋₉	
				Pg ₁₋₅		
Lote G2	Polvo de grafeno	0,08	2,4	Pg ₂₋₁	Pg ₂₋₆	
				Pg ₂₋₂	Pg ₂₋₇	
				Pg ₂₋₃	Pg ₂₋₈	
				Pg ₂₋₄	Pg ₂₋₉	
				Pg ₂₋₅		
Lote G3	Polvo de grafeno	0,10	3,0	Pg ₃₋₁	Pg ₃₋₆	
				Pg ₃₋₂	Pg ₃₋₇	
				Pg ₃₋₃	Pg ₃₋₈	
				Pg ₃₋₄	Pg ₃₋₉	
				Pg ₃₋₅		

TABLA 22: DOSIFICACIONES, CANTIDAD Y NOMENCLATURA DE PROBETAS CON ADITIVO DE GRAFENO.

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.4.4. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ACIDO POLICARBOXILICO.

Se han realizado 3 lotes de 9 probetas por cada muestra para evaluar la repercusión en las propiedades mecánicas de la mezcla, añadiendo el aditivo de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 % del compuesto, de forma independiente, como se muestra en la Tabla nº 23:

DOSIFICACIONES E IDENTIFICACION DE PROBETAS DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO					
Denominación	Aditivo	Porcentaje (%)	Peso (grs)	Identificación Ensayo	
Lote A1	Ácido Policarboxílico	0,10	3,0	Pa ₁₋₁ Pa ₁₋₂ Pa ₁₋₃ Pa ₁₋₄ Pa ₁₋₅	Pa ₁₋₆ Pa ₁₋₇ Pa ₁₋₈ Pa ₁₋₉
Lote A2	Ácido Policarboxílico	0,16	4,8	Pa ₂₋₁ Pa ₂₋₂ Pa ₂₋₃ Pa ₂₋₄ Pa ₂₋₅	Pa ₂₋₆ Pa ₂₋₇ Pa ₂₋₈ Pa ₂₋₉
Lote A3	Ácido Policarboxílico	0,20	6,0	Pa ₃₋₁ Pa ₃₋₂ Pa ₃₋₃ Pa ₃₋₄ Pa ₃₋₅	Pa ₃₋₆ Pa ₃₋₇ Pa ₃₋₈ Pa ₃₋₉

TABLA 23: DOSIFICACIONES, CANTIDAD Y NOMENCLATURA DE PROBETAS CON ADITIVO DE ÁCIDO POLICARBOXILICO.

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.4.5. MEZCLA-DOSIFICACIONES DEL MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Se ha realizado 3 lotes de 9 probetas cada lote, con la mezcla de los dos aditivos de forma conjunta en las proporciones de: 0,05 % de aditivo de polvo de grafeno más 0,06 % de ácido policarboxílico, 0,08 % de polvo de grafeno más 0,06 % de ácido policarboxílico, y 0,10 % de aditivo de polvo de grafeno más 0,06 % de ácido policarboxílico, todo ello se expresa en la Tabla nº 24:

PORCENTAJES E IDENTIFICACION DE PROBETAS DE MEZCLA CONJUNTA DE ADITIVOS						
Denominación	ADITIVO POLVO DE GRAFENO		ADITIVO ACIDO POLICARBOXILICO		Identificación ensayo	
	PORCENTAJE (%)	PESO (grs)	PORCENTAJE (%)	PESO (grs)		
Lote GA1	0,05	1,5	0,06	1,8	Pga ₁₋₁ Pga ₁₋₂ Pga ₁₋₃ Pga ₁₋₄ Pga ₁₋₅	Pga ₁₋₆ Pga ₁₋₇ Pga ₁₋₈ Pga ₁₋₉
Lote GA2	0,10	3,0	0,06	1,8	Pga ₂₋₁ Pga ₂₋₂ Pga ₂₋₃ Pga ₂₋₄ Pga ₂₋₅	Pga ₂₋₆ Pga ₂₋₇ Pga ₂₋₈ Pga ₂₋₉
Lote GA3	0,15	4,5	0,06	1,8	Pga ₃₋₁ Pga ₃₋₂ Pga ₃₋₃ Pga ₃₋₄ Pga ₃₋₅	Pga ₃₋₆ Pga ₃₋₇ Pga ₃₋₈ Pga ₃₋₉

TABLA 24: DOSIFICACIONES, CANTIDAD Y NOMENCLATURA DE PROBETAS CON LA MEZCLA DE ADITIVOS CONJUNTA.

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).

3.5. ENSAYOS

Todas las probetas fabricadas para la elaboración del presente estudio han sido sometidas a ensayo de dureza Shore C, ensayo de flexión y ensayo de compresión.

3.5.1. ENSAYO DE DUREZA SHORE C

Para la determinación de la dureza superficial en los compuestos analizados, se utiliza el ensayo Shore C. Este ensayo viene definido en la norma UNE-EN 13279-2 [66].

En dicha norma se especifica que se han de analizar seis lecturas, tres por cada cara de las dos opuestas contramoldeadas y se realiza la media de los valores obtenidos que será el valor final de la probeta.

3.5.2. ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN

Consiste en la determinación de la capacidad de carga máxima a la flexión y del módulo de rotura de los materiales en ensayo. Se busca establecer una relación de sus comportamientos durante esos tipos de tensiones, del yeso al mezclarlo con la fibra de carbono en sus diferentes longitudes y porcentajes.

De cada formulación se amasa un lote de 3 probetas prismáticas normalizadas de 40x40x160 mm. El ensayo se realiza según la Norma UNE-EN 13279-2 [66], haciendo uso de la máquina universal de ensayos a la que se le coloca un dispositivo de flexotracción a 3 puntos, que aportará los datos de resistencia y módulo de elasticidad.

El dispositivo está compuesto, por una parte inferior fija con dos barras rígidas separadas entre sí 100 mm sobre las que se apoya la probeta a ensayar. En la parte superior hay un brazo con movimiento vertical libre acabado en una pieza circular basculante con una barra rígida encargada de transmitir la carga a la probeta. En la parte inferior hay además dos pivotes metálicos que sirven de ayuda para alinear la probeta y evitar que ésta esté desplazada durante el ensayo.

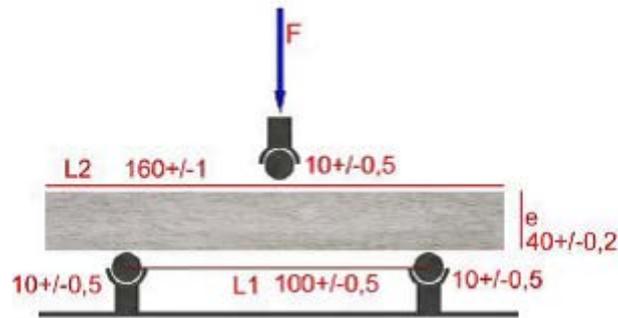


ILUSTRACIÓN 7: ENSAYO NORMALIZADO

(FUENTE: DPTO. INGENIERÍA EPSO)

Para la recogida de datos, la prensa está controlada por un software que recoge los valores fuerza realizada y la posición automáticamente se procesa los datos de fuerza y deformación para cada segundo registrado durante el ensayo, así como la resistencia final. Las probetas se someten a esfuerzos de flexotracción aplicando sobre ellas una carga de 50 ± 10 N/s hasta rotura de la probeta en dos mitades.



FOTOGRAFÍA 26: PROBETA ENSAYADA A FLEXIÓN

(FUENTE: ELABORACION PROPIA)

El procedimiento analítico para la determinación de los valores característicos que necesitamos para clasificar e identificar las propiedades mecánicas, viene sistematizado a continuación.

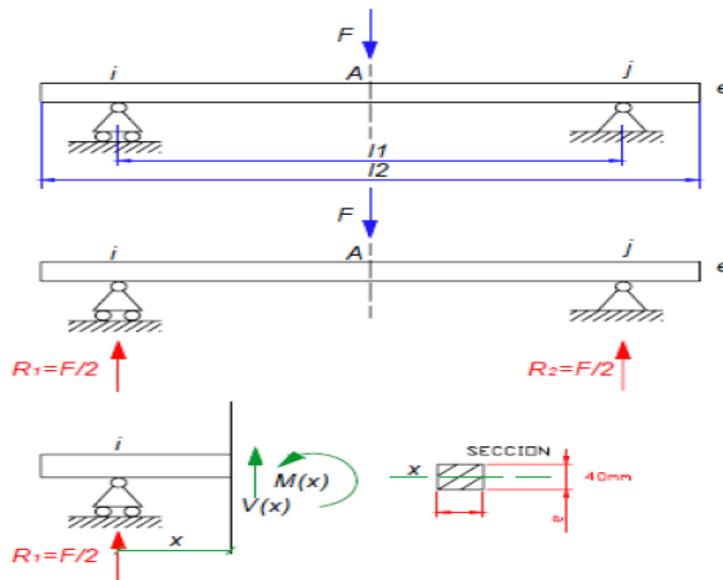


ILUSTRACIÓN 8: MODELO FÍSICO DE VIGA BIAPOYADA SOMETIDA A FLEXIÓN DEBIDO A UNA CARGA PUNTUAL

(FUENTE: DPTO. INGENIERIA EPSO)

Según la citada norma, la resistencia a flexión se calcula, una vez anotada la carga de rotura, mediante la fórmula:

$$PF = 0,00234 \times P \quad (3.1)$$

Dónde:

PF = resistencia a flexión (N/mm^2)

P = carga medida de rotura de la probeta (N)

Que no es más que la particularización a las dimensiones de nuestra probeta, de la fórmula correspondiente de la resistencia de materiales, para hallar la tensión de rotura a flexión o “resistencia a flexión” PF en N/mm^2 . Así pues tendremos que:

$$P_F = \frac{M_P}{W_S} \quad (3.2)$$

Dónde:

$$M_P = \frac{Pxl}{4} \quad (3.3)$$

M_p : es el momento generado por la carga P en la sección intermedia de la probeta, en Nxmm

$$W_s = \frac{bxh^2}{6} \quad (3.4)$$

Dónde:

W_s : es el momento resistente de dicha sección de la probeta, en mm^3

l : es la distancia entre apoyos (vano) de ensayo = 100mm

b : es el ancho de la sección de la probeta = 40mm*

h : es el canto total de la probeta = 40mm*

En la máquina se puede afinar en extremo los resultados obtenidos de resistencia a flexión en N/mm^2 para cada probeta, al poderse medir individual y directamente las dimensiones exactas de la sección de cada probeta para ser empleadas en el cálculo de su momento resistente W_s en mm^3 , evitando así las desviaciones producidas debidas a los errores dimensionales en la fabricación de las probetas.

Resistencia a la Flexión:

$$R_f = \frac{(Px)l}{(bxh^2)/6} = \frac{3}{2} \times \frac{Px}{bxh^2} = \frac{3}{2} \times \frac{Px100}{40 \times 40^2}$$

$$R_f = 0,00234 \times P$$

El espesor “e”, se mide en el punto de intersección de las diagonales en las caras opuestas de las probetas, como se muestra en la figura. Se medirá además del espesor “e”, los valores de “b1” y de “b2”, tal y como lo indican las flechas en el dibujo en mm y se pesa la probeta siendo “m” el peso en gamos.

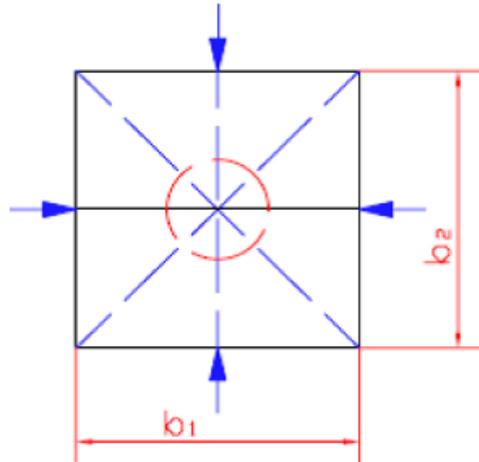


ILUSTRACIÓN 9: PUNTO DE MEDIDA PARA DETERMINACIÓN DEL ESPESOR

(FUENTE: DPTO. INGENIERÍA EPSO)

La densidad de cada probeta, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \quad (3.5)$$



FOTOGRAFÍA 27: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

(FUENTE: DPTO. INGENIERÍA EPSO)



FOTOGRAFÍA 28: DETERMINACIÓN DEL PESO

(FUENTE: DPTO. INGENIERÍA EPSO)

La densidad de un lote, será la media aritmética de las densidades de las 3 probetas que lo conforman.

3.5.3. ENSAYO DE COMPRESION.

Para el ensayo a compresión, utilizaremos las probetas rotas del ensayo a flexión, se dispondrán en la máquina universal de ensayos, los lados de las caras en contacto con el molde. . El ensayo se realiza según la Norma UNE-EN 13279-2 [66], mediante la fórmula:

$$R_c = F/A \quad (3.6)$$

Dónde:

F: Fuerza en Newton

A: superficie en mm², en este caso se corresponde con: A=40x40=1600 mm²

Por lo tanto:

$$R_c = F/1600 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

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.

En cualquier experimento, los resultados y conclusiones dependen de la forma en que los datos han sido recopilados.

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 Análisis y evaluación de los distintos comportamientos de las probetas sometidas a ensayo en sentido técnico no peyorativo, refiriéndose a variaciones que a menudo son inevitables (Box, Hunter & Stuart, 1.989) [67].

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 estadístico de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, se ha estructurado en dos partes; una primera parte, en la cual se ha definido el tamaño del experimento llevado a cabo en laboratorio; y una segunda parte en la cual se ha realizado la estadística descriptiva de los datos obtenidos.

3.6.1. TAMAÑO DEL EXPERIMENTO.

En primer lugar obtenemos el tamaño del experimento, definiéndose como el número total de observaciones, réplicas o repeticiones que debemos realizar.

En este apartado, el tamaño nos lo fija la norma UNE correspondiente con un número mínimo de 9 unidades en tres ensayos distintos. Como se indicaba anteriormente, se han realizado 27 ensayos, es decir se ha trabajado con 9 muestras para cada dosificación que corresponde a tres amasadas distintas, una por lote.

Para justificar que el tamaño de experimento escogido es el correcto nos apoyamos en el método de estimación de tamaño muestral expresado por Cochran y Cox (1957) [68], 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:

$$r \geq 2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\delta} \right)^2 \cdot (t_1 + t_2) \quad (3.7)$$

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.

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.

$$r \geq \frac{4 \cdot \sigma^2}{\delta^2} \quad (3.8)$$

Siendo:

r: número de repeticiones de la muestra.

σ : desviación típica o estándar de los datos de la variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.9)$$

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

Como indica el parámetro r, la elección del tamaño muestral escogido para el desarrollo del estudio ha sido correcta.

La segunda parte, 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.

Se ha utilizado el software informático empleado SPSS 17.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN



4.1. ENSAYOS DE LOTES PARA LA OBTENCIÓN DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

A continuación se van a desarrollar los resultados obtenidos atendiendo a los porcentajes que se han utilizado en la mezcla para la obtención del mortero base de referencia, para ello se han contemplado 3 tipos de dosificaciones:

- mezcla de 40 % Agua y 60 % de yeso, relación Y/A= 1,5.
- mezcla de 35 % Agua y 65 % de yeso, relación Y/A= 1,86.
- mezcla de 30 % Agua y 70 % de yeso, relación Y/A= 2,33.

Como se ha mencionado en el Capítulo III: Materiales y Métodos, en el apartado 3.1: Metodología y 3.4: Métodos; para obtener unos resultados con los que posteriormente poder comparar, necesitamos una referencia; es por ello, que hemos preparado unas probetas de referencia y hemos realizado los ensayos de dureza, resistencia a flexión y resistencia a compresión a dichas probetas; mostrándose los resultados sobre esas probetas de referencia a continuación.

4.1.1.1. DENSIDAD LOTE N° 1 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 1,5).

4.1.1.1.1. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOTE N° 1 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,5).

El Lote n° 1, con una mezcla de 40 % Agua y 60 % de yeso, se han obtenido unos resultados, los cuales se muestran en la Tabla n° 25:

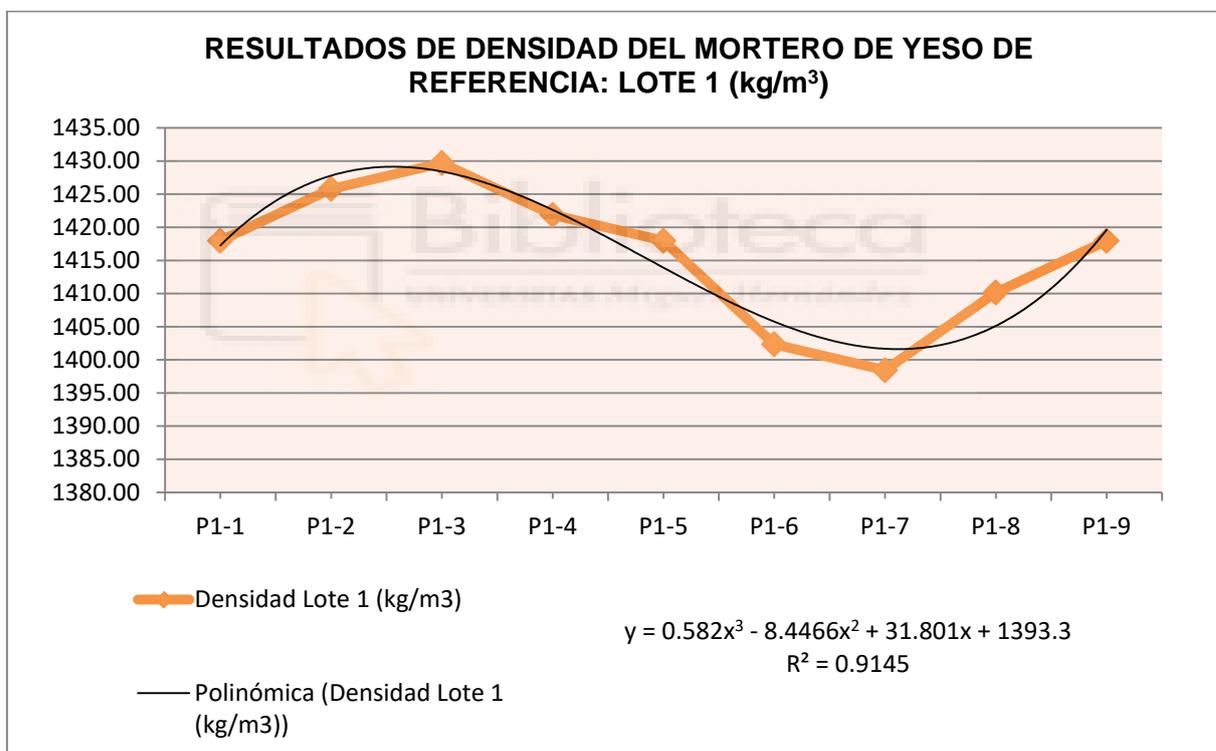
RESULTADOS DE DENSIDAD DEL MORTERO DE YESO BASE LOTE 1						
Lote	% Yeso	% Agua	Probeta	Volumen (m ³)	Masa (kg)	Densidad Lote nº 1 (kg/m ³)
1	60	40	P1-1	0,000256	0.3630	1417.9688
			P1-2	0,000256	0.3650	1425.7813
			P1-3	0,000256	0.3660	1429.6875
			P1-4	0,000256	0.3640	1421.8750
			P1-5	0,000256	0.3630	1417.9688
			P1-6	0,000256	0.3590	1402.3438
			P1-7	0,000256	0.3580	1398.4375
			P1-8	0,000256	0.3610	1410.1563
			P1-9	0,000256	0.3630	1417.9688
Promedio					0.3624	1415.7986
Desviación Estandar +/-					0.0027	10.3555
Coefficiente de variación					0.0073	0.0073
Covarianza						0.0275
Máximo						1429.6875
Mínimo						1398.4375

TABLA 25: RESULTADOS DE DENSIDAD DE LAS PROBETAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MORTERO BASE DE REFERENCIA LOTE 1.

4.1.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE DENSIDAD LOTE N° 1 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,5).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 25, para la obtención del mortero base de referencia, sobre el cual posteriormente realizar los ensayos con los aditivos; nos muestran unos resultados de densidad de las 9 probetas elaboradas con esta proporción, para una relación Yeso/Agua de 1,5, de un valor promedio de 1415.79 kg/m³; con un valor máximo de 1429.68 kg/m³ y un valor mínimo de 1398.43 kg/m³.

Observamos la evolución de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,90.



GRÁFICA 5: DENSIDAD DE LOTE 1 DE MORTERO DE REFERENCIA BASE (Y/A= 1,5).

4.1.1.2. DENSIDAD LOTE N° 2 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 1,86).

A continuación se exponen los resultados de densidad del Lote nº 2 del mortero de yeso de referencia, para una relación Y/A= 1,86, así como la discusión de dichos resultados.

4.1.2.1. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOTE N° 2 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,86).

Para el Lote n° 2, compuesto por con una mezcla de 35 % Agua y 65 % de yeso, se han obtenido unos resultados, los cuales se muestran en la Tabla n° 26:

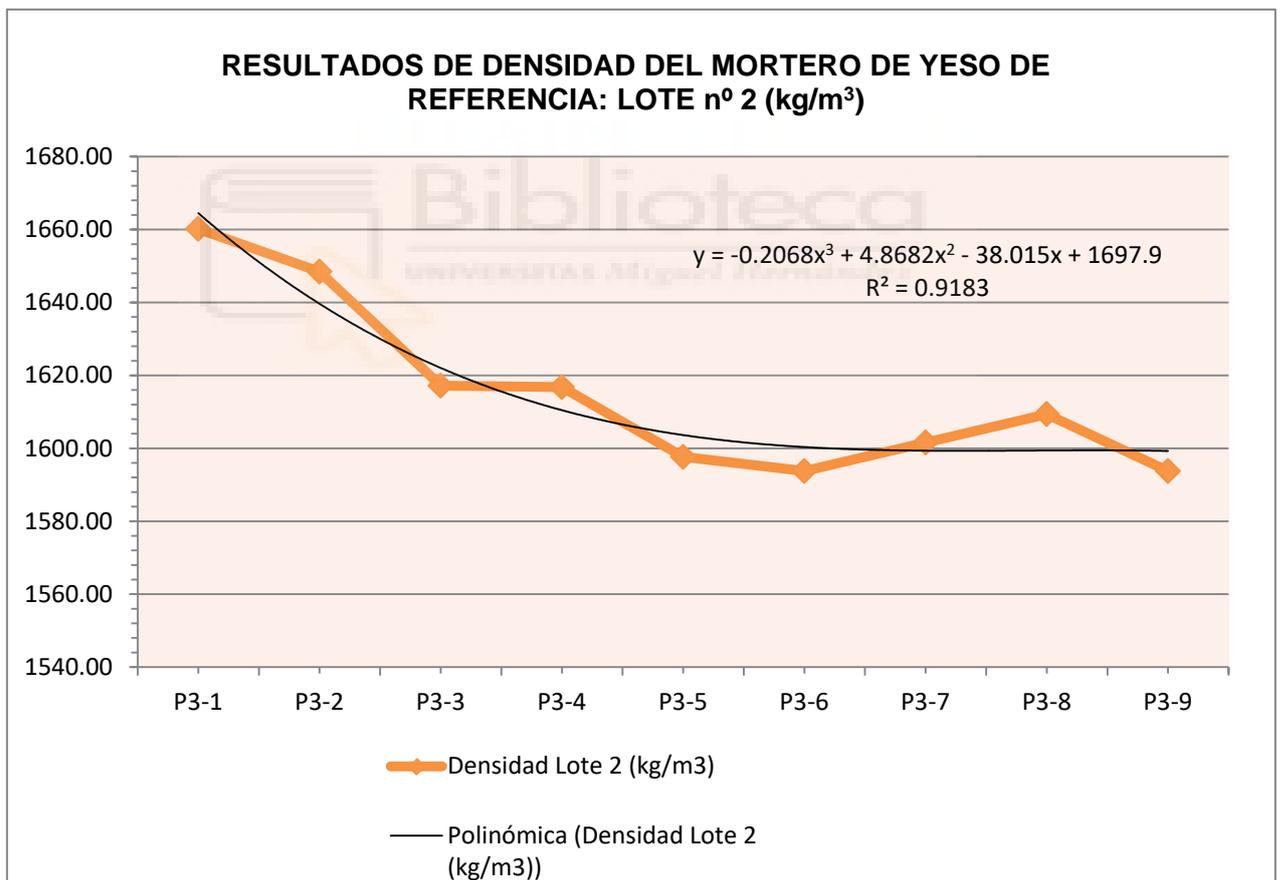
RESULTADOS DE DENSIDAD DEL MORTERO DE YESO BASE LOTE 2						
Lote	% Yeso	% Agua	Probeta	Volumen (m3)	Masa (kg)	Densidad Lote n° 2 (kg/m3)
2	65	35	P2-1	0,000256	0.4250	1660.1563
			P2-2	0,000256	0.4220	1648.4375
			P2-3	0,000256	0.4140	1617.1875
			P2-4	0,000256	0.4139	1616.7969
			P2-5	0,000256	0.4090	1597.6563
			P2-6	0,000256	0.4080	1593.7500
			P2-7	0,000256	0.4100	1601.5625
			P2-8	0,000256	0.4120	1609.3750
			P2-9	0,000256	0.4080	1593.7500
Promedio					0.4135	1615.4080
Desviación Estandar +/-					0.0061	23.9265
Coefficiente de variación					0.0148	0.0148
Covarianza						0.1466
Tamaño de la muestra					9.0000	9.0000
Máximo						1660,1563
Mínimo						1.593,7500

TABLA 26: RESULTADOS DE DENSIDAD DE LAS PROBETAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MORTERO BASE DE REFERENCIA LOTE 2 (Y/A= 1,86).

4.1.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE DENSIDAD LOTE N° 2 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 1,86).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 26, para la obtención del mortero base de referencia, sobre el cual posteriormente realizar los ensayos con los aditivos, nos muestran unos resultados de densidad de las 9 probetas elaboradas con esta proporción, para una relación Yeso/Agua de 1,86, de un valor promedio de 1.614,58 kg/m³; con un valor máximo de 1.660,15 kg/m³ y un valor mínimo de 1.593,75 kg/m³.

Observamos la evolución de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,90.



GRÁFICA 6: DENSIDAD DE LOTE 2 DE MORTERO DE REFERENCIA BASE (Y/A= 1,86).

4.1.3. DENSIDAD LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 2,33).

4.1.3.1. RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA. (Y/A= 2,33).

Para el Lote n° 3, compuesto por con una mezcla de 30 % Agua y 70 % de yeso, se han obtenido unos resultados los cuales se muestran en la Tabla n° 27:

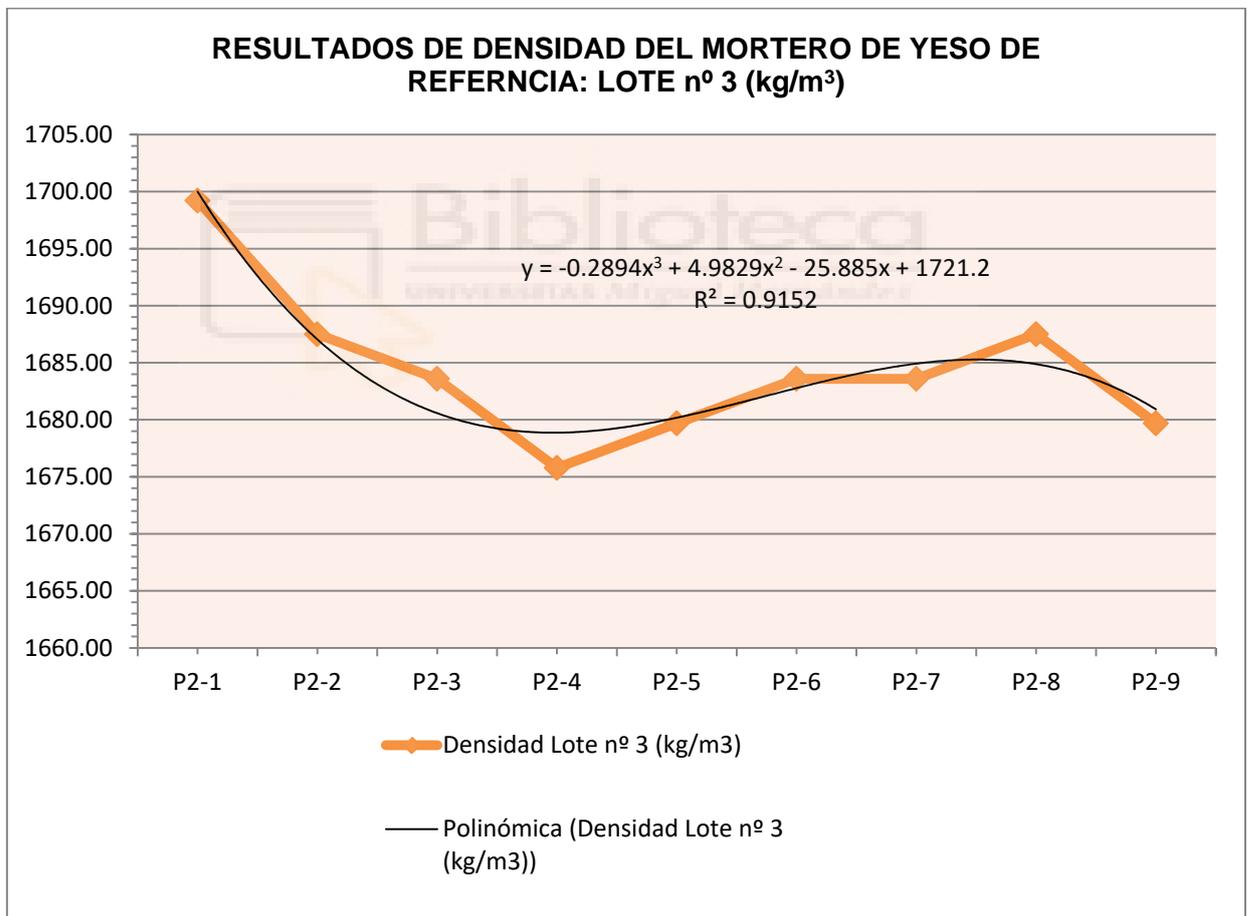
RESULTADOS DE DENSIDAD DEL MORTERO DE YESO BASE LOTE 3						
Lote	% Yeso	% Agua	Probeta	Volumen (m3)	Masa (kg)	Densidad (kg/m3)
3	70	30	P3-1	0.000256	0.4350	1699.2188
			P3-2	0.000256	0.4320	1687.5000
			P3-3	0.000256	0.4310	1683.5938
			P3-4	0.000256	0.4290	1675.7813
			P3-5	0.000256	0.4300	1679.6875
			P3-6	0.000256	0.4310	1683.5938
			P3-7	0.000256	0.4310	1683.5938
			P3-8	0.000256	0.4320	1687.5000
			P3-9	0.000256	0.4300	1679.6875
Promedio					0.4312	1684.4618
Desviación Estandar +/-					0.0017	6.7029
Coefficiente de variación					0.0040	0.0040
Covarianza						0.0115
Máximo						1699,2188
Mínimo						1675.7813

TABLA 27: RESULTADOS DE DENSIDAD DE LAS PROBETAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MORTERO BASE DE REFERENCIA LOTE 3.

4.1.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE DENSIDAD LOTE N° 3 DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (Y/A= 2,33).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 27, para la obtención del mortero base de referencia, sobre el cual posteriormente realizar los ensayos con los aditivos; nos muestran unos resultados de densidad de las 9 probetas elaboradas con esta proporción, para una relación Yeso/Agua de 2,33, de un valor promedio de 1684.4618 kg/m³; con un valor máximo de 1699,2188 kg/m³ y un valor mínimo de 1675.7813 kg/m³.

Observamos la evolución de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,90.



GRÁFICA 7: DENSIDAD DE LOTE 3 DE MORTERO DE REFERENCIA BASE (Y/A= 2,33).

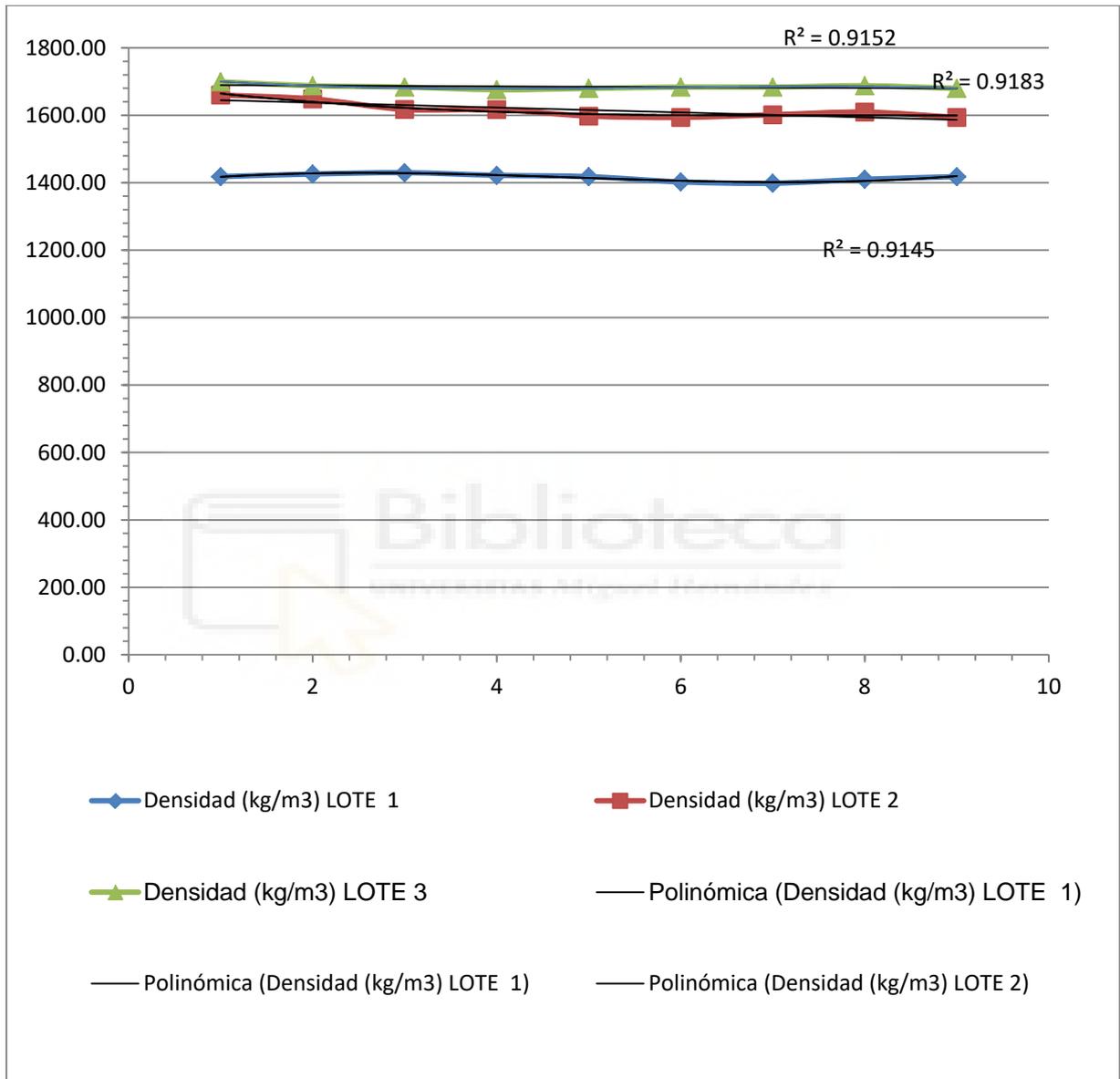
4.1.4. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOS DISTINTOS LOTES PARA LA OBTENCION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Como consecuencia de dichos resultados, se aprecia que conforme aumentamos la proporción de yeso y disminuimos la proporción de agua, el mortero de yeso aumenta su densidad; aumentando su tiempo de fraguado, por lo que la trabajabilidad del mismo disminuye considerablemente; es por ello, que se seleccionó el de una densidad media y su mejor trabajabilidad, que resultó ser, el lote nº 2; dado que el de mayor densidad (lote nº 3), su fraguado era muy rápido por lo que la trabajabilidad es peor. Por lo tanto las proporciones para el mortero de yeso de referencia, por el cual nos sirve de base para realizar los siguientes lotes de muestras de mortero aditivado es 65 % de yeso y 35 % de agua, como viene reflejado en la siguiente Tabla nº 28:

COMPARATIVO DE RESULTADOS DE DENSIDAD DE PROBETAS PARA LA OBTENCION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA			
PROBETA	Densidad (kg/m³) LOTE 1	Densidad (kg/m³) LOTE 2	Densidad (kg/m³) LOTE 3
P1	1417.9688	1660.1563	1699.2188
P2	1425.7813	1648.4375	1687.5000
P3	1429.6875	1617.1875	1683.5938
P4	1421.8750	1616.7969	1675.7813
P5	1417.9688	1597.6563	1679.6875
P6	1402.3438	1593.7500	1683.5938
P7	1398.4375	1601.5625	1683.5938
P8	1410.1563	1609.3750	1687.5000
P9	1417.9688	1593.7500	1679.6875

TABLA 28: COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE DENSIDAD DE LOS 3 LOTES DE PROBETAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MORTERO BASE DE REFERENCIA.

En la gráfica nº 8, se muestra la comparación de densidades de las distintas probetas, de los lotes con distinta relación Yeso-Agua, que se han obtenido:



GRÁFICA 8: COMPARATIVO DE LOS 3 LOTES DE PROBETAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MORTERO BASE DE REFERENCIA, PARA DISTINTAS RELACIONES YESO-AGUA.

4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Se ha procedido a someter al lote de mortero de yeso de referencia seleccionado, en nuestro caso, el Lote nº 2, con unas proporciones de 65% de Yeso y 35 % de Agua, relación Yeso-Agua de 1,86; a los ensayos de Dureza Shore C en primer lugar, en segundo lugar el ensayo de resistencia a flexión y para finalizar el ensayo de resistencia a compresión.

4.2.1. DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

El ensayo de Dureza Shore C, al que se ha sometido las 9 probetas, se han realizado tomando 5 puntos de las caras de cada probeta, con una separación de 20 milímetros.

4.2.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Como se ha mencionado en esta Tesis, los resultados se comparan con una muestra de mortero de yeso sin aditivo, los resultados de este mortero de referencia, que hemos fijado como Lote nº 2, con unas proporciones de 65% de Yeso y 35 % de Agua, relación Yeso-Agua de 1,86. Los resultados de la Dureza Shore C del mortero de referencia, se detallan en la Tabla nº 29:

RESULTADOS DUREZA SHORE C DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA LOTE Nº 2 (SIN ADITIVOS)									
YESO SIN ADITIVO	Muestra								
Dureza Shore C Mortero de Yeso	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9
Pto 1	85	90	90	88	88	90	85	90	86
Pto 2	89	89	85	89	89	85	86	85	86

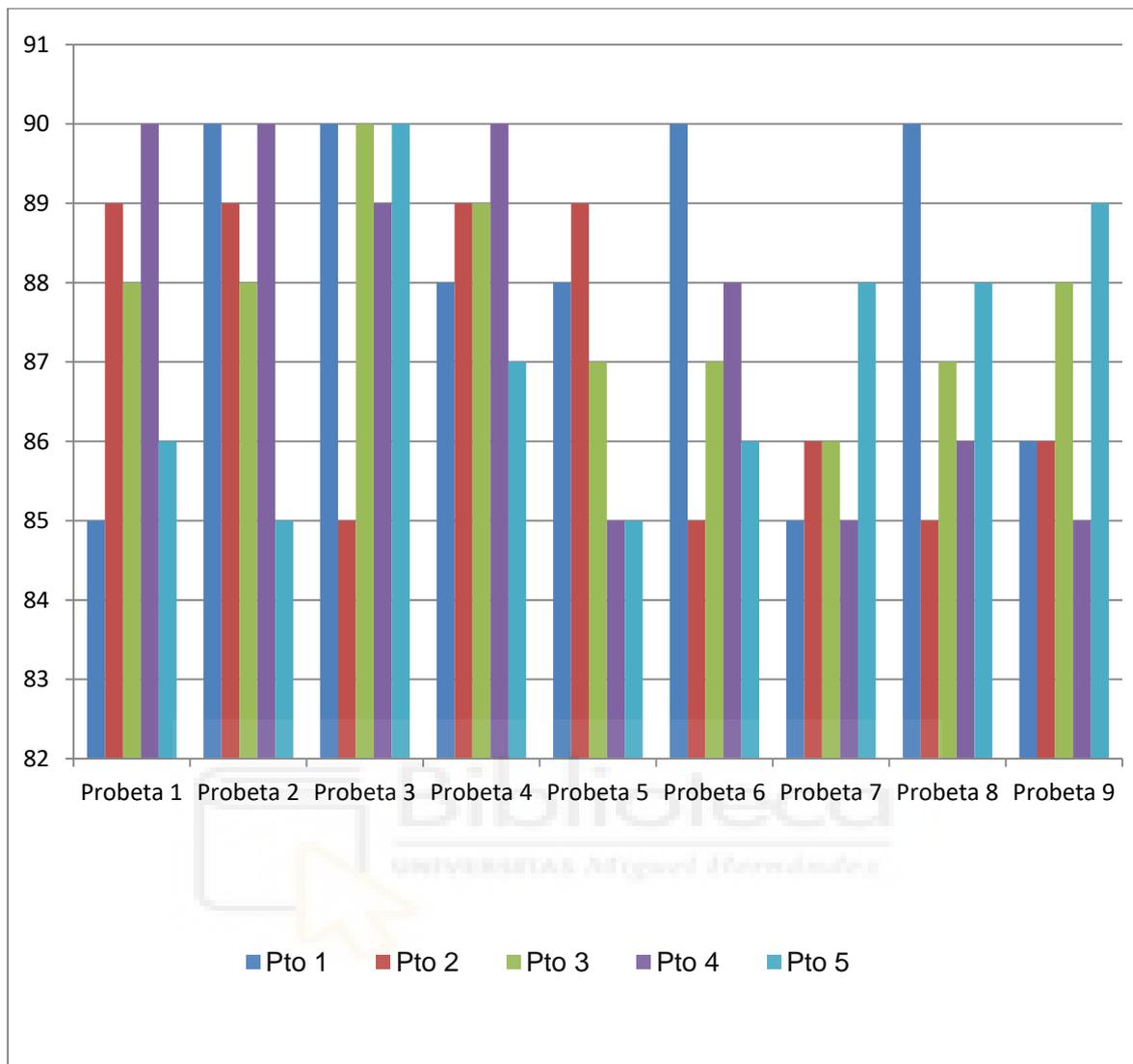
Pto 3	88	88	90	89	87	87	86	87	88
Pto 4	90	90	89	90	85	88	85	86	85
Pto 5	86	85	90	87	85	86	88	88	89
Tamaño de la muestra	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Promedio			87.4889						87.4889
Desviación Estandar +/-	2.0736	2.0736	2.1679	1.1402	1.7889	1.9235	1.2247	1.9235	1.6432
Coefficiente de variación	0.0237	0.0237	0.0248	0.0130	0.0204	0.0220	0.0140	0.0220	0.0188

TABLA 29: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

4.2.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA SHORE C DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 29, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas del mortero de yeso que se ha fijado como referencia, el lote nº 2, con una relación de yeso/agua de 1,86, en la proporción de 65 % de yeso y 35 % de agua. Es el que utilizaremos como base de referencia, para utilizar de comparativo con los ensayos de las probetas con aditivos. Nos muestran para los 5 puntos tomados de cada cara del prisma de las probetas, un promedio de Dureza Shore C de 87,50. Este valor nos muestra la referencia de Dureza Shore C, para saber si con los aditivos que empleamos obtenemos valores superiores, lo que implicará que habremos mejorado la dureza de este material.

En la gráfica nº 9, se ha representado los valores del ensayo de Dureza Shore C, se aprecia que la dureza oscila en torno a valores de 88, siendo su promedio de 87, 48.



GRÁFICA 9: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Como se observa en la gráfica, se producen desviaciones de resultados en los resultados de la dureza Shore C del mortero de yeso de referencia, oscilando los valores entre el intervalo de 85 y 90 de dureza Shore C.

4.2.2 RESISTENCIA A FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

4.2.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Los resultados del ensayo de resistencia a flexión, al cual se han sometido las probetas del Lote nº 2 (relación Y/A=1,86) de la mezcla de mortero de yeso de referencia se detallan a continuación en la Tabla nº 30:

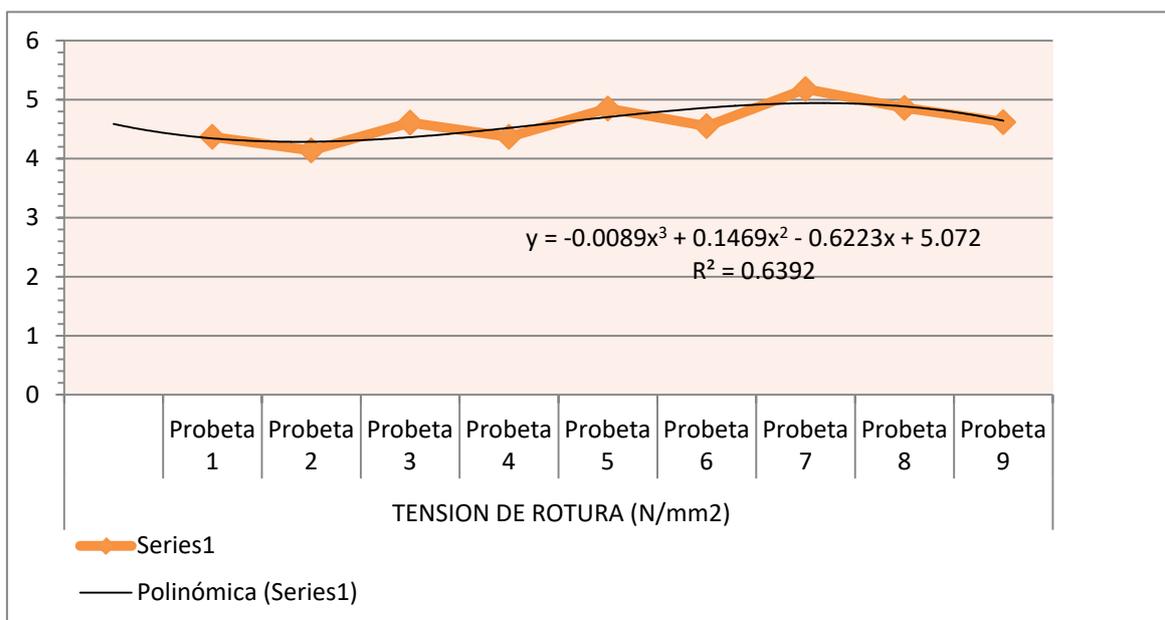
RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXION DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (LOTE Nº 2, Y/A=1,86)										
TENSION DE ROTURA (N/mm ²)										
Probetas Lote nº 2 mortero de yeso de referencia	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	
	4.37	4.14	4.61	4.37	4.85	4.55	5.18	4.86	4.62	
Valor Medio										4.62
Desviación Estandar +/-										0.3131
Coefficiente de variación										0.0678
Máximo										5.18
Mínimo										4.14

TABLA 30: RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXIÓN PARA MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

4.2.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 30, del ensayo de resistencia a flexión, al que ha sido sometido las probetas del mortero de yeso que se ha fijado como referencia, el lote nº 2, con una relación de yeso/agua de 1,86, en la proporción de 65 % de yeso y 35 % de agua. Es el que utilizaremos como base de referencia, para utilizar de comparativo con los ensayos de las probetas con aditivos. Nos muestran para las 9 probetas sometidas a ensayo, un promedio de tensión de rotura 4,62 N/mm². Este valor nos muestra la referencia de Resistencia a Flexión, para saber si con los aditivos que empleamos obtenemos valores superiores, inferiores o similares; si obtenemos valores superiores con el empleo de los aditivos, que habremos mejorado la resistencia a flexión de este material.

En la gráfica nº 10, se ha representado los valores del ensayo de resistencia a flexión del mortero de yeso de referencia, se aprecia que la tensión de rotura oscila en torno al intervalo de valores de 4,10 N/mm² a 5,20 N/mm², siendo su promedio de 4,62 N/mm².



GRÁFICA 10: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Observamos la evolución de resultados mediante su curva polinómica de tercer grado, así como su regresión, siendo inferior al 0,85; esto significa que en los resultados se ha producido algún pico máximo y mínimo de los valores en relación al valor promedio de los mismos resultados.

4.2.3. RESISTENCIA A COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

4.2.3.1 RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión, al cual se han sometido las probetas del Lote nº 2 (relación Y/A=1,86) de la mezcla de mortero de yeso de referencia se detallan a continuación en la Tabla nº 31:

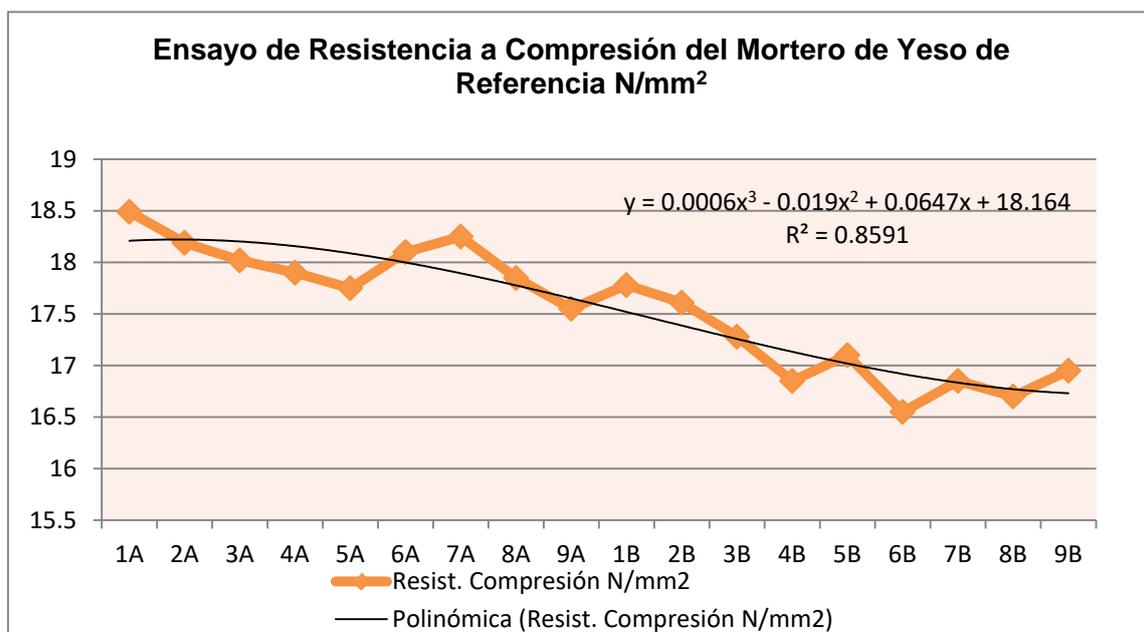
RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA (LOTE Nº 2, Y/A=1,86)									
TENSION DE ROTURA (N/mm ²)									
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9
A	18.49	18.19	18.02	17.9	17.75	18.1	18.25	17.85	17.55
B	17.78	17.61	17.28	16.85	17.1	16.55	16.85	16.7	16.95
Valor Medio									17.54
Desviación Estandar +/-									0.2841
Coficiente de variación									0.0162
Máximo									18.49
Mínimo									16.25
Covarianza									0.0589

TABLA 31: RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN PARA MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

4.2.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPRESION DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 31, del ensayo de resistencia a compresión, al que ha sido sometido las probetas del mortero de yeso que se ha fijado como referencia, el lote nº 2, con una relación de yeso/agua de 1,86, en la proporción de 65 % de yeso y 35 % de agua. Es el que utilizaremos como base de referencia, para utilizar de comparativo con los ensayos de las probetas con aditivos. Nos muestran para las 18 probetas sometidas a ensayo, un promedio de tensión de rotura 17,54 N/mm². Este valor nos muestra la referencia de Resistencia a Compresión, para saber si con los aditivos que empleamos obtenemos valores superiores, inferiores o similares; si obtenemos valores superiores con el empleo de los aditivos, que habremos mejorado la resistencia a compresión de este material.

En la gráfica nº 11, se ha representado los valores del ensayo de resistencia a flexión del mortero de yeso de referencia, se aprecia que la tensión de rotura oscila en torno al intervalo de valores de 16,25 N/mm² a 18,49 N/mm², siendo su promedio de 17,54 N/mm².



GRÁFICA 11: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO DE YESO DE REFERENCIA.

Observamos la evolución de resultados mediante su curva polinómica de tercer grado, así como su regresión, situándose por encima 0,85; esto significa que los resultados que se ha producido son representativos.

4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Una vez obtenida las referencias del mortero de yeso para los ensayos de dureza Shore C, resistencia a flexión y resistencia a compresión; pasamos a la segunda parte. En esta parte de la Tesis consiste en la adicción de grafeno en el mortero de yeso, en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %.

4.3.1. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,05 %.

4.3.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO (0,05 %).

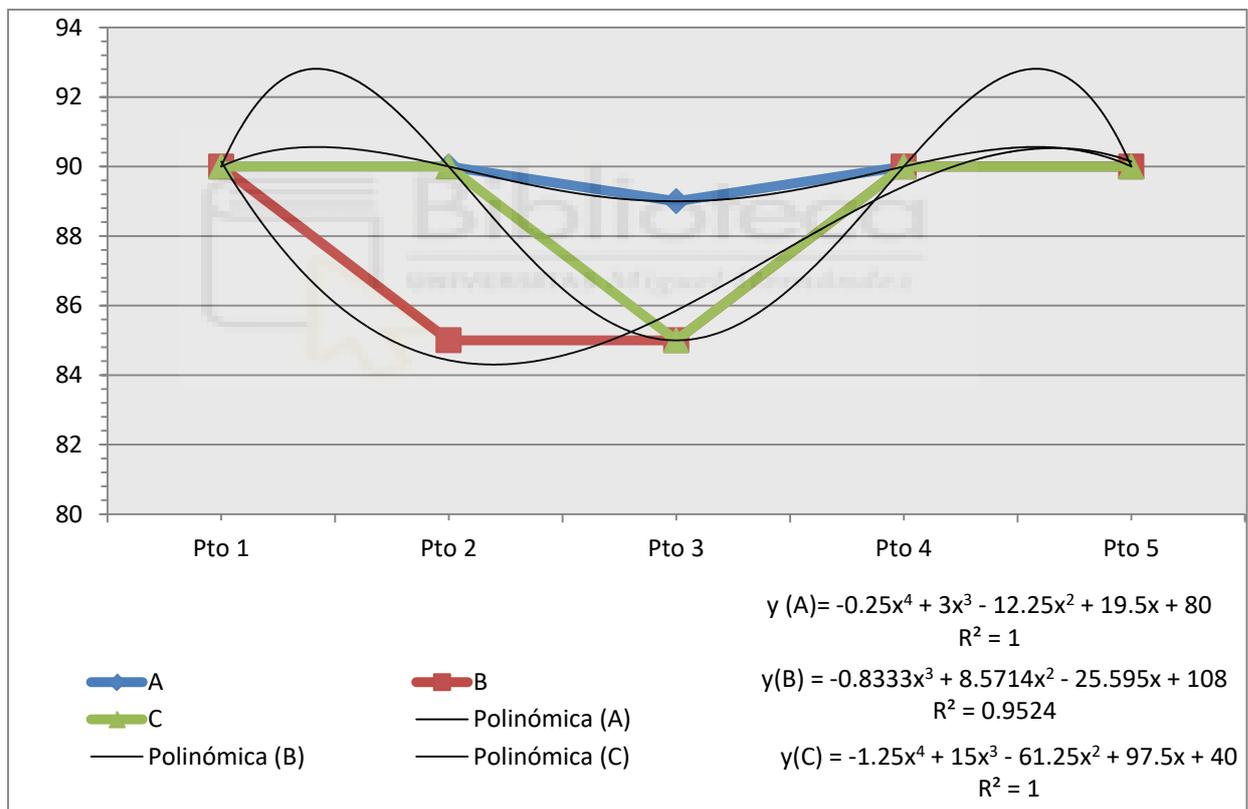
Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de polvo de grafeno, para una proporción del 0,05% de este aditivo, se muestran en la Tabla nº 32:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + GRAFENO (0.05%)			
YESO + ADITIVO 1 (0.05%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	90	90	90
Pto 2	90	85	90
Pto 3	89	85	85
Pto 4	90	90	90
Pto 5	90	90	90
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			88.93

Desviación Estandar +/-	1.2944	2.7386	2.2361
Coefficiente de variación	0.0146	0.0308	0.0251
Máximo			90
Mínimo			85

TABLA 32: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,05%

En la gráfica nº 12, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de polvo de grafeno al 0,05 %, se aprecia que la dureza oscila en torno a valores de 90, siendo su promedio de 89:



GRÁFICA 12: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,05%.

Observamos la evolución de resultados mediante su curva polinómica de tercer grado, así como su regresión, situándose por encima 0,85; esto significa que los resultados que se ha producido son representativos.

4.3.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,05 %).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 32, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de polvo de grafeno al 0,05 %, nos muestran unos resultados con un valor promedio de 89 de dureza Shore C, por lo que se aprecia un pequeño aumento de dureza con respecto al mortero de yeso de referencia que tenía un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C.

4.3.2. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,08 %.

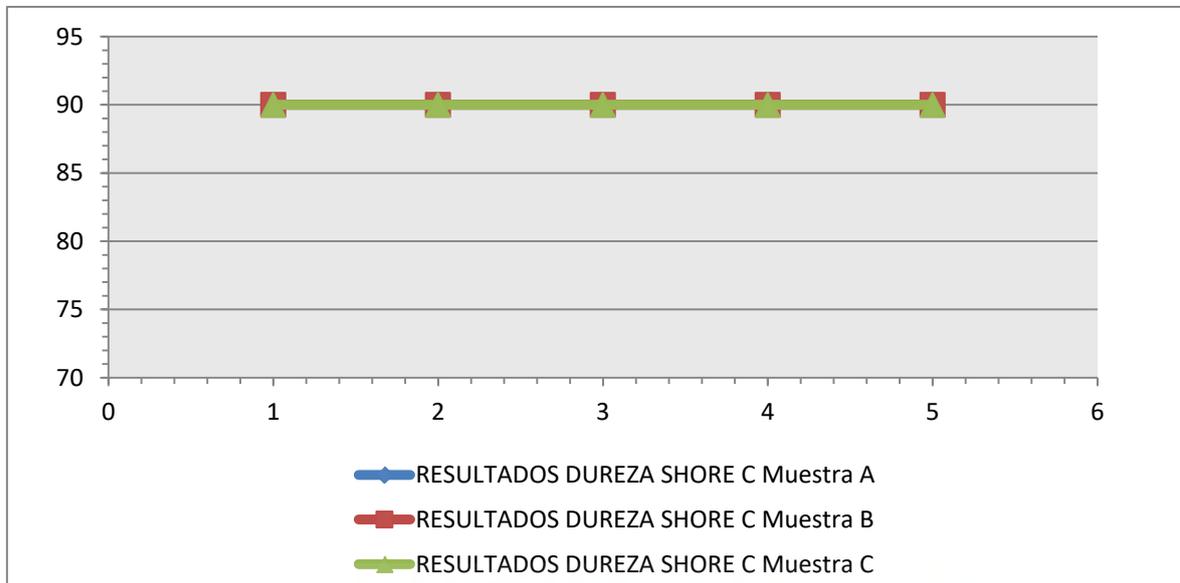
4.3.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE GRAFENO (0,08 %).

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de polvo de grafeno, para una proporción del 0,08% de este aditivo, se muestran en la Tabla nº 33:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + GRAFENO (0.08%)			
YESO + ADITIVO 1 (0.08%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	90	90	90
Pto 2	90	90	90
Pto 3	90	90	90
Pto 4	90	90	90
Pto 5	90	90	90
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			90,00
Desviación Estandar +/-	0,0000	0,0000	0,0000
Coeficiente de variación	0,0000	0,0000	0,0000
Máximo			90
Mínimo			90

TABLA 33: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,08%

En la gráfica nº 13, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de polvo de grafeno al 0,08 %:



GRÁFICA 13: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,08%.

Observamos la evolución de resultados mediante la recta que se forma; esto significa que la tendencia de dichos valores es constante.

4.3.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,08 %).

Los resultados que se muestran en la tabla nº 4.9, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de polvo de grafeno al 0,08 % , nos muestran unos resultados con un valor promedio de 90 de dureza Shore C, por lo que se aprecia un aumento de dureza con respecto al mortero de yeso de referencia que tenía un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C, y un pequeño aumento de dureza con respecto a la mezcla de mortero de yeso de referencia y aditivo de polvo de grafeno en proporción del 0,05 %, que tenía un valor promedio de 89 de dureza Shore C.

Por otro parte, se aprecia que el incremento del porcentaje de grafeno en la mezcla, va haciendo aumentar la dureza, con respecto al mortero de referencia y a una menor proporción de grafeno.

4.3.3. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO 0,10 %.

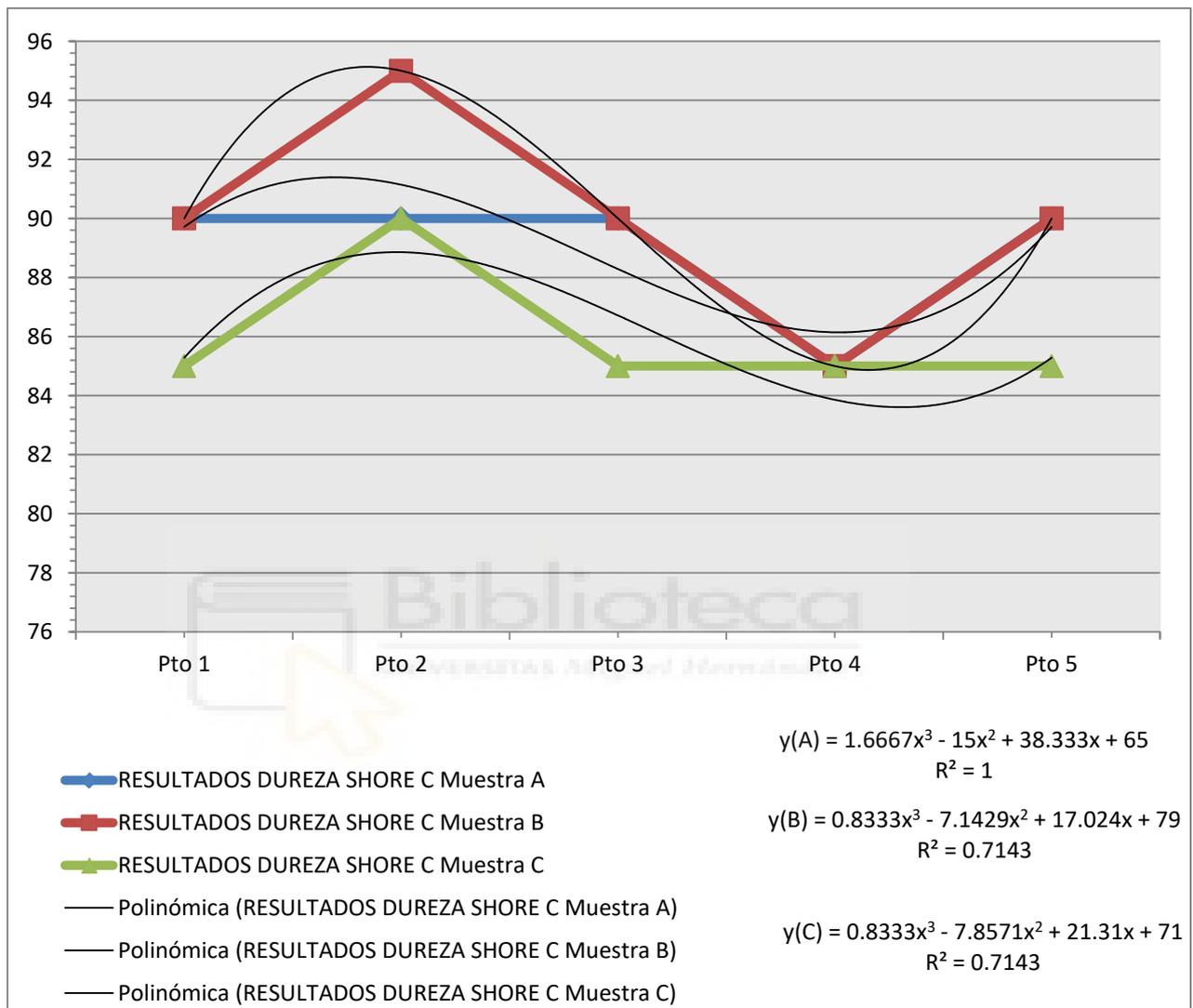
4.3.3.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE GRAFENO (0,10 %).

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de polvo de grafeno, para una proporción del 0,10 % de este aditivo, se muestran en la tabla nº 34:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + GRAFENO (0.10%)			
YESO + ADITIVO 1 (0.10%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	90	90	85
Pto 2	90	95	90
Pto 3	90	90	85
Pto 4	85	85	85
Pto 5	90	90	85
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			88,33
Desviación Estandar +/-	2,2361	3,5355	2,2361
Coeficiente de variación	0,0253	0,0400	0,0253
Máximo			95
Mínimo			85

TABLA 34: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,10%

En la gráfica nº 14, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de polvo de grafeno al 0,10 %:



GRÁFICA 14: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO AL 0,10%.

4.3.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE GRAFENO (0,10 %).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 34, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de polvo de grafeno al 0,10 % , nos muestran unos resultados con un valor promedio de 88,30 de dureza Shore C, por lo que se aprecia una disminución de dureza con respecto al mortero de yeso de referencia que tenía un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C, y con respecto a la mezcla de mortero de yeso de referencia y aditivo de polvo de grafeno en las proporciones de 0,05 % y 0,08 % que tenían un valor promedio de 89 y 90 respectivamente de dureza Shore C.

4.3.4. COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Ha continuación, se ha procedido a realizar un comparativo de los valores de resultados de los ensayos de Dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de grafeno en las 3 proporciones estudiadas, y el mortero de yeso sin el aditivo.

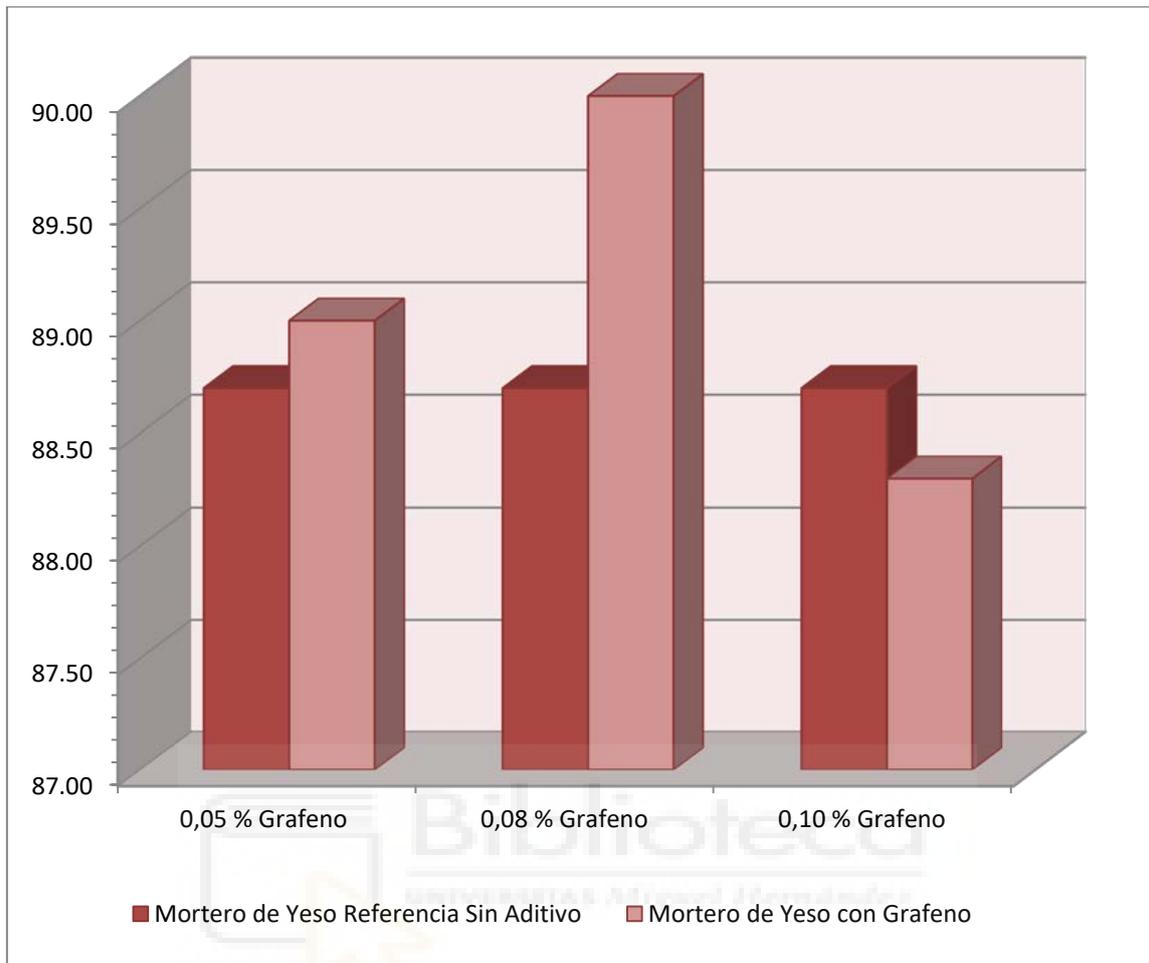
4.3.4.1. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Realizando un comparativo de los valores obtenidos en los ensayos de dureza Shore C, para el mortero de referencia con el aditivo de grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 % de polvo de grafeno, obtenemos los resultados que se muestran en la tabla nº 35:

COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO							
Localización del ensayo	Muestra	Pto 1	Pto 2	Pto 3	Pto 4	Pto 5	Valor Promedio
Yeso sin aditivo	A	85	90	90	90	85	88,7 SHORE C
	B	90	90	90	90	85	
	C	90	85	90	90	90	
Yeso + Grafeno (0.05%)	A	90	90	90	90	90	89 SHORE C
	B	90	85	85	90	90	
	C	90	90	85	90	90	
Yeso + Grafeno (0.08%)	A	90	90	90	90	90	90 SHORE C
	B	90	95	90	90	90	
	C	90	90	90	90	90	
Yeso + Grafeno (0.10%)	A	90	90	90	85	90	88,3 SHORE C
	B	90	95	90	85	90	
	C	85	90	85	85	85	

TABLA 35: RESULTADOS DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON POLVO DE GRAFENO EN DISTINTAS PROPORCIONES.

En la gráfica nº 15, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de polvo de grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %.



GRÁFICA 15: RESULTADOS DE DUREZA SHORE C PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE POLVO DE GRAFENO.

4.3.4.2. DISCUSION DE COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE POLVO DE GRAFENO.

Como se desprende de los resultados obtenidos, con el aditivo de grafeno, se produce un aumento de dureza Shore C, en comparativa con el mortero de yeso de base de referencia sin aditivar, obteniéndose los mejores resultados para una proporción del 0,08 % de aditivo.

4.3.5. ENSAYOS DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.

Tras los ensayos de dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso y grafeno, se ha procedido a realizar los ensayos de resistencia a flexión de la mezcla de mortero de yeso y grafeno.

4.3.5.1. RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXION, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Los resultados del ensayo de resistencia a flexión, al cual se han sometido los lotes de probetas de la mezcla de mortero de yeso de referencia con las proporciones de grafeno de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %; se exponen a continuación.

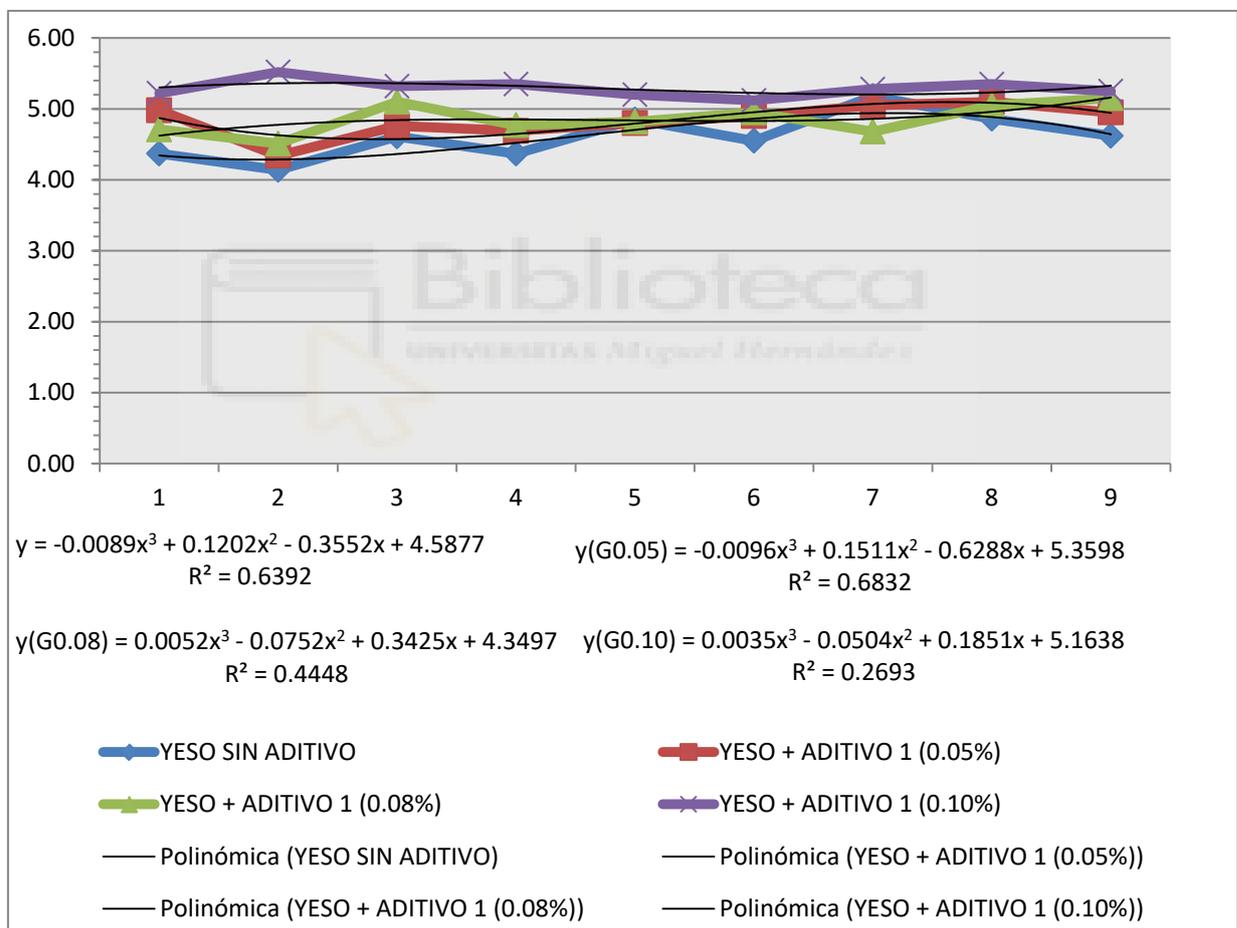
Los resultados del ensayo de resistencia a flexión para el mortero de yeso aditivado con polvo de grafeno (aditivo 1) se muestran a continuación en la tabla nº 36:

RESULTADOS ENSAYOS DE FLEXION DE MORTERO BASE Y GRAFENO				
PROBETAS	YESO SIN ADITIVO	YESO + GRAFENO (0.05%)	YESO + GRAFENO (0.08%)	YESO + GRAFENO (0.10%)
	TENSION DE ROTURA (N/mm ²)			
1	4.37	4.98	4.71	5.22
2	4.14	4.34	4.51	5.52
3	4.61	4.76	5.10	5.32
4	4.37	4.69	4.77	5.35
5	4.85	4.80	4.82	5.20
6	4.55	4.90	4.95	5.12
7	5.18	5.05	4.68	5.28
8	4.86	5.10	5.05	5.35
9	4.62	4.95	5.15	5.25
Desviación Estandar +/-	0.3131	0.3252	0.3001	0.1528
Coefficiente de variación	0.0678	0.0672	0.0617	0.0289

Máximo	5.1800	5.1000	5.1500	5.5200
Mínimo	4.1400	4.3400	4.5100	5.1200
Error		0.2564	0.0567	0.2539
Covarianza		0.0512	0.0194	-0.0135

TABLA 36: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON POLVO DE GRAFENO (ADITIVO 1).

En la gráfica nº 16, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de flexión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %.

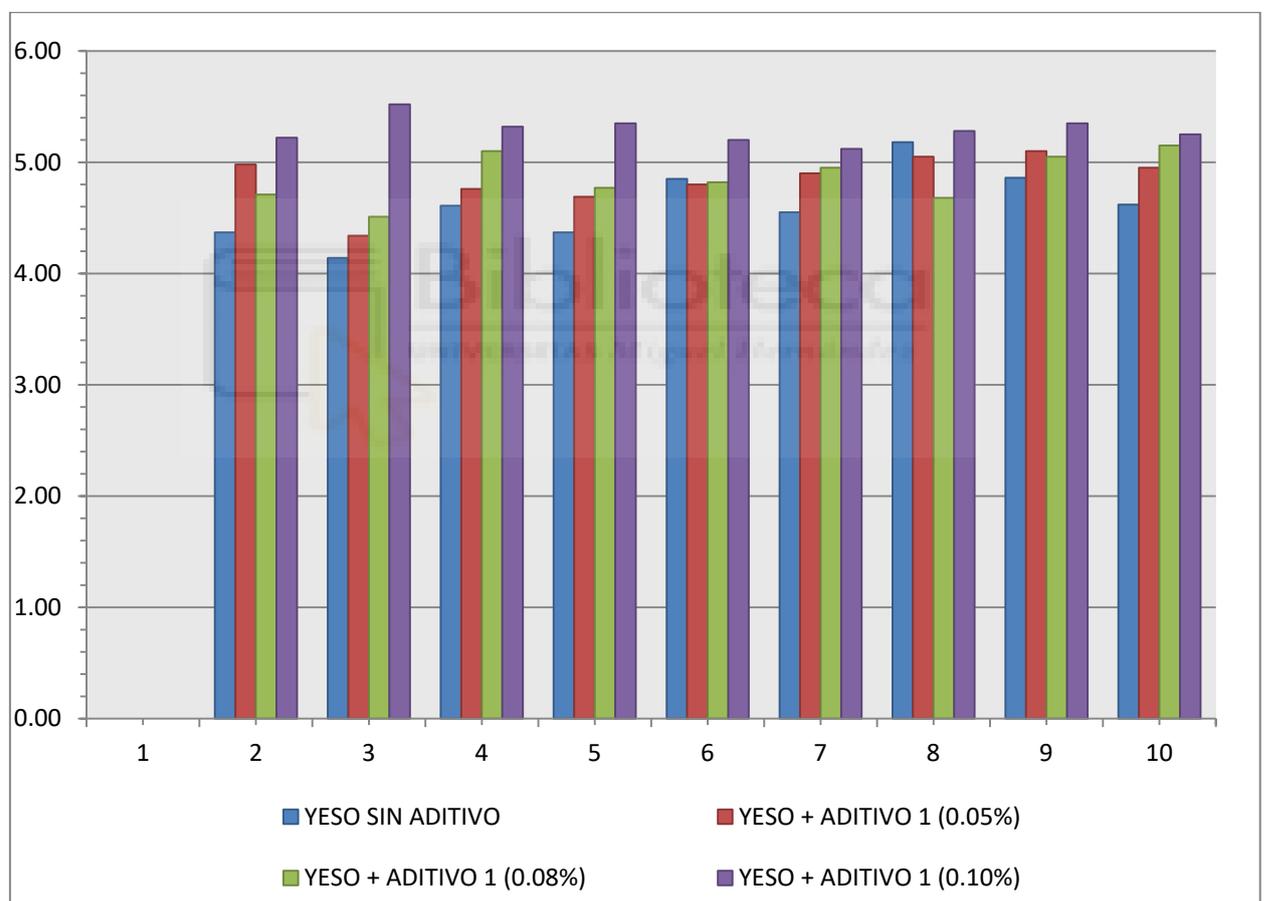


GRÁFICA 16: GRÁFICA DE RESULTADOS DE ENSAYO A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.3.5.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.

Analizando los resultados, observamos que claramente al añadir polvo de grafeno al mortero de yeso de referencia, aumenta su resistencia a flexión en cualquier proporción, siendo su mejor resultado para una proporción del 0,10 % con un valor medio máximo de 5,35 N/mm², lo que significa que se ha aumentado su resistencia a flexión en 0,98 N/mm², es decir, se ha incrementado su resistencia a flexión un 22,43 %.

En la gráfica nº 17, se muestra este aumento:



GRÁFICA 17: GRÁFICA DE BARRAS DE RESULTADOS DE ENSAYO A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO EN LAS PROPORCIONES DE 0,05 %, 0,08 %, 0,10 %.

Al comparar los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a flexión del mortero de yeso aditivado con grafeno, con los resultados obtenidos en otros ensayos similares con distintos aditivos, se aprecia el aumento considerable de la resistencia a flexión al añadir grafeno.

Los resultados de resistencia a flexión obtenidos en los ensayos por el Dr. J.M. Bernal [7] en su tesis doctoral en morteros de yeso con aditivo de tipo orgánico de efecto retardador sobre el proceso de fraguado y vermiculita se aprecia, que para un porcentaje fijo de un 3% de aditivo Adifoc y vermiculita en porcentajes del 10 %, 20 %, 30%, 50 % y 70 % la resistencia a flexión no supera los 2,84 N/mm², comparándolos con los resultados obtenidos en los ensayos de mortero de yeso aditivados con grafeno cuyo valor máximo es de 5,35 N/mm², por lo tanto se ha obtenido un aumento de la resistencia a flexión del 88,38 %.

Si continuamos comparando dichos resultados con otros ensayos en los cuales se han empleado otros aditivos empleados en los morteros de yesos; el Dr. Alfonso García Santos [6] en su tesis doctoral en morteros de yeso con aditivo de fibras poliméricas, obtiene unos resultados de resistencia a flexión empleando Fibra Acrílica (Dolanit) al 0,3% de 3,00 N/mm² (valor promedio), frente al valor promedio máximo que se obtiene con el grafeno de 5,35 N/mm², lo que supone un aumento de un 78,4 % de aumento de la resistencia a flexión. Con respecto a mortero de yeso con Fibra de Poliester (Nurel) al 0,3%, este mismo autor obtuvo unos valores de 3,03 N/mm², por lo que se produce un aumento del 76,44 % de resistencia a flexión empleando el aditivo de grafeno al 0,10 % (valor promedio 5,35 N/mm²), con respecto al aditivo de Fibra de Prolipropileno (Propilan) al 0,3% (valor promedio 2,78 N/mm²), se produce un aumento del 92,50 %; otros aditivos ensayados por el mismo autor son Fibra de Prolipropileno Fibrilado (Halesa) al 0,3% (valor promedio 2,98 N/mm²), Fibra de Prolipropileno Monofilamento (Concre Fib Halesa) al 0,3% (valor promedio 3,13 N/mm²), Policondensado de Melamina y Formaldehido (MELMENT F.10) al 1 % (valor promedio 4,70 N/mm²), Dispersión a base de acetato de polivinilo (Mowilith Pulver DS) al 1 % (valor promedio 4,12 N/mm²), Dispersión copolimera a base de esteres de ácido acrílico (Mowiton M-300) al 1 % (valor

promedio 5,22 N/mm²); comparándolos con al aditivo de grafeno al 0,10 % (valor promedio 5,35 N/mm²), se ha producido un porcentaje de aumento de la resistencia a flexión del 79.81 %, 70.91 %, 13.83 %, 29.85 %, 2.42 % respectivamente.

Por otro lado, la Dra. Mercedes del Río Merino [5] en su tesis doctoral de escayolas y morteros de yeso aditivos con espumantes, corcho, fibras de vidrio y vermiculita, según los ensayos realizados de escayola confeccionadas con agua carbonatada se obtiene el valor de 3,12 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 71,50 %. En ensayos realizados con Escayola aligerada mediante la adición de espumante SKW2 se obtiene un valor de 4,22 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 26,83 %. En ensayos realizados con Escayola aligerada con arcilla expandida se obtiene el valor de 3,14 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 70,43 %.

En ensayos realizados de Escayola aligerada con perlita se obtiene el valor de 2,49 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 115,3 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con arcilla expandida se obtiene el valor de 3,14 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 70,43 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con vermiculita se obtiene el valor de 2,43 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 122,6 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con poliestireno expandido se obtiene el valor de 1,04 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 414,1 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con vidrio celular se obtiene el valor de 4,48 N/ mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 19,3 %.

En ensayos realizados de yeso-corcho, con un porcentaje de corcho del 10 % y del 20% se obtiene para el mejor de los resultados un valor de 3,34 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 60,40 %. En ensayos realizados de Escayola reforzada con fibra de vidrio E, Longitud de fibra de 12, 25, 32 y 50 mm, se obtiene para el mejor de los resultados un valor de 4,21 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 5,35 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a flexión de un 26,83 %.

4.3.6. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y GRAFENO.

Después de haber realizado los ensayos de dureza Shore C, y los ensayos de resistencia a flexión de la mezcla de mortero de yeso con grafeno; es el turno de los ensayos de compresión para la mezcla de mortero de yeso y grafeno.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión, al cual se han sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso de referencia con las proporciones de grafeno de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %; se exponen en el apartado nº 4.3.6.1.

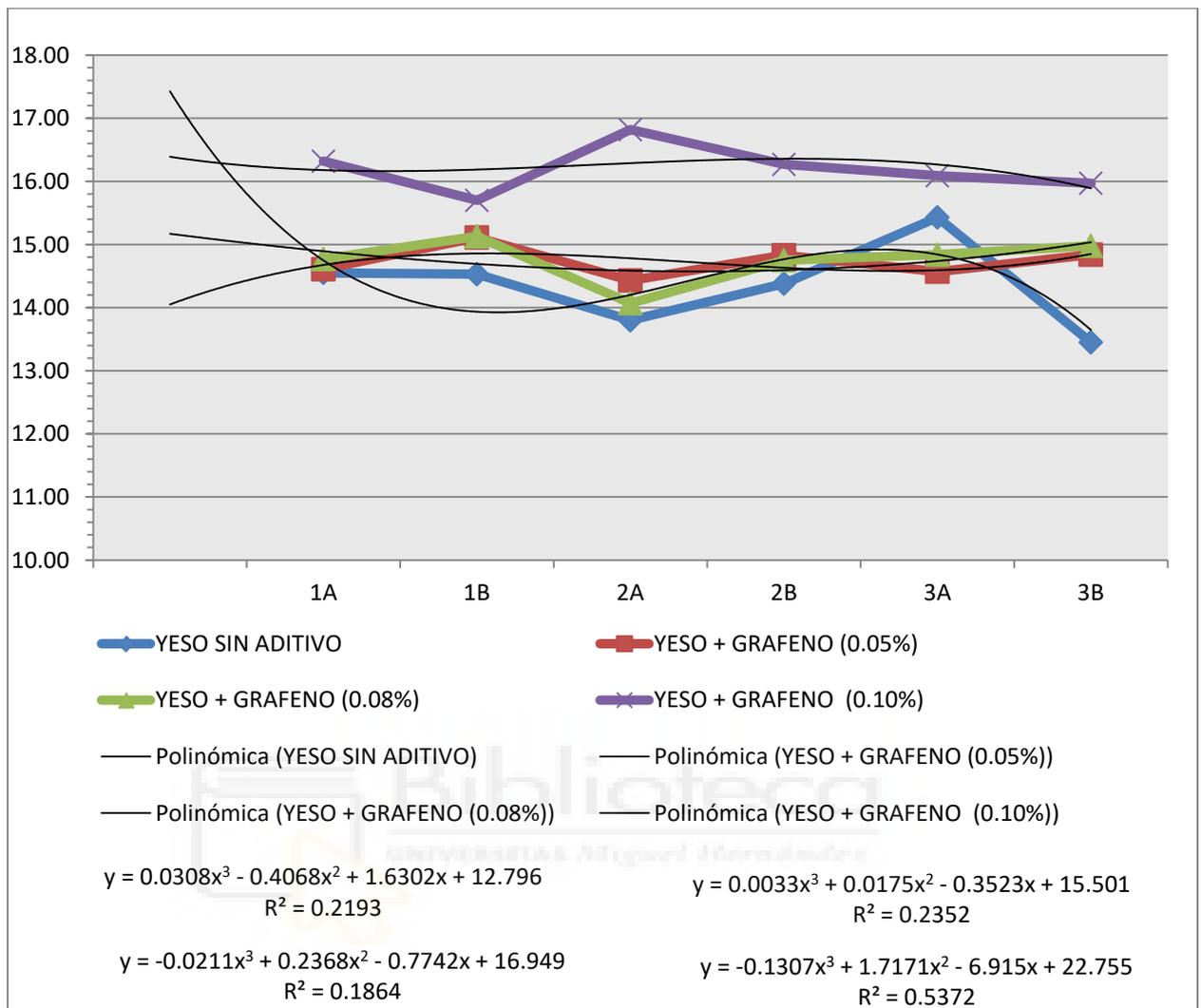
4.3.6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el mortero de yeso aditivado con polvo de grafeno (aditivo 1) se muestran a continuación en la tabla nº 37:

RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO				
Probetas	Yeso sin aditivo	Yeso + Grafeno (0.05%)	Yeso + Grafeno (0.08%)	Yeso + Grafeno (0.10%)
	TENSION DE ROTURA (N/mm ²)			
1A	14,55	14,61	14,77	16,32
1B	14,53	15,11	15,13	15,70
2A	13,80	14,43	14,07	16,82
2B	14,38	14,83	14,75	16,27
3A	15,43	14,57	14,84	16,09
3B	13,45	14,84	14,98	15,97
V.M.	14,35	14,73	14,76	16,19
Desviación Estandar +/-	0,6858	0,2435	0,3655	0,3791
Coeficiente de variación	0,0478	0,0165	0,0248	0,0234
Máximo	15,4300	15,1100	15,1300	16,8200
Mínimo	13,4500	14,4300	14,0700	15,7000
Error		0,7649	0,7387	0,7437
Covarianza		-0,0119	0,0673	-0,0633

TABLA 37: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON POLVO DE GRAFENO (ADITIVO 1).

En la gráfica nº 18, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %.

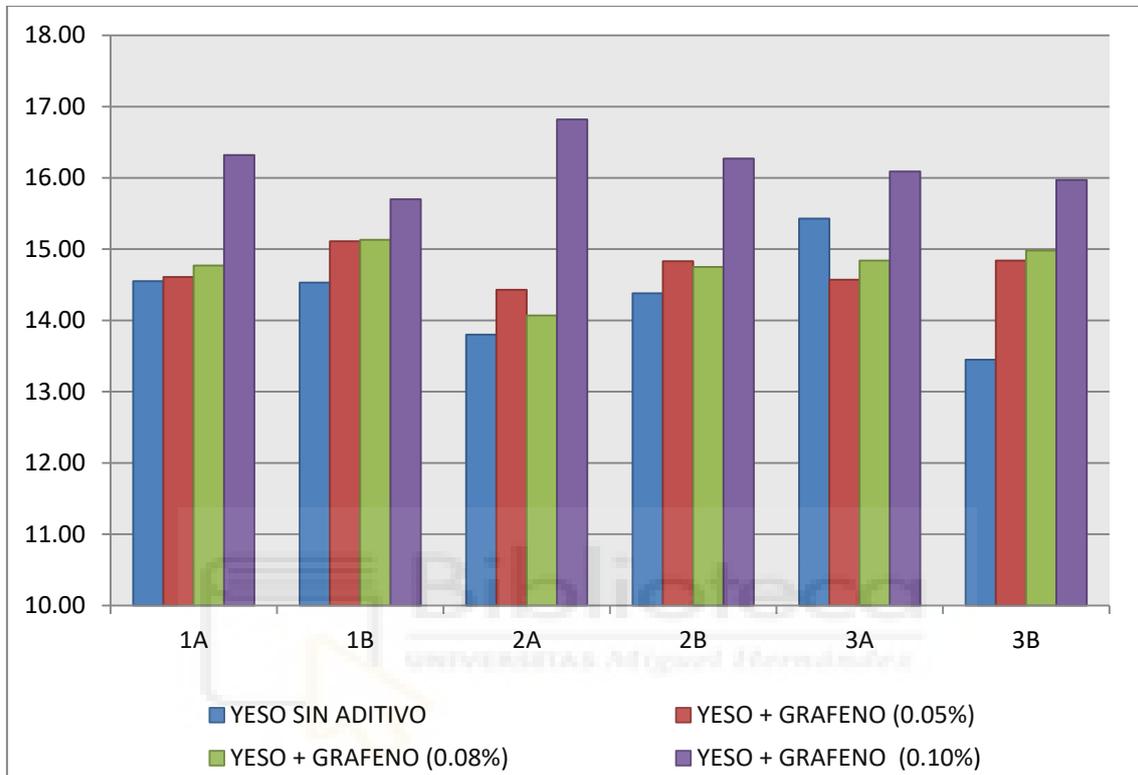


GRÁFICA 18: GRÁFICA LINEAL DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.3.6.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y GRAFENO.

Analizando los resultados, observamos que claramente al añadir polvo de grafeno al mortero de yeso de referencia, aumenta su resistencia a compresión en cualquier proporción, siendo su mejor resultado para una proporción del 0,10 % con un valor medio máximo de 16,19 N/mm², lo que significa que se ha aumentado su resistencia a compresión en 1,84 N/mm², lo que supone un aumento de la resistencia a compresión del 12,82 %.

En la gráfica de barras nº 19, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de grafeno en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %.



GRÁFICA 19: GRÁFICA DE BARRAS DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON GRAFENO EN DISTINTAS PROPORCIONES

Al comparar los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión del mortero de yeso aditivado con grafeno, con los resultados obtenidos en otros ensayos similares con distintos aditivos, se aprecia el aumento considerable de la resistencia a compresión al añadir grafeno.

También se ha comprobado que los resultados obtenidos al adicionar grafeno al mortero de yeso son superiores a otros aditivos ensayados por diversos autores

Los resultados de resistencia a compresión obtenidos en los ensayos por el Dr. J.M. Bernal [7] en su tesis doctoral en morteros de yeso con aditivo de tipo orgánico de efecto retardador sobre el proceso de fraguado y vermiculita se aprecia, que para un porcentaje fijo de un 3‰ de aditivo Adifoc

y vermiculita en porcentajes del 10 %, 20 %, 30%, 50 % y 70 % la resistencia a compresión no supera los 7,26 N/mm², comparándolos con los resultados obtenidos en los ensayos de mortero de yeso aditivados con grafeno cuyo valor máximo es de 16,19 N/mm², por lo tanto se ha obtenido un aumento de la resistencia a compresión del 123 %.

Si continuamos comparando dichos resultados con otros ensayos en los cuales se han empleado otros aditivos empleados en los morteros de yesos; el Dr. Alfonso García Santos [6] en su tesis doctoral en morteros de yeso con aditivo de fibras poliméricas, obtiene unos resultados de resistencia a compresión empleando Fibra Acrílica (Dolanit) al 0,3% de 11,40 N/mm² (valor promedio), frente al valor promedio máximo que se obtiene con el grafeno de 16,19 N/mm², lo que supone un aumento de un 42,08 % de aumento de la resistencia a compresión. Con respecto a mortero de yeso con Fibra de Poliester (Nurel) al 0,5%, este mismo autor obtuvo unos valores de 7,51 N/mm², por lo que se produce un aumento del 115,62 % de resistencia a compresión empleando el aditivo de grafeno al 0,10 % (valor promedio 16,19 N/mm²).

Por otro lado, la Dra. Mercedes del Río Merino [7] en su tesis doctoral de escayolas y morteros de yeso aditivos con espumantes, corcho, fibras de vidrio y vermiculita, según los ensayos realizados de escayola confeccionadas con agua carbonatada se obtiene el valor de 7,36 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 16,19 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a compresión de un 120 %. En ensayos realizados con Escayola aligerada mediante la adición de espumante SKW2 se obtiene un valor de 5,69 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 16,19 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a compresión de un 184,54 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con perlita se obtiene el valor de 5,75 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 16,19 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a compresión de un 181,58 %. En ensayos realizados de Escayola aligerada con vermiculita se obtiene el valor de 3,71 N/mm², y nosotros tenemos un valor de 16,19 N/mm², por lo que se produce un aumento de resistencia a compresión de un 336,60 %.

4.4. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Una vez obtenida las referencias del mortero de yeso para los ensayos de dureza Shore C, resistencia a flexión y resistencia a compresión; pasamos a la segunda parte. En esta parte de la Tesis consiste en la adición de grafeno en el mortero de yeso, en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %.

4.4.1. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,10 %.

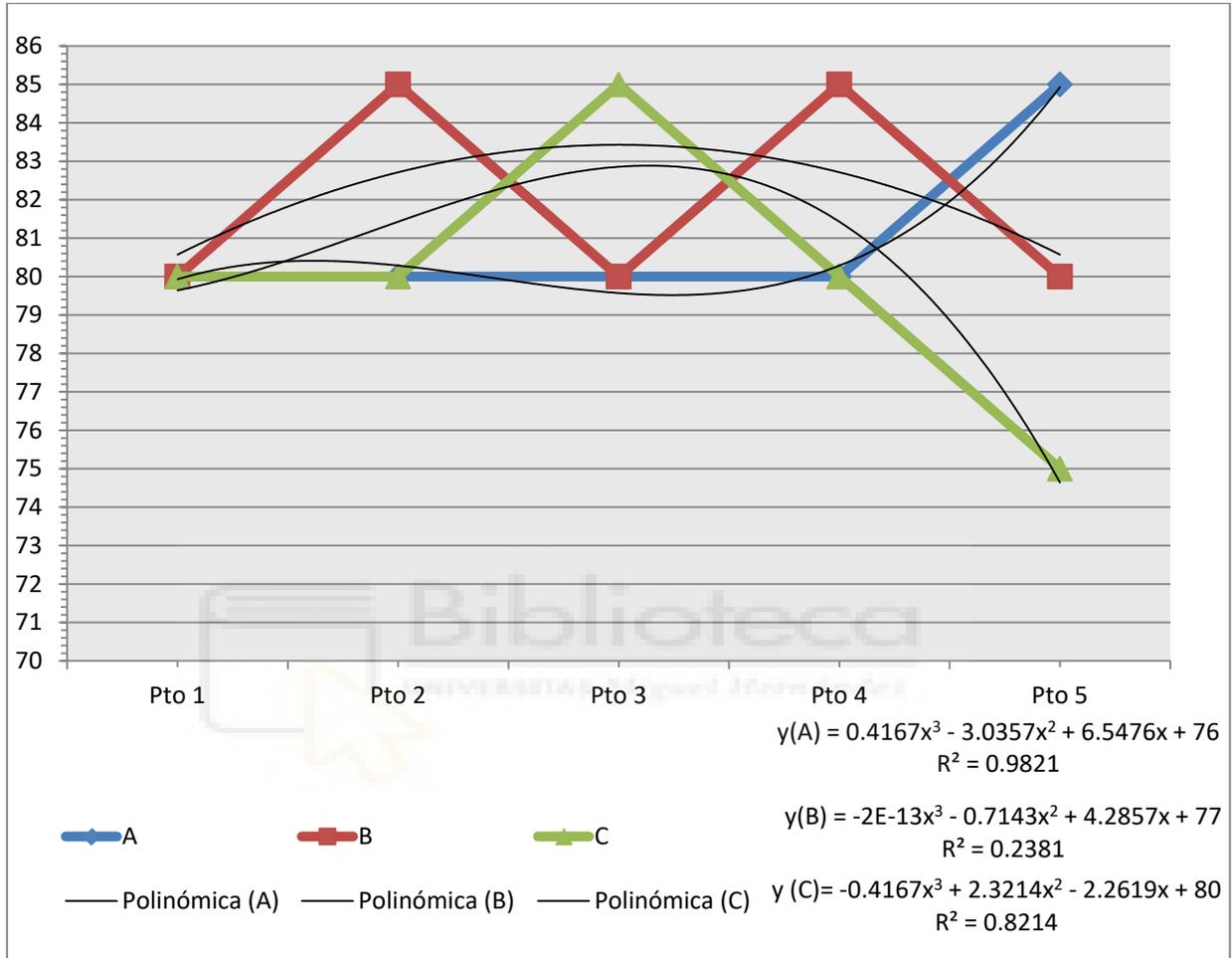
4.4.1.1. RESULTADOS DUREZA SHORE C, MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO (0,10 %).

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de ácido policarboxílico para una proporción del 0,10% de este aditivo, se muestran en la Tabla nº 38:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + ACIDO POLICARBOXILICO (0.10%)			
Yeso + Acido Policarboxilico (0.10%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	80	80	80
Pto 2	80	85	80
Pto 3	80	80	85
Pto 4	80	85	80
Pto 5	85	80	75
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			81,00
Desviación Estandar +/-	2,2361	2,7386	3,5355
Coefficiente de variación	0,0276	0,0338	0,0436
Máximo			85,00
Mínimo			75,00

TABLA 38: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO AL 0,10%

En la gráfica nº 20, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en una proporción del 0,10 %:



GRÁFICA 20: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ACIDO POLICARBOXILICO AL 0,10%.

Observamos la evolución de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,80 en dos de las tres muestra, la muestra en la cual su curva de regresión tiene un valor inferior, es debido al valor anormal de un resultado con respecto al resto de los resultados.

4.4.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,10 %).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 38, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de ácido policarboxílico al 0,10 %, nos muestran unos resultados con un valor promedio de 81,00 de dureza Shore C, por lo que se demuestra que la adición a la mezcla del aditivo de de ácido policarboxílico en un 0,10 % hace que la dureza Shore C, se reduzca considerablemente con respecto al mortero de yeso de referencia, que tiene un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C.

4.4.2. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,16 %.

Una vez realizado los ensayos de dureza Shore C con la mezcla de mortero de yeso y ácido policarboxílico, en la proporción de 0,10 %, se ha procedido a realizar el ensayo de dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso con ácido policarboxílico en la proporción de 0,16 % de dicho aditivo.

4.4.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,16 %).

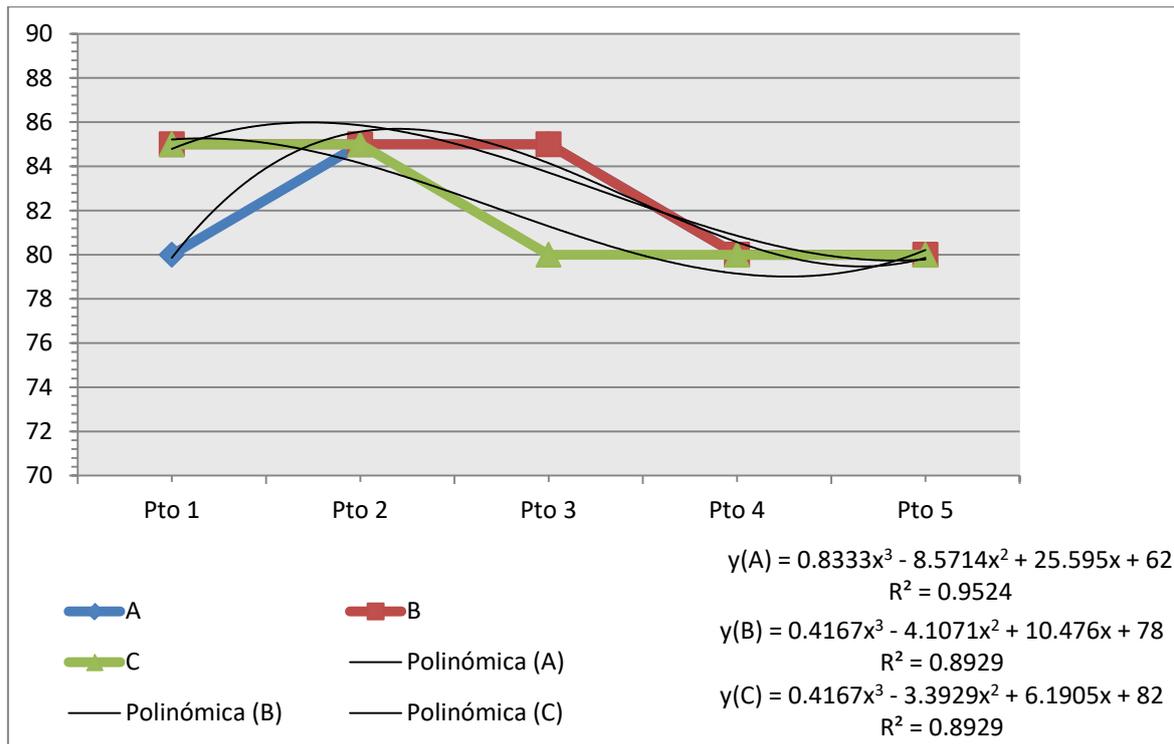
Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de ácido policarboxílico para una proporción del 0,16 % de este aditivo, se muestran en la tabla nº 39:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + ACIDO POLICARBOXILICO (0.16%)

YESO + ACIDO POLICARBOXILICO (0.16%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	80	85	85
Pto 2	85	85	85
Pto 3	85	85	80
Pto 4	80	80	80
Pto 5	80	80	80
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			82,3333
Desviación Estandar +/-	2,7386	2,7386	2,7386
Coefficiente de variación	0,0333	0,0333	0,0333
Máximo			85,0000
Mínimo			80,0000

TABLA 39: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO AL 0,16%

En la gráfica nº 21, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en una proporción del 0,16 %:



GRÁFICA 21: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO AL 0,16%.

Observamos la tendencia de resultados así como su regresión, siempre por encima del 0,80 en las tres muestras.

4.4.2.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,16 %).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 39, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de ácido policarboxílico al 0,16 %, nos muestran unos resultados con un valor promedio de 82,33 de dureza Shore C, por lo que se demuestra que la adicción a la mezcla del aditivo de ácido policarboxílico en un 0,16 % hace que la dureza Shore C, se reduzca considerablemente con respecto al mortero de yeso de referencia, que tiene un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C, aunque aumenta ligeramente con respecto a la proporción de ácido policarboxílico de 0,10 %, pasando de un valor de 81 a 82,33 de dureza Shore C.

4.4.3. ENSAYOS DE DUREZA SHORE C MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO 0,20 %.

Una vez realizado los ensayos de dureza Shore C con la mezcla de mortero de yeso y ácido policarboxílico, en las proporciones de 0,10 % y 0,16 % se ha procedido a realizar el ensayo de dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso con ácido policarboxílico en la proporción de 0,20 % de dicho aditivo.

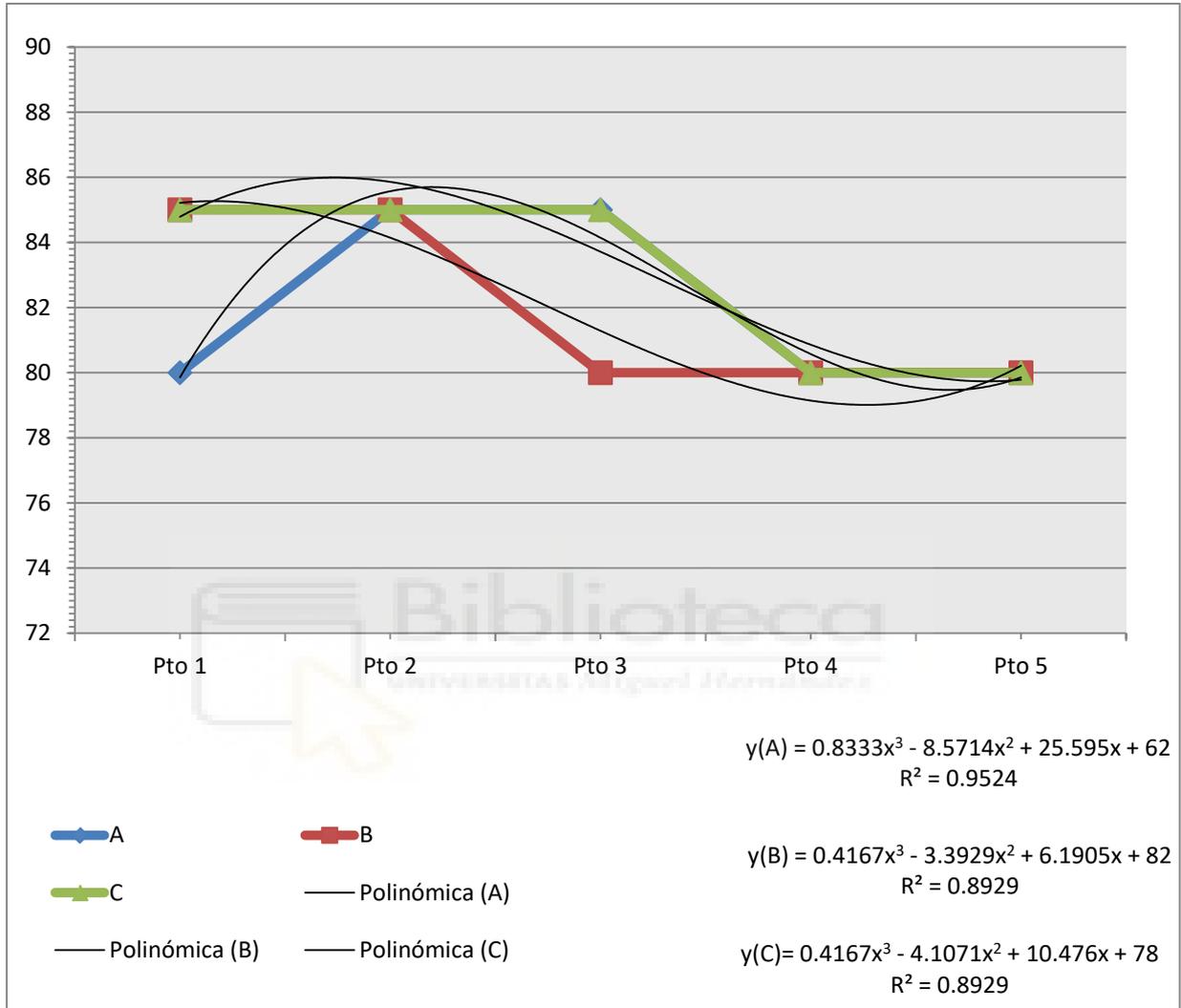
4.4.3.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO MAS ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,20 %).

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de ácido policarboxílico para una proporción del 0,20 % de este aditivo, se muestran en la tabla nº 40:

RESULTADOS DUREZA SHORE C: MORTERO DE YESO + ACIDO POLICARBOXILICO (0.20%)			
YESO + ACIDO POLICARBOXILICO (0.20%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	80	85	85
Pto 2	85	85	85
Pto 3	85	80	85
Pto 4	80	80	80
Pto 5	80	80	80
Tamaño de la muestra	5	5	5
Valor Promedio			82,3333
Desviación Estandar +/-	2,7386	2,7386	2,7386
Coeficiente de variación	0,0333	0,0333	0,0333
Máximo			85,0000
Mínimo			80,0000

TABLA 40: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO AL 0,20%

En la gráfica nº 22, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en una proporción del 0,20 %:



GRÁFICA 22: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C PARA MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO AL 0,20%.

Observamos la tendencia de resultados así como su regresión, se sitúa siempre por encima del 0,80 en las tres muestras.

4.4.3.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO (0,20 %).

Los resultados que se muestran en la Tabla nº 40, del ensayo de dureza Shore C, al que ha sido sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso con el aditivo de ácido policarboxílico al 0,20 %, nos muestran unos resultados con un valor promedio de 82,33 de dureza Shore C, por lo que se demuestra que la adición a la mezcla del aditivo de ácido policarboxílico en un 0,20 % hace que la dureza Shore C, se reduzca considerablemente con respecto al mortero de yeso de referencia, que tiene un valor promedio de 88,67 de dureza Shore C, aunque aumenta ligeramente con respecto a la proporción de ácido policarboxílico de 0,10 %, pasando de un valor de 81 a 82,33 de dureza Shore C, y manteniendo el mismo valor con respecto a una proporción de 0,16 % de ácido policarboxílico.

4.4.4. COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Tras la realización de los tres ensayos de dureza Shore C de la mezcla de mortero de yeso y ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 % de disco aditivo; en el siguiente apartado se procede a realizar un comparativo de los resultados de dureza Shore C para dicho aditivo en relación con el mortero de yeso sin aditivar.

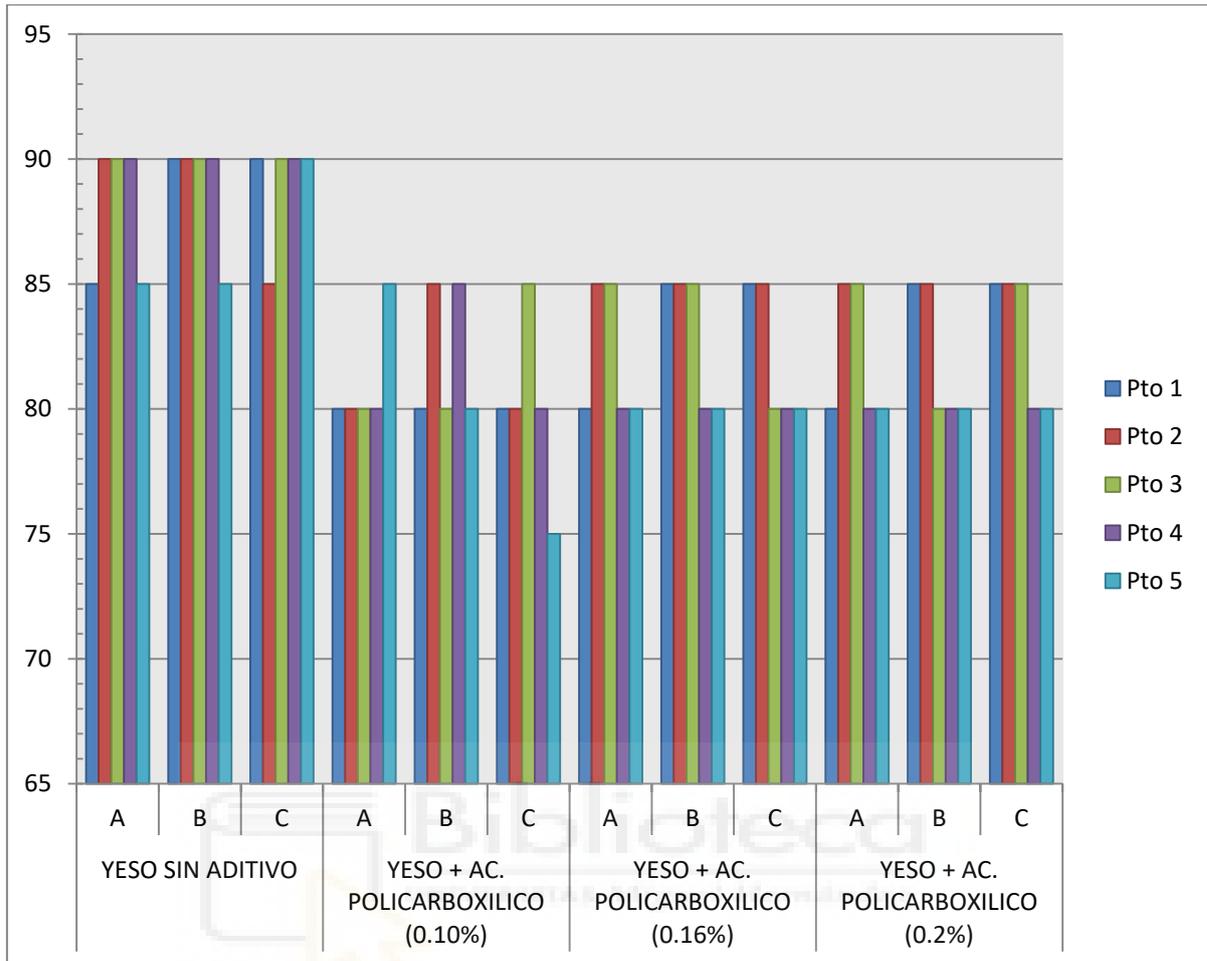
4.4.4.1. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Realizando un comparativo de los valores obtenidos en los ensayos de dureza Shore C, para el mortero de referencia con el aditivo de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %, obtenemos los resultados que se muestran en la tabla nº 41:

COMPARATIVO DE ENSAYOS DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO							
Localización del ensayo	Muestra	Pto 1	Pto 2	Pto 3	Pto 4	Pto 5	VALOR MEDIO
Yeso sin aditivo	A	85	90	90	90	85	88,7 SHORE C
	B	90	90	90	90	85	
	C	90	85	90	90	90	
Yeso + Acido Policarboxilico (0.10%)	A	80	80	80	80	85	81,0 SHORE C
	B	80	85	80	85	80	
	C	80	80	85	80	75	
Yeso + Acido Policarboxilico (0.16%)	A	80	85	85	80	80	82,3 SHORE C
	B	85	85	85	80	80	
	C	85	85	80	80	80	
Yeso + Acido Policarboxilico (0.20%)	A	80	85	85	80	80	82,3 SHORE C
	B	85	85	80	80	80	
	C	85	85	85	80	80	

TABLA 41: COMPARATIVO DE RESULTADOS DE DUREZA SHORE C CON EL ADITIVO ÁCIDO POLICARBOXILICO

En la gráfica nº 23, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxilico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %.



GRÁFICA 23: COMPARATIVO DE RESULTADOS DE DUREZA SHORE C PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE ÁCIDO POLICARBOXILICO

4.4.4.2. DISCUSION DE COMPARATIVO DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MORTERO DE YESO CON ADITIVO DE ACIDO POLICARBOXILICO.

Como se desprende de los resultados, con el aditivo de ácido policarboxílico, se produce una disminución de la dureza Shore C, en comparativa con el mortero de yeso de base de referencia sin aditar, obteniéndose los peores resultados para una proporción del 0,10 % de aditivo, con un valor de 81, en comparación con el valor de 88,7 de dureza Shore C del mortero de yeso de referencia.

4.4.5. ENSAYOS DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Los resultados del ensayo de resistencia a flexión, al cual se han sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso de referencia con las proporciones de ácido policarboxílico de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %; se exponen a continuación.

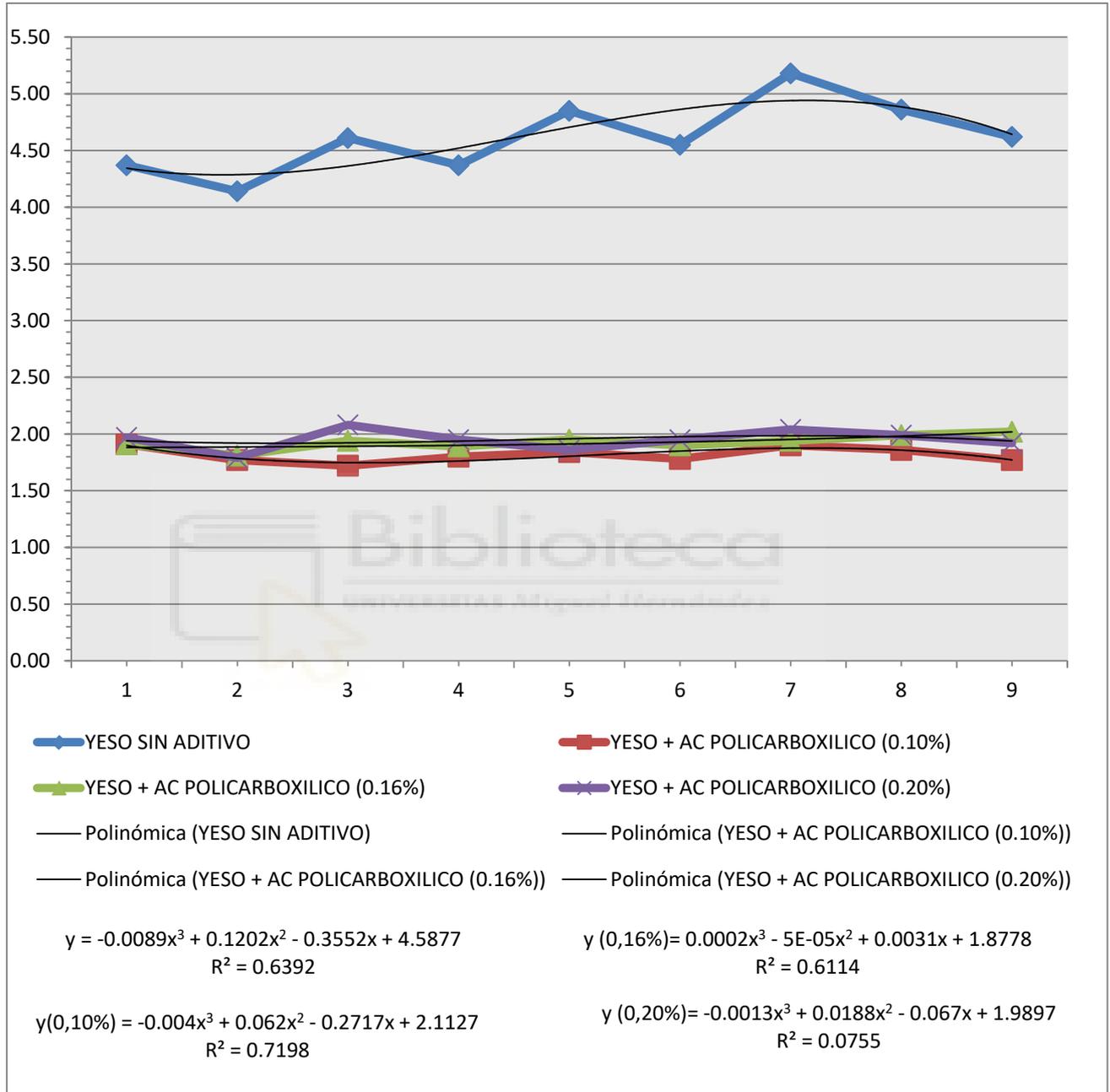
4.4.5.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Los resultados del ensayo de resistencia a flexión para el mortero de yeso aditivado con ácido policarboxílico (aditivo 2) se muestran a continuación en la tabla nº 42:

RESULTADOS ENSAYOS DE FLEXION DE MORTERO BASE Y ACIDO POLICARBOXILICO				
Probetas	TENSION DE ROTURA (N/mm2)			
	Yeso sin aditivo	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.10%)	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.16%)	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.20%)
1	4.37	1.91	1.91	1.97
2	4.14	1.77	1.81	1.79
3	4.61	1.72	1.94	2.08
4	4.37	1.8	1.89	1.95
5	4.85	1.84	1.95	1.86
6	4.55	1.78	1.9	1.95
7	5.18	1.9	1.94	2.04
8	4.86	1.86	1.99	1.99
9	4.62	1.77	2.02	1.92
Promedio	4.62	1.82	1.93	1.95
Desviación Estandar +/-	0.3131	0.0646	0.0608	0.0877
Coefficiente de variación	0.0678	0.0356	0.0315	0.0450
Máximo	5.1800	1.9100	2.0200	2.08
Mínimo	4.1400	1.7200	1.8100	1.86
Error		0.3026	0.2541	0.2900
Covarianza		0.0087	0.0124	0.0137

TABLA 42: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO.

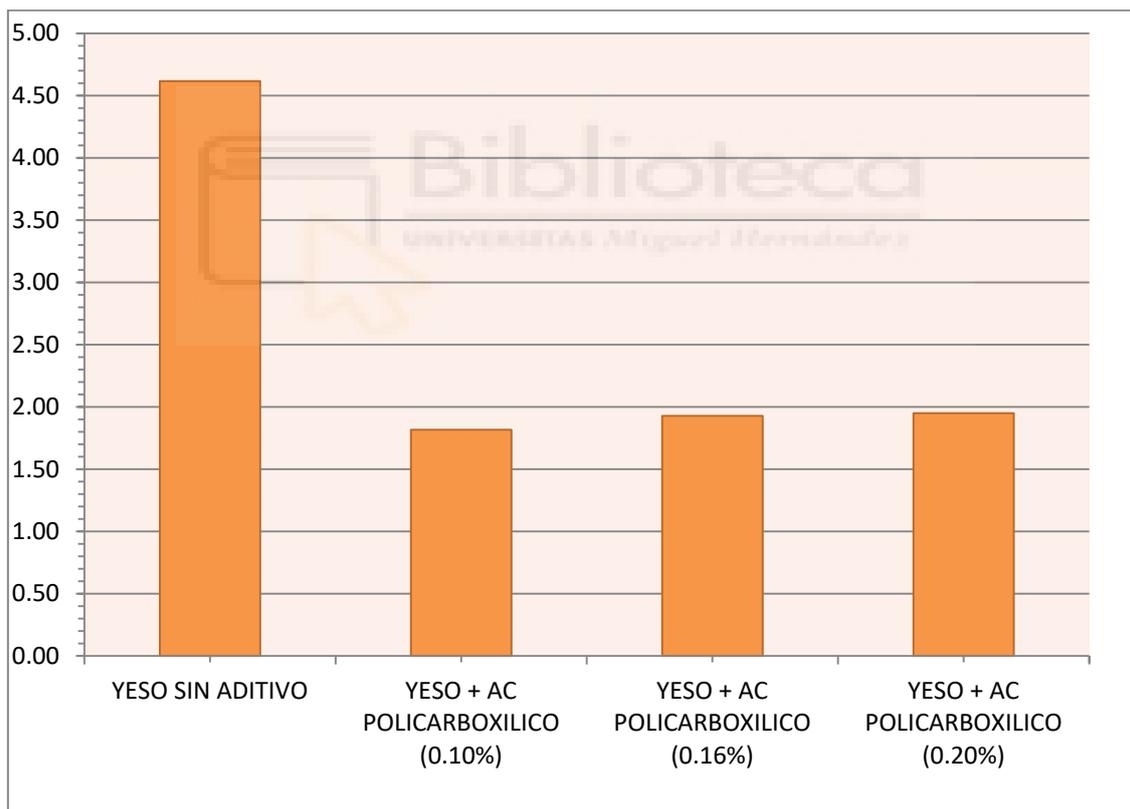
En la gráfica nº 24, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de flexión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %.



GRÁFICA 24: GRÁFICA DE RESULTADOS DE ENSAYO A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.4.5.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Analizando los resultados, observamos que claramente al añadir ácido policarboxílico al mortero de yeso de referencia, disminuye su resistencia a flexión en cualquier proporción, siendo su peor resultado para una proporción del 0,10 % con un valor medio máximo de $1,80 \text{ N/mm}^2$, lo que significa que ha disminuido su resistencia a flexión en $2,57 \text{ N/mm}^2$, esto representa una disminución del 58,81 % de la resistencia a flexión, observándolo en la gráfica nº 25, que se muestra a continuación:



GRÁFICA 25: GRÁFICA DE VALORES PROMEDIO DE RESULTADOS DE ENSAYO A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO.

4.4.6. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión, al cual se han sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso de referencia con las proporciones de ácido policarboxílico de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %; se exponen a continuación.

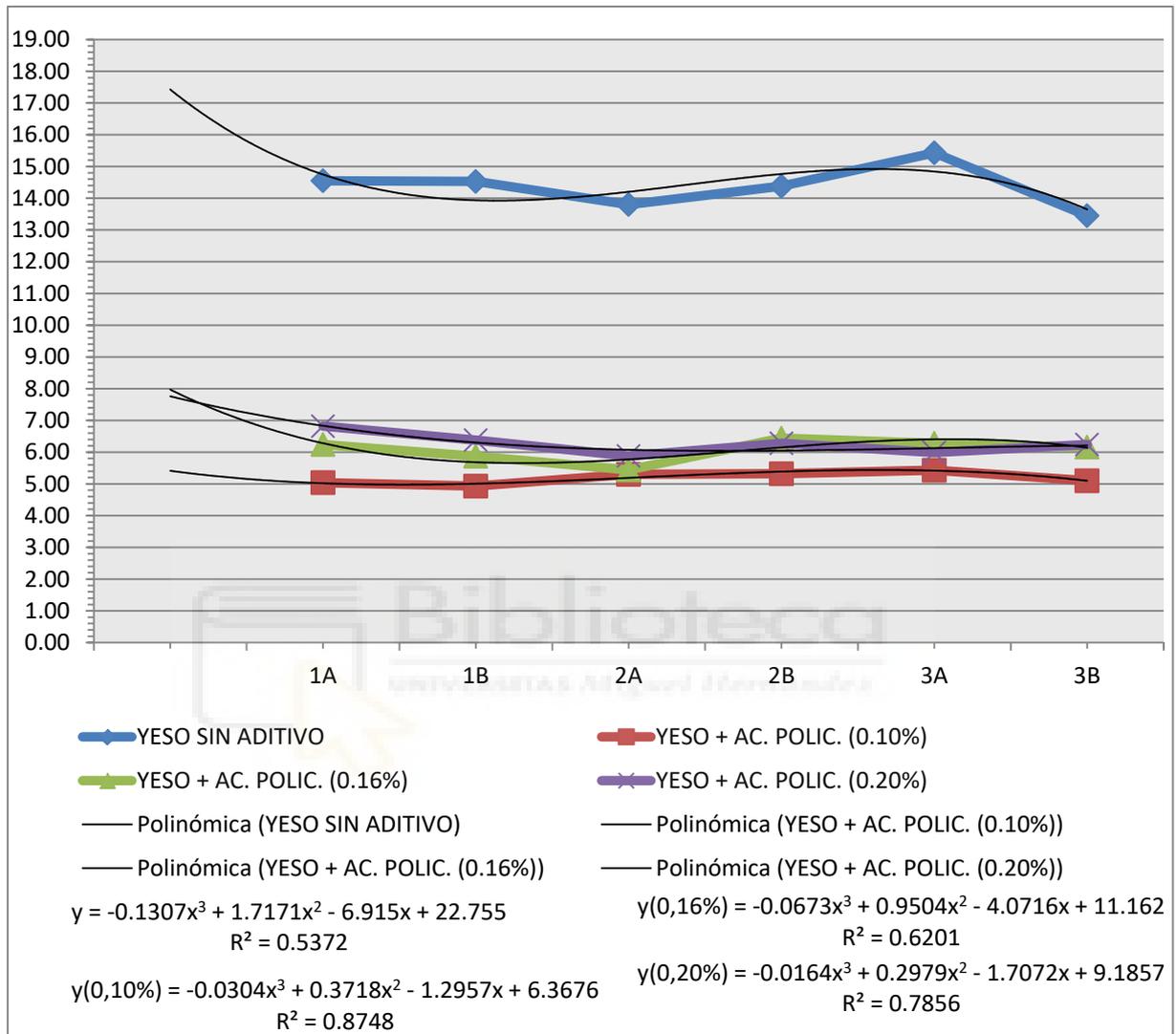
4.4.6.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Para el aditivo 2, identificado como ácido policarboxílico, hemos obtenido en los ensayos de resistencia a compresión los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla nº 43:

RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESION MORTERO BASE Y ACIDO POLICARBOXILICO				
Probetas	Yeso sin aditivo	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.10%)	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.16%)	Yeso + Ac. Policarboxilico (0.20%)
TENSION DE ROTURA (N/mm²)				
1A	14.55	5.04	6.24	6.82
1B	14.53	4.93	5.87	6.38
2A	13.80	5.30	5.44	5.88
2B	14.38	5.32	6.44	6.28
3A	15.43	5.43	6.28	5.99
3B	13.45	5.10	6.16	6.24
V.M.	14.36	5.19	6.07	6.265
Desviación Estandar +/-	0.6858	0.1922	0.3619	0.3304
Coefficiente de variación	0.0478	0.0371	0.0596	0.0527
Máximo	15.4300	5.4300	6.4400	6.82
Mínimo	13.4500	4.9300	5.4400	5.88
Error		0.7280	0.7015	0.7654
Covarianza		0.0414	0.1003	0.0138

TABLA 43: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO.

En la gráfica nº 26, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %.

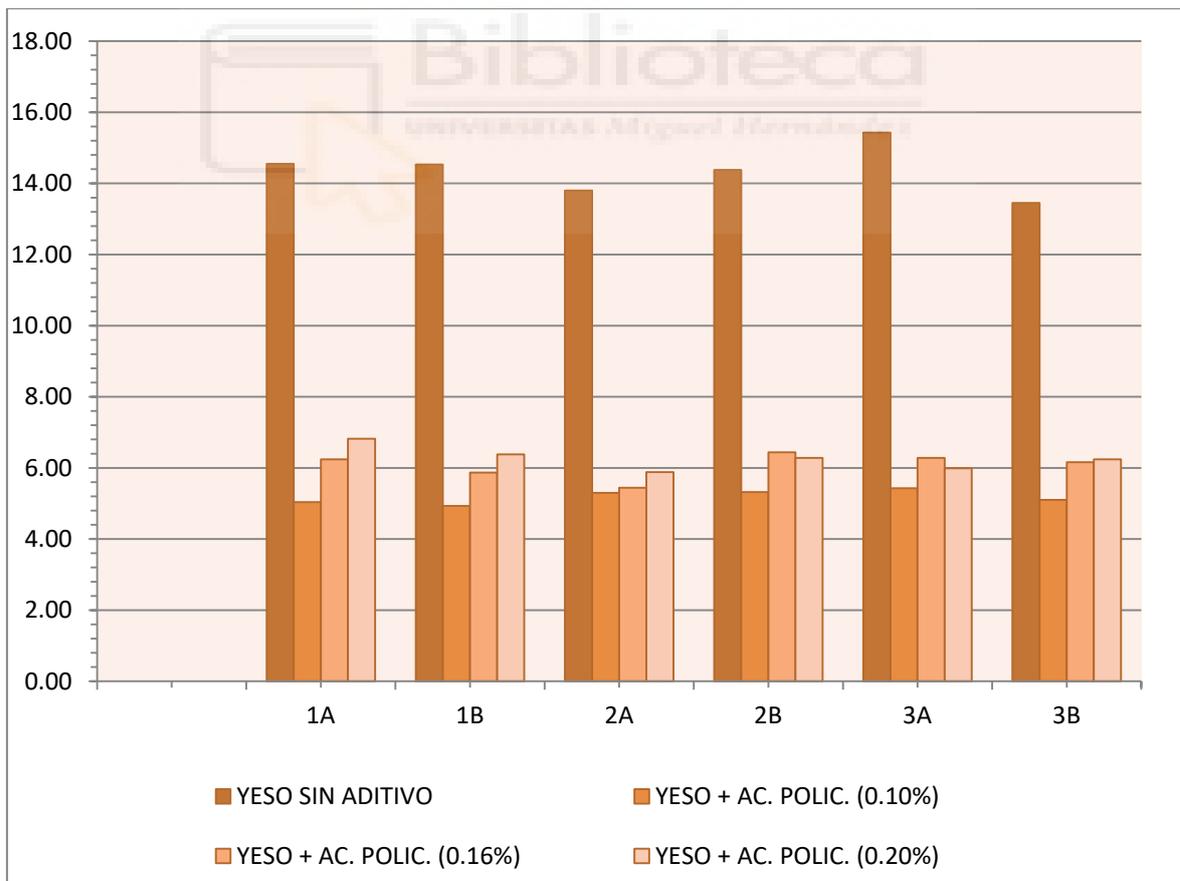


GRÁFICA 26: RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO ADITIVADO CON ÁCIDO POLICARBOXILICO EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.4.6.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Analizando los resultados, observamos que claramente al añadir ácido policarboxílico al mortero de yeso de referencia, disminuye considerablemente su resistencia a compresión en cualquier proporción, siendo su peor resultado para una proporción del 0,10 % con un valor medio máximo de $5,19 \text{ N/mm}^2$, lo que significa que se ha reducido la resistencia a compresión en $9,16 \text{ N/mm}^2$, lo que supone una reducción de la resistencia a la compresión del 63,83 %.

En la gráfica de barras nº 27, se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, para la mezcla de mortero de yeso con aditivo de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %.



GRÁFICA 27: RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE ÁCIDO POLICARBOXILICO.

4.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Siguiendo la cronología de los ensayos realizados en el laboratorio de Ingeniería, una vez realizados los ensayos del mortero de yeso, para obtener los valores de referencia; posteriormente se realizaron los ensayos de la mezcla de mortero de yeso y grafeno; y a continuación los ensayos de la mezcla de mortero de yeso y ácido policarboxílico. Para finalizar este estudio, se realizarán los ensayos de la mezcla de mortero de yeso con los aditivos de grafeno y ácido policarboxílico de forma conjunta.

4.5.1. ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Una vez, realizados los ensayos de dureza Shore C, de los aditivos y el mortero de yeso de base de referencia de forma independiente, se procedió a realizar un ensayo con la mezcla de los dos aditivos de forma conjunta en distintas proporciones (0,05 %, 0,10 % y 0,15 %) en cuanto al polvo de grafeno, dejando constante la proporción de 0,06 % de ácido policarboxílico

4.5.1.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

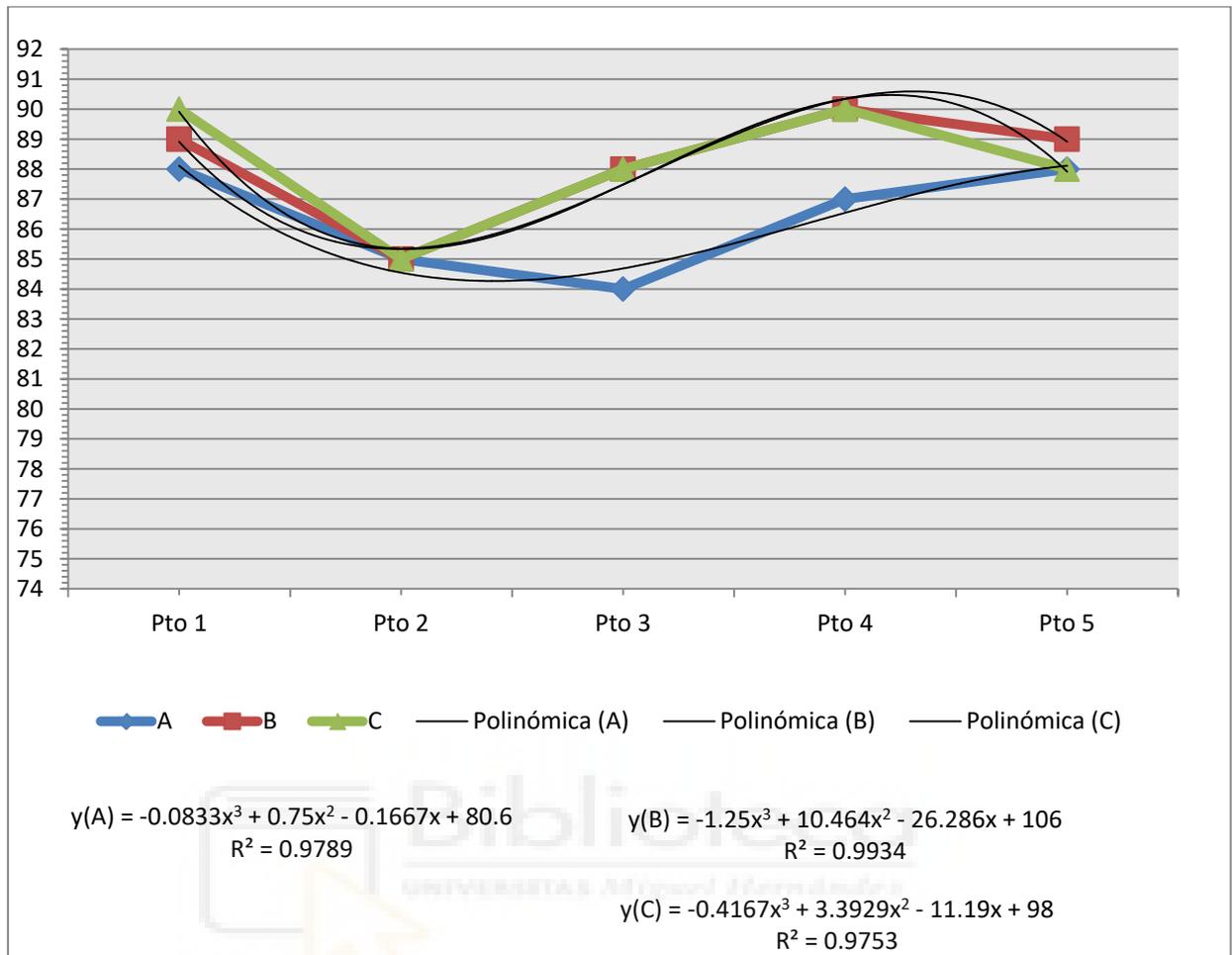
Tras los ensayos se obtuvieron los resultados que se muestran en las siguientes Tablas nº 44, nº 45 y nº 46:

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de grafeno en la proporción de 0,05% y de ácido policarboxílico para una proporción del 0,06 % de este aditivo, se muestran en la Tabla nº 44:

RESULTADOS ENSAYOS DE DUREZA SHORE C YESO + GRAFENO (0,05%) + ACIDO POLICARBOXILICO (0,06%)			
YESO + Grafeno (0,05%)+AC. POLICARBOXILICO (0.06%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	88	89	90
Pto 2	85	85	85
Pto 3	84	88	88
Pto 4	87	90	90
Pto 5	88	89	88
Tamaño de la muestra	5	5	5
Promedio			87.60
Desviación Estandar +/-	1.8166	1.9235	2.0494
Coeficiente de variación	0.0207	0.0220	0.0234
Máximo			90.0000
Mínimo			84.0000

TABLA 44: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,05%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

En la gráfica nº 28 se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con los dos aditivo, de grafeno y de ácido policarboxílico en las proporciones del 0,05 % y 0,06%, respectivamente.



GRÁFICA 28: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,05%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

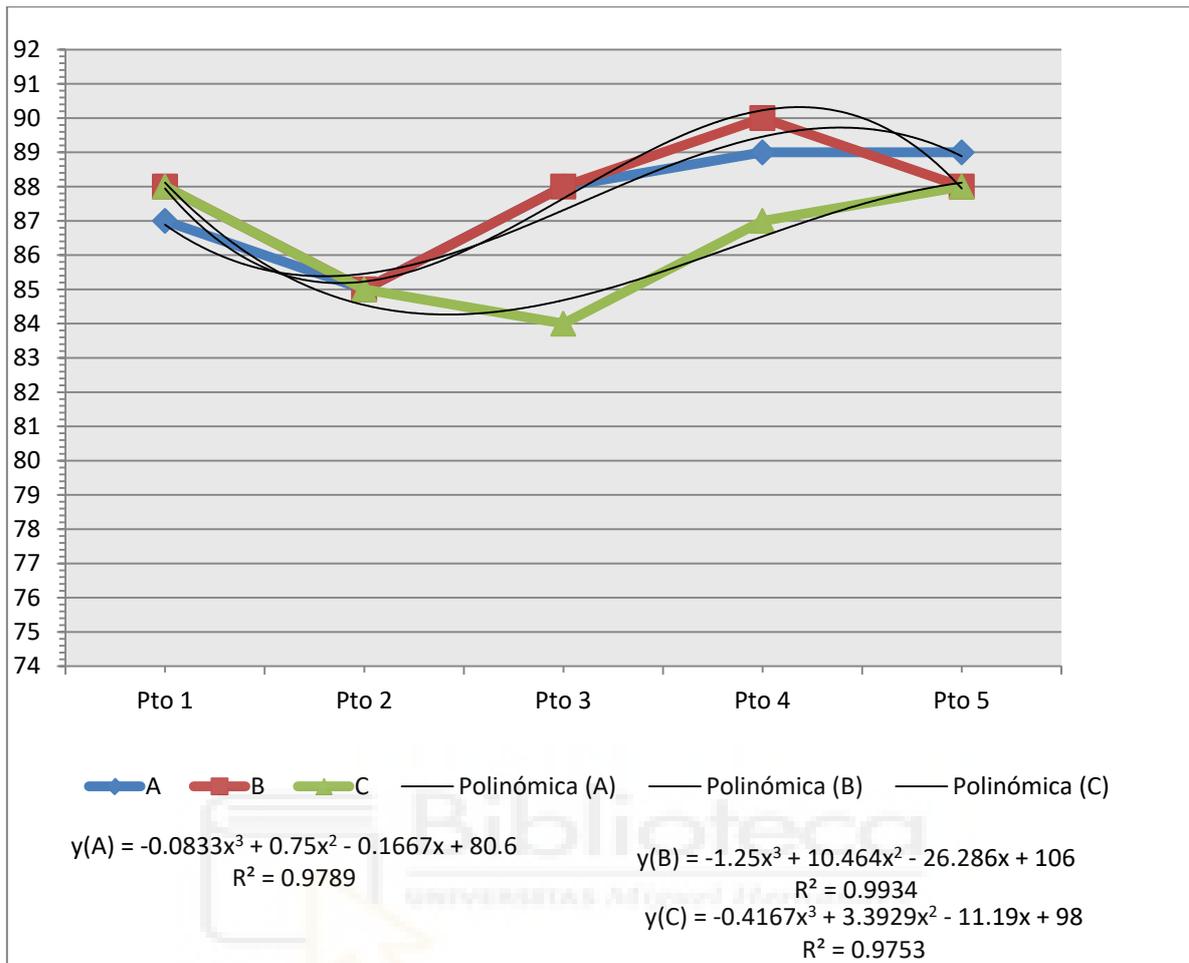
Observamos la evolución de la tendencia de resultados así como su regresión, situándose por encima del 0,90.

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de grafeno en la proporción de 0,10 % y de ácido policarboxílico para una proporción del 0,06 % de este aditivo, se muestran en la tabla nº 45:

RESULTADOS ENSAYOS DE DUREZA SHORE C YESO + GRAFENO (0,10%) + ACIDO POLICARBOXILICO (0,06%)			
YESO + Grafeno (0,10%)+AC. POLICARBOXILICO (0.06%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	90	88	89
Pto 2	85	86	86
Pto 3	88	84	88
Pto 4	90	87	90
Pto 5	88	88	89
Tamaño de la muestra	5	5	5
Promedio			87.73
Desviación Estandar +/-	2.0494	1.6733	1.5166
Coeficiente de variación	0.0234	0.0191	0.0173
Máximo			90.0000
Mínimo			84.0000

TABLA 45: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,10%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

En la gráfica nº 29, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con los dos aditivo, de grafeno y de ácido policarboxílico en las proporciones del 0,10 % y 0,06%, respectivamente.



GRÁFICA 29: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,10%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

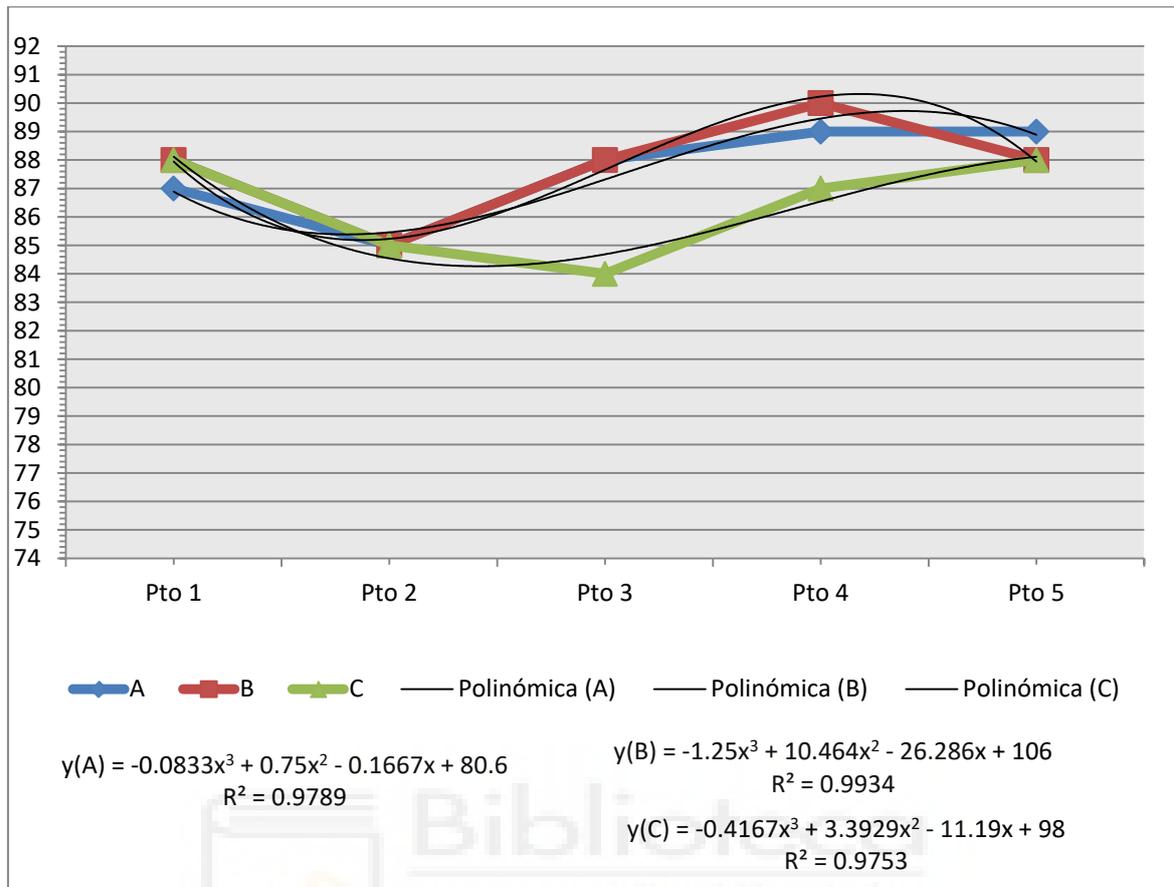
Observamos la evolución de la tendencia de resultados así como su regresión, situándose por encima del 0,90.

Los resultados de dureza Shore C, para las probetas que se han preparado de mortero de yeso de referencia añadiendo aditivo de grafeno en la proporción de 0,15 % y de ácido policarboxílico para una proporción del 0,06 % de este aditivo, se muestran en la tabla nº 46:

RESULTADOS ENSAYOS DE DUREZA SHORE C YESO + GRAFENO (0,15%) + ACIDO POLICARBOXILICO (0,06%)			
YESO + Grafeno (0,15%)+AC. POLICARBOXILICO (0.06%)	Muestra		
	A	B	C
Pto 1	87	88	88
Pto 2	85	85	85
Pto 3	88	88	84
Pto 4	89	90	87
Pto 5	89	88	88
Tamaño de la muestra	5	5	5
Promedio			87.27
Desviación Estandar +/-	1.6733	1.7889	1.8166
Coeficiente de variación	0.0192	0.0205	0.0208
Máximo			90.0000
Mínimo			84.0000

TABLA 46: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,15%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

En la gráfica nº 30, se representa los valores de los resultados obtenidos de dureza Shore C, para la mezcla de mortero de yeso con los dos aditivo, de grafeno y de ácido policarboxílico en las proporciones del 0,15 % y 0,06%, respectivamente.



GRÁFICA 30: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO (0,15%) Y ÁCIDO POLICARBOXILICO (0,06%).

Observamos la evolución de la tendencia de resultados así como su regresión, situándose por encima del 0,90.

4.5.1.2. DISCUSION DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA SHORE C DE MEZCLA DE MORTERO DE YESO DE REFERENCIA, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Como se puede apreciar en los resultados, con la mezcla de mortero de yeso con los aditivos en distintas proporciones, la dureza Shore C, disminuye con respecto al mortero base de referencia, tal y como se produce con la mezcla sola de ácido policarboxílico; pero, en menor medida que con este aditivo solamente; ello es debido al porcentaje de grafeno aditivado en la mezcla como queda demostrado.

4.5.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Una vez, realizados los ensayos de dureza Shore C, se procedió a realizar el ensayo de resistencia a flexión con la mezcla de los dos aditivos de forma conjunta en distintas proporciones (0,05 %, 0,10 % y 0,15 %) en cuanto al polvo de grafeno, dejando constante la proporción de 0,06 % de ácido policarboxílico.

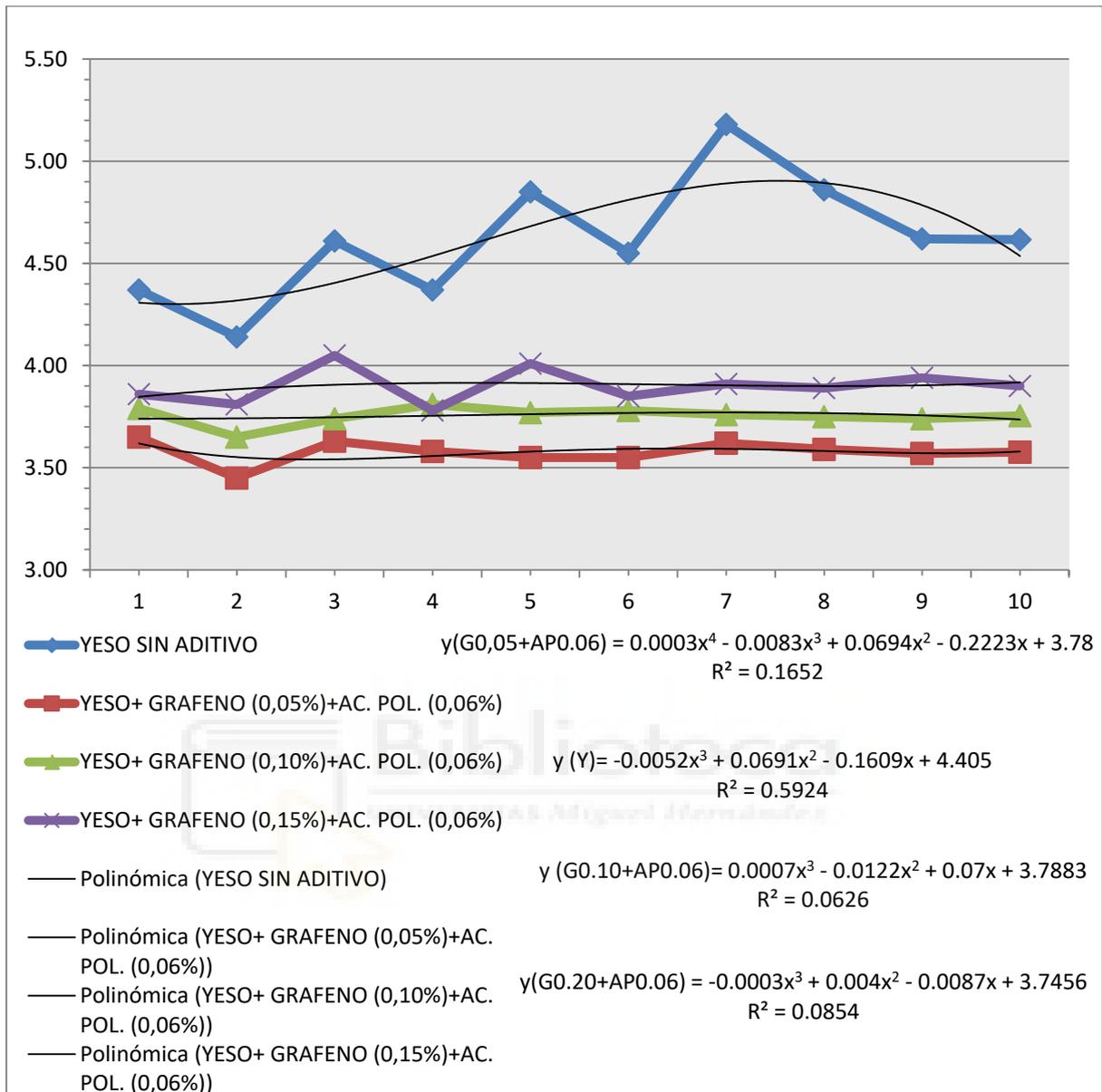
4.5.2.1. RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Para la mezcla de mortero de yeso de referencia con el aditivo 1, identificado como polvo de grafeno y el aditivo 2, identificado como ácido policarboxílico, con las proporciones de grafeno de 0,05 %, 0,10 % y 0,15 %; y de ácido policarboxílico en proporción de 0,06 %; hemos obtenido en los ensayos de resistencia a flexión los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla nº 47:

RESULTADOS ENSAYOS DE FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO					
Ensayo	Probetas	Yeso sin aditivo	Yeso+ Grafeno (0,05%) + Ac. Pol. (0,06%)	Yeso+ Grafeno (0,10%) + Ac. Pol. (0,06%)	Yeso+ Grafeno (0,15%) + Ac. Pol. (0,06%)
Resistencia a Flexión (N/mm²)	1	4.37	3.65	3.79	3.86
	2	4.14	3.45	3.65	3.81
	3	4.61	3.63	3.74	4.05
	4	4.37	3.58	3.81	3.78
	5	4.85	3.55	3.77	4.01
	6	4.55	3.55	3.78	3.85
	7	5.18	3.62	3.76	3.91
	8	4.86	3.59	3.75	3.89
	9	4.62	3.57	3.74	3.94
V.M.		4.62	3.58	3.75	3.90
Desviación Estandar +/-		0.31	0.0589	0.0456	0.0887
Coeficiente de variación		0.0678	0.0165	0.0121	0.0228
Máximo		5.18	3.65	3.8	4.01
Mínimo		4.14	3.45	3.65	3.78
Error			0.3013	0.3219	0.2877
Covarianza			0.0080	0.0039	0.0142

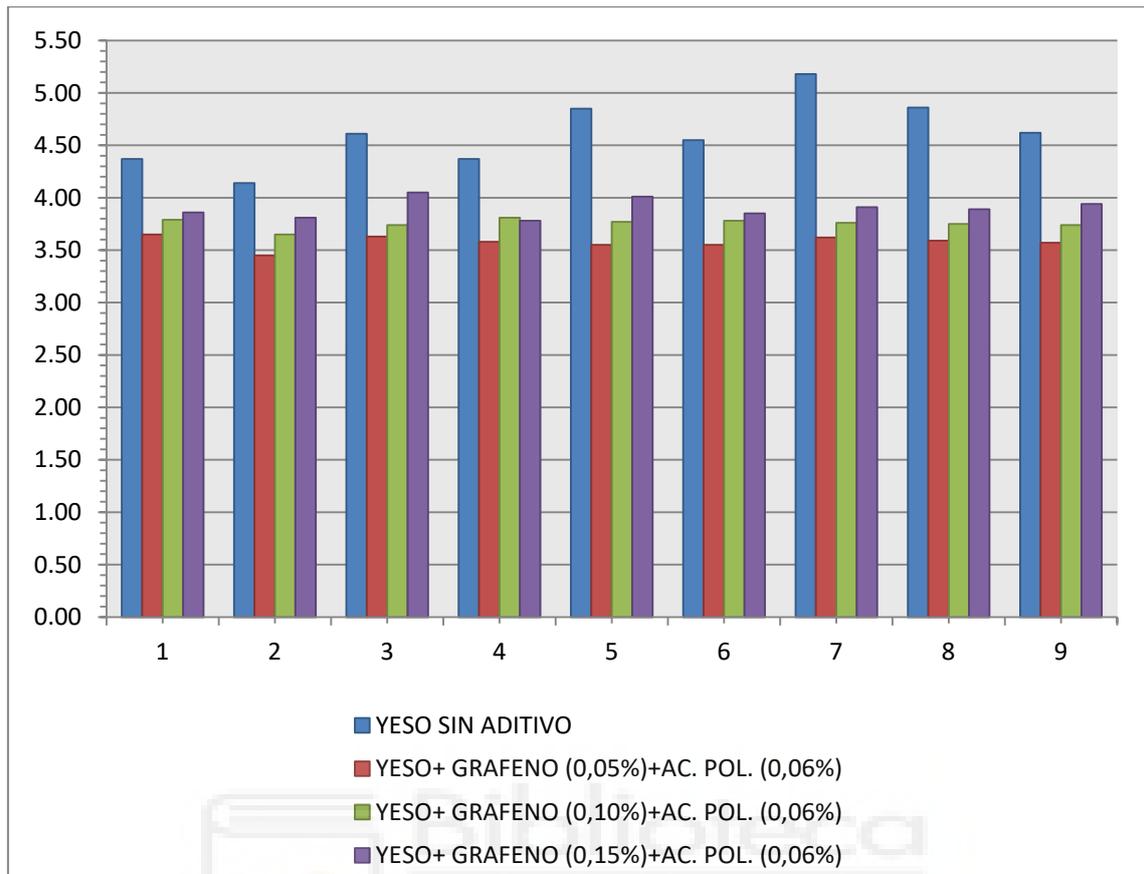
TABLA 47: TABLA DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ÁCIDO POLICARBOXILICO.

En la gráfica nº 31, se representa los valores de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a flexión, para la mezcla de mortero de yeso con los dos aditivo, de grafeno y de ácido policarboxílico en las proporciones del 0,05 %, 0,10 % y 0,15 % de grafeno y 0,06%, de ácido policarboxílico.



GRÁFICA 31: RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ÁCIDO POLICARBOXILICO.

A continuación, se muestra la gráfica nº 32 de los resultados de los ensayos de resistencia a flexión, del mortero de yeso con la mezcla de los dos aditivos de forma más intuitiva.



GRÁFICA 32: RESULTADOS DE ENSAYO A FLEXIÓN DE MORTERO DE YESO CON MEZCLA DE LOS DOS ADITIVOS EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.5.2.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS A FLEXION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Observando los resultados, apreciamos que al añadir la mezcla del aditivo 1, polvo de grafeno y el aditivo 2, ácido policarboxílico al mortero de yeso de referencia, disminuye su resistencia a flexión en cualquier proporción, siendo su peor resultado para una proporción del 0,05 del aditivo 1 con 0,06 % del aditivo 2 % con un valor medio máximo de $3,58 \text{ N/mm}^2$, conforme se incrementa el porcentaje de aditivo 1, manteniendo constante la proporción de aditivo 2, se aprecia que la resistencia a flexión va aumentando sin sobrepasar los valores del mortero de yeso de referencia a medida que aumentamos el porcentaje de grafeno (aditivo 1).

4.5.3. ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión, al cual se han sometido las probetas de la mezcla de mortero de yeso de referencia con las proporciones de grafeno de 0,05 %, 0,08 % y 0,100 %; y de ácido policarboxílico en proporción de 0,06 %, se exponen a continuación.

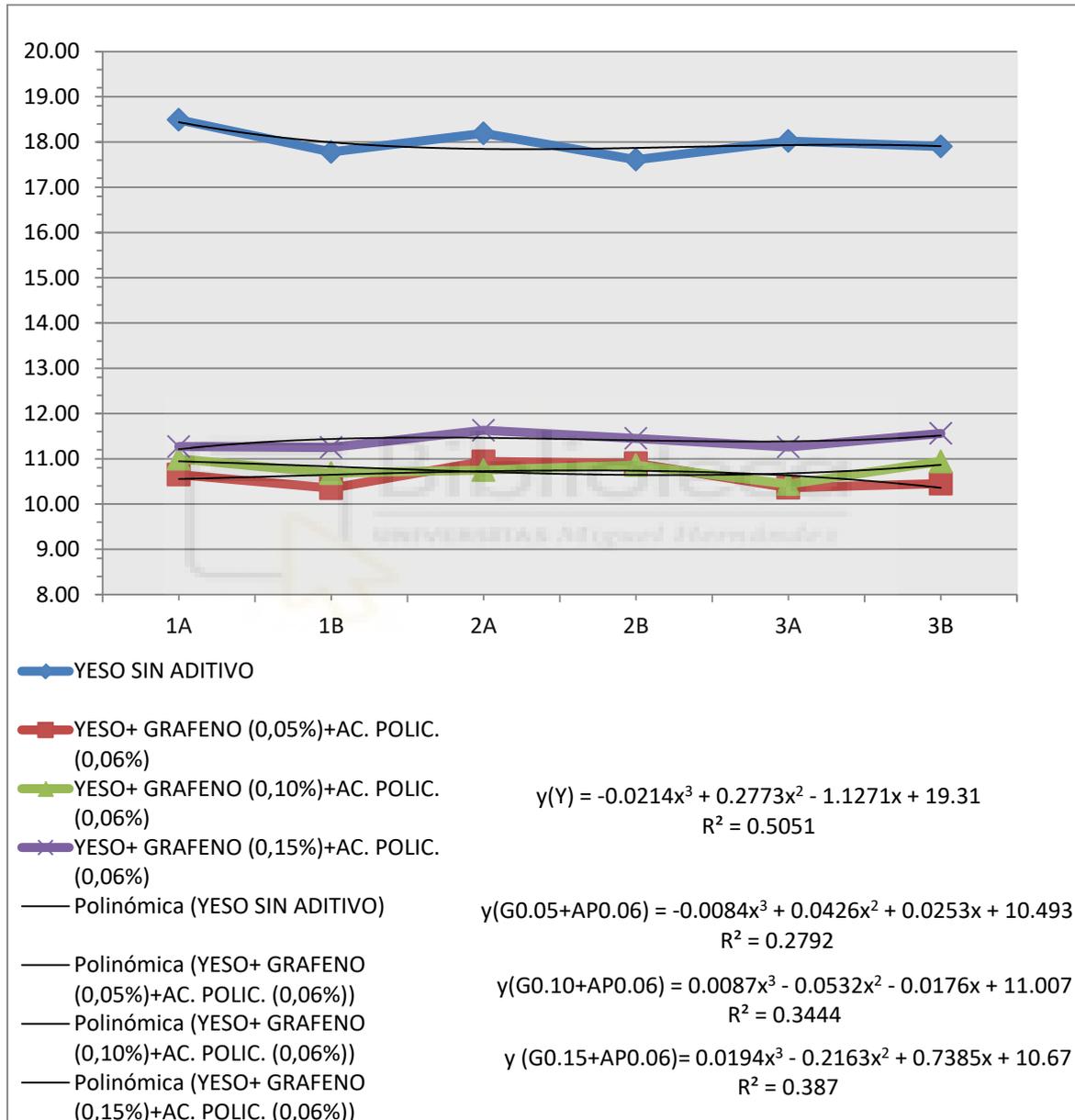
4.5.3.1. RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESION DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO CON GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Para la mezcla de mortero de yeso de referencia con el aditivo 1, identificado como polvo de grafeno y el aditivo 2, identificado como ácido policarboxílico, con las proporciones de grafeno de 0,05 %, 0,10 % y 0,15 %; y de ácido policarboxílico en proporción de 0,06 %; hemos obtenido en los ensayos de resistencia a compresión los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla nº 48:

RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESION DE MORTERO BASE Y MEZCLA DE GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO (N/mm²)				
Probetas	Yeso sin aditivo	Yeso + Grafeno (0,05%) + Ac. Poli. (0,06%)	Yeso + Grafeno (0,10%) + Ac. Pol. (0,06%)	Yeso + Grafeno (0,15%) + Ac. Pol. (0,06%)
1A	18,49	10,65	11,00	11,27
1B	17,78	10,35	10,68	11,25
2A	18,19	10,94	10,75	11,63
2B	17,61	10,90	10,86	11,45
3A	18,02	10,36	10,44	11,26
3B	17,90	10,45	10,94	11,56
V.M.	18,00	10,61	10,78	11,40
Desviación Estandar +/-	0,3121	0,2647	0,2034	0,1673
Coficiente de variación	0,0173	0,0249	0,0189	0,0147
Máximo	18,4900	10,9400	11,0000	11,6300
Mínimo	17,6100	10,3500	10,4400	11,2500
Error		0,3475	0,3403	0,3473
Covarianza		0,0075	0,0140	-0,0051

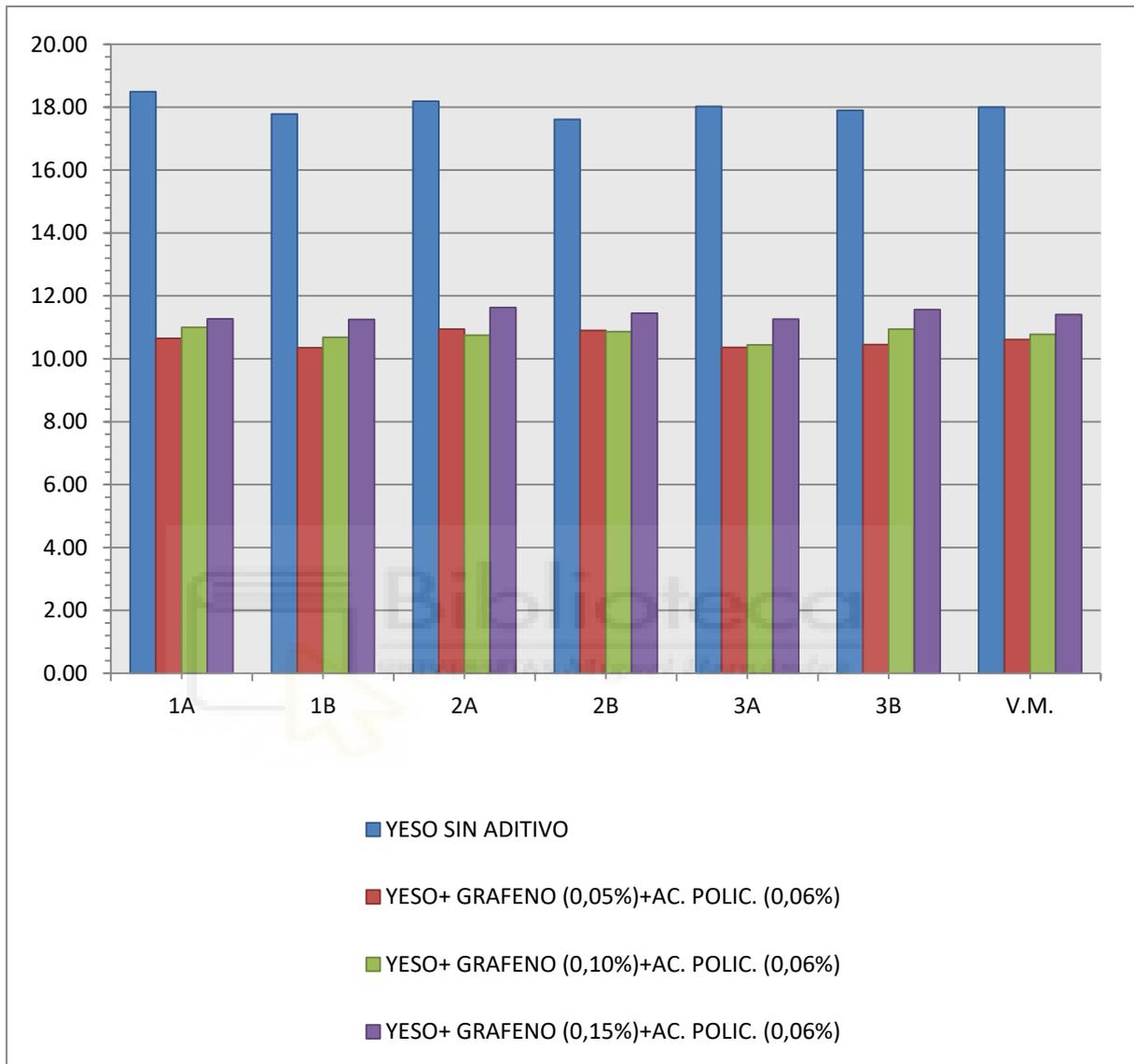
TABLA 48: TABLA DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA PARA LA MEZCLA DE LOS DOS ADITIVOS EMPLEADOS.

En la gráfica nº 33 se representa los valores de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, para la mezcla de mortero de yeso con los dos aditivos empleados, el grafeno y de ácido policarboxílico en las proporciones de 0,05 %, 0,10 % y 0,15 % para el grafeno; y de 0,06 %, para el ácido policarboxílico.



GRÁFICA 33: GRÁFICA LINEAL DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO CON LA MEZCLA DE LOS 2 ADITIVOS EN DISTINTAS PROPORCIONES.

A continuación, se muestra la gráfica de barras nº 34 de los ensayos de resistencia a compresión, del mortero de yeso con la mezcla de los dos aditivos:



GRÁFICA 34: GRÁFICA DE BARRAS DE RESULTADOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTERO DE YESO CON LA MEZCLA DE LOS 2 ADITIVOS EN DISTINTAS PROPORCIONES.

4.5.4.2. DISCUSION DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MEZCLA DE MORTERO DE YESO, GRAFENO Y ACIDO POLICARBOXILICO.

Observando los resultados, apreciamos que al añadir la mezcla del aditivo 1, polvo de grafeno y el aditivo 2, ácido policarboxílico al mortero de yeso de referencia, disminuye su resistencia a compresión en cualquier proporción, siendo su peor resultado para una proporción del 0,05 del aditivo 1 con 0,06 % del aditivo 2 % con un valor medio máximo de 10,61 N/mm², conforme se incrementa el porcentaje de aditivo 1, manteniendo constante la proporción de aditivo 2, se aprecia que la resistencia a compresión va aumentando sin sobrepasar los valores del mortero de yeso de referencia.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES



5.1. CONCLUSIONES.

De los ensayos efectuados a las probetas de mortero de yeso aditivado con las proporciones de polvo de grafeno del 0,05 %, 0,08 % y 0,10 %; y ácido policarboxílico en 0,10 %, 0,16 % y 0,20 %, por separado; así, como de forma conjunta en la mezcla en las proporciones de 0,05 %, 0,08 % y 0,10 % de grafeno y 0,06 % de ácido policarboxílico; se puede extraer unas conclusiones generales y específicas.

Las principales conclusiones generales que se desprenden de estos ensayos, es que al aditivar el mortero de yeso con polvo de grafeno aumentan las propiedades mecánicas del mortero de yeso, se produce un aumento de la dureza Shore C, un aumento de la resistencia a la flexión y un aumento de la resistencia a la compresión.

Por el contrario, al aditivar el mortero de yeso utilizando el ácido policarboxílico como aditivo, las propiedades mecánicas del mortero de yeso, disminuyen; se produce una disminución de la dureza Shore C, una disminución de la resistencia a la flexión y una disminución de la resistencia a la compresión.

Las conclusiones específicas que se desprenden de estos ensayos realizados, son:

- a.- Al añadir polvo de grafeno en una proporción de 0,08 %, es decir una cantidad mínima de 1,5 gramos, aumenta en 1,5 % la dureza Shore C del mortero de yeso respecto del mortero sin aditivar.
- b.- Al añadir ácido policarboxílico como aditivo al mortero de yeso, en la proporciones empleadas, se produce una disminución de hasta el 8,70 % de la dureza Shore C del mortero de yeso resultante.
- c.- Obtenemos un aumento de la resistencia mecánica a flexión en comparación con el yeso sin aditivar cuando empleamos el polvo de grafeno, en valores de hasta 5,35 N/mm², y con el yeso sin aditivar obtenemos unos valores de media de 4,37 N/mm². Lo que significa un incremento del 22,42 %

de la resistencia a flexión del mortero de yeso al añadirle un 0,10 % de grafeno a la mezcla.

d.- Obtenemos una disminución de la resistencia mecánica a flexión en comparación con el yeso sin aditar cuando empleamos el ácido policarboxílico en valores de hasta $1,80 \text{ N/mm}^2$, y con el yeso sin aditar obtenemos unos valores de media de $4,37 \text{ N/mm}^2$. Lo que significa una disminución del 58,81 % de la resistencia a flexión del mortero de yeso al añadirle un 0,10 % de ácido policarboxílico.

e.- Obtenemos un aumento de la resistencia mecánica a compresión en comparación con el yeso sin aditar cuando empleamos el polvo de grafeno, en valores de hasta $16,19 \text{ N/mm}^2$, y con el yeso sin aditar obtenemos unos valores de media de $14,35 \text{ N/mm}^2$. Lo que significa un incremento del 12,82 % de la resistencia a compresión del mortero de yeso al añadirle un 0,10 % de polvo de grafeno a la mezcla.

f.- Obtenemos una disminución de la resistencia mecánica a compresión en comparación con el yeso sin aditar cuando empleamos el ácido policarboxílico en valores de hasta $5,19 \text{ N/mm}^2$, y con el yeso sin aditar obtenemos unos valores de media de $14,35 \text{ N/mm}^2$. Lo que significa una disminución del 63,83 % de la resistencia a compresión del mortero de yeso al añadirle un 0,10 % de ácido policarboxílico.

g.- Se deduce que el polvo de grafeno como aditivo en un 0,10 % de mezcla en el mortero de yeso, se obtiene mejores resultados, que para los porcentajes de 0,05 % y 0,08% del mismo aditivo.

h.- Se deduce que el ácido policarboxílico como aditivo en un 0,10 % de mezcla en el mortero de yeso, se obtiene peores resultados, que para los porcentajes de 0,20 % y 0,16% del mismo aditivo.

5.2. POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se podrían seguir varias ramas de investigación para obtener diferentes resultados de investigación positivos en mi humilde opinión, en aplicación de diferentes campos, como puede ser el de la construcción o el industrial.

Las posibles aplicaciones en el sector de la construcción podría venir dado por el estudio del comportamiento del aditivo de polvo de grafeno mezclado con un retardante, así como otros materiales como pueden ser fibra de carbono, o fibras naturales, para averiguar si con estas mezclas se puede llegar a un compuesto de mayor resistencia mecánica, al fin de poder utilizarlo como elementos estructurales de edificaciones por su bajo peso, por ejemplo como dinteles para huecos de cerramientos en paramentos verticales o utilización como viguetas de soporte de cubiertas inclinadas.

Dentro del campo industrial, se podría analizar cómo estudio de transmisión térmica en paredes planas y curvas, como aislante térmico; como he mencionado anteriormente, sería muy interesante para la industria naval como aplicación a cascos de embarcaciones, la utilización de grafeno mezclado con fibra de vidrio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Real Academia de las Ciencias de Suecia, Nobel Prize [online].
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010; 2010.
- [2] Díez Reyes, M. Carmen; "En torno al yeso", Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 493, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2004.
- [3] Villanueva Domínguez, Luis de; Evolución histórica de la construcción con yeso. Informes de la construcción. Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 493, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2004.
- [4] Sanz Arauz, David; Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de MADRID., 2009.
- [5] Del Río Merino Mercedes. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos. Tesis Doctoral, U.P.M.1999.
- [6] García Santos, Alfonso; Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos, Tesis Doctoral, ETSAM UPM, 1988.
- [7] Berná Serna, Juan Manuel, "Evaluación de las propiedades mecánicas de los morteros aditivados de yeso con vermiculita. Tesis Doctoral UMH, 2013
- [8] Torres Balbás, L. y A. Momplet Mínguez. El arte hispanomusulmán. Arte-Encuentro. 1995.

- [9] Torres Balbas, L (1995). Precedentes de la decoración mural hispano musulmana. Crónica arqueológica de la España musulmana XXXVII. Obra dispersa I. Instituto de España
- [10] Patronato de la Alhambra [online], <http://www.alhambra-patronato.es/> , 2018
- [11] Toledo monumental [online], <http://www.toledomonumental.com/> , 2018
- [12] Arredondo, F. Materiales de construcción II: El yeso. Instituto Eduardo Torroja de la construcción, Madrid, 1961.
- [13] La Spina Vincenzina ; La calcinación industrial del yeso según la tratadística histórica, U.P.C.T.; 2014
- [14] Villanueva Domínguez, Luis de y Alfonso García Santos. Manual del yeso de ATEDY. Editorial Cie Dossat, 2000. Madrid.
- [15] La Spina Vincenzina, Grau Giménez Carles Jordi; La evolución de la producción del yeso tradicional hasta los años 70 del siglo XX en Gestalgar, Valencia (España), Actas del X Congreso Nacional y II Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. Donostia-San Sebastián, Octubre 2017
- [16] Moreno Ramón, Héctor, Ibáñez Asensio, Sara, Gisbert Blanquer, Juan Manuel; "Minerales Carbonatados", Universidad Politécnica de Valencia, 2011
- [17] Foster, N. Yesos aligerados. Conferencia en el IV Congreso de Eurogypsum. 1964. Madrid.
- [18] Rivero Fernández L, Fabricación de productos de base de yeso y sus aplicaciones industriales. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 36 (6): 591-598 (1997).

- [19] Eurogypsum, Recomendaciones para la aplicación se yesos especiales sobre soportes no tradicionales. Publicadas en Curso de Rehabilitación. 7 Cerramientos y acabados. COAM, 1988.
- [20] Novo de Miguel, Luciano; “El yeso en la construcción”, Editorial Ceac, Barcelona, 1963.
- [21] Green Buildings, Library of Congress Cataloging in Publication, “Contractor’s guide to green building construction” Glavinich, Thomas E., 2008.
- [22] Díaz Díaz, Pedro; Tesis Doctoral “Estudio experimental sobre manipulación y propiedades físico-mecánicas de los productos derivados del yeso usados en odontología”, Facultad de Odontología, Universidad Complutense de Madrid, 2014.
- [23] Villanueva, Luis de; “El yeso: material de construcción primitivo y actual” Boletín yeso-cemento. 2009.
- [24] GARCÍA FIGUERO, July Altagracia; Trabajo Fin de Master, “La incorporación de la cáscara de mejillones en conglomerantes yeso, cal y cemento”, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [25] Villanueva, Luis de; “Estudios de yeso, resistencia al fuego”. Boletín del yeso. 1982.
- [26] Gomis Yagües, Vicente; “El yeso como materia prima.”, Universidad de Alicante. 2013.
- [27] Emison S.A.; Hornos rotatorios, [online]; <http://www.emison.com>, 2018.
- [28] Le Chatelier , H . L.; Recherches experimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Dunod, Paris; 1887.
- [29] Cavazzi, A.; Kolloid; 1913.

- [30] Traube, J.; Kolloid-Z; 1919.
- [31] Luis Moneo Pecos, Protección de recipientes de gases licuados y/o hidrocarburos con revestimiento de morteros modificados para evitar fenómeno de BLEVE, Tesis Doctoral UMH, 2014.
- [32] AENOR. UNE-EN 102031. Yesos y escayolas de construcción. Métodos de ensayos físicos y mecánicos.
- [33] L. E. Chassevent (Etude des Variations de Volume des plâtres, pendant et après leur prise, Revue des Matériaux. 1.949
- [34] Gibson, C. S., and Johnson, R. N. Investigations of the Setting of Plaster of Paris, J. Soc. Chem. Ind., 51:25T, 1932.
- [35] Ostwald, W. y Wotski, P.; Kollid-Z., 1920.
- [36] Rohland Z.; Anorg. Chem.; 1914.
- [37] AENOR. UNE-EN 13279-1:2009: Yesos de construcción y conglomerados a base der yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones
- [38] UNE-EN 998-1:2010 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.
- [39] AENOR. UNE-EN 998-2:2012: Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería.
- [40] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, Estadística Minera de España, 2015.
- [41] Riba Arteriu O. y Macau Vilar, F., Situación, características y extensión de los terrenos yesíferos en España, I Coloquio internacional sobre las obras públicas en los terrenos yesíferos, 1962.

- [42] La Spina Vincenzina, estudio del yeso tradicional en España Fase I, Publicaciones del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte y U.P.C.T.; Julio 2016
- [43] La Spina Vincenzina; estudio del yeso tradicional en España Fase I, Publicaciones del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte y U.P.C.T.; Noviembre 2016.
- [44] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), [online], <http://info.igme.es/cartografiadigital/tematica/rocasindustriales>
- [45] Estadística Minera de España 2015, Ministerio de Industria, Energía y Minas de España, 2017.
- [46] Saint Gobain Placo Ibérica, S. A. Manuales de soluciones constructivas. 2010.
- [47] Knauf España, [online], <http://www.knauf.es/>
- [48] Grupo Uralita, [online], <https://www.pladur.com/>
- [49] Saldivar Larré, Carlos Jorge; “El Grafeno. Propiedades y Aplicaciones”; Facultad de Ciencias y Tecnologías, Universidad Católica Nuestra Señora de Asunción, Asunción, Paraguay. 2008.
- [50] Aoki, Hideo; Dresselhaus, M. S; Faculty of Science, Department of Physics University of Tokyo. Physics of Graphene, Physics and Electrical Eng. Department Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA, USA International Publishing. 2014
- [51] Hernández Gervacio, Claudia ; Tesis ““Grafeno: Estado del Arte”, Centro de investigación en materiales avanzados, S. C.; CIMAV, México; 2015.
- [52] Valencia Giraldo, Asdrúbal; “El Grafeno”; Revista Colombiana de Materiales, Colombia, 2011.

- [53] Geim, A. K. and K. S. Novoselov; "The raise of Graphene", Nature materials, Vol. 6, March 2007; Londres, Reino Unido; 2007.
- [54] Prasanna Chandrasekhar, Conducting Polymers, Fundamentals and Applications: Including Carbon Nanotubes and Graphene, Springer International Publishing editor, Ashwin-Ushas Corporation Marlboro, New Jersey, USA, 2018
- [55] Ayrat M. Dimiev and Eigler, Siegfried, Graphene Oxide: Fundamentals and Applications, Wiley, United Kingdom, 2017.
- [56] Rodríguez González, Claramaria y Oxana Vasilevna,"Propiedades y aplicaciones del grafeno", Ingenierías Enero-Marzo 2008, Vol. XI, nº 38 Universidad Autónoma de Nueva León, UANL, México, 2008.
- [57] Luca Ottaviano and Vittorio Morandi; GraphITA 2011: Selected Papers from the Workshop on Fundamentals and Applications of Graphene; Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2012.
- [58] Del Rio Merino Mercedes, F. Hernández Olivares, y P. Comino Almenara. Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibra de vidrio E. Informes de la Construcción, Vol 56, Nº 493; Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; 2004.
- [59] Intergypsum S.A; Grupo Tablicia; [online]; www.intergypsum.com
- [60] Del Rio Merino, Mercedes; "Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación"; III Encuentro Eurocork, Huelva; 2005.
- [61] González Madariaga, F. J. Tesis Doctoral, Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción; Universidad Politécnica de Cataluña, U.P.C.; 2005.

- [62] González Madariaga, F. J. and J. Lloveras Macia. Mezcla de residuos de poliestireno (EPS) conglomerado con yeso o escayola para su uso en la construcción. Informes de la Construcción; Vol. 60, Nº. 509; 2008.
- [63] Aquagest Levante, S.A.. Grupo Agbar; [online] www.hidraqua.es/
- [64] Antioxidants 3A S.L.; Ficha técnica Acido Policarboxilico TAINOX-68; [online] <http://www.tres-a.net/>
- [65] LUCASLED Smart Savings.; Ficha técnica Grafeno; [online] <http://www.lucasled.es/>
- [66] UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- [67] Box, G. E., W. Hunter, and J. H. Stuart. Estadísticas para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos. Editorial Reverte, S. A. Barcelona (España), 1989.
- [68] Cochran, W. G. and G. M. Cox. Diseños experimentales. México. 1991.

ANEXO 1: PUBLICACIÓN DE ARTICULO DE INVESTIGACION

Título: "Study of compressive strength of gypsum with graphene addition".

Autores: Luis M. Serna Jara, Joaquín Pastor Pérez, José A. Flores Yepes.

Publicación: CEMENT WAPNO BETON

Área Temática: Materiales de construcción

Editor: Stowarzyszenie Producentow Cementu

Año de publicación: 2020

ISSN: 1425-8129.

Artículo de investigación en revista indexada JCR, incluido en Open Access



Wpływ dodatku grafenu na wytrzymałość zaczynu gipsowego

Study of compressive strength of gypsum with graphene addition

Luis M. Serna Jara*, Joaquín J. Pastor Pérez, José A. Flores Yepes

Department of the Higher Polytechnic School of Orihuela, Miguel Hernández University (UMH), Road of Beniel, Km. 3,2, 03312 (Alicante), Spain

*corresponding author: Luis M. Serna, e-mail: luis.serna@goumh.umh.es

Streszczenie

W zaprawach i zaczynach gipsowych popularne jest stosowanie nowych dodatków, które pozwalają na zmianę czasu wiązania i zawartości wody w mieszance. Dodatki umożliwiają również stosowanie różnych kruszyw w zaprawach gipsowych poprawiających ich właściwości. W tej pracy skupiono się na badaniu jednej z właściwości mechanicznych - wytrzymałości na ściskanie zaczynów z mieszanin gipsu z grafenem, w różnych proporcjach. Badania przeprowadzono metodami normowymi. Ciekawe wyniki uzyskano porównując wytrzymałości na ściskanie zaczynów z gipsu bez dodatków z wytrzymałościami zaczynów z gipsu z dodatkiem grafenu, w różnych proporcjach. Grafen spowodował 12% wzrost wytrzymałości na ściskanie.

Słowa kluczowe: gips, grafen, wytrzymałość na ściskanie, dodatki

Summary

Gypsum plasters are related to the use of new additives that allow changing the setting time and the water content of the mixture and also the possibility of applying different aggregates in the mortars, that improve their properties. The objectives on which we have focused in this study, is one of those mechanical properties, the compressive strength, of the mixture of gypsum with graphene, in different proportions, performing the tests by standard methods. Significant results have been obtained comparing the properties of compressive strength of the gypsum plaster without addition, with the results obtained for the gypsum plasters with graphene, in different proportions. Graphene gives a 12% increase in compressive strength.

Keywords: gypsum, graphene, compressive strength, additives

1. Wprowadzenie

W rozwiniętym i zglobalizowanym świecie postęp technologiczny oraz odkrywanie nowych metod produkcji lub ulepszanie już istniejących, nieustannie wiąże się z poszukiwaniem nowych materiałów. Głównie są to znane już materiały, które ewoluują w kierunku poprawy ich właściwości mechanicznych, optymalizacji produkcji lub po prostu poprawy ekonomii.

Celem tej pracy jest zbadanie właściwości mechanicznych zaczynów z siarczanu wapnia modyfikowanego grafenem

Artykuł opiera się na założeniu, że podstawowy surowiec, jakim jest siarczan wapnia, jest już przebadany, znany i szerokostosowany w budownictwie, również jako składnik materiałów o specjalnych właściwościach (1). Na Wydziale Inżynierskim Uniwersytetu Miguela Hernandeza od ponad dziesięć lat prowadzi się badania mające na celu poprawę właściwości zapraw i zaczynów gipsowych. Grafen jest materiałem bardzo uniwersalnym, dlatego pojawiają

1. Introduction

In this world, so developed and globalized, with the technological advance of new techniques or improvement of the existing ones, we are in continuous research and development of new materials. They are mainly the existing materials that have been evolving, always intending to improve their mechanical properties, optimizing their production, or simply, to achieve an economic improvement of their technology.

The goal of this paper is the analysis of the mechanical properties of calcium sulphate plasters modified with graphene additive

This paper is based on the premise that the base element, the calcium sulphate plaster, is already developed, and widely known in the world of construction, also as special material (1). However, in the Engineering Department of the Miguel Hernandez University, the studies from more than ten years were conducted, to improve their properties. Graphene is a very universal material, therefore

się próby wykorzystania jego właściwości również w budownictwie (2). Dodatek grafenu do zapraw i zaczynów ma na celu poprawę ich właściwości, głównie urabialności, zwiększenia twardości oraz odporności na zginanie i ściskanie. Precyzując, celem jest uzyskanie innowacyjnego materiału o lepszych właściwościach, do zastosowań ogólnych w przemyśle, a bardziej szczegółowo w budownictwie, jako materiału okładzinowego wewnątrz budynków przemysłowych i mieszkalnych. Dodatkowo, prefabrykatami wykonanymi z takich spoiw można zastąpić cegły ceramiczne, co wiąże się ze zmniejszeniem emisji CO₂.

Przeglądając literaturę związaną z tematem tynków, można dostrzec wiele odniesień do prac naukowych, w których do tynków dodawane są materiały, mające na celu modyfikację i poprawę niektórych ich właściwości fizycznych. Wśród nich wyróżniamy następujące:

- tynki z włóknami celulozowymi; wyroby gipsowo-włókniste (3) są jednorodną mieszaniną tynku gipsowego i włókien celulozowych z makulatury,
- tynki gipsowe z wypełniaczem korkowym; prowadzone są badania nowych spoiw kompozytowych - betonów, zapraw i tynków, zawierających odpady korkowe i konglomeraty, stosowane najczęściej wewnątrz budynków (4),
- mieszanki konglomeratów spienionego polietylenu [SPE] z tynkami lub zaprawami budowlanymi (5),
- dodatek muszli małż do zapraw gipsowych; właściwości muszli małż pozwalają na zastosowanie ich jako bardzo dobrej jakości kruszywa. Muszle są surowcem odpadowym, więc zastosowanie ich jako kruszywa pozwala na zagospodarowanie odpadu, obniżenie ceny oraz pomaga zmniejszyć zużycie surowca naturalnego, którego z dnia na dzień ubywa (6).

W tej pracy badano odporność na pęknięcie pod obciążeniem ściskającym próbek z siarczanu wapnia, przy różnych udziałach grafenu.

1.1. Właściwości gipsu

Kolor gipsu jest zwykle biały, ale ze względu na zanieczyszczenia materiałami takimi jak glina, piasek, wapień i inne, może mieć kolor różowy, brązowy lub szary. Naturalny gips występuje w przyrodzie w różnych formach, np. alabastru, gipsu jedwabistego, gipsu włóknistego, czy też róży pustyni. Znajdowany jest w różnych formach krystalicznych - w formie selenitu, dużych sześciokątnych kryształów (rysunek 1), jaskółczych ogonów, róż pustyni lub polikrystalicznego alabastru, będącego bardzo czystą, lekko przeświecającą odmianą, w odcieniach szarości lub różu. Istnieją również odmiany bardziej zanieczyszczone. Ponieważ są to minerały polikrystaliczne, mogą się w nich pojawić zanieczyszczenia innych utworów geologicznych.

1.2. Historyczny rozwój spoiw gipsowych

Gips jest składnikiem najstarszych znanych materiałów budowlanych. Już Egipcjanie stosowali gips, co pokazują różne zabytki tego regionu, np. do łączenia bloków w Piramidzie Cheopsa 2800 lat

there are attempts to use its properties also in the field of cement-based materials (2). With graphene addition to the plasters is intended to improve their properties, mainly workability, increase of hardness, resistance to bending, and compression. Summarising the target is to obtain an innovative material of better properties for the applications in the industry in general and more specifically in the construction, as a material of continuous cladding in the interior enclosures in buildings, for industrial and residential use. Also to replace the precast elements in buildings, or to substitute the ceramic bricks, since it means a significant reduction of CO₂ emission.

In the study, carried out with the knowledge on topics related to plasters, we can see an important number of references to scientific works, where different materials are incorporated in the plasters, to modify and improve some of their physical properties; among which we highlight the following:

- plaster with cellulose fibres; fibers-gypsum panel (3), is a homogeneous mixture of gypsum plaster and cellulose fibres, from recycled paper,
- applications of cork in the field of construction; the study of new composite materials based on cork waste and the conglomerates, used most frequently in the construction of buildings: concrete, mortar and plaster/plaster is pursued (4),
- mixes of expanded polyethylene [EPS] waste conglomerates with plaster or plaster for use in construction (5),
- incorporation of the mussel shell in the plaster mortar; this makes it possible to emphasize that the properties of the mussel shell, makes it a material very conveniently to be incorporated as aggregate. The shell of mussels as aggregates is a feasible option for the valuation of the material, which in addition to eliminating the dumping of this material, helps reduce the consumption of a natural resource that is becoming scarcer every day (6).

Resistance to compression fracture has been studied in the work when calcium sulphate is used with graphene additions.

1.1. Gypsum nature

Gypsum colour is usually white, but due to mineral impurities such as clay, sand, limestone and others, it can have pink, brown, and gray colors. Natural gypsum is found in nature in various forms, eg alabastro, silky plaster, fibrous plaster, snow plaster, earthy plaster, and desert rose. It can be found under different states of



Rys. 1. Selenit (7)

Fig. 1. Selenite or "espejuelo" (7)

p.n.e. lub do budowy części podłóg pałacu w Knossos. Egipcjanie używali również gipsu w grobowcach, pokrywając nim kamienne posadzki lub jako tabliczki do malowania i wykonywania materiałów dekoracyjnych i form (7, 8).

W Berberii, w Afryce Północnej w regionie M'zab budowano z gipsu kanały i tamy.

W Europie w średniowieczu również używano gipsu, zwłaszcza w Paryżu i okolicach, do wykonywania robót tynkarskich, podłóg, łączenia drewnianych belek stropowych, ścian działowych lub kominów.

W dekoracji renesansowej gips stosowany był bardzo powszechnie, a od baroku na szeroką skalę stosowane były stiuki gipsowe wykonywane techniką tradycyjną, upiększając wiele dekoracji rokokowych.

W średniowieczu, głównie w rejonie Paryża, gdzie w 1292 r. działało 18 kopalni gipsu, był on używany do wytwarzania tynków, płyt, ścianek działowych i kominów. W okresie baroku i rokoko powszechnie używano tynków ozdobnych, wykonywanych w technice, która dzisiaj nazywana jest „tynkiem paryskim”. Po wielkim pożarze Londynu w 1666 roku produkty te powszechnie eksportowano do Anglii.

Od XVIII wieku stosowanie gipsu jest szeroko rozpowszechnione w całej Europie. W 1768 roku, w Akademii Nauk autorstwa Lavoisiera, przedstawiono pierwsze naukowe wyjaśnienie zjawisk leżących u podstaw wiązania gipsu. Sto lat później Le Chatelier i van't Hoff podają naukowe wyjaśnienie dehydratacji tego materiału, zapoczątkując w ten sposób, trwające do dziś, badania gipsu (7, 9).

Okolo 52% powierzchni wykonywanych w Hiszpanii, wykańczanych jest gipsem. W ciągu ośmiu wieków obecności kultury arabskiej w Hiszpanii (10) gips stał się głównym materiałem dekoracyjnym arabskich mistrzów budowlanych tego okresu, osiągając swój największy blask w czasach dynastii Nasrydzkich sultanów. Sztandarowymi przykładami ich architektury są Alhambra w Granadzie [rysunek 2], Santa María la Blanca w Toledo [rysunek 3] czy Alcázar w Sewilli.

Mimo długiej już historii gipsu, aż do początku XX wieku, nie udoskonalano go w znaczący sposób ani pod względem metod produkcji, ani pod kątem poprawy jakości końcowego produktu.



Rys. 2. Dekoracyjne detale gipsu w Alhambrze w Granadzie (11)

Fig. 2. Decorative details of gypsum in Alhambra of Granada (11)

crystallization, being selenite or mirrors – transparent hexagonal crystals, Fig. 1, being arrowheads or desert roses – twins, alabaster [polycrystalline], being this variety very pure, massive, compact, translucent, with a grey or pink tint. There are also varieties such as Berrugones, being these more impure since they are polycrystalline structures, in which monocrystalline elements mixed with massive formations appear.

1.2. Historical evolution of the plaster

The plaster is part of the oldest known building materials, the Egyptians made fervent use of plaster, as shown in various monuments of the region, forming the joints of the ashlar in the Pyramid of Cheops 2800 years BC, forming part of coatings and floors in the palace of Knossos, in addition to this conglomerating use. The Egyptians made use of the plaster in a large number of tombs, covering the stone of the land as a base for painting and making decorative materials and molds (7, 8).

In North Africa, the Berbers manage to build canals and dams with plaster in the oasis of M'zab.

In Europe, during the Middle Ages, gypsum was also used, especially in the Paris region, in coatings, floors, combined with wooden joists, partition walls, and chimneys.

In the decoration of the Renaissance, the gypsum is used profusely, and from the Baroque, the gypsum stucco is used on a large scale along with the technique of staff and the traditional plasterwork, facilitating many decorations of the Rococo.

During the Middle Ages, mainly in the Paris region, where there were 18 plaster quarries in operation in 1292, gypsum was used in coatings, slabs, partitions, and chimneys. In the Renaissance for decoration. During the Baroque period, the plaster of ornamental plaster and the technique of the staff were very used in the Rococo. The product was exported to England, from the seventeenth century, after the London fire

From the eighteenth century, the use of plaster is widespread throughout European culture. In 1768 the first scientific study of the phenomena that lend base to the preparation of the plaster in the Academy of Sciences by Lavoisier was presented. The hundred years later, Le Chatelier and van't Hoff give a scientific



Rys. 3. Fragment dekoracji gipsowej w synagodze Santa María la Blanca (21)

Fig. 3. Detail of decoration of gypsum in the synagogue of Santa María la Blanca (21)

1.3. Grafen

Grafen był już opisywany i znany od lat trzydziestych XX wieku (13), a już w 1889 r. wspomniano o możliwości powstawania włókien węglowych podczas termicznego rozkładu węglowodorów gazowych. Nazwa grafen została oficjalnie uznana w chemii powierzchni w 1994 roku, po wyizolowaniu monowarstwy grafitu. Jednak dopiero kilka lat temu zainteresowano się ciekawymi właściwościami tego materiału.

To właśnie w 2004 roku lawinowo wzrosło zainteresowanie grafenem, kiedy to Andre Geim i Konstantin Novoselov (14), profesor i doktorant Uniwersytetu w Manchesterze, wyizolowali pierwsze próbki grafenu z grafitu metodą mechanicznej eksfoliacji. Geim i Novoselov (14, 15) wyodrębnili grafen z kawałka grafitu, takiego jak ten, z którego wytwarzane są ołówki, za pomocą taśmy klejącej, która pozwoliła im otrzymać pojedynczą warstwę atomów węgla.

Grafen jest odmianą alotropową węgla (16), płaską sześciokątną teselacją - podobną do plastra miodu, którą atomy węgla tworzą poprzez wiązania kowalencyjne, powstające dzięki hybrydyzacji sp^2 .

W rzeczywistości struktura grafitu przedstawiana jest właśnie jako stos dużej liczby nakładających się warstw grafenu, a wiązania między warstwami są tworzone tylko przez siły van der Waalsa oraz wiązania typu π pomiędzy atomami węgla.

Można uznać, że grafen jest podstawowym elementem struktury grafitu. Grafen to dwuwymiarowy budulec wszystkich innych struktur węglowych. Może być zakrzywiony w fulereny o różnych średnicach, zwijany w jednowymiarową strukturę nanorurek lub układany w stos, jak w trójwymiarowej strukturze graficie (17).

Podstawowe parametry grafenu, według Chandrasekhar (18), to:

- długość wiązań C-C około 1,42 Å,
- grubość około 3,35 Å, która jest zbliżona do odległości międzyplaszczynowych grafitu,
- masa około 0,77 mg / m²,
- powierzchnia właściwa około 2600 m²/g, podobna do węgla aktywnego i znacznie większa niż nanorurek węglowych.

Do bardziej wyjątkowych właściwości należy to, że jest przezroczysty, elastyczny, niezwykle odporny chemicznie, nieprzepuszczalny i przewodzi prąd lepiej niż jakikolwiek znany metal. Grafen skupia w sobie wiele właściwości, których wspólnie wcześniej nie odkryto w żadnym innym materiale i fascynuje naukowców oraz przemysł ze względu na swoje niezwykle właściwości.

Choć po raz pierwszy został otrzymany w 2004 roku, rozgłos zyskał w roku 2010, kiedy to odkrywcy, rosyjscy badacze Andre Geim i Konstantin Novoselov (1), otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

explanation of the dehydration of this material, beginning this way, its uninterrupted study (7, 9).

About 52% of the Spanish surface are gypsum, in the eight centuries of Arabic denomination in Spain (10), the plaster became the main decoration material in the hands of Arabic alarifes, having its maximum splendor in the time of Nazarite sultans. As an example, we can find the Alhambra in Granada [Fig. 2], Santa María la Blanca in Toledo [Fig. 3], or the Alcázar in Seville.

Despite its long history, until the beginning of the twentieth century, the industry does not begin to perfect itself, both in its manufacturing methods and in the increase of its quality, developing as a result an increase in the number of products.

1.3. Graphene

Graphene has already been described and known since the 1930s (13) and in 1889 the possibility of forming carbon filaments by thermal decomposition of gaseous hydrocarbons, was already mentioned. In addition, the word graphene was officially adopted in 1994 after being used as a monolayer of graphite in the surface chemistry. But, it has not been until a few years ago, when its true usefulness has been discovered.

It was in 2004 when the definitive impulse in the study of graphene took place, Andre Geim and Konstantin Novoselov (14), professor and doctoral student of the University of Manchester, isolated the first graphene samples from graphite, using a mechanical exfoliation process. Geim and Novoselov (14,15) extracted the graphene from a piece of graphite, like the one found in any pencil mine, using an adhesive tape that allowed them to extract a sheet of a single carbon atom.

Graphene is an allotrope (16) of carbon, a flat hexagonal tessellation – like a honeycomb, formed by carbon atoms and covalent bonds that are formed from the superposition of the sp^2 hybrids of the carbon atoms.

Actually, the graphite structure is presented as a stack of large numbers of overlapping graphene sheets, and the bond between the various graphene layers are formed only by the van der Waals forces and interactions of the π bonds of the carbon atoms.

It can be considered that graphene is the fundamental unit of graphite structure. Graphene is the two-dimensional material for carbonaceous materials of all other dimensions; it can be curved in OD fullerenes, rolled in 1D nano-tubes, and stacked in 3D graphite (17).

The basic parameters of graphene, according to Chandrasekhar (18), are:

- C-C link distance of approximately 1.42 Å,
- the thickness of approximately 3.35 Å which is close to the interplanar spacing in 3-D graphite,
- mass per unit area around 0.77 mg / m²,

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

Woda

Zaczyny do badań przygotowano z mieszaniny gipsu, grafenu i wody. Do wykonania próbek użyto wody wodociągowej (19). Właściwa ilość wody zapewniła odpowiednie zagęszczenie w formach i czas wiązania, optymalny do przygotowywania próbek do badań.

Gips

Spoivo gipsowe użyte w badaniach spełniało wymagania dla budowlanych spoiw gipsowych B1, określone normą UNE-EN 13279-1 (20). Były one następujące:

- spoiwo zawiera ponad 50% gipsu półwodnego,
- spoiwo może zawierać regulatory czasu wiązania,
- minimalna wytrzymałość na zginanie powinna wynosić 1 N/mm² a wytrzymałość na ściskanie 2 N/mm²,
- spoiwo może być powszechnie stosowane do budowy ścianek działowych, tynków wewnętrznych oraz jako substytut zapraw budowlanych.

Do badań użyto gips szpachlowy zwany też szarym gipsem. Gips ten był używany głównie ze względów ekonomicznych, ponieważ jest uważany za tańszy. Gipsy o większej czystości z pewnością zapewniłyby lepsze wyniki, ale celem było uzyskanie zaczynów do powszechnego stosowania w budownictwie mieszkaniowym i przemysłowym. Właściwości użytego spoiwa gipsowego zamieszczono w tabelicy 1.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI ZASTOSOWANEGO GIPSU, ŹRÓDŁO: PLACO S.A. (21)

TECHNICAL SPECIFICATIONS OF THE PLASTER, SOURCE: PLACO S.A.(21)

Właściwość / Property	IBERPLAST
Klasyfikacja / Classification [UNE-EN-13.279-1:2009]	Gipsy budowlane i konglomeraty zawierające gips w przemyśle budowlanym / Building plasters and gypsum-based conglomerates for the building industry.
Rodzaj / Type	Zgodnie z oznaczeniem Europejskim - gips budowlany B1 / B1 [Building plaster] in accordance with the European denomination.
Odporność na ogień / Reaction to fire	Zgodnie z 89/106/CEE, klasa A1 - ponieważ zawiera mniej niż 1% substancji organicznych nie przyczynia się do pożaru / Euroclass A1 [does not contribute to fire], as it has less than 1% in mass or volume of organic material, according to Directive 89/106/CEE relative to building materials.
Czystość / Purity Index, %	>75
Uziarnienie / Granulometry (mm)	0-2
Stosunek wodno-spoiwowy Water/gypsum ratio (l/kg)	1,0-1,2
Twardość wg Shore'a Shore hardness (Shore C units)	≥45 - średnia wartość, zgodnie z załącznikiem K normy RP 35.01 dla tynków budowlanych B1 / ≥45 - Test mean value according to Annex K of the RP 35.01 Standard for B1 construction plasters
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	> 2 N/mm ²
Wytrzymałość na zginanie Bending strength	> 2 N/mm ²

- the specific surface area of approximately 2600 m²·g⁻¹, similar to the activated carbon and significantly larger than CNT.

Among the most outstanding properties are that it is transparent, flexible, extraordinarily resistant, impermeable, and conducts electricity better than any known metal. Graphene has many properties that had not been found before in any other materials; in today graphene has fascinated scientists and industry, because of its fantastic properties.

Although it was synthesized for the first time in 2004, it rose to fame in 2010 when its discoverers, Russian researchers Andre Geim and Konstantin Novoselov (1) received the Nobel Prize in Physics.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Water

The plasters for this tests were obtained by mixing brown plaster and graphene with water, obtained directly from the drinking water supply system (19). Water was used in the correct amount for the tests being undertaken. Water, in the correct amount, facilitates the setting and distribution of the plaster within the molds, when preparing the test specimens.

Gypsum

Brown plaster, also called black plaster, was used for carrying out the tests. Its nominal properties are defined according to UNE-EN 13279-1 (20) using a construction Gypsum B1, and are the following:

Grafen

Obecnie na rynku dostępne są następujące rodzaje grafenu (18):

- grafen w arkuszach (22); jest to produkt bardzo dobrej jakości. Grafen w arkuszach jest drogi i znajduje zastosowanie w gałęziach przemysłu komputerowego, elektroniki czy nawet aeronautyki, gdzie wymaga się materiałów bardzo wytrzymałych,
- grafen w proszku (23); jest gorszej jakości niż grafen w arkuszach, jednak jest produkowany w dużych ilościach przez co jego cena jest mniejsza.

Do badań użyto grafenu w proszku, którego właściwości przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI GRAFENU UŻYTEGO DO BADAŃ (24)

SPECIFICATIONS OF GRAPHENE IN POWDER (24)

Rodzaj materiału / Material type	Stały proszek / Solid powder
Kolor / Colour	Czarny / Black
Zapach / Smell	Bezwonny / Odourless
Udział cząstek stałych / Solid particles	98%
Średni rozmiar ziarna / Mean size of particles	10 mm
Gęstość / Density	2.2 g/cm ³
Wytrzymałość mechaniczna / Mechanical properties	1.060 GPa
Skład chemiczny / Chemical composition, %	C - 77-87, H - 0-1, N - 0-1, S - 0, O - 13-22

Badania wytrzymałości stwardniałych próbek wykonano na uniwersalnej prasie do badania wytrzymałości, w laboratorium Konstrucyjnym Uniwersytetu Miguela Hernandeza (E.P.S.O.) w Orihueła. Prasa podaje bezpośrednio wartości wytrzymałości na ściskanie.

2.2. Metody

Przygotowano 9 próbek gipsowych jako próbki wzorcowe. Następnie przygotowano 27 próbek zaczynów gipsowych z dodatkiem grafenu. W artykule przedstawione zostaną tylko wyniki odpowiadające wartościom średnim dla każdej z serii. Do wykonania obliczeń użyto oprogramowanie SPSS do statystycznej analizy danych (26).

Plan przeprowadzonych badań wyglądał następująco:

Określenie składu próbek

- Dobór stosunku woda/gips (W/G), umożliwiającego wymieszanie spoiwa.
- Wykonanie próbek o różnych udziałach gips/grafen i bez grafenu.

Zbadanie właściwości stwardniałych kompozytów

W oparciu o normę UNE-EN 13279-2 (25), przygotowano próbki do określenia wytrzymałości na ściskanie. Dziewięć próbek z każdej serii dojrzewało w laboratorium przez 7 dni, w kontrolowanej temperaturze 23±2°C, przy wilgotności względnej RH = 50±5%.

- thick gypsum formed of semihydrate, with more than 50% hemihydrate,
- possible incorporation of setting regulating additives,
- the minimum bending resistance of 1 N/mm² and 2 N/mm² of compression strength,
- it is used as a binder for partitions, in interior coatings, and as secondary construction plaster.

This material has been used primarily for economic reasons as it is considered a less expensive, compared to others of higher purity that would surely offer better results, but would increase the final objective which is the use of these plasters in the civil and industrial fields. The binder that was used has the technical specifications given in Table 1.

Graphene

At present, graphene is marketed under the following types (18):

- graphene in sheets (22). This is a graphene of high quality. The production of graphene in sheets has a high price, and it is used in fields such as computers, electronics, or even aeronautics, where a very strong material is required,
- graphene powder (23). It is of lower quality than graphene in sheets. Its production is higher and has a lower price.

The technical specifications of the graphene are shown in Table 2.

The tests of gypsum specimens were undertaken using a universal testing machine from the Higher Polytechnic School of Orihueła of the University Miguel Hernandez [E.P.S.O.] Construction Laboratory. The machine provides directly, the values of resistance to compression.

2.2. Methods

Nine specimens were prepared as references, for comparing the results obtained for gypsum plasters, with the additive. Subsequently, a total of 27 samples were prepared, to obtain the results from the gypsum plasters with the graphene addition. The results corresponding to the mean values for each of the batches will be presented.

The computer software used was SPSS (26).

Przygotowanie wzorcowego zaczynu gipsowego

Próbki wzorcowe wykonano z zaczynu gipsowego bez dodatku grafenu. Skład próbek przedstawiono w tablicy 3.

Przygotowanie zaczynów gipsowych z dodatkiem grafenu

Przygotowano trzy serie po dziewięć próbek, aby ocenić wpływ dodatku grafenu na wytrzymałość na ściskanie stwardniałych próbek. Grafen dodawano w ilościach 0,05%, 0,08% i 0,10%. Składy poszczególnych serii przedstawiono w tablicy 4:

3. Wyniki

Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek odniesienia i próbek z rafenem przedstawiono w tablicy 5.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla zaczynów gipsowych z dodatkami grafenu w ilościach

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD I OZNACZENIE PRÓBEK Z DODATKIEM GRAFENU.

DOSAGES, QUANTITY AND DESIGNATION OF SPECIMENS WITH GRAPHENE POWDER

Oznaczenie serii Designation of batch	Dodatek grafenu Percentage of graphene, %	Masa grafenu Mass of graphene, g
G1	0.05	1.5
G2	0.08	2.4
G3	0.10	3.0

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE PRÓBEK WZORCOWYCH I PRÓBEK Z GRAFENEM

TEST RESULTS OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF GYPSUM PLASTERS WITH GRAPHENE POWDER ADDITION

Seria / Batch	Zaczyn bez grafenu Plaster without graphene	Zaczyny z grafenem / Plaster with graphene		
		0.05%	0.08%)	0.10%
1 ^a	14.55	14.61	14.77	16.32
1B	14.53	15.11	15.13	15.70
2 ^a	13.80	14.43	14.07	16.82
2B	14.38	14.83	14.75	16.27
3 ^a	15.43	14.57	14.84	16.09
3B	13.45	14.84	14.98	15.97
Średnia / Average value	14.35	14.73	14.76	16.19
Odchylenie standardowe / Standard deviation	0.69	0.24	0.37	0.38
Współczynnik zmienności / Coefficient of variation	0.048	0.017	0.025	0.023
Maksimum / Maximum	15.43	15.11	15.13	16.82
Minimum	13.45	14.43	14.07	15.70
Błąd / Error		0.76	0.74	0.74
Kowariancja / Covariance		-0.012	0.067	-0.063

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD PRÓBEK WZORCOWYCH

THE GYPSUM PASTES REFERENCE SAMPLES

Masa gipsu na serię Mass of plaster per batch, g	Masa wody na serię Mass of water per batch, g	Udział gipsu Content of plaster, %	Udział wody Content of water, %	Stosunek W/G W/G ratio, -
1950	1050	65	35	0.54

The following experimental methods were followed for the preparation of the test specimens:

Determination of the proposed samples

- selection of the minimum water/gypsum [W/G] ratio, to allow the mixing of the paste,
- gypsum in different doses and without graphene.

Properties of the prepared composite materials

For the determination of the compressive strength, a series of 40 mm x 40 mm x 160 mm specimens was prepared, based on Standard UNE-EN 13279-2 (25). Nine specimens per batch were prepared in the laboratory with controlled temperature at 23±2°C and a relative humidity RH = 50±5% and cured for 7 days.

Mixing and dosing of the reference plaster

For the preparation of these tests, the samples of gypsum plaster were taken to serve as a reference for the different samples of the gypsum with graphene addition in different proportions, as presented in Table 3:

0,05%, 0,08% i 0,10% oznaczonych odpowiednio G1, G2, G3 i porównane z próbkami wzorcowymi RF, bez dodatku grafenu.

4. Dyskusja

Uzyskane wyniki pokazują, że dodatek grafenu do zaczynów gipsowych, w każdej zastosowanej ilości, wpływa na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie - rysunek 4. Najlepsze wyniki uzyskano dla największej ilości grafenu, która wynosiła 0,10%. Maksymalna średnia wytrzymałość to 16,19 N/mm². Oznacza to, że wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się o 1,84 N/mm², co odpowiada 12,8%.

Biorąc pod uwagę największą wytrzymałość na ściskanie, uzyskaną w przeprowadzonych badaniach zaczynów gipsowych z dodatkiem grafenu, która wynosiła 16,19 N/mm², można ją porównać z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy.

Berná (8) w rozprawie doktorskiej dotyczącej zapraw gipsowych z dodatkami organicznymi opóźniającymi czas wiązania oraz z wermikulitem wykazuje, że dla stałej ilości domieszki opóźniającej Adifoc wynoszącej 3 ‰, i wermikulitu w ilościach 10%, 20%, 30%, 50% i 70% wytrzymałość na ściskanie nie przekracza 7,26 N/mm², co jest o 55% mniejszą wartością niż dla próbek z grafenem.

García Santos (27), badał wpływ włókien polimerowych na wytrzymałość zapraw gipsowych. Przy 0,3% dodatku włókien akrylowych Dolanit uzyskał wartość na poziomie 1,40 N/mm². Porównując ten wynik do 16,19 /mm² uzyskano wzrost wytrzymałości na ściskanie o 42%. W odniesieniu do zaprawy z 0,5% dodatku włókien poliestrowych Nurel ten sam autor uzyskał wytrzymałość na ściskanie 7,51 N/mm², co jest o 54% mniejszą wartością niż dla próbek z dodatkiem grafenu.

del Río Merino (28) w swojej rozprawie doktorskiej dotyczącej zapraw gipsowych z dodatkami spieniającymi - korkiem, włóknami szklanymi i wermikulitem, wykonanymi na wodzie gazowanej uzyskała wytrzymałość 7,36. N/mm², co jest wartością mniejszą o 55% niż wytrzymałość próbek z grafenem. W badaniach przeprowadzonych z białym gipsem z dodatkiem pianki SKW2 oraz z białym gipsem z dodatkiem perlitu uzyskano wytrzymałości, odpowiednio 5,69 N/mm² i 5,75 N/mm², co oznacza mniejsze wytrzymałości na ściskanie od próbek z dodatkiem grafenu o 65%.

5. Wnioski

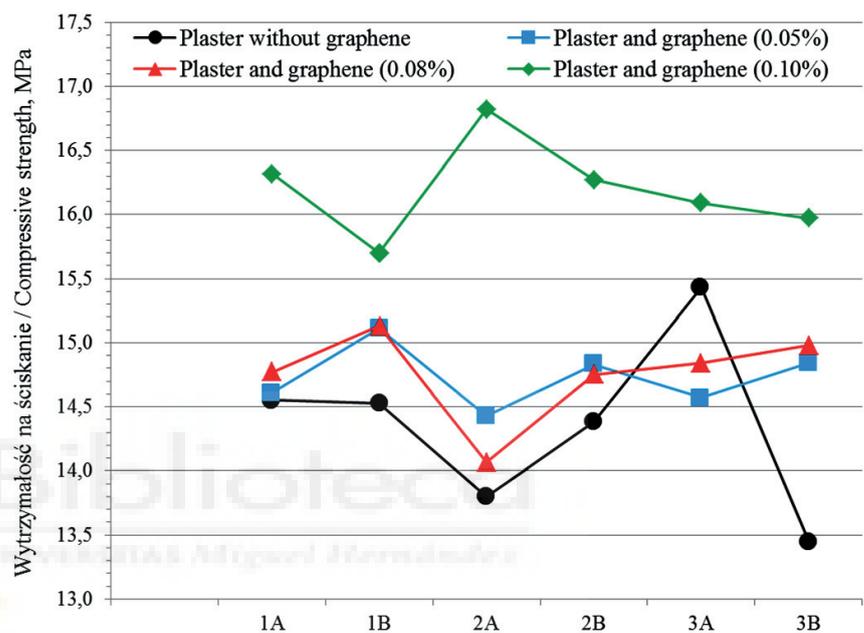
Ogólny wniosek, jaki wylania się z przedstawionych badań, jest taki, że dodatek grafenu do zaczynu gipsowego poprawia wytrzymałość na ściskanie. W badaniach uzyskano wzrost wytrzymałości na ściskanie do 16,19 MPa, względem zaczynu wzorcowego. Dla

Mixing and dosages of gypsum plasters with graphene addition

Three batches of nine specimens per batch were prepared to assess the impact on the compressive strength of the mixture, obtained by adding the graphene powder in 0.05 %, 0.08 %, and 0.10 %, in proportion shown in Table 4:

3. Results

The results of the compressive strength of the specimens of the reference gypsum plasters for the batches with graphene proportions of 0.05 %, 0.08 %, and 0.10 % are shown in Table 5.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie próbek z dodatkiem grafenu i zaczynu wzorcowego bez dodatku.

Fig. 4. The compressive strength of the gypsum samples with graphene addition and reference plaster without the addition

In Fig. 4 the test results of obtained compression strength are presented for gypsum plaster with graphene additions of 0.05%, 0.08%, 0.10%, designated as G1, G2, G3, respectively, and compared with the reference RF gypsum samples, without addition.

4. Discussion

The results analysis is showing clearly that the addition of graphene powder to the plaster in any proportion is increasing the compressive strength – Fig. 4. The best results are obtained for the highest graphene addition of 0.10%, giving a maximum average value of 16.19 N/mm². It means that the compressive strength has been increased by 1.84 N/mm², therefore implying an increase of 12.8%.

Taking into account the highest compressive strength which was obtained with 0.10% addition of graphene powder, equal to 16,19 MPa, we can compare it with the results of other researchers.

porównania, dla zaczynu gipsowego bez dodatków uzyskano średnią wartość 14,35 MPa. Stanowi to wzrost o 12,82% wytrzymałości na ściskanie względem próbki referencyjnej spowodowany 0,10% dodatkiem grafenu do mieszanki.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań wytrzymałości na ściskanie zaczynu gipsowego bez dodatku oraz z dodatkiem grafenu stwierdzono, że dodanie proszku grafenowego powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie. Wzrost ten występuje dla każdego dodatku grafenu.

Uzyskane wytrzymałości są większe w porównaniu z wynikami uzyskanymi w badaniach gipsów z innymi dodatkami, przeprowadzonych przez innych badaczy.

Obecnie, z różnych powodów, grafen nadal jest bardzo droгим materiałem. Jednocześnie na rynku światowym rośnie popyt na grafen. Przedział cenowy na rynku, w zależności od jakości i stopnia czystości grafenu, zwykle waha się od 2 euro za gram (np. ten którego użyto do badań), do 80 euro za gram tlenku grafenu lub nawet 220 euro za gram zredukowanego tlenku grafenu.

Jak wspomniano, w tej pracy zastosowano najtańszy grafen w proszku, czego powodem była użyteczność takiego materiału. Niewielkie ilości dodatku grafenu do zaczynów gipsowych powodują wzrost ceny o około 10% do 15% względem ceny za kilogram zwykłego gipsu. Jednocześnie w badaniach wykazano, że dodatek ten w istotny sposób polepsza właściwości mechaniczne zaczynów gipsowych. W przypadku zastosowania takiej mieszanki do robót tynkarskich można znacząco ograniczyć grubość warstwy tynku i zwiększyć jej twardość, a tym samym zmniejszyć ilość użytego spoiwa gipsowego.

Literatura / References

1. K. Zając, T. Rucińska, A. W. Morawski, M. Janus, Photocatalytic gypsum plasters – studies of air cleaning properties and selected technical parameters, *Cement Wapno Beton*, **24** (1), 10-20 (2019).
2. A. Jamrozik, R. Wiśniowski, S. Stryczek, Effect of graphene oxide on properties of cement slurries, *Cement Wapno Beton*, **23** (1), 59-66 (2018).
3. Intergypsum S.A; Tablicia Group; [on-line];www.intergypsum.com
4. M. Del Rio Merino, New applications of cork in the field of construction, III Encounter Eurocork, Huelva; 2005.
5. F.J. González Madariaga, Doctoral Thesis, Characterization of mixtures of expanded polystyrene (EPS) waste conglomerates with gypsum or plaster, its use in construction; Polytechnic University of Catalonia, U.P.C, 2005.
6. J.A. García Figuerero, Final Master's Project, "The incorporation of the shell of mussels in gypsum, lime and cement", University School of Technical Architecture, Polytechnic University of Madrid, 2011.
7. L. de Villanueva Domínguez, Historical evolution of the construction with plaster. Construction reports. Reports Construction, **56**, n° 493, Superior Council of Scientific Research CSIC - Institute of Construction Sciences Eduardo Torroja, (2004).
8. J.M. Berná Serna, Evaluation of the mechanical properties of mortar additivated with vermiculite gypsum, Doctoral Thesis University Miguel Hernandez, 2013.

Berná (8) in his doctoral thesis on plaster mortars with an organic additive with a delaying effect on the setting process and vermiculite show that for a fixed percentage of 3 ‰ Adifoc additive and vermiculite in percentages of 10%, 20%, 30%, 50% and 70% the compressive strength does not exceed 7.26 N/mm², which is lower than obtained in the presented work of 55%.

García Santos (27) in his doctoral thesis on plaster mortars for 0.3% additive of acrylic fibers (Dolanit), obtained compressive strength of 11.40 N/mm² (average value), comparing to the maximum average compressive strength with graphene additive, our results are higher of 42%. Concerning plaster mortar with 0.5% Polyester Fiber [Nurel], the same author obtained the compressive strength of 7.51 N/mm², which is lower than obtained in the presented work of 54%.

del Río Merino (28) in her doctoral thesis of gypsum plaster and mortar additives with foaming agents, cork, glass fibers, and vermiculite, according to the plaster assays made with carbonated water, obtained the strength of 7.36 N/mm², which is lower than obtained in the presented work of 54.53%. In tests carried out with lightened plaster by adding SKW2 foam, a value of 5.69 N/mm², which is lower than obtained in the presented work by 65%. In trials made of lightened plaster with perlite, the value of 5.75 N/mm², which is lower than obtained in the presented work by 65%.

5. Conclusions

The main general conclusion that emerges from these tests, is that when to the gypsum plaster the graphene powder is added, the compressive strength of the gypsum plaster increases. In our study, we have obtained an increase of compressive strength of up to 16.19 N/mm², caused by graphene powder addition. For comparison, the average value for the plaster with no additives was 14,35 N/mm². This represents an increase of 12.8% in the compressive strength of gypsum plaster, caused by the addition of 0.10% of graphene to the mixture.

From the analysis of the obtained results of the compressive strength tests of gypsum plaster without addition and with the graphene additive, have been established that when to gypsum plaster the graphene powder is added, it causes an increase in the compressive strength. This increase is occurring in any of the proportions in which graphene is added to the reference base plaster.

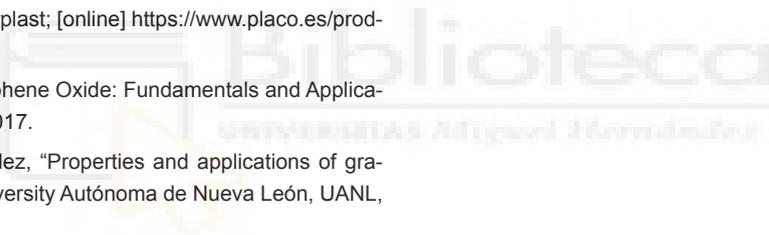
It is also specifically observed that the results obtained are superior compared to other tests carried out with other additives, used by other researchers.

Although graphene is a very expensive material, still today, for several reasons, such as there are only a few companies worldwide that manufacture this material at the industrial level. Simultaneously, there is an increasing demand in the world market. The price range in the market according to the quality and degree of purity of graphene, usually goes from € 2 for one gram of graphene

9. F. Arredondo, Building materials II: Plaster. Eduardo Torroja Institute of Construction, Madrid, 1961.
10. L. y A. Torres Balbás, Momplet Mínguez. The Hispano-Muslim art. Art- Meeting, 1995
11. Patronato of Alhambra [online], <http://www.alhambra-patronato.es/> , 2018
12. Toledo monumental [online], <http://www.toledomonumental.com/>, (2018).
13. C.J. Saldívar Larré, "The Graphene. Properties and Applications "; Faculty of Sciences and Technologies, University Católica Nuestra Señora de Asunción, Asunción, Paraguay. 2008.
14. Royal Academy of Sciences of Sweden, Nobel Prize [online]. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/; (2010)
15. H. Aoki, M.S. Dresselhaus (ed.), Physics of Graphene, Springer, 2014.
16. C. Hernández Gervacio, Tesis "Graphene: State of the Art ", Center for Research in Advanced Materials, S. C.; CIMAV, México; 2015.
17. A. Valencia Giraldo, "Graphene"; Colombian Magazine of Materials, Colombia, 2011.
18. Prasanna Chandrasekhar, Conducting Polymers, Fundamentals and Applications: Including Carbon Nanotubes and Graphene, Springer International Publishing editor, Ashwin-Ushas Corporation Marlboro, New Jersey, USA, 2018.
19. Aquagest Levante, S.A.. Group Agbar; [online] www.hidraqua.es/.
20. AENOR. UNE-EN 13279-1:2009: Plasters of construction and conglomerates based on plaster for construction. Part 1: Definitions and specifications.
21. Gypsum technical sheet iberplast; [online] <https://www.placo.es/products/yesos-manuales/iberplast>.
22. A. M. Dimiev, S. Eigler, Graphene Oxide: Fundamentals and Applications, Wiley, United Kingdom, 2017.
23. C. y O.V. Rodríguez González, "Properties and applications of graphene", Engineering **9** (38), University Autónoma de Nueva León, UANL, México, 2008.
24. Lucasled Smart Savings; technical sheet Grafeno; [online] <http://www.lucasled.es/>.
25. UNE-EN 13279-2:2014 Plasters of construction and binders based on plaster for construction. Part 2: Test methods
26. Camacho, J. Statistics with SPSS for Windows. Madrid, Ed. RA-MA. ISBN 978-84-7897-654-6 (2005).
27. A. García Santos, "Mechanical behavior of gypsum reinforced with synthetic polymers". Doctoral Thesis E.T.S.A. U.P.M., 1988.
28. M. Del Rio Merino, "Elaboration and constructive applications of pre-fabricated panels of lightweight plaster and reinforced with glass fibers and other additives"; Doctoral Thesis E.T.S.A. U.P.M., 1999.

powder, with which this study has been conducted, to € 80/gram of graphene oxide, 220 €/gram of reduced graphene oxide.

As mentioned in this study, graphene powder, which is the cheapest, has been used. The reason why the utility of the use of this material mixed in small quantities with the plaster, represents between 10% and 15% increase in the price of the kilogram of normal plaster. Simultaneously it has been shown in this research that this addition is significantly increasing the mechanical properties of gypsum plasters. When using this mixture in coatings for construction, there will be a reduction in the thickness of the gypsum plaster layer and increasing its hardness, reducing therefore the amount of gypsum mortar to be used.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi agradecimiento a mi director, Dr. Joaquín Julián Pastor Pérez, Catedrático de Escuela Universitaria, por su dirección en esta Tesis Doctoral; así como mi codirector y amigo, el Dr. Jose Antonio Flores Yepes.

Este trabajo de investigación sigue la línea investigadora comenzada por ambos doctores en la búsqueda de nuevos materiales para la construcción, agradeciéndole su esfuerzo y tenacidad para abrir nuevos horizontes en la investigación en este campo, así como su inestimada ayuda para la realización de esta tesis.

Deseo manifestar mi gratitud a mí mujer Alexandra, que me ha apoyado en esta Tesis, y en especial a nuestras dos hijas Nerea y Alex. Sin su apoyo hubiese sido imposible realizar esta tesis doctoral.

No quiero olvidarme de mis padres, Pepe y Fina; ni tampoco de Alejandro y Janet sin ellos no sería posible esto.

Y a todas esas personas que me han ayudado de una forma directa o indirecta a poder desarrollar esta tesis.

Mil gracias por vuestra inestimable ayuda.