

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS TIPOS DE YESO UTILIZADOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS SANITARIAS.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar por el Título de
Ingeniero Químico
Por la Br. Morin L, Gladys.

Caracas, Noviembre de 2004.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS TIPOS DE YESO UTILIZADOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS SANITARIAS.

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Arnaldo Millán.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar por el Título de
Ingeniero Químico
Por la Br. Morin L, Gladys.

Caracas, Noviembre de 2004.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida casa de estudios y a todos los profesores y personal que laboran en ella por luchar cada día por la formación de miles de individuos que, como yo, deseamos surgir y servir a nuestro país.

A Yuly Aguilar por haberme ayudado desinteresadamente a encontrar un tema de tesis en la empresa Sanitarios Maracay, C.A. Igualmente, al personal que labora en esta empresa, por haber confiado en mi para la búsqueda de solución a unos de los problemas que los aqueja y en especial a la Ing. Ludmila Valor quien en todo momento atendió a mis solicitudes y actuó en pro de la materialización de este proyecto.

Al personal docente y administrativo del Instituto Universitario de Tecnología “Federico Rivero Palacio” Región Capital, IUTRC, por haberme abierto las puertas de sus instalaciones y suministrarme toda la ayuda, equipos y materiales necesarios para la elaboración de este Trabajo Especial de Grado.

Al Prof. Santiago Marrero del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Escuela de Geoquímica de la Universidad Central de Venezuela, por haberme atendido tan gratamente y haber sido parte importante en el entendimiento de los resultados de los análisis realizados.

Al personal del Instituto Venezolano de Investigaciones Tecnológicas e Industriales, INVESTI, por haber respondido a mi solicitud tan rápida y certeramente.

Al Prof. Francisco Yáñez quien aclaró mis dudas y trató de encaminar mi proyecto de manera desinteresada e incondicional.

Un agradecimiento especial al Dr. Arnaldo Millán por haber hecho de este su propio proyecto y haber luchado conmigo, incluso contra el tiempo, para el logro de un trabajo de investigación que diera cabida a la realización de nuevos trabajos. Por haber sido más que un tutor, un compañero de ideas y experiencias en el difícil rol de ser un profesional integral.

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, ya que con su ayuda y compañía nos permite emprender y materializar cualquier proyecto en la vida, no importa lo difícil que parezca al principio.

A mis padres, Gladys y Jorge, a mi hermana Georgely y a Luis Edgardo, sin cuya comprensión y compañía no hubiese logrado la feliz culminación de este trabajo.

Morin L., Gladys.

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS TIPOS DE YESO
UTILIZADOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS SANITARIAS.**

Tutor Académico: Dr. Arnaldo Millán. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2004, 139 p.

Palabras Claves: Yeso, Molde, Vida Útil, Resistencia Mecánica, Aditivos, Tamizado.

Resumen.

El yeso es un aglutinante hidráulico que tiene aplicaciones en un amplio espectro industrial, entre los cuales destaca el conformado de piezas cerámicas. En este proceso se aprovechan una de las propiedades más importantes de los moldes elaborados con yeso: su alta porosidad. Con el uso de esta propiedad y como producto de la capilaridad, es posible la obtención de cuerpos cerámicos mediante un proceso denominado colado, en el cual una suspensión de arcillas y silicoaluminatos es vaciada dentro de un molde para dar lugar a la formación de las piezas, entre ellas las sanitarias. Sin embargo, frente a esta ventaja surge la limitante de la baja resistencia de los cuerpos de yeso, la cual está íntimamente relacionada con la duración de su vida útil en los procesos de colado realizados en la industria. Un molde de yeso de alta calidad debe soportar una vida útil promedio de 120 coladas. Sin embargo, los moldes elaborados con el yeso Paria tipo VII, producido en el país, sólo alcanzan como promedio 80 coladas. Con la finalidad de determinar las causas de este comportamiento y mejorar el proceso de elaboración de moldes en una empresa que produce piezas sanitarias en el país, se realizó un estudio comparativo entre el yeso Paria tipo VII y un yeso que permite alcanzar las 120 coladas.

Para ello se realizaron, entre otros, estudios de resistencia a la flexión en tres puntos y microscopía electrónica de barrido (MEB) sobre probetas elaboradas con relaciones yeso/agua 60/40, 57/43 y 54/46, preparadas a condiciones ambientales y de agitación similares. Las probetas cuya relación fue 57/43 presentaron la mayor resistencia para ambos yesos (36,80 kg/cm² para el yeso nacional y 40,57 kg/cm² para el yeso de referencia). La observación de la

superficie de fractura mediante MEB permitió detectar la presencia de impurezas y una marcada macroporosidad en las probetas del yeso nacional. Estos resultados y los conceptos y principios del procesamiento coloidal de polvos, permitieron explicar las razones de corta duración de los moldes de yeso Paria tipo VII respecto a los elaborados con el yeso de referencia.

Con el empleo de un aditivo con efecto acelerante en el fraguado (K_2SO_4 en una concentración de 0,1% en peso) y la aplicación del tamizado de la mezcla, se logró incrementar la resistencia mecánica a un valor de 44,12 Kg/cm². Análogamente, con el uso de un dispersante no iónico (Genapol PF en una concentración de 0,03% en peso) y el empleo del tamizado, se obtuvo una resistencia de 44,21 Kg/cm². A partir de estos resultados se concluyó que con el uso de los aditivos antes citados y la técnica del tamizado, fue posible mejorar la calidad de los cuerpos de yeso nacional alcanzando valores de resistencia mecánica incluso superiores al obtenido para el yeso de referencia, manteniendo en todos los casos los valores del índice de absorción dentro del rango estipulado (38-40%). De esta forma se logró establecer una vía económicamente factible para solucionar un problema latente en una de las industrias cerámicas sanitarias del país.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I.- INTRODUCCIÓN.....	17
II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
III.- OBJETIVOS.....	20
IV.- MARCO TEÓRICO.....	21
IV.1.- MÉTODOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS CERÁMICAS.....	21
IV.2.- PRINCIPIOS DEL PROCESO DE COLADO.....	22
IV.3.- EL YESO Y SUS APLICACIONES.....	24
IV.4.- YESO NATURAL O SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.....	25
IV.5.- EFECTOS DEL CALOR SOBRE EL SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.....	28
IV.5.1.- SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.....	29
IV.5.2.- SULFATO DE CALCIO ANHIDRO.....	32
IV.6.- PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL YESO.....	33
IV.6.1.- OBTENCIÓN DEL HEMIHIDRATO ALFA.....	34
IV.6.2.- OBTENCIÓN DEL HEMIHIDRATO BETA.....	35
IV.6.3.- OBTENCIÓN DE ANHIDRITA SOLUBLE.....	28
IV.7.- YESOS PREPARADOS.....	36
IV.8.- YESO ARTIFICIAL.....	37
IV.9.- REACCIÓN QUÍMICA Y TEORÍA SOBRE EL FRAGUADO.....	38
IV.9.1.- TEORÍA CRISTALINA DEL FRAGUADO.....	39
IV.9.2.- TEORÍA COLOIDAL DEL FRAGUADO.....	40
IV.10.- VELOCIDAD DE FRAGUADO.....	40
IV.11.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO.....	42

IV.11.1.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO CON ADITIVOS.....	43
IV.11.2.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO POR FACTORES FÍSICOS.....	44
IV.12.- EXPANSIÓN DEL FRAGUADO.....	47
IV.13.- POROSIDAD.....	49
IV.14.- RESISTENCIA.....	50
IV.15.- APLICACIONES DEL YESO.....	53
V.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE YESO.....	55
V.1.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE MATERIALES DE YESO.....	55
V.2.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MATERIALES DE YESO.....	55
V.3.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE MATERIALES DE YESO.....	57
VI.- METODOLOGÍA.....	60
VI.1.- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS YESOS.....	60
VI.2.- EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES A MODIFICAR.....	65
VI.3.- MODIFICACIÓN DE VARIABLES Y PREPARACIÓN DE YESO.....	65
VI.4.- EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES.....	65
VII.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.....	67
VII.1.- CARACTERIZACIÓN DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.....	67
VII.1.1.- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	67
VII.1.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	69

VII.1.3.- ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO.....	71
VII.1.4.- ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL.....	73
VII.1.5.- DENSIDAD REAL.....	74
VII.1.6.- GRANULOMETRÍA.....	75
VII.1.7.- MICROSCOPIA ÓPTICA.....	80
VII.2.- ANÁLISIS DEL PROCESO DE DILUSIÓN Y FRAGUADO DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.....	83
VII.2.1.- TIEMPO DE FRAGUADO.....	86
VII.2.2.- TEMPERATURA DE FRAGUADO.....	89
VII.3.- PROPIEDADES DE LAS MASAS FRAGUADAS.....	93
VII.3.1.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN E ÍNDICE DE ABSORCIÓN.....	93
VII.3.2.- DENSIDAD APARENTE.....	96
VII.3.3.- POROSIDAD.....	97
VII.3.4.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROANÁLISIS....	98
VII.4.- EFECTOS DE LAS IMPUREZAS EN EL YESO PARIA TIPO VII.....	110
VII.4.1.- PERÍODO DE DURACIÓN DE MOLDES DE YESO.....	110
VII.4.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE IMPUREZAS.....	114
VII.4.3.- TEORÍA PROPUESTA SOBRE EL MECANISMO DE DETERIORO DE LOS MOLDES DE YESO PARIA TIPO VII.....	115
VII.5.- ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL YESO PARIA TIPO VII.....	118
VII.5.1.- EMPLEO DE ADITIVOS.....	118
VII.5.2.- APLICACIÓN DEL TAMIZADO.....	119
VII.6.- EVALUACIÓN DEL EFECTO DE ADITIVOS Y EL TAMIZADO SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL YESO PARIA TIPO VII.....	120

VII.6.1.- DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y TIEMPO ÓPTIMO DE AGITACIÓN.....	121
VII.6.2.- EFECTO DE LOS ADITIVOS UREA, ZnSO ₄ , KSO ₄ Y GENAPOL PF.....	123
VII.6.3.- INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS SOBRE EL TIEMPO DE FRAGUADO, LA VISCOSIDAD Y LA RESISTENCIA MECÁNICA.....	125
VII.6.4.- ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE FRAGUADO OBTENIDA LAS MEZCLAS ELABORADAS CON ZnSO ₄ , KSO ₄ Y GENAPOL PF....	128
VII.6.5.- APLICACIÓN DEL TAMIZADO Y EMPLEO DE ADITIVOS EN CONCENTRACIONES ÓPTIMAS EN LA MEZCLA 57/43.....	129
VIII.- REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS Y EQUIPOS NECESARIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL YESO PARIA TIPO VII MEJORADO.....	132
IX.- CONCLUSIONES.....	135
X.- RECOMENDACIONES.....	137
X.- BIBLIOGRAFÍA.....	138
APÉNDICE I.....	140
APÉNDICE II.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
TABLA 4.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.....	27
TABLA 4.2.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.....	31
TABLA 4.3.- SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	31
TABLA 4.4.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL SULFATO DE CALCIO ANHIDRO.....	32
TABLA 4.5.- SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO ANHIDRO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	32
TABLA 4.6.- ADITIVOS MÁS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE YESOS.....	37
TABLA 4.7.- EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/POLVO SOBRE EL TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL PARA DIFERENTES YESOS.....	46
TABLA 4.8.- EFECTO DE LA AGITACIÓN SOBRE EL TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL PARA DIFERENTES YESOS.....	47
TABLA 4.9.- EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/POLVO Y EL TIEMPO DE AGITACIÓN SOBRE LA EXPANSIÓN DEL FRAGUADO.....	48
TABLA 4.10.- EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/POLVO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE DIFERENTES YESOS.....	51
TABLA 4.11.- EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/POLVO Y TIEMPO DE AGITACIÓN SOBRE LA RESISTENCIA COMPRESIVA DEL YESO PARÍS.....	52
TABLA 6.1.- ENSAYOS CORRESPONDIENTES AL ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS YESO PARIA TIPO VII Y FORTE.....	64
TABLA 7.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA DE YPTVII.....	68
TABLA 7.2.- FICHA ASTM DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.....	71

TABLA 7.3.- DENSIDAD REAL DE YF Y YPTVII.....	75
TABLA 7.4.- DESVIACIONES DE LOS VALORES DE ÍNDICE DE ABSORCIÓN OBTENIDOS PARA YF Y YPTVII CON DISTINTAS RELACIONES YESO/AGUA.....	94
TABLA 7.5.- DENSIDAD APARENTE DE MASAS FRAGUADAS DE YF Y YPTVII CON RELACIÓN 57/43.....	97
TABLA 7.6.- POROSIDAD DE MASAS FRAGUADAS DE YF Y YPTVII CON CON RELACIÓN 57/43.....	98
TABLA 7.7.- TIEMPO DE FRAGUADO FINAL PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE AGITACIÓN.....	122
TABLA 7.8.- TIEMPO DE FRAGUADO FINAL PARA DISTINTOS TIEMPOS DE AGITACIÓN.....	122
TABLA 7.9.- TIEMPO DE FRAGUADO FINAL DE MEZCLAS 57/43 DE YPTVII CON EL USO DE ADITIVOS.....	127
TABLA 7.10.- VISCOSIDAD DE LAS MEZCLAS 57/43 DE YPTVII CON EL USO DE ADITIVOS.....	128
TABLA 7.11.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN E ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE CUERPOS DE YPTVII ELABORADOS CON MEZCLAS 57/43 TAMIZADAS.....	130
TABLA 8.1.- PRECIO DE VENTA Y TIPO DE PRESENTACIÓN DE YESOS Y ADITIVOS UTILIZADOS.....	132
TABLA 8.2.- DATOS COMPARATIVOS ENTRE EL USO DE YESO PARIA TIPO VII MODIFICADO Y EL EMPLEO DEL YESO NACIONAL SIN ADITIVOS EN CONJUNTO CON EL YESO FORTE.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 4.1.- MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS CERÁMICAS.....	22
FIGURA 4.2.- DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD DURANTE EL PROCESO DE COLADO.....	23
FIGURA 4.3.- CRISTALES DE YESO NATURAL.....	25
FIGURA 4.4.- FORMACIONES NATURALES DE YESO.....	26
FIGURA 4.5.- ESTRUCTURA QUÍMICA DEL SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.....	26
FIGURA 4.6.- SOLUBILIDAD DE SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	27
FIGURA 4.7.- ANÁLISIS TÉRMICO DEL YESO.....	29
FIGURA 4.8.- CRISTALES DE SULFATO DE CALCIO HEMIHI DRATADO.....	30
FIGURA 4.9.- SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHI DRATADO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	31
FIGURA 4.10.- SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO ANHIDRO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	32
FIGURA 4.11.- PROCESO DE FABRICACIÓN DEL YESO.....	33
FIGURA 4.12.- ESTADO INICIAL DE FRAGUADO DE UN YESO PIEDRA.....	39
FIGURA 4.13.- MECANISMO DE FRAGUADO.....	42
FIGURA 4.14.- SOLUBILIDAD DEL SULFATO DE CALCIO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	45
FIGURA 4.15.- CURVAS DE TIEMPO DE FRAGUADO DEL SULFATO DE CALCIO EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	45

FIGURA 4.16.- SUPERFICIE DE FRACTURA DE UN YESO PIEDRA.....	50
FIGURA 4.17.- EFECTO DE LA PÉRDIDA DEL EXCEDENTE DE AGUA SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL YESO.....	52
FIGURA 6.1.- DIAGRAMA DE FLUJS DE ACTIVIDADES A REALIZAR.....	66
FIGURA 7.1.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE YF.....	70
FIGURA 7.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE YPTVII.....	70
FIGURA 7.3.- ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO DE YF Y YPTVII.....	72
FIGURA 7.4.- ANÁLISIS TÉRMICO DUFERENCIAL DE YF Y YPTVII.....	73
FIGURA 7.5.- GRANULOMETRÍA DE LA FRACCIÓN GRUESA DE YF Y YPTVII.....	76
FIGURA 7.6.- RETENIDO DE YF EN TAMICES CON DISTINTOS TAMAÑOS DE ORIFICIO.....	77
FIGURA 7.7.- RETENIDO DE YPTVII EN TAMICES CON DISTINTOS TAMAÑOS DE ORIFICIO.....	77
FIGURA 7.8.- DISTRIBUCIÓN Y FRECUENCIA GRANULOMÉTRICA DE LA FRACCIÓN FINA DE YF Y YPTVII.....	78
FIGURA 7.9.- AIRE ATRAPADO EN MEZCLAS DE YF Y YPTVII FRAGUADAS ENTRE DOS VIDRIOS.....	79
FIGURA 7.10.- MICROSCOPIA ÓPTICA DE LOS POLVOS DE YF Y YPTVII, 200X.....	81
FIGURA 7.11.- PROCESO DE FRAGUADO DE YF Y YPTVII TOMADO MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA, 200X.....	84
FIGURA 7.12.- TIEMPO DE FRGUADO INICLA DE MEZCLAS DE YF Y YPTVII PARA DIFERENTES RELACIONES YESO/AGUA.....	86
FIGURA 7.13.- TEMPERATURA DE FRAGUADO DE MEZCLAS DE YF Y YPTVII PARA DIFERENTES RELACIONES YESO/AGUA.....	90

FIGURA 7.14.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (RM) E ÍNDICE DE ABSORCIÓN (IA) DE YF Y YPTVII PARA DIFERENTES RELACIONES YESO/AGUA.....	93
FIGURA 7.15.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YF DE RELACIÓN 60/40.....	100
FIGURA 7.16.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YF DE RELACIÓN 57/43.....	101
FIGURA 7.17.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YF DE RELACIÓN 54/46.....	102
FIGURA 7.18.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YPTVII DE RELACIÓN 60/40...	105
FIGURA 7.19.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YPTVII DE RELACIÓN 57/43...	106
FIGURA 7.20.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS DE UNA MUESTRA DE YPTVII DE RELACIÓN 54/46....	107
FIGURA 7.21.- SUPERFICIE DE MOLDE DE YPTVII CON 80 COLADAS.....	111
FIGURA 7.22.- SUPERFICIE DE MOLDE DE YF CON 120 COLADAS.....	111
FIGURA 7.23.- MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MEB Y ESPECTRO DE RAYOS X DE IMPUREZAS PARA UN MOLDE DE YPTVII CON 80 COLADAS.....	113
FIGURA 7.24.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE IMPUREZAS PRESENTES EN YPTVII....	114
FIGURA 7.25.- PROCESO DE DETERIORO DE LA SUPERFICIE DE UN MOLDE DE YPTVII.....	116
FIGURA 7.26.- UBICACIÓN DE LAS IMPUREZAS EN LAS MASAS FRAGUADAS DE YPTVII.....	117
FIGURA 7.27.- VARIACIÓN DE RM E IA DEL YPTVII EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN DE LA MEZCLA 57/43.....	121
FIGURA 7.28.- VARIACIÓN DE RM E IA DEL YPTVII EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE AGITACIÓN DE LA MEZCLA 57/43.....	121
FIGURA 7.29.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (RM) E ÍNDICE DE ABSORCIÓN (IA) DE CUERPOS DE YPTVII ELABORADOS CON DISTINTOS ADITIVOS EN LAS MEZCLAS 57/43.....	123

FIGURA 7.30.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (RM) E ÍNDICE DE ABSORCIÓN (IA) DE CUERPOS DE YPTVII ELABORADOS CON GENAPOL EN LA MEZCLA 57/43.....	125
FIGURA 7.31.- TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL DE MEZCLAS DE YPTVII ELABORADAS CON ADITIVOS.....	126
FIGURA 7.32.- TEMPERATURA DE FRAGUADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN MEZCLAS 57/43 DE YPTVII ELABORADAS CON 1% DE $ZnSO_4$, 0,1% DE KSO_4 Y 0,03% DE GENAPOL.....	129
FIGURA 7.33.- GRÁFICO COMPARATIVO DE VALORES DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN OBTENIDO BAJO DIFERECNTES CONDICIONES DE YPTVII..	131

Caracas, 18 de Noviembre de 2004.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Gladys Morín, titulado:

“Estudio comparativo entre dos tipos de yeso utilizados para el conformado de piezas sanitarias”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Belkis Velásquez.

Prof. Johnny Vásquez.

Dr. Arnaldo Millán.

I. INTRODUCCIÓN.

El gypsum es un mineral cuyos derivados tienen amplias aplicaciones debido a que las propiedades de estos pueden ser fácilmente modificadas. Uno de los derivados más importantes es el yeso hemihidratado, el cual es un aglutinante hidráulico producto de la calcinación de dicho mineral. Este producto tiene múltiples usos, entre los de mayor relevancia a nivel industrial se encuentra la fabricación de moldes porosos de yeso para el conformado de materiales cerámicos, donde se incluyen las piezas para uso sanitario.

Las piezas cerámicas sanitarias se obtienen a partir de una pasta conformada por una mezcla de arcillas y otros sílicoaluminatos con agua, llamada comúnmente barbotina. Mediante un proceso denominado colado, la barbotina, con un 30 por ciento en peso de agua aproximadamente, se vierte dentro de un molde de yeso seco o casi seco, cuyas paredes absorben una cierta porción del agua presente. De esta manera, la pasta pierde humedad a través de los capilares del molde, dando lugar a la formación de una masa firme denominada torta, cuyo espesor aumenta progresivamente. Al mismo tiempo, la resistencia a la deformación de la torta se incrementa a valores tales que la misma es capaz de soportar su propio peso.

El proceso antes descrito es empleado en la empresa Sanitarios Maracay C.A, donde se utilizan dos tipos de yesos para la fabricación de los moldes. Estos yesos son de procedencias distintas, por lo que presentan propiedades y características muy diferentes. Uno de ellos se utilizará como referencia debido a que sus propiedades presentan valores acordes con los sugeridos en la bibliografía consultada y su comportamiento es considerablemente más ventajoso respecto al otro yeso.

El objetivo principal de este proyecto es estudiar las causas del bajo rendimiento del yeso de menor calidad y modificar sus propiedades con la finalidad de obtener un material de características cercanas al yeso de referencia. Para ello se caracterizarán ambos yesos con el

fin de determinar su estructura, grado de cristalización y sus propiedades químicas, físicas y mecánicas. Posteriormente se discernirán las variables influenciadas en el yeso de menor rendimiento para luego provocar cambios sobre ellas y lograr la obtención de un yeso mejorado.

Con esto se pretende mejorar el rendimiento y la calidad de las piezas producidas en la empresa Sanitarios Maracay C.A y además incentivar la producción de yeso en la industria venezolana, debido a que el yeso de propiedades mejorables es de origen nacional y el de referencia es importado, siendo los nombres comerciales de estos Paria tipo VII y Forte respectivamente.

II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Uno de los problemas que se presenta en la empresa Sanitarios Maracay, C.A se debe a la diferencia en la vida útil de los moldes según el tipo de yeso utilizado. Los moldes elaborados con el yeso Paria Tipo VII presentan menores valores de resistencia mecánica y mayor desgaste que los elaborados con el yeso Forte, por lo que estos últimos alcanzan una campaña y vida útil más prolongada. En cuanto al número de coladas, los moldes elaborados con yeso Paria tipo VII soportan campañas de 80 coladas, que representan una vida útil de 8 semanas aproximadamente, mientras que los de yeso Forte pueden alcanzar campañas de hasta 120 coladas, durante un período aproximado de 12 semanas. Esta situación conlleva al frecuente reemplazo de los moldes de yeso nacional y se traduce en grandes inversiones económicas, pérdidas considerables de tiempo efectivo de producción y un incremento en los costos de producción por molde.

III.- OBJETIVOS.

Los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este proyecto son los siguientes:

Objetivo General:

Obtener propiedades físicas y mecánicas en el Yeso Paria tipo VII similares a las observadas en el Yeso Forte utilizado como referencia, cuyos valores se encuentran dentro de los rangos indicados en la bibliografía.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar los yesos Forte y Paria tipo VII según sus propiedades estructurales mediante la aplicación de los siguientes métodos: Difracción de rayos X (DRX), análisis térmico gravimétrico (ATG) y diferencial (ATD), microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB).
2. Caracterizar los yesos Forte y Paria tipo VII según sus propiedades químicas, físicas, químicas y mecánicas mediante la realización de ensayos de análisis químico, granulometría, porosidad, densidad, índice de absorción y resistencia mecánica.
3. Determinar las variables a modificar y producir los cambios pertinentes en las mismas para la obtención del Yeso Paria tipo VII modificado.
4. Explorar la posibilidad de sustitución a nivel industrial del yeso Forte por el yeso Paria tipo VII modificado y especificar los requerimientos económicos para el logro de dicho alcance.

IV. MARCO TEÓRICO.

IV.1.- MÉTODOS PARA EL CONFORMADO DE PIEZAS CERÁMICAS.

El conformado de piezas cerámicas puede realizarse por *vía seca* mediante el uso de polvos granulados o por *vía húmeda* mediante el uso de suspensiones o cuerpos plásticos. En la actualidad la tendencia es la vía húmeda, específicamente mediante la utilización de pastas cerámicas de alto contenido de humedad denominadas *suspensiones*, constituidas por un sistema particulado, o fase sólida, suspendida en un medio orgánico y/o acuoso que constituye la fase líquida.

Las masas cerámicas utilizadas para el conformado de piezas generalmente presentan un contenido de humedad mayor al 15 por ciento en peso, sin embargo esta variable depende directamente de las propiedades de la fase sólida y del proceso de conformado. Para dar forma a dichas masas, se cuenta con métodos de extrusión, prensado y moldeo por inyección cuando el conformado de piezas cerámicas se realiza a partir de cuerpos plásticos y con métodos de prensado axial e isostático cuando se realiza a partir de polvos granulados obtenidos a partir de una suspensión. Cuando la pieza se obtiene por conformado directo de una suspensión, el proceso se denomina colado, que consiste en el vertido de la misma dentro de moldes elaborados con materiales porosos. Este es un método económico y sencillo donde se aprovechan las bondades de las suspensiones (Norton, 1975).

En la figura 4.1 se muestra un esquema detallado de los procesos comúnmente utilizados para el conformado de piezas cerámicas:

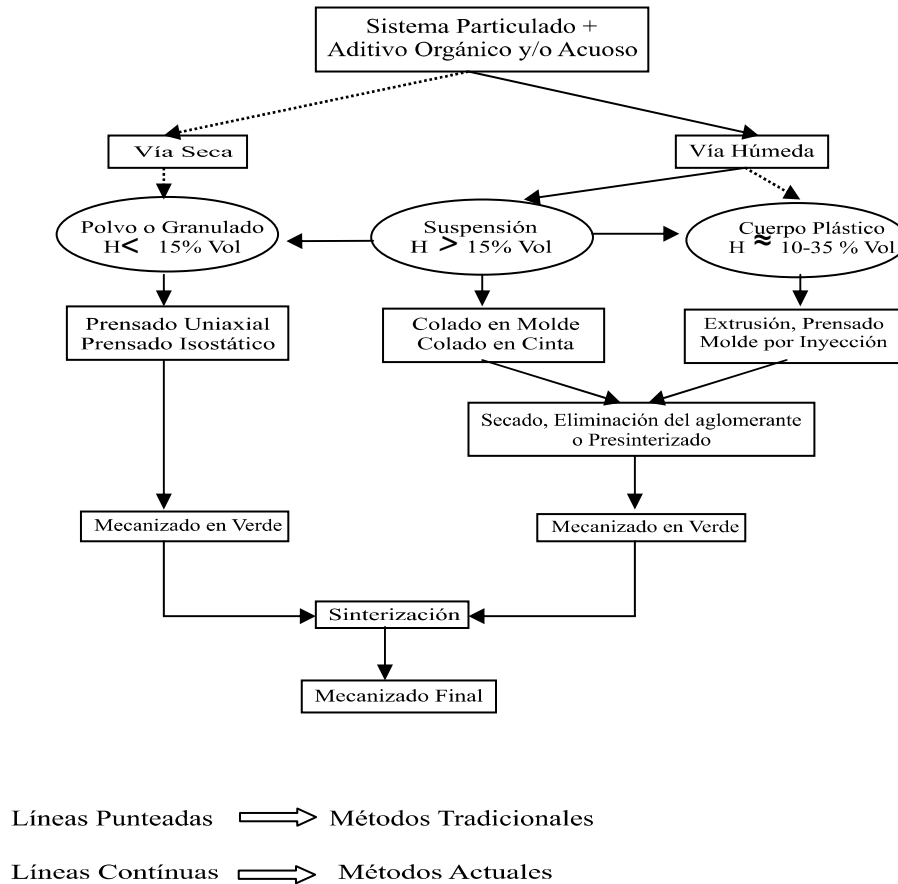


Figura 4.1.- Métodos utilizados para el conformado de piezas cerámicas (Millán, A).

IV.2.- PRINCIPIOS DEL PROCESO DE COLADO.

El proceso de colado para el conformado de materiales cerámicos se emplea para producir objetos que carecen de superficies de revolución, como elementos de uso culinario o piezas sanitarias vitrificadas. Existen dos procedimientos según la pieza a elaborar, el de *colada hueca* que sirve para formar paredes delgadas y uniformes, y el de *colada sólida* para elaborar formas de paredes gruesas e irregulares (Norton, 1975).

El proceso de colado consiste en verter una pasta líquida dentro de un molde poroso de yeso o escayola. La *barbotina*, constituida por una mezcla de arcillas y otros silicoaluminatos con agua, una vez vertida y debido a la fina porosidad del molde, inicia un

proceso de separación sólido-líquido en el que parte del agua contenida en la misma comienza a pasar al molde por fuerzas capilares, logrando que la pasta pierda suficiente agua como para que su punto de fluencia se incremente hasta convertirse en una masa firme. La velocidad de moldeo, o sea, la del crecimiento del espesor de la pared, disminuye con el tiempo porque el agua va encontrando mayor resistencia para difundirse a través de una capa de sólidos que es cada vez más gruesa y, paralelamente, el molde experimenta un fenómeno de saturación de humedad puesto que sus espacios capilares se llenan. Un diagrama ilustrativo de este proceso se muestra en la figura 4.2.

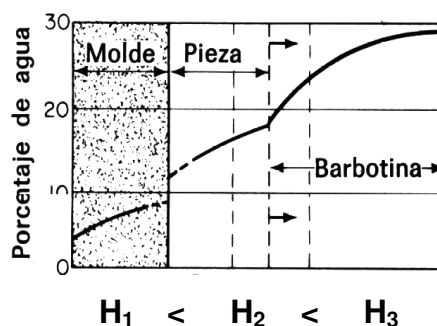


Figura 4.2.- Distribución de la humedad durante el proceso de colado (Norton, 1975).

Por otra parte, el proceso de colado también puede clasificarse en función de las condiciones de presión y temperatura a las que se realice. En condiciones normales se utilizan principalmente moldes de yeso y bajo niveles elevados de presión se hace uso de moldes de resinas porosas instalados sobre sistemas mecánicos cuyo funcionamiento es similar al del filtro prensa. El primero de los casos es denominado *colado por gravedad* mientras que el segundo se conoce como *colado a presión* (Norton, 1975).

Debido al uso del yeso, el colado por gravedad es una técnica ampliamente difundida, versátil y económica. Sin embargo, su rentabilidad está particularmente afectada por la calidad del yeso utilizado para la confección de moldes, razón por la cual este material es constantemente motivo de estudio.

IV.3.- EL YESO Y SUS APLICACIONES.

Desde los tiempos bíblicos, los yesos han sido utilizados como materiales para la construcción. Las paredes de algunos templos antiguos, incluso antes de la era cristiana, fueron construidas con yeso y se cree que los primeros escultores pueden haber hecho modelos de diferentes objetos y decorados con yeso o alabastro. En la actualidad los productos de yeso se encuentran clasificados en muchas categorías basadas en el método de producción o la utilización final de los mismos, siendo los tres grupos más representativos la construcción, la industria manufacturera y la agricultura.

El yeso industrial puede ser dividido a su vez en tres categorías basadas en el grado de cocción del mineral: sin calcinar, calcinado y anhidro, cada una de las cuales tiene aplicaciones distintas basadas en las propiedades de cada material. Entre las mayores aplicaciones industriales del yeso calcinado se encuentran la fabricación de moldes para la elaboración de piezas sanitarias, de alfarería y en la producción de objetos cerámicos decorativos. El yeso para moldes se obtiene a partir del mineral gypsum de alta pureza y es comercializado sobre la base de su necesidad de agua, resistencia, color blanco, tiempo de fraguado y cualidades estrechamente controladas de expansión y contracción (Stanley, 1975).

Las características que hacen del yeso un excelente material para la fabricación de moldes se encuentran relacionadas con su capacidad absorción, posibilidad de copiar finos detalles y facilidad para la reproducción de modelos, lo cual permite su utilización en los procesos de impresión y colado. Se incluyen en esta categoría los moldes dentales y los moldes para el conformado de materiales cerámicos. En ambos casos las características del yeso pueden ser modificadas por distintos métodos, ya sea por el proceso de producción o con el uso de aditivos.

IV.4.- YESO NATURAL O SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.

El yeso natural o gypsum es un mineral formado principalmente por sulfato de calcio dihidratado, cuya fórmula química es $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Es un tipo de roca sedimentaria ampliamente distribuido, formado por la precipitación de sulfato de calcio en el agua de mar y con frecuencia está asociado a otras formas de depósitos salinos, como la halita y la anhidrita, la piedra caliza y el esquisto. El gypsum se origina en zonas volcánicas por la acción de ácido sulfúrico sobre minerales con contenido en calcio; también se encuentra en muchas arcillas como un producto de la reacción de la caliza con ácido sulfúrico. Se halla en todo el mundo; algunos de los mejores yacimientos están en España, Francia, Suiza, Estados Unidos y México. En Venezuela los principales yacimientos se encuentran en los estados Sucre, Yaracuy, Táchira y Guárico, con unas reservas superiores a las 80 mil toneladas métricas (Encarta, 2002; Rodríguez, 1986).

El gypsum cristaliza en sistemas monoclinicos, de forma rómbica con aristas biseladas o en forma de macla (Figura 4.3.a y b). Es brillante, perlado o sedoso. Es incoloro, blanco, gris o de diversas tonalidades de amarillo como consecuencia de impurezas. Los tipos más comunes de yeso, reconocibles a escala visual, son los yesos macrocristalinos o *seleníticos*, los yesos laminados formados por microcristales y los yesos nodulares, reconocidos en muchos casos como *alabastros* (BSECV,1997; Cornelli,1998).

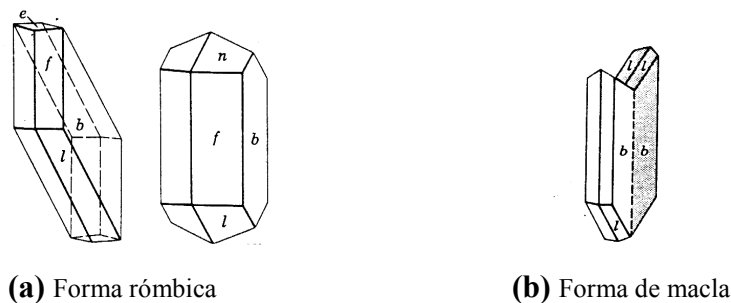
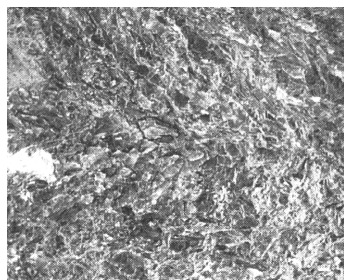


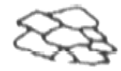
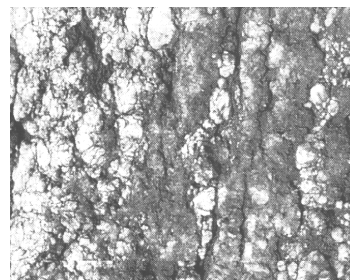
Figura 4.3.- Cristales de yeso natural (Cornelli, 1998).

Los yesos seleníticos usualmente se ordenan en cristales maclados que pueden llegar a alcanzar longitudes métricas y dar lugar a depósitos de alta pureza y bien estratificados (Figura 4.4.a). Los nódulos de yeso o alabastro son cuerpos generalmente compactos, con medidas variables desde unos centímetros hasta magnitudes métricas. Presentan típicamente un color blanco o amarillento y están formados por agregados de microcristales interpenetrados. La dureza de los nódulos puede ser muy elevada aunque el conjunto de las capas en que aparecen los nódulos presenta usualmente proporciones variables de arcillas o carbonatos (Figura 4.4.b)



(a) Yeso selenítico.

Formación de yesos de Sorbas, España



(b) Yeso alabastro

Formación de yesos de Calatayud, España.

Figura 4.4.- Formaciones naturales de yeso (BSECV, 1997).

La estructura química del sulfato de calcio dihidratado esta constituida por iones de sulfato (SO_4^{2-}) cuya forma es tetraédrica, átomos de calcio que están unidos a las moléculas de agua por puentes de hidrógeno y las dos moléculas de agua unidas a un átomo de calcio y dos átomos de oxígeno pertenecientes a dos tetrahedros distintos. En la figura 4.5 se muestra la estructura química del yeso antes descrita:

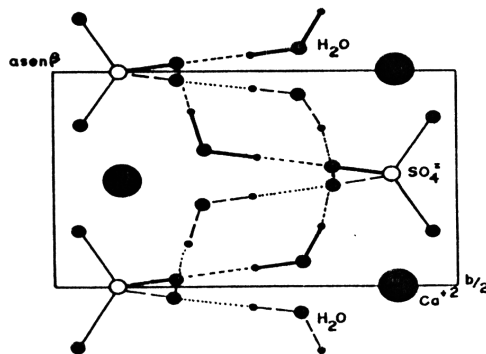


Figura 4.5.- Estructura química del sulfato de calcio dihidratado (Arzabe, 1993).

El gypsum o sulfato de calcio dihidratado presenta las siguientes propiedades físicas:

Tabla 4.1.- Propiedades físicas del sulfato de calcio dihidratado (Arzabe, 1993).

Característica	Valor
Peso Molecular	172,17
Volumen Molar (cm ³)	74,5
Dureza (escala Mohs)	1,5 a 2,0
Densidad (g/cm ³)	2,32
Contenido de Agua (%)	20,92
Estructura Cristalina	Monoclínico

El yeso es soluble en ácido clorhídrico caliente, insoluble en alcohol y en la solución con cloruro de bario da un precipitado blanco de sulfato de bario (Cornelius). Ciertas sales como los cloruros alcalinos y de magnesio, el tiosulfato de sodio, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico, aumentan la solubilidad del yeso en el agua por la formación de sales dobles más solubles. ^(Arzabe) Su solubilidad en el agua es parcial y depende de la temperatura como se muestra en la figura 4.6:

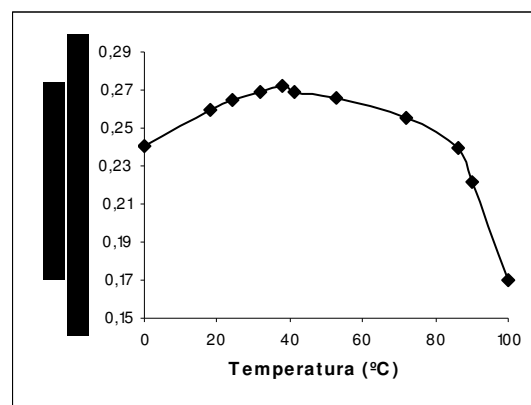


Figura 4.6.- Solubilidad del sulfato de calcio dihidratado en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

El yeso natural presenta un comportamiento característico ante la acción del calor, según el cual puede dar lugar a otras formas de sulfato de calcio: el parcialmente hidratado o hemihidratado y completamente deshidratado, partiendo del mineral con dos moléculas de agua.

IV.5.- EFECTOS DEL CALOR SOBRE EL SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO.

El yeso natural sólo tiene aplicaciones como fertilizante en terrenos secos y alcalinos, como lecho en el pulido de planchas de vidrio y como base en pigmentos para pinturas. Para ser utilizado en otras actividades, como aglutinante hidráulico o como material para la elaboración de moldes, debe ser tratado térmicamente, obteniendo el llamado *Yeso calcinado*.

Cuando el sulfato de calcio dihidratado es calentado pierde parte del agua de constitución. Según el tipo de mineral, a temperaturas superiores a 120°C se elimina una molécula y media de agua, dando lugar al sulfato hemihidratado, cuya fórmula química es $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$. Este tipo de yeso es el constituyente fundamental del llamado *Yeso para modelar*.

Con un posterior recalentamiento a 163 °C (en la práctica cerca o por encima de 200°C) el sulfato de calcio hemihidratado antes obtenido pierde el agua de cristalización y se forma el sulfato de calcio anhidro soluble o anhidrita α , cuya fórmula química es CaSO_4 , también conocido como *Yeso de Construcción*.

Si la temperatura se incrementa sobre los 500-600 °C, no se alcanza ninguna modificación química pero se produce una transformación alotrópica de la forma alfa a la forma beta, dando lugar al sulfato de calcio anhidro insoluble o anhidrita β , producto denominado *Yeso muerto o extracocido*.

Cerca de los 1000 °C se produce una descomposición del anhidro insoluble, con la liberación de cerca del 3% de óxido de calcio o cal viva (CaO) y formación del sulfato de calcio básico; el producto resultante recibe el nombre de *Yeso hidráulico o Yeso de fraguado largo*. Entre los 1360 °C y 1375 °C se produce la disociación completa en óxido de calcio, anhidrita sulfurosa y oxígeno (Arzabe, 1993).

Todas las reacciones de deshidratación antes mencionadas son irreversibles, en la figura 4.7 se presenta una gráfica de análisis térmico diferencial (ATD) y termogravimétrico (ATG), en la cual se ubican dichas reacciones y se observa la pérdida de peso del sulfato de calcio dihidratado, así como su transformación a las diferentes formas cristalinas:

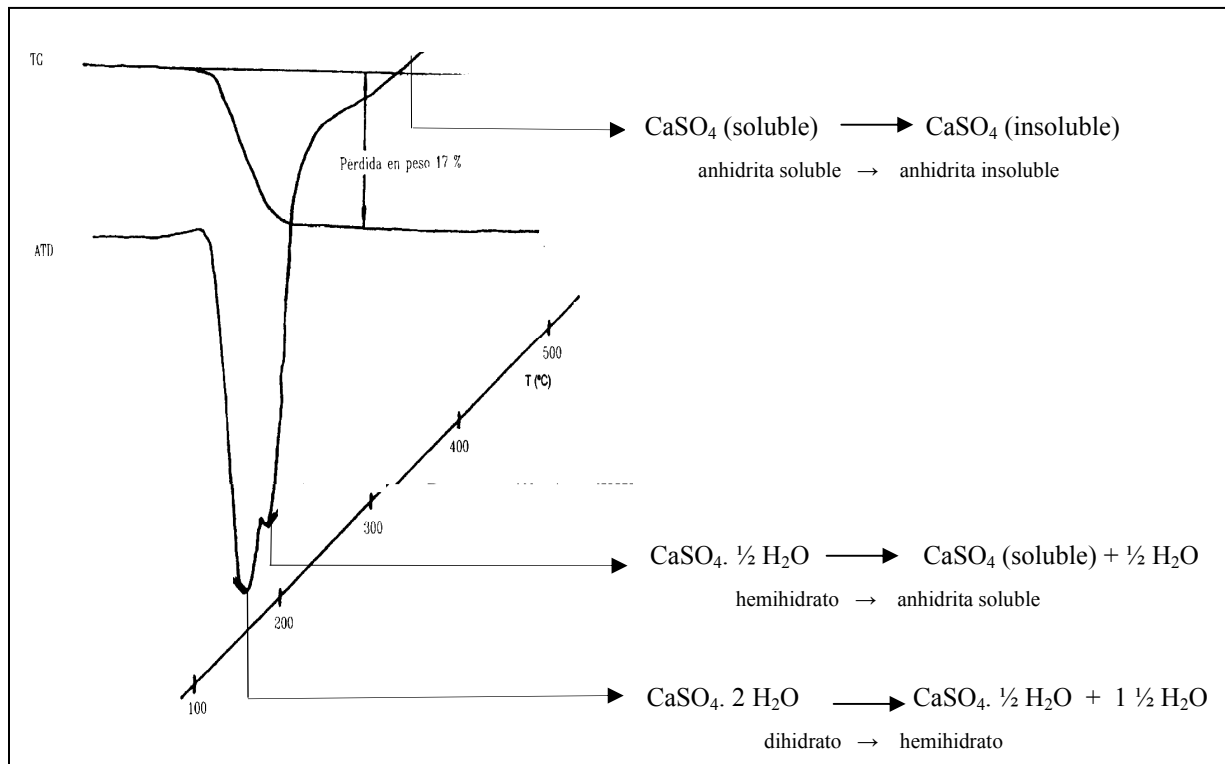


Figura 4.7.- Análisis térmico del yeso (BSECV, 1997).

IV.5.1.- SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.

El sulfato de calcio hemihidratado es producto de la deshidratación del mineral gypsum a temperaturas cercanas a 123 °C. Este posee un porcentaje de agua de constitución que usualmente va desde 5% hasta 7,5%, encontrándose que el valor teórico de esta variable es de 7,5%. El hemihidrato al ser pulverizado y combinado con agua se hidrata nuevamente, fraguado y formando un agregado cristalino compacto.

Dependiendo del método de calcinación, se pueden obtener diferentes formas de hemihidratos. Estas formas se refieren como α -hemihidrato y β -hemihidrato y las diferencias entre ellos son resultado del tamaño del cristal, la superficie y el grado de perfeccionamiento. La forma β posee un mayor contenido de energía y es más soluble que la forma α , pero esta última es más estable o menos reactiva que la β . En cuanto a la cristalografía, el β -hemihidrato es un agregado fibroso de cristales irregulares y planares mientras que α -hemihidrato consiste en finos cristales aciculares o en forma de prismas, los cuales se muestran en las figuras 4.8.a y b (Stanley, 1975; O'Brien, 1986).



(a) Hemihidrato alfa, 400 x.



(b) Hemihidrato beta, 400 x.

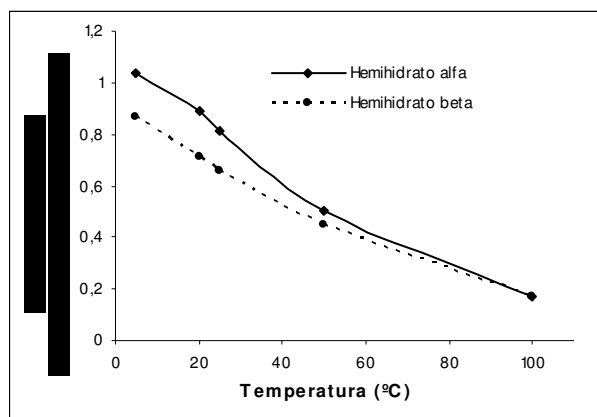
Figura 4.8.- Cristales de sulfato de calcio hemihidratado (O'Brien, 1986).

El sulfato de calcio hemihidratado además de poseer distintas formas de cristalización o de partículas, presenta diferentes propiedades físicas según al tipo de hemihidrato al que se haga referencia. Es por ello que se muestran en la tabla 4.2 las principales propiedades de los hemihidratos α y β , notándose, entre otros aspectos, las notables diferencias de los tiempos de fraguado de los dos hemihidratos, razón por la cual el α -hemihidrato es llamado de *fraguado rápido* mientras que el β -hemihidrato de *fraguado lento*.

Tabla 4.2.- Propiedades físicas del sulfato de calcio hemihidratado (Arzabe, 1993).

Característica	α -hemihidrato	β -hemihidrato
Peso molecular	145,15	145,15
Volumen molar (cm ³)	2,757	2,637
Contenido de agua	6,21	6,21
Peso específico	2,757	2,637
Calor específico medio de 25 a 170°C (Kcal/Kg)	0,227	0,254
Calor de hidratación (cal/mol)	4100	4600
Consistencia normal (cm ³ agua/100 gr hemihidrato)	35	90
Tiempo de fraguado (min)	15-20	25-35
Expansión (%)	0,2	0,38
Resistencia a la flexión, en seco (Kg/cm ²)	66	13
Resistencia a la compresión, en seco (Kg/cm ²)	560	56
Estructura Cristalina	Hexagonal	Hexagonal

En cuanto a la solubilidad en agua de ambos hemihidratos, se observa tanto en la figura 4.9 como en la tabla 4.3 que esta propiedad varía con la temperatura de manera inversamente proporcional, al igual que en el sulfato de calcio dihidratado, siendo la forma alfa considerablemente más soluble que la forma beta.

**Figura 4.9.-** Solubilidad del sulfato de calcio hemihidratado en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).**Tabla 4.3.-** Solubilidad del sulfato de calcio hemihidratado en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

Temperatura (°C)	Solubilidad (partes de CaSO ₄ ·0.5H ₂ O/100 partes de H ₂ O)	
	α -hemihidrato	β -hemihidrato
5	1,04	0,87
20	0,89	0,71
25	0,81	0,66
25	0,68	0,59
50	0,50	0,45
100	0,17	0,17

IV.5.2.- SULFATO DE CALCIO ANHIDRO.

El sulfato de calcio anhidro α o soluble se obtiene cuando el hemihidrato es calentado a temperaturas superiores a los 163 °C, mientras que el anhidro β o insoluble se forma cuando la anhidrita soluble se calienta por encima de los 500 °C. Una de las diferencias entre estas formas es que la anhidrita β presenta mayor estabilidad química y cristalográfica que la forma α . Otras diferencias en cuanto a propiedades físicas son mostradas en la tabla 4.4:

Tabla 4.4.- Propiedades físicas del sulfato de calcio anhidro (Arzabe, 1993).

Característica	α -anhidrita	β -anhidrita
Peso Molecular	136,14	136,14
Volumen Molar (cm ³)	52,8	45,8
Peso específico (g/cm ³)	2,58	2,93
Contenido de Agua (%)	< 1	0
Estructura Cristalina	Hexagonal	Ortorrónica

En la figura 4.10 y en la tabla 4.5 se muestra la manera como varía la solubilidad en función de la temperatura para la α -anhidrita:

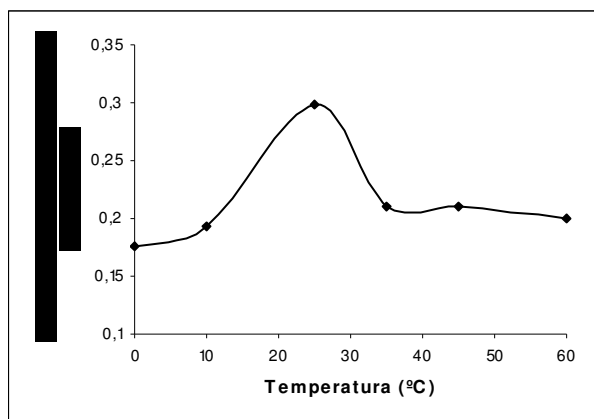


Figura 4.10.- Solubilidad del sulfato de calcio anhidro soluble en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

Tabla 4.5.- Solubilidad del sulfato de calcio anhidro soluble en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

Temperatura (°C)	Solubilidad (partes de CaSO ₄ ·2H ₂ O/100 partes de H ₂ O)
0	0,176
10	0,193
25	0,299
35	0,211
45	0,210
60	0,199

Puede notarse que, a diferencia del sulfato de calcio dihidratado y hemihidratado, la solubilidad aumenta hasta alcanzar un máximo a los 25°C, es decir, a la temperatura ambiente. Después de este punto comienza nuevamente el descenso hasta estabilizarse a una temperatura mayor a los 50°C.

IV.6.- PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL YESO.

La preparación de yeso industrial se encuentra basada en la implantación de una serie de acciones mecánicas y térmicas que van desde la extracción del mineral hasta el tratamiento con aditivos para su mercadeo como yeso de propiedades específicas para diferentes aplicaciones. Estas actividades se dividen en tres etapas básicas como son preparación del mineral, calcinación, formulación y manufactura (Stanley, 1975).

En la figura 4.11 se muestra el diagrama simplificado del proceso típico de fabricación de yeso, las variables que intervienen y las variables a controlar en cada etapa:

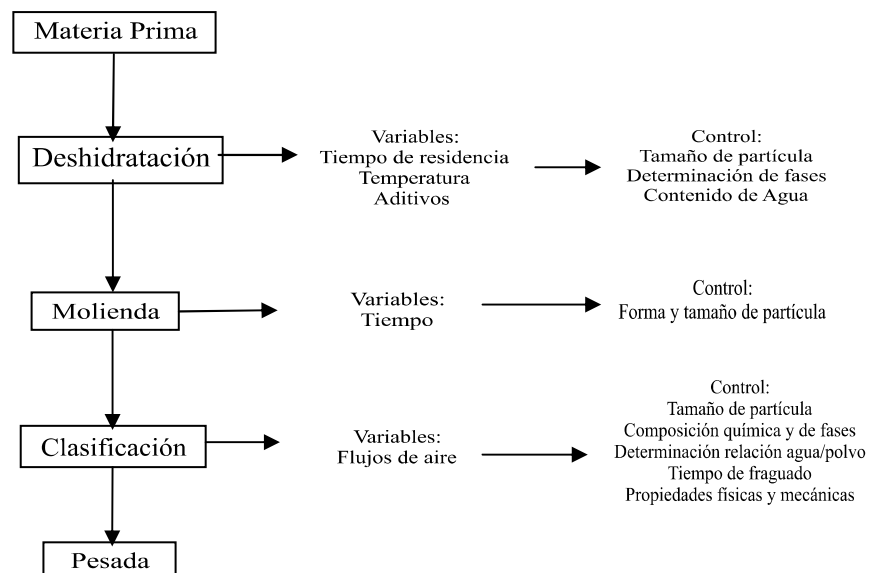


Figura 4.11.- Proceso de fabricación de yeso (BSECV, 1997).

La etapa de calcinación o deshidratación puede considerarse la más importante del proceso porque es en ella donde se reduce el gypsum o sulfato de calcio dihidratado a sus diferentes estados de deshidratación. Es por ello que se han venido desarrollando diferentes métodos de calcinación de alta sofisticación que se clasifican como sigue (Arzabe, 1993):

- Procedimiento al seco a temperaturas mayores a 125 °C: se realiza de manera directa en hornos rotatorios o de manera indirecta en calderas. En la actualidad se han desarrollado diferentes técnicas de producción, una de las más novedosas consiste en la aplicación de un atomizador o spray drying, con el cual se realizan las etapa de cocción y clasificación simultáneamente. Estos procedimientos son comúnmente usados para la obtención de sulfato de calcio hemihidratado tipo beta.
- Procedimiento húmedo a temperaturas iguales o mayores a 100 °C: que puede realizarse bajo presión mediante la utilización de autoclaves, a presión atmosférica en presencia de soluciones salinas o ácidas diluidas y a través del proceso de aridización. Estos procedimientos son comúnmente usados para la obtención de sulfato de calcio hemihidratado tipo alfa.

IV.6.1.- OBTENCIÓN DEL HEMIHIDRATO ALFA.

El sulfato de calcio hemihidratado en su forma α se puede obtener con distintos métodos y condiciones, los cuales se encuentran basados principalmente en los rangos de presión a los cuales se desarrolla el proceso y en la presencia de aditivos. En este sentido se describen las tres principales formas de obtención del α -hemihidratado (Peyton, 1964).

- A presión atmosférica:

El hemihidrato puede obtenerse a presión atmosférica y temperaturas inferiores a 100 °C recurriendo al uso de soluciones salidas o ácidas diluidas que resultan químicamente inertes a la fase sulfática y que reducen la presión de vapor de la fase acuosa a valores inferiores a la del hemihidrato sólo en el agua.

- Bajo altas presiones:

El tratamiento se lleva a cabo en autoclaves a temperaturas que oscilan entre 125 y 150 °C. Puede ser efectuado en presencia de fase líquida o vapor de agua saturado. En el primer caso la adición de pequeñas cantidades de sales de ácidos orgánicos (ácidos succinico, maleico, cítrico) o sales inorgánicas favorecen la formación de cristales prismáticos bien desarrollados. A este yeso se le conoce como **Yeso Piedra o Hidrocal**, utilizado en la producción de distintos tipos de yeso piedra, particularmente aquellos que se emplean en modelos sobre los que se van a construir prótesis dentales.

- En presencia de sales:

El proceso se desarrolla en presencia de una fase acuosa formada por una solución de cloruro de calcio (CaCl_2) al 30% a la temperatura de ebullición de esta solución. En estas condiciones se obtiene un cristal prismático más desarrollado que el obtenido en autoclave. También se propone el uso de cloruro de sodio (NaCl) o magnesio (MgCl_2). Este yeso se conoce comúnmente como **Yeso Piedra mejorado o Densita**, utilizado en odontología principalmente para troqueles, en la construcción de incrustaciones y coronas por el método indirecto.

IV.6.2.- OBTENCIÓN DEL HEMIHIDRATO BETA.

Esta variedad del hemihidrato se obtiene por deshidratación del yeso dihidratado en ambiente seco por diferencias de presión de vapor de agua entre el yeso y el ambiente circundante. En la práctica se obtiene esencialmente el hemihidrato en forma β calentando el mineral a presión atmosférica a temperaturas entre 120 y 150 °C. El producto obtenido es conocido como **Yeso París** en el comercio y posee trazas de yeso dihidratado y de anhídrita soluble que se forman en las zonas subcalentadas o sobrecalentadas del horno o caldera en el cual fue cocido (Peyton, 1964).

El proceso de cocción para la obtención del hemihidrato β puede realizarse en hornos estáticos o rotatorios, con distintas variantes que permiten operar a fuego directo o indirecto y

de manera continua o discontinua. Es el constituyente mayoritario de los yesos empleados para industria cerámica, junto con la arcilla se emplea como fertilizante y en la industria de la construcción se usa para enyesado de paredes y como aditivo retardador del cemento Pórtland (BSECV, 1997).

IV.6.3.- OBTENCIÓN DE ANHIDRITA INSOLUBLE.

La preparación del sulfato de calcio deshidratado es similar a la utilizada en el proceso de obtención del hemihidrato β , se realiza en hornos verticales o rotatorios agregando el mineral molido en cantidades limitadas para lograr una deshidratación completa. Se emplea comúnmente en la industria de la construcción como aditivo para el cemento y para la elaboración de yesos especiales producto de una mezcla de hemihidrato beta y anhídrita insoluble (Arzabe,1993; BSECV, 1997)

IV.7.- YESOS PREPARADOS.

Son aquellos a los cuales se les agregan aditivos para mejorar su trabajabilidad y permitir su proyección mecánica. Estos yesos presentan características diferentes durante la preparación (reología de la pasta, consistencia, escurrimiento, tiempo de fraguado) y/o a nivel de sus cualidades finales (densidad, porosidad, resistencia mecánica, dureza) (Arzabe, 1993)

Los aditivos pueden ser productos naturales y químicos de origen mineral y orgánico, agregados en cantidades estrictamente dosificadas. Por el efecto producido en el yeso, estos pueden clasificarse en modificadores del fraguado, espesantes, retenedores de agua y fluidificantes, necesiéndose para cada tipo un proceso de fabricación determinado. Existe una gran cantidad y variedad de yesos aditivados, una prueba de ello lo constituye la compañía yesera BPB Fórmula que ha desarrollado más de 125 tipos. Entre los yesos aditivados más comunes se encuentran el yeso alumado, el yeso coloidal y el yeso plástico.

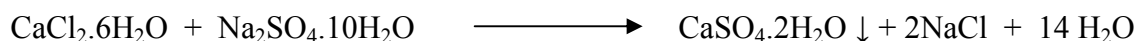
La industria del yeso aditivado es un sector muy interesante debido a la constante necesidad de innovación y aplicación de conocimientos científicos, esto es debido a que los aditivos utilizados no sólo afectan una propiedad sino que influyen de forma notoria sobre otras variables. En la tabla 4.6 se presentan algunos de los aditivos más utilizados y su influencia sobre ciertas variables:

Tabla 4.6.- Aditivos más utilizados en la producción de yesos.

Aditivo	Influencia sobre variables
Alcoholes, ácido cítrico, bórax, azúcar (en concentraciones menores al 1% en peso)	Modificadores de solubilidad. Acción como retardantes del fraguado.
Carbonato de sodio, acetato de calcio	Modificadores de estructura. Acción como retardantes del fraguado.
Sulfato de aluminio, potasio y zinc. Leche, dextrina y aprestos.	Modificadores de resistencia mecánica. Acción como acelerantes del fraguado.

IV.8.- YESO ARTIFICIAL.

El sulfato de calcio dihidratado artificial se puede producir mediante distintos métodos, uno de los más comunes es su obtención como producto precipitado de la reacción entre una solución de cloruro de calcio y una solución de sulfato de sodio o potasio, como se muestra a continuación:

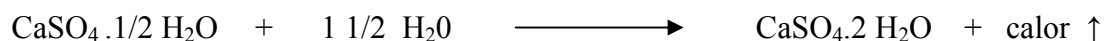


Otro método conocido para obtener el yeso artificial es mediante el tratamiento de las grandes emisiones de dióxido de azufre que se producen en las instalaciones de combustión. El efecto nocivo que tienen estos gases en el ambiente puede disminuirse eliminando el azufre contenido en los mismos. Para ello se procede al lavado sobre cal de los gases, produciendo la precipitación del sulfato de calcio dihidratado, que es otro de los yesos artificiales cuyo nombre común es *Desulfoyeso*.

Adicionalmente, el yeso artificial resulta como producto secundario en algunas industrias químicas como las de ácidos carbónico, cítrico, esteárico y tartárico. Es también uno de los productos obtenidos en un método antiguo para la fabricación de ácido fosfórico, en el cual el fosfato en roca, cuyo constituyente esencial es el fosfato tricálcico, se trata con ácido sulfúrico, produciendo ácido fosfórico y yeso. Controlando la concentración y la temperatura del ácido sulfúrico añadido al fosfato en roca, se puede obtener una mezcla de fosfato monocálcico, dicálcico y yeso. Esta combinación, útil como fertilizante, se conoce como *Superfosfato* (Arzabe,1993).

IV.9.- REACCIÓN QUÍMICA Y TEORÍAS SOBRE EL FRAGUADO.

Teóricamente, cuando el hemihidrato se mezcla con agua, estos reaccionan para formar el dihidrato por medio de la siguiente reacción química:



En la práctica esta reacción se lleva a cabo con un exceso de agua para la obtención de una mezcla sulfato de calcio-agua de mayor trabajabilidad, cuya cantidad puede variar según los requerimientos de la aplicación a la que se vaya a destinar el yeso fraguado, por lo que la reacción anterior queda:



El mecanismo real de esta reacción es interesante desde el punto de vista teórico. Durante los muchos siglos a través de los cuales los yesos han sido útiles a la humanidad, se han propuesto diferentes teorías para explicar el mecanismo de su fraguado. De entre éstas, las más reconocidas son la teoría cristalina y la teoría coloidal del fraguado (Peyton, 1964).

IV.9.1.- TEORÍA CRISTALINA DEL FRAGUADO.

Esta teoría fue propuesta por el químico francés Henry Louis Le Chatelier en año 1807. En 1907 recibió el apoyo del famoso químico holandés Van` Hoff. De acuerdo a la explicación de estos científicos, se producen las siguientes etapas cuando el hemihidrato se transforma en dihidrato (Peyton, 1964; Phillips, 1973; O`Brien, 1986):

1. Parte del sulfato de calcio hemihidratado se disuelve en el agua de la mezcla.
2. El hemihidrato disuelto reacciona con el agua y se convierte en sulfato de calcio dihidratado.
3. El hemihidrato es más soluble que el dihidrato, por lo que la solución se vuelve sobresaturada con respecto a este último.
4. Como todas las soluciones sobresaturadas están en condición inestable, el sulfato de calcio dihidratado precipita, permitiendo que la solución quede en solución saturada que es más estable.
5. A medida que precipita el sulfato de calcio dihidratado de la solución, se disuelve más sulfato de calcio hemihidratado y siguen las mismas etapas hasta que todo el hemihidrato se ha transformado en dihidrato.

De manera que la reacción de fraguado es una disolución continua de hemihidrato y la simultánea precipitación del dihidrato, lo que forma agrupaciones de cristales microscópicos de yeso, generalmente de forma acicular como los mostrados en la figura 4.12 (O`Brien,1986).



Figura 4.12.- Estado inicial de fraguado de un yeso piedra, 400 X.

Según los adelantos químicos realizados después del planteamiento inicial de esta teoría, la misma no se considera totalmente correcta, debido a que se sabe que ni el sulfato de calcio hemihidratado ni el dihidratado pueden existir en solución. Se reconoce que en esta condición sólo pueden existir los iones calcio, sulfato y probablemente diversos complejos entre estas sustancias y el agua (Peyton,1964).

En este mecanismo de reacción para el fraguado pueden distinguirse dos tipos de centros: de disolución y de precipitación, manteniéndose estos alrededor del hemihidrato y el dihidrato respectivamente. La concentración de sulfato de calcio es mayor en los centros de disolución, por lo cual este se moviliza a través de la solución por difusión desde la zona de en la que la concentración es más alta hacia donde es más baja.

IV.9.2.- TEORÍA COLOIDAL DEL FRAGUADO.

La teoría coloidal o del gel fue ideada por M. Michaelis en 1893 y tuvo muchos seguidores entre 1910 y 1920. De acuerdo con esta teoría, el sulfato de calcio dihidratado existe inicialmente como fase dispersa de un gel coloidal a partir del cual crecen los cristales dihidrato. La teoría contó con gran popularidad en su momento debido a que las propiedades del yeso fraguado son similares en algunos aspectos a las de un gel. Sin embargo, como muchas características del comportamiento del yeso pueden ser explicadas en base a la teoría cristalina, esta resulta ser la más aceptable (Peyton,1964).

IV.10.- VELOCIDAD DE FRAGUADO.

Según Peyton (1964), una de las características más importantes y discutidas del yeso es su velocidad de fraguado, debido a que de esta depende la posibilidad que tiene el operador de manipular la mezcla en forma adecuada. Es la rapidez de fraguado la que da lugar a otra propiedad de igual importancia en el yeso que es el *tiempo de fraguado*. Es importante conocer no sólo el tiempo que el material necesita para completar la reacción de

conversión del hemihidrato en dihidrato, sino también hasta donde ha avanzado la reacción química.

La reacción química se inicia en el momento en el que se mezcla el polvo con el agua. La masa recién mezclada tiene una consistencia semifluida y puede ser colada en moldes que presentan las más diversas formas. Sin embargo, a medida que progresa la reacción, constantemente se producen y crecen más cristales de sulfato de calcio dihidratado, aumentando la viscosidad de la masa y dificultando su fluidez dentro del molde. Esta operación requiere, por consiguiente, el conocimiento del tiempo de fraguado inicial y final:

- **Tiempo de trabajo o de fraguado inicial:** es el tiempo durante el cual se puede mezclar y vaciar la mezcla dentro del molde con facilidad. Cuando ha culminado se distingue por la aparición de una masa semiendurecida que ha dejado ser trabajable pero no ha fraguado completamente.
- **Tiempo de fraguado final:** se define como el tiempo necesario para que el material fragüe completamente y pueda separarse del molde sin distorsión o fractura. En este momento, se considera que se ha completado la conversión del hemihidrato a dihidrato en toda su masa.

En general, los tiempos de fraguado inicial y final se miden arbitrariamente por medio de algún ensayo de penetración, aunque ocasionalmente se usan otros métodos como la pérdida de brillo de la superficie de la mezcla de yeso y el aumento de la temperatura, ya que la reacción química es exotérmica. De acuerdo con la reacción, cada vez que una molécula de hemihidrato reacciona con una y media molécula de agua, se forma una molécula de dihidrato y se generan 3900 calorías (Peyton, 1964).

En la figura 4.13 se presenta una gráfica en la que se muestra el mecanismo de fraguado y sus efectos sobre las variables del yeso.

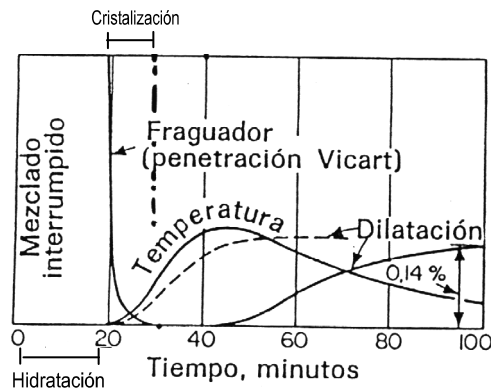


Figura 4.13.- Mecanismo de fraguado (Norton,1975).

El aumento de temperatura observado se retrasa en cierta medida respecto al tiempo de reacción real, debido a que el yeso posee una conductividad térmica relativamente baja y es necesario calentar la masa de agua que se encuentra en exceso en la mezcla. El tiempo transcurrido antes de que el calor sea percibido y comience a elevarse la temperatura se llama **período de inducción** y el fin de este marca el comienzo de la cristalización rápida del yeso. Al final de la elevación de la temperatura, la mayor parte del hemihidrato se ha convertido en dihidrato (Arzabe, 1993).

IV.11.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO.

Según la aplicación a la cual el yeso vaya a ser destinado, se requiere que la mezcla de este posea características determinadas de consistencia y viscosidad por ciertos períodos de tiempo, para que la misma sea manipulada sin inconvenientes. Es en estos casos en los cuales la velocidad del fraguado debe ser medida y modificada para que el yeso pueda ser aplicado antes de que el tiempo final de fraguado se haya completado.

Según la teoría de Le Chatelier, los fenómenos de retardo y aceleración del fraguado del yeso se explican por relaciones de solubilidad. La presencia de un cuerpo extraño en solución puede aumentar o disminuir la solubilidad y con ello la velocidad de disolución del hemihidrato, así como también la formación y solubilidad del dihidrato. En consecuencia, varía el grado de saturación preciso para que comience la cristalización. De acuerdo con esto,

las sustancias que disminuyen la solubilidad del hemihidrato son llamadas *retardadores*, mientras que aquellas que la aumentan son *aceleradoras* (Peyton,1964).

IV.11.1.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO CON ADITIVOS.

Phillips y colaboradores (1973) consideran que el método más práctico y efectivo para el control de la velocidad y el tiempo de fraguado sea adicionar ciertos modificadores químicos a la mezcla de yeso. A continuación se explica la acción de los dos principales grupos de aditivos:

1. **Aceleradores:** Son denominados aceleradores a los aditivos con los cuales se disminuye el tiempo de fraguado. Como ya se ha mencionado, la velocidad del fraguado es influida por la velocidad de disolución del hemihidrato. De manera que la aceleración causada por los aditivos depende de la cantidad y la velocidad de la solubilidad del hemihidrato en comparación con el mismo efecto sobre el dihidrato. Los compuestos más comúnmente usados como aceleradores son los sulfatos, siendo los más utilizados el sulfato de potasio y el sulfato de zinc en una concentración no mayor al 3%. Las sales orgánicas con frecuencia actúan como aceleradoras, entre ellas los cloruros, bromuros y yoduros alcalinos y de amonio. Análogamente, la urea, el dicromato de potasio, el silicato sódico y los oxalatos pueden ser usados como aceleradores de la velocidad de fraguado del yeso.
2. **Retardadores:** El efecto de los retardadores es aún más complicado y delicado que el de los aceleradores debido a que poseen un efecto directo sobre las propiedades finales del yeso fraguado. La creencia común es que ciertos productos químicos forman una cubierta sobre las partículas del hemihidrato, evitando que este forme una solución de manera normal. Los citratos, acetatos y boratos por lo general retardan la reacción, una clasificación más detallada se muestra a continuación (Arzabe, 1993):

- ***Sustancias orgánicas que actúan como coloide protector:*** tienen un elevado peso molecular y las más comunes son las colas, caseína, albúminas, gelatinas y proteínas hidrolizadas.
- ***Sustancias que disminuyen la solubilidad del yeso:*** entre ellos se encuentran la glicerina, el alcohol, acetona, éter, azúcar, ácido cítrico, acético, fosfórico, láctico y sus respectivas sales.
- ***Sustancias que modifican la estructura cristalina del yeso:*** son principalmente el acetato de sodio, el carbonato de calcio y de magnesio.

IV.11.2.- MODIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FRAGUADO POR FACTORES FÍSICOS.

La velocidad de fraguado puede ser influenciada también por ciertos factores físicos que afectan la solubilidad del hemihidrato, la saturación de la solución y la posterior cristalización. Dichos factores son mencionados y explicados a continuación:

1.- ***Efecto de la temperatura:*** la temperatura afecta más al tiempo de fraguado que cualquier otra propiedad de los yesos, tanto la temperatura del agua como la del medio ambiente. Este factor tiene fundamentalmente dos efectos sobre el fraguado de los yesos (Peyton, 1964).

- Un cambio en la temperatura puede provocar una variación en la solubilidad del sulfato de calcio hemihidratado y en la del sulfato de calcio dihidratado, afectando el régimen de la reacción. La relación entre las solubilidades de estos dos sulfatos debe ser de alrededor de 4,5 a 20°C, es decir, se disuelve 4,5 veces más el hemihidrato que el dihidrato. Si la relación es mayor a este valor, el tiempo de fraguado se acortará con respecto al obtenido a 20 °C y viceversa. En la gráfica de la figura 4.13 se muestra la solubilidad del hemihidrato y del dihidrato en función de la temperatura.

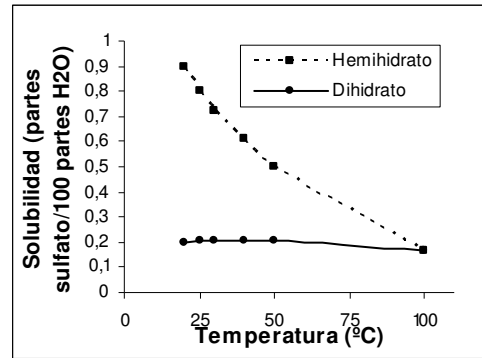


Figura 4.14.- Solubilidad del sulfato de calcio en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

- El otro efecto de la temperatura es sobre la movilidad de los iones. En general, a medida que aumenta la temperatura, la movilidad de los iones sulfato y calcio aumenta, lo cual tiende a aumentar el régimen con que se produce la reacción y hacer que se complete en un tiempo menor.

En la práctica los efectos de estos dos fenómenos se sobreponen y sólo se observa el efecto total. El efecto que sea más poderoso sobre el otro predomina e influye el resultado final. La experiencia ha demostrado que aumentando la temperatura de 20 °C hasta 37 °C, la velocidad de fraguado aumenta ligeramente, mientras que si la temperatura se eleva por encima de 37 °C, el fraguado se hace más lento. A 100 °C las solubilidades del hemihidrato y del dihidrato son iguales (0.17) y en este caso no se produce ningún tipo de fraguado o endurecimiento. Se ha estudiado el efecto de la temperatura sobre el tiempo de fraguado, el cual se presenta en la figura 4.14

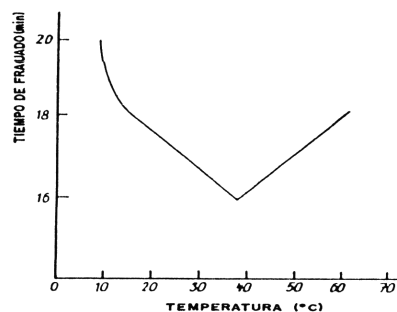


Figura 4.15.- Curva de tiempo de fraguado del sulfato de calcio en agua en función de la temperatura (Arzabe, 1993).

2.- **Efecto de la relación agua/polvo:** puede observarse en la reacción química de hidratación del hemihidrato presentada en el apartado IV.7, que al hacer reaccionar una molécula y media de agua con una molécula de hemihidrato, se produce una molécula de dihidrato. Esto corresponde según los pesos moleculares a 145,15 grs de hemihidrato y 27,02 grs de agua para formar 172,17 de dihidrato. Como se mencionó anteriormente, en la práctica se ha encontrado que no se puede mezclar el yeso con una cantidad tan pequeña de agua y obtener una masa manejable para trabajar. Para mezclar 100grs polvo de yeso y obtener una consistencia adecuada se deben utilizar por lo menos 45 a 50grs (ml) de agua. Es importante destacar que sólo 18,61grs de los 45grs de agua reaccionarán estequiométricamente con los 100grs de yeso y el excedente quedará en la masa fraguada como agua libre, sin tomar parte de la reacción química (Peyton, 1964)

Las cantidades correctas de agua en la mezcla no sólo permiten obtener las condiciones adecuadas de trabajabilidad, sino también propiedades físicas correctas en el material como la resistencia a la compresión. La relación agua/polvo tiene un efecto pronunciado sobre el tiempo de fraguado de la mezcla, observando entre ellos una relación de directa proporcionalidad como se muestra en la tabla 4.7:

Tabla 4.7.- Efecto de la relación agua/polvo sobre el tiempo de fraguado inicial para diferentes yesos* (Peyton, 1964).

Tipo de Yeso	Relación A/P	Tiempo de fraguado inicial (min)
París	0.45	8
	0.50	11
	0.55	14
Piedra	0.27	4
	0.30	7
	0.33	8
Piedra mejorado	0.22	5
	0.24	6
	0.26	9

*Todas las muestras fueron espatuladas con 100 vueltas

3.- **Efecto de la agitación:** cuando se mezcla con agua cualquier tipo de yeso, se debe agitar la mezcla para obtener una masa uniforme. Esta se obtiene con más facilidad si se vuelca el polvo en un recipiente en el que se ha colocado previamente la cantidad de agua necesaria.

La agitación puede hacerse en forma manual o mecánica. Durante este proceso se debe procurar que la incorporación de aire sea la menor posible, lo cual afecta las propiedades mecánicas finales. A menudo, se puede obtener un producto más denso y con menos porosidad sometiendo la mezcla al vacío durante o después de la agitación.

Dentro de límites prácticos, un aumento en la agitación acorta el tiempo de fraguado, ya sea por la velocidad o energía de agitación o una combinación de ambos factores. Incluso si se continúa la agitación una vez comenzado en proceso de fraguado, puede modificarse el tiempo de fraguado, entre otras variables. Cuando se coloca el polvo en contacto con el agua, la reacción química comienza y se forma algo de sulfato de calcio dihidratado. Durante la agitación, el dihidrato recién formado se divide en cristales más pequeños que constituyen nuevos centros de nucleación alrededor de los cuales puede precipitar más sulfato de calcio dihidratado, por lo que se requiere menos tiempo para la completación de la reacción. En la tabla 4.8 se muestra el efecto de la agitación sobre el tiempo de fraguado de distintos tipos de yeso:

Tabla 4.8. - Efecto de la agitación sobre el tiempo de fraguado inicial para diferentes yesos (Peyton, 1964).

Tipo de Yeso	Relación A/P	Vueltas de mezclado	Tiempo de fraguado inicial (min)
París	0.50	20	14
	0.50	100	11
	0.50	200	8
Piedra	0.30	20	10
	0.30	100	8

IV.12.- EXPANSIÓN DEL FRAGUADO.

Independientemente del tipo de yeso que se emplee, es posible notar una expansión de masa durante el cambio de hemihidrato a dihidrato. Dependiendo de la composición de los productos de yeso, se observa una expansión lineal que puede ser menor a 0.06-0.05 por ciento. Este fenómeno puede racionalizarse en base al mecanismo de cristalización, el cual es debido a la acción de empuje de los cristales de yeso durante su crecimiento, según la teoría de Le Chatelier y Van' Hoff. Por su parte, la teoría coloidal atribuye la expansión del

fraguado al hinchamiento del gel por inhibición del agua utilizada en la mezcla (Peyton, 1964; Phillips, 1973).

En el proceso de cristalización, los cristales en crecimiento se entrelazan e interceptan. En los puntos en los que el crecimiento de un cristal es interrumpido por otro, se produce una tensión en dirección al cristal obstructor y un cambio de dirección en el crecimiento de uno de los cristales, lo cual se traduce en una expansión de la masa total. La trayectoria de estos cristales y su movimiento ocasiona la creación de microporos que contienen el exceso de agua requerido en la mezcla. Durante el secado, este exceso de agua se pierde y el espacio entre cristales aumenta.

Es deseable una baja expansión de fraguado en aplicaciones en las que la precisión dimensional es importante, por ejemplo, en las impresiones, modelos de trabajo y troqueles en operaciones odontológicas. En consecuencia, es necesario tener un control de la expansión del fraguado para alcanzar la exactitud requerida en ciertas aplicaciones y este control puede lograrse mediante la regulación de la relación agua/polvo, el tiempo de agitación y el uso de aditivos. En la tabla 4.9 se muestra el efecto de los primeros dos factores sobre el porcentaje de expansión durante el fraguado:

Tabla 4.9.- Efecto de la relación agua/polvo y el tiempo de agitación sobre la expansión del fraguado (Phillips, 1973).

Relación A/P	Tiempo de agitación (min)	Expansión del fraguado (%)
0.45	0.6	0.41
0.45	1.0	0.51
0.60	1.0	0.29
0.60	2.0	0.41
0.80	1.0	0.24

Como puede notarse, cuanto mayor es la relación A/P y mayor el tiempo de mezcla o agitación, mayor será la expansión del fraguado. El efecto de la relación A/P en la expansión del fraguado tiene coincidencia con la teoría, ya mientras más altos son los valores de esta relación, menor debería ser la cantidad de núcleos de cristalización en comparación con mezclas más densas. Por lo tanto, el espacio entre los núcleos es mayor y se produce una menor interacción de crecimiento entre los cristales del dihidrato, con lo cual se origina un

empuje o fuerza externa resultante de menores proporciones. O'Brien y otros autores (1986) concluyeron que la expansión del fraguado es inversamente proporcional a la relación A/P.

Sin embargo, el método más eficaz para el control de la expansión del fraguado es la adición de sustancias químicas. Generalmente el uso de aceleradores reduce la expansión del fraguado. ^(Phillips) Por ejemplo, agregando 4% de sulfato de potasio se disminuye tanto la expansión como el tiempo de fraguado, mientras que el agregado de cloruro de sodio (NaCl) en pequeña concentración aumenta la expansión del fraguado y al mismo tiempo reduce el tiempo de fraguado (Peyton, 1964).

Según los párrafos anteriores que las mezclas de yesos fraguan al aire. Sin embargo, si el proceso de fraguado se lleva a cabo bajo el agua la expansión es llamada **expansión higroscópica** y esta posee una magnitud mayor al doble de la obtenida bajo el aire. Esta razón del aumento de la expansión se relaciona con el crecimiento adicional de cristales y no con alguna diferencia en la reacción química de hidratación. La reducción de la relación A/P hace que aumenten de igual manera ambos tipos de expansiones de fraguado y al aumentar la agitación o el tiempo de mezclado se produce un incremento en la expansión higroscópica (Phillips, 1973).

IV.13.- POROSIDAD.

El yeso fraguado no es más que un agregado enmarañado y tridimensional de cristales aciculares de yeso, que incluyen porosidades microscópicas. Esta porosidad inherente es de dos tipos (O'Brien, 1986):

1. La microporosidad causada por el agua remanente sin reaccionar que queda atrapada en la masa fraguada. Estas cavidades son aproximadamente esféricas y se producen entre grupos de cristales de yeso. (Figura 4.16.a)

2. La microporosidad causada por intensa interacción de los cristales de dihidrato en crecimiento. Estas cavidades son de forma irregular, más pequeñas que las del primer tipo y aparecen dentro de los grupos de cristales de yeso. (Figura 4.16.b)



(a) Microporosidad causada por agua remanente, 2000 X.



(b) Microporosidad causada por rechazo entre los cristales, 2000 X.

Figura 4.16.- Superficie de fractura de un yeso piedra (O'Brien, 1986).

Ambos tipos de porosidad inherente son afectados por la relación A/P, pero en modos opuestos. Una relación baja de A/P deja menos agua sin reaccionar en la masa fraguada y de este modo se disminuye la proporción del primer tipo de porosidad, pero también aumenta el efecto del crecimiento del número de cristales durante el fraguado debido a que los núcleos de crecimiento disponibles están concentrados en un volumen total de mezcla más pequeño. Por ello, la interacción entre cristales es más efectiva y aumenta el segundo tipo de porosidad. Para cualquier relación A/P, la proporción total de porosidad inherente es el resultado de la sumatoria de los dos efectos inversos, siendo el primero de ellos el predominante. De manera que, para cualquier tipo de yeso la porosidad total disminuirá en la medida que se reduzca el valor de la relación A/P.

IV.14.- RESISTENCIA.

La resistencia de los productos de yeso por lo general se expresa en términos de la resistencia a la compresión o flexión en tres puntos. En la teoría del fraguado, la resistencia de un yeso aumenta rápidamente conforme endurece el material, después de cumplido el tiempo de fraguado inicial. Sin embargo, el contenido de agua libre del producto afecta

considerablemente esta propiedad. Por esta razón, se reconocen dos resistencias a la compresión del producto de yeso: **la resistencia húmeda y la resistencia seca**. La primera es la obtenida cuando la muestra contiene toda o parte del agua en exceso utilizada en la mezcla y la segunda se obtiene cuando la muestra es sometida al secado y pierde parte importante del agua en exceso. La resistencia seca puede ser dos o más veces mayor a la resistencia húmeda (Phillips, 1973; Peyton, 1964).

La resistencia compresiva del yeso piedra fraguado, formado a partir del α -hemidrato, es siempre mayor que la del yeso París, obtenido del β -hemihidrato, hasta el punto que el más débil de los yesos piedra tiene más resistencia que el más resistente de los yesos París. Estas diferencias de resistencias compresivas entre yesos se debe a la influencia de varios factores, entre los más importantes se pueden enumerar (O'Brien, 1986; Phillips, 1973)

1.- **Efecto de la relación agua/polvo (A/P)**: En general, las propiedades de resistencia están inversamente relacionadas con la relación A/P y, por lo tanto, con la cantidad total de porosidad inherente. Así, cuando se requiera una máxima resistencia en un material determinado, la relación A/P debe ser tan baja como sea posible, siempre y cuando esta no vaya en detrimento del agua mínima necesaria para la completación de la reacción de hidratación. La obtención de altas resistencias mediante el uso de bajas relaciones de A/P se encuentra también relacionada con expansiones de fraguado relativamente altas. En la tabla 4.10 se muestra del efecto de la relación A/P sobre los valores de la resistencia a la compresión

Tabla 4.10.- Efecto de la relación agua/polvo sobre la resistencia a la compresión de diferentes yesos* (Peyton, 1964).

Tipo de Yeso	Relación A/P	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)
París	0.45	125
	0.50	110
	0.55	90
Piedra	0.27	315
	0.30	210
	0.50	110
Piedra mejorado	0.24	385
	0.30	220
	0.50	110

*Todas las muestras fueron mezcladas con 100 vueltas.

2.- **Efecto del secado:** la remoción de toda el agua libre por secado a baja temperatura duplica la resistencia, pero esta no aumenta hasta que se haya eliminado el último 2% de agua libre contenida en la muestra. En este sentido, puede observarse en la figura 4.17 que aunque la masa de yeso pierda hasta 7% del 8.8% del agua en exceso que contiene, no se produce un cambio apreciable en la resistencia compresiva del material. Mientras que cuando se pierde 7.5% de su excedente de agua, la resistencia comienza a aumentar en forma pronunciada.

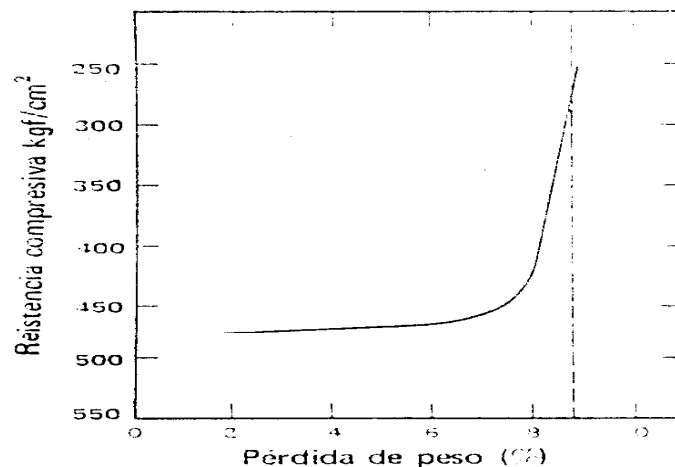


Figura 4.17.- Efecto de la pérdida del excedente de agua sobre la resistencia a la compresión del yeso (Peyton, 1964).

El tiempo que demora en sacarse un material a base de yeso varía de acuerdo con el su volumen, así como con la temperatura y humedad a la que se conserva. A temperatura y humedad normales, puede demorar aproximadamente 7 días en perder su excedente de agua (Peyton, 1964).

3.- **Efecto del tiempo de agitación:** En general, con un incremento del tiempo de mezclado aumenta también la resistencia a la compresión. Sin embargo, esta relación de directa proporcionalidad se cumple hasta cierto límite porque si la mezcla es sobremezclada, los cristales de yeso formados se rompen, resultando un menor entramado cristalino en el producto final y por lo tanto una menor resistencia. A continuación se muestra la tabla 4.11 en la que se puede observar el efecto del tiempo de agitación sobre la resistencia a la compresión para diferentes relaciones A/P.

Tabla 4.11.- Efecto de la relación agua/polvo y tiempo de agitación sobre la resistencia a la compresión del yeso París (Phillips, 1973).

Relación A/P	Tiempo de agitación (min)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)
0.45	0.5	234
0.45	1.0	262
0.60	1.0	179
0.60	2.0	138
0.80	1.0	110

Un efecto poco considerado y que afecta en gran medida la resistencia mecánica es el relacionado con el aire incorporado y atrapado en la masa fraguada, a medida que este aumenta decrecen los valores correspondientes a esta propiedad. Existen varios métodos que impiden la incorporación excesiva de aire, fundamentalmente se debe mezclar agitando moderadamente, agregando el yeso al agua de forma espolvoreada, sometiendo la mezcla a vacío o vibración, o bien pasarla por un tamiz después de preparada.

4.- *Efecto del uso de aditivos:* la incorporación de un acelerador o retardador hace que disminuya la resistencia seca y húmeda del producto de yeso. Tal disminución de resistencia puede atribuirse parcialmente a la sal adicionada como adulterante y a la reducción de la cohesión intercrystalina (Phillips, 1973).

IV.15.- APLICACIONES DEL YESO.

El criterio para la selección de cualquier producto de yeso depende de su uso y de las propiedades físicas requeridas para cada aplicación en particular. La principal aplicación que se le ha dado al yeso desde tiempos inmemorables es en el área de la construcción, fundamentalmente porque es un material a prueba de fuego, de gran versatilidad y de económica aplicación. Por estas razones es usado para la fabricación de enlucidos, placas y paneles, para revestimiento de paredes, entre otros.

Por otra parte, del grupo de materiales utilizados para la profesión odontológica, los yesos resultan ser los más útiles. En este grupo se encuentran el yeso parís, el yeso piedra y

los revestimientos para colados. Estos son utilizados para la toma de impresiones bucales, la confección de moldes para el procesamiento de prótesis y en los revestimientos para colados de aleaciones de oro y cromo-cobalto.

En agronomía, el yeso en sus diferentes formas también se utiliza para la corrección de terrenos alcalinos o arcillosos calcáreos, así como para su fertilización por su acción como alimento directo y por favorecer la fijación del amoníaco y la disociación del potasio.

También es utilizado en la elaboración de moldes para la industria cerámica, en principio, por su gran capacidad de absorción de la humedad de las pastas de arcillas en las actividades de colado y prensado de pastas plásticas. Hasta ahora ningún producto poroso ha podido reemplazar el yeso en los procesos de colado con un costo de producción cercano al encontrado con la utilización del mismo. Específicamente, los moldes de yeso utilizados en la industria cerámica de sanitarios deben presentar una gran resistencia y dureza, expansión del fraguado relativamente baja y superficies perfectamente lisas para no dejar huellas en el exterior de las piezas.

Entre otros usos menores del yeso puede mencionarse la fabricación de papel, pinturas, tizas de uso escolar y vendas enyesadas, así como la preparación de sales nutritivas para bovinos, la conservación de frutas y la desinfección y desodorización de fosas biológicas (Stanley, 1975).

V.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE YESO.

Para una adecuada identificación, utilización y tratamiento de materiales de yeso, es importante el conocimiento de sus propiedades químicas, físicas y estructurales, así como su comportamiento térmico. Por ello es interesante conocer el alcance de los principales métodos utilizados para caracterizar estos materiales.

V. 1.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE MATERIALES DE YESO.

La composición química del llamado yeso calcinado depende del origen y el tratamiento que se le ha dado a la materia prima (gypsum). Puede decirse que este yeso se compone principalmente de sulfato de calcio hemihidratado, pero adicionalmente puede contener anhidrita o restos de gypsum por mala cocción de la materia prima e impurezas como óxidos, carbonatos, sílice y materia orgánica (ASTM C 471)

El comportamiento de un yeso está dado por su composición química y también por su “*Composición real o mineralógica*”, la cual se determina mediante la complementación de los resultados del análisis químico con los obtenidos mediante la aplicación de métodos de análisis estructural como difracción de rayos X (DRX), microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis térmico (AT). A partir de estos ensayos se determinan las fases cristalinas, el tamaño de los cristales y su forma, detectando incluso la presencia de aditivos.

V.2.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MATERIALES DE YESO.

El análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los yesos proporciona información determinante y fundamental al momento de interpretar y concluir sobre la

correcta aplicación que puede darse a un yeso en particular. Los ensayos realizados incluyen estudios sobre las propiedades del hemihidrato, características del proceso de mezcla y fraguado, así como características de las masas fraguadas, tales como su capacidad para soportar cargas. A continuación se describen los principales ensayos y su alcance.

- **GRANULOMETRÍA:** La distribución y tamaño de partícula en el polvo de yeso constituye un factor de gran importancia en el proceso de fraguado, ya que puede aumentar la velocidad de fraguado por la facilidad de hidratación del hemihidrato al hallarse en partículas de menor tamaño y afectar directamente la resistencia del producto fraguado por la variación en la porosidad.
- **DENSIDAD REAL Y APARENTE:** el conocimiento de esta propiedad es útil tanto para el polvo de yeso como para la masa fraguada en relación a la masa/volumen utilizada.
- **TIEMPO DE FRAGUADO:** Como se mencionó en la sección IV.8, existen dos tiempos de fraguado, el tiempo de fraguado inicial y el tiempo de fraguado final. Desde el punto de vista práctico, el conocimiento del primero de ellos resulta más útil porque establece el tiempo útil de trabajabilidad de la mezcla de yeso.
- **TEMPERATURA DE FRAGUADO:** la reacción de hidratación del sulfato de calcio hemihidratado es exotérmica, por lo que la variación de la temperatura en función del tiempo suministra información sobre la conversión completa de hemihidrato a dihidrato.
- **ÍNDICE DE ABSORCIÓN:** esta propiedad proporciona información en relación a la capacidad de la muestra fraguada para absorber agua, siendo determinante en los procesos de conformado de cuerpos cerámicos por colado.
- **RESISTENCIA A LA FLEXIÓN:** bien sea la resistencia a la compresión o a la flexión, en seco o en húmedo, esta propiedad constituye uno de los requerimientos

fundamentales al momento de elegir un tipo de yeso para una actividad en particular, debido a que suministra información en relación a la carga máxima que puede soportar una masa de yeso fraguada y permite inferir sobre su resistencia al desgaste.

- **POROSIDAD:** es una propiedad importante en los cuerpos de yeso fraguado, pues de ella depende en gran medida la capacidad de absorción. Los ensayos de porosidad suministran información relativa a la distribución y tamaño de los poros en las masas de yeso fraguadas y permiten relacionar esta propiedad con la resistencia mecánica de las mismas.

V.3.- MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE MATERIALES DE YESO.

El conocimiento de la estructura de un material es indispensable para comprender sus propiedades y para determinar dónde y cómo utilizarlo a fin de lograr los mejores resultados. La estructura de un material se estudia en tres niveles (Arzabe, 1993):

1. **Macroestructura:** es la que se observa a simple vista o con ayuda de instrumentos de poca magnificación, encontrándose que puede ser una macroestructura de conglomerados (yeso), de macroporos (hormigón), de poros finos (materiales cerámicos), estructura fibrosa (madera, plásticos), estructura estratificada (plásticos a base de papel) o estructura de grano mullido (materiales granulares y polvorientos).
2. **Microestructura:** puede ser cristalina o amorfa. A menudo las formas cristalinas y amorfas son tan sólo diferentes estados de una misma sustancia, siendo las primeras formas ordenadas y las segundas carecen de arreglo definido. También existe la posibilidad de que una sustancia exista en diferentes formas cristalinas llamadas modificaciones, a este fenómeno se le conoce como polimorfismo. En el caso del yeso se tienen las formas alfa y beta del hemihidrato y de la anhidrita.

3. **Estructura Interna:** En este tipo de estructura interfieren los tipos de enlaces (covalente o iónico). La estructura interna de las sustancias que constituyen un material determinan la resistencia mecánica, la dureza, el carácter refractario y otras propiedades importantes del material.

Para la determinación de la macroestructura y microestructura de los materiales se hace uso de técnicas sofisticadas, entre las cuales se encuentran (Arzabe, 1993).

- **DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX):** esta es una técnica de caracterización de las diferentes fases cristalinas presentes en un material. Cada fase presente produce un espectro característico que puede ser identificado por la distancia interplanar y por la intensidad de los picos presentes.
- **ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO (ATG):** esta técnica también llamada termogravimetría determina las pérdidas de peso de las muestras en polvo en función de la temperatura a la que se encuentra el horno bajo un ciclo térmico preestablecido, permitiendo su identificación.
- **ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL (ATD):** es una técnica que registra las diferencias de temperatura entre la muestra en estudio y un material de referencia, generalmente alúmina calcinada. Es muy utilizada como método de caracterización e identificación.
- **MICROSCOPIA OPTICA (MO):** esta es la técnica más utilizada para la caracterización microestructural de los materiales junto con MEB. Permite la observación y análisis de estructuras cristalinas mediante la utilización de diferentes aumentos o magnificaciones de zonas específicas.
- **MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) Y MICROANÁLISIS:** Se basa en las propiedades de interacción entre los electrones y la materia, dirigiendo un haz de electrones acelerado a bajas presiones hacia la superficie de la muestra. La

microscopía de barrido con microsonda para análisis es la más idónea para el estudio de materiales y superficies de fractura, debido a que permite la visualización en detalle de microestructuras y la realización del análisis de sus composiciones, así como identificar las fases presentes.

VI.- METODOLOGÍA.

La metodología empleada para llevar a cabo este proyecto establece como primer punto el estudio preliminar de las propiedades características de los yesos Forte y Paria tipo VII. En base a estos resultados se seleccionaron las variables a modificar en el yeso nacional con la finalidad de que su comportamiento y características fueran similares a las del yeso utilizado como referencia. A continuación se describe de manera detallada los pasos a seguir para el logro de los objetivos planteados:

VI.1.- DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DEL LOS YESOS.

Para ello se realizaron análisis químicos, físicos y mecánicos de las muestras de yeso Paria tipo VII y Forte como se explica a continuación:

VI.1.1.- Análisis Químico: Este análisis fue realizado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Tecnológicas e Industriales (INVESTI) bajo la norma COVENIN 3640:2000 y ASTM C 471, logrando la determinación de: agua combinada, sílice y otros residuos insolubles, óxido de hierro, aluminio, calcio y magnesio, carbonato de calcio y de magnesio, trióxido de azufre, cloruros, sulfato de yeso hemihidratado, dihidratado y anhidrita.

VI.1.2.- Análisis de propiedades mecánicas: Con este ensayo se estudió el comportamiento de los yesos Paria tipo VII y con yeso Forte (yeso de referencia) a partir de las relaciones yeso/agua 60/40, 57/43 y 54/46, analizando un mínimo de cuatro (4) probetas para cada relación. Las probetas tienen forma de barra de sección cuadrada de 2,5 cm por lado y 15 cm de largo. Las mismas fueron secadas a temperatura ambiente por un período de siete (7) días, para luego ser rectificadas con papel de lija a fin de obtener caras plano /paralelas. Por último, fueron sometidas al ensayo de flexión en tres puntos en un equipo MTS.810 Material Test System (USA).

VI.1.3.- Análisis de propiedades físicas: Este análisis incluyó el estudio de las propiedades mencionadas en la sección V, mediante los siguientes procedimientos:

1) Granulometría: En la literatura consultada no existen referencias sobre la influencia del tamaño de partícula y/o la distribución granulométrica del polvo de hemihidrato durante el proceso de mezcla yeso/agua. La norma ASTM C59-90 es la referencia disponible y en ella se indica que los yesos para moldeo deben pasar completamente a través de la malla 30 y al menos el 90% debe pasar a través de la malla 100. Por estas razones y debido al rango de sensibilidad de los equipos, se realizó el estudio granulométrico de ambos materiales mediante tamizado para la fracción gruesa y mediante granulometría láser para la fracción fina.

- **Granulometría mediante tamizado:** Este método se basó en la utilización de tamices de diferente tamaño de orificio, a través de los cuales se pasaron las muestras de yeso en polvo. Se utilizaron mallas 50, 80, 200 y 325, debido a que en la malla 30 no quedó ningún retenido. La malla 50 fue empleada para realizar el tamizado de mezclas yeso/agua y las demás para la determinación de la distribución granulométrica de la fracción gruesa en húmedo, mediante el lavado con alcohol isopropílico de 70% de pureza, el cual no reaccionó con el hemihidrato por su alta concentración. Los resultados se expresaron en función del porcentaje de polvo retenido en cada malla respecto a 100 gramos de masa inicial (ASTM, 1990).
- **Granulometría láser:** A partir de este método fue posible estudiar la distribución de partículas cuyo tamaño es inferior a 200 μm . Para ello se hizo uso del equipo MasterSizer 2000, de la casa Malvern Instruments (Inglaterra). El mismo tiene instalada una unidad Hidro 2000G con capacidad de 1 litro para colocar el líquido con la muestra, en este caso se utilizó etanol de 98% de pureza. Cuenta además con un rango de medición de 0,02-2000 micrones y las mediciones se realizan a través de la aplicación de láser de helio y neón.

2) Densidad real (δ): Se utilizó un volunómetro de vidrio, calculando la densidad mediante la relación entre la masa conocida de polvo de yeso agregado dentro del equipo y el volumen de líquido desplazado al agregar el polvo, reportando los valores en gr/cm^3 .

3) Densidad Aparente (τ): Para su determinación se aprovecharon las probetas de yeso utilizadas en los ensayos mecánicos. A estas se les determinó el largo, ancho y espesor con la finalidad de calcular el volumen. La densidad resultó de la relación entre el peso de la probeta en gramos y el volumen calculado en cm^3 .

4) Porosidad: La porosidad presentada como porcentaje para las masas fraguadas de yeso Forte y Paria tipo VII, se determinó a partir de la densidad real de los polvos y la densidad aparente de los cuerpos, como se indica en el Apéndice 1.

4) Tiempo de fraguado: Se determinó el tiempo de fraguado inicial mediante el ensayo de Vicat (Apéndice 1) de mezclas de yeso Forte y Paria tipo VII, preparadas mediante agitación manual con relaciones yeso/agua de 60/40, 57/43 y 54/46, realizando un mínimo de tres determinaciones para cada ensayo.

5) Temperatura de fraguado: La determinación de la variación en la temperatura con el tiempo se realizó mediante el uso de un termómetro, comenzando las mediciones una vez culminado el proceso de agitación manual de las mezclas de Paria tipo VII y yeso Forte elaboradas con relaciones yeso/agua de 60/40, 57/43 y 54/46.

6) Índice de absorción: Para determinar esta propiedad se procedió a la inmersión en agua de las probetas sometidas al ensayo mecánico, por un período de tres horas, considerando el peso antes y después de la inmersión (Apéndice 1).

VI.1.4.- Análisis estructural: Para la caracterización estructural de los polvos de yeso Forte y yeso Paria tipo VII, se emplearon las siguientes técnicas y equipos.

1) Difracción de rayos X: Para este ensayo se utilizó un difractómetro marca BRUKERS-AXS (USA), modelo D8-Advance. Este consta de un tubo de cobalto, un filtro de hierro y una longitud de onda de 1,78897. La velocidad de adquisición del espectro fue de 3°/min.

2) Análisis térmico gravimétrico: Este ensayo fue realizado en un equipo TMA (análisis termomecánico) de marca SETARAN (Francia), constituido por una balanza electrónica modelo G-70, cuya apreciación es de 0,01 gramos, y un horno eléctrico con una velocidad de calentamiento de 3,33 °C/min y una sensibilidad de 2,5 mV/ mg. Se utilizaron crisoles de sílice vítrea para colocar las muestras de polvo de hemihidrato, calentando estas últimas hasta una temperatura máxima de 360 °C. Adicionalmente el equipo cuenta con un módulo de recolección y tratamiento de datos modelo C-COM.

3) Análisis térmico diferencial: Para la realización de este ensayo se utilizó un equipo automatizado marca T.A 2000 (USA), constituido por un software General Utility 2.0 y un módulo de recolección de datos Data Análisis 2.0. Se empleó caolín calcinado como muestra de referencia y un crisol de alúmina para la colocación de la muestra de polvo de yeso. Ambas fueron sometidas a idénticos regímenes de temperatura en un horno calentado a una velocidad controlada, en el registro obtenido o termograma, aparecen una serie de picos cuya posición respecto a la horizontal viene determinada por la composición química, estructura cristalina de la sustancia y cambios energéticos debido a las reacciones que tienen lugar, siendo posible determinar si estas reacciones son endotérmicas o exotérmicas. Las endotérmicas generan picos por debajo de la horizontal y las exotérmicas por encima de la misma.

4) Microscopía óptica: Este ensayo se realizó en un microscopio óptico de luz polarizada marca Nikon AFX-DX (Japón), conectado a una cámara fotográfica de Labophot 2 – Pol de 35 mm, de la misma marca. Las muestras de los yesos en polvo fueron dispersadas en etanol de 98% de pureza para el estudio de la forma y tamaño de los cristales de hemihidrato. También se realizó el seguimiento del fraguado de mezclas de yeso Forte y Paria tipo VII preparadas mediante la disolución de un gramo de muestra de yeso en polvo en un mililitro de agua destilada (relación yeso/agua 50/50), con el fin de determinar la forma y distribución de los cristales de dihidrato formados.

5) **Microscopía electrónica de barrido:** Esta técnica fue aplicada tanto al polvo como a las probetas elaboradas con las relaciones yeso/agua 60/40, 57/43 y 54/46 después de ser sometidas a ensayos de flexión, para observar la superficie de fractura, los defectos presentes, así como la forma y tamaño de los cristales de dihidrato.

En la tabla 6.12 se muestra el resumen de los ensayos químicos, físicos y mecánicos realizados al yeso Forte y al Paria tipo VII, incluyendo el orden de los mismos, el estado del material y la justificación de su realización:

Tabla 6.1. - Ensayos correspondientes al análisis de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los yeso Forte y Paria tipo VII.

Ensayo	Estado del Yeso	Justificación
1) Análisis Químico.	Hemihidrato en polvo	Determinar composición y grado de pureza
2) Densidad Real		Establecer las relaciones entre la masa y volumen de los polvos de yeso
3) Difracción de Rayos X		Determinar las fases cristalinas presentes
4) Análisis Térmico Diferencial (ATD) y Gravimétrico (ATG)		Identificación del material y determinación del grado de pureza y de calcinación del mismo. Detectar presencia de aditivos
5) Granulometría mediante tamizado		Caracterización y distribución granulométrica de la fase gruesa.
6) Granulometría a Láser		Caracterización y distribución granulométrica de la fase fina.
7) Microscopía Óptica y Electrónica		Identificación de fases. Verificación de forma y tamaño de cristal presente en el hemihidrato
8) Tiempo de fraguado inicial	Durante el fraguado de la mezcla	Determinación de relación entre esta variable y la cantidad de yeso en la mezcla
9) Temperatura de fraguado		Estudiar la variación de esta en función del tiempo
10) Microscopía Óptica		Determinación de la forma de los cristales de dihidrato formados.
11) Resistencia Mecánica	Masa fraguada y seca	Determinar máxima carga soportable
11.1) Microscopía Óptica y Electrónica		Identificación de fases. Verificación de forma y tamaño de cristal y de poros presentes en el dihidratado
11.2) Densidad Aparente		Determinar relación masa/volumen
11.3) Índice de Absorción		Determinar capacidad de absorción de agua respecto a la relación yeso/agua

VI.2.- EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES E IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES A MODIFICAR.

Luego de comparar las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los dos yesos analizados, se procedió a la selección de las variables factibles de modificación para la obtención de un yeso Paria VII mejorado.

VI.3.- MODIFICACIÓN DE VARIABLES Y PREPARACIÓN DE YESO.

Esta etapa incluyó la modificación individual de cada variable seleccionada en el paso anterior, mientras el resto de las variables se mantuvieron constantes. Para ello se prepararon mezclas de yeso Paria tipo VII con cada variable modificada.

VI.4.- EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES.

Una vez modificada cada variable y preparado el yeso, se procedió a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del yeso Paria tipo VII modificado de manera análoga a lo explicado en el punto VI.1 de esta sección. Seguidamente se compararon las propiedades obtenidas con las del yeso Forte, considerando la culminación del estudio cuando los resultados obtenidos fueron similares a los encontrados para este último.

En la figura 6.20 se presentan de manera concisa la correlación entre las distintas etapas a seguir en la metodología mediante la utilización de un flujograma.

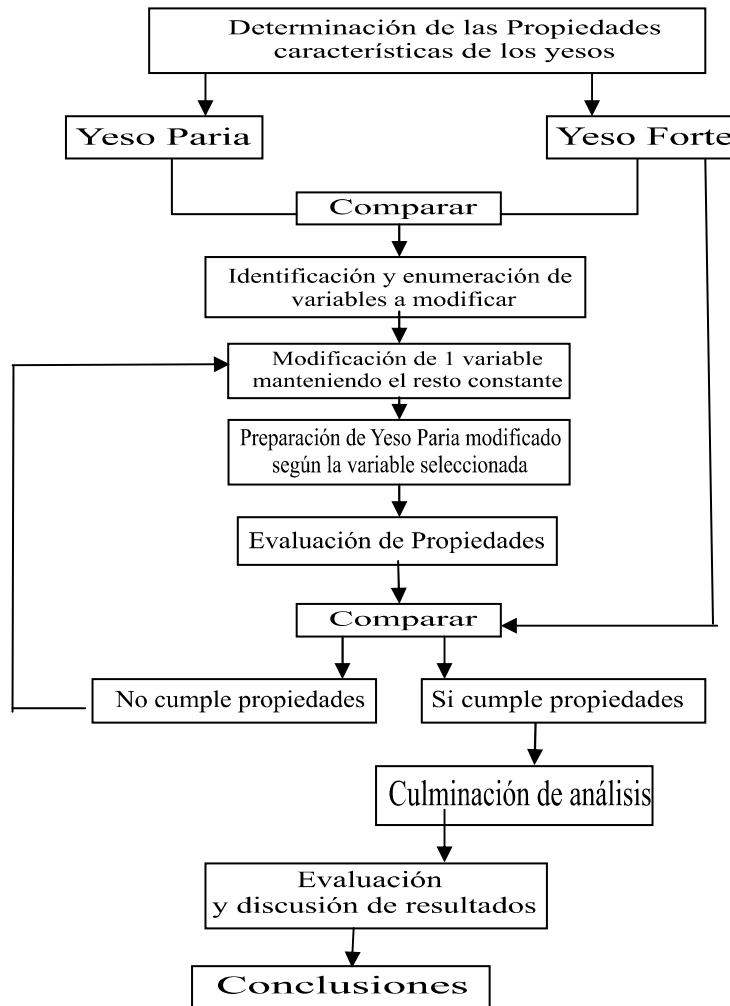


Figura 6.1.- Diagrama de flujo de las actividades realizadas.

VII.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados de caracterización química, física y estructural de los polvos de yeso Forte y Paria tipo VII, así como el estudio de los fenómenos observados durante su fraguado y el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los cuerpos formados, evaluando las diversas correlaciones existentes entre las distintas etapas de la utilización de los yesos. Por razones prácticas, en esta sección se hará referencia a los yesos nacional e importado como YPTVII y YF, respectivamente.

VII.1.- CARACTERIZACIÓN DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHDRATADO.

Con la determinación y estudio de las propiedades de los materiales en polvo es posible predecir el comportamiento de los mismos cuando son utilizados en procesos tales como el conformado de sólidos. Es por ello que resulta de gran importancia estudiar las propiedades del YF y YPTVII.

VII.1.1.- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.

El análisis químico suministra información de gran importancia respecto al grado de pureza que presentan los materiales. Con la finalidad de determinar las cantidades exactas en la que se encuentran los compuestos que constituyen el yeso nacional, se realizó el análisis químico obteniendo los resultados mostrados en la tabla 7.1.

Uno de los puntos más importantes a discutir en este análisis es que el yeso nacional presenta un grado de pureza del 94,13%, lo que indica que poco menos del 6% de este se encuentra constituido por otros compuestos distintos al hemihidrato. Es así como se observa la presencia de 1,29% de agua libre o no combinada, la cual seguramente es producto de la humedad absorbida del ambiente durante los procesos de traslado y almacenamiento del yeso.

Tabla 7.1.- Composición química de YPTVII.

Compuesto	Fracción (%)
Agua Libre	1,29
Sulfato de calcio hemihidratado (CaSO ₄ .1/2H ₂ O)	94,13
Sulfato de calcio anhidro (CaSO ₄)	0,00
Dióxido de sílice y residuos insolubles (SiO ₂ + R.I)	1,63
Óxido de hierro y aluminio (Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃)	0,47
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	1,74
Carbonato de magnesio (MgCO ₃)	0,30
Cloruro de Sodio (NaCl)	0,24
Total	98,51

Puede notarse que el resto de los compuestos encontrados en el YPTVII y mostrados en la tabla 7.1, se relacionan directamente con impurezas. Algunas de estas probablemente se incorporan durante el almacenamiento y tratamiento de la piedra de gypse, mientras que otras provienen directamente de este mineral, ya que el mismo precipita en depósitos en los cuales hay presencia de otros materiales característicos de la zona en la cual es explotado. Posiblemente las impurezas provenientes de la materia prima son, en primer lugar, el dióxido de sílice y demás residuos insolubles, los cuales representan el 1,63%, los carbonatos de calcio y de magnesio, que representan 1,74 y 0,3, respectivamente y los óxidos de hierro y aluminio (0,47%), cuya presencia se relaciona con la coloración característica de YPTVII. Por su parte el cloruro de sodio se encuentra presente en una cantidad inferior a la observada en el resto de las impurezas (0,24%), atribuyéndose su presencia a la adición del mismo como modificante del fraguado o a la ubicación geográfica de la planta (Guanta, Pertigalete. Edo. Anzoátegui) en la que es producido el hemihidrato, ya que este compuesto está presente en el ambiente costero.

Finalmente, puede notarse la ausencia de anhidrita en YPTVII, lo que permite inferir que la materia prima a partir de la cual se obtuvo el hemihidrato no fue sometida a procesos de sobrecalentamiento que transformaran este último en sulfato de calcio anhidro. Además, puede notarse que la sumatoria de los resultados obtenidos no corresponde al 100%. En relación a esto se considera que en los análisis basados en la gravimetría, la obtención de un 98,5% ya constituye una precisión aceptable, debido a que los métodos para la realización de estos ensayos requieren de gran minuciosidad y se encuentran abiertos a la influencia de factores externos.

VII.1.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

A partir de este ensayo se logran identificar los principales compuestos contenidos en YF y YPTVII, debido a que cada uno se encuentra en una fase distinta, capaz de producir un espectro característico. En las figuras 7.1 y 7.2 se muestran los espectros correspondientes a las muestras analizadas, evidenciándose la similitud entre los mismos. En este sentido, se observa que las distancias interplanares de cada fase presentan valores idénticos y, en consecuencia, se obtuvieron picos cuya ubicación e intensidad fueron análogas para ambos yesos. Los picos de mayor intensidad responden a la difracción de las principales fases presentes y al mayor grado de cristalización de las mismas, razón por la cual sólo en estos se señalan los valores de las distancias interplanares obtenidas.

Los equipos de difracción de rayos X cuentan con una base de datos en la cual se hallan los espectros correspondientes a una gran cantidad de compuestos existentes en la naturaleza. De manera que, cuando se realizó la comparación de los obtenidos con los registrados en el equipo, se encontró que los resultados de YF y YPTVII coincidían completamente con el espectro de la bassanita, que es otro nombre con el cual se identifica el sulfato de calcio hemihidratado tipo β , indicada en espectros por líneas de color azul. Puede notarse en ambas figuras que las mismas se encuentran en el centro de la mayoría de los picos obtenidos, específicamente en los ángulos de 17, 30, 35 y 37 grados, lo que permite afirmar que el hemihidrato β es el constituyente fundamental de las muestras analizadas.

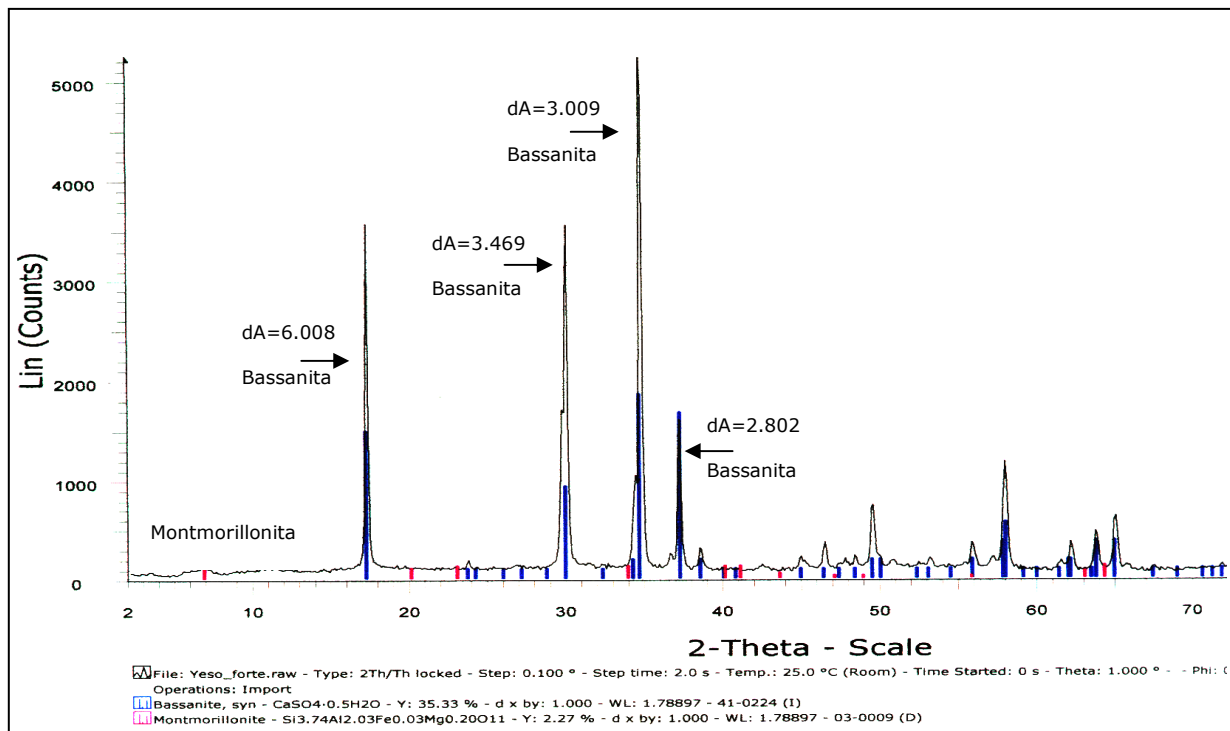


Figura 7.1.- Difracción de rayos X de YF.

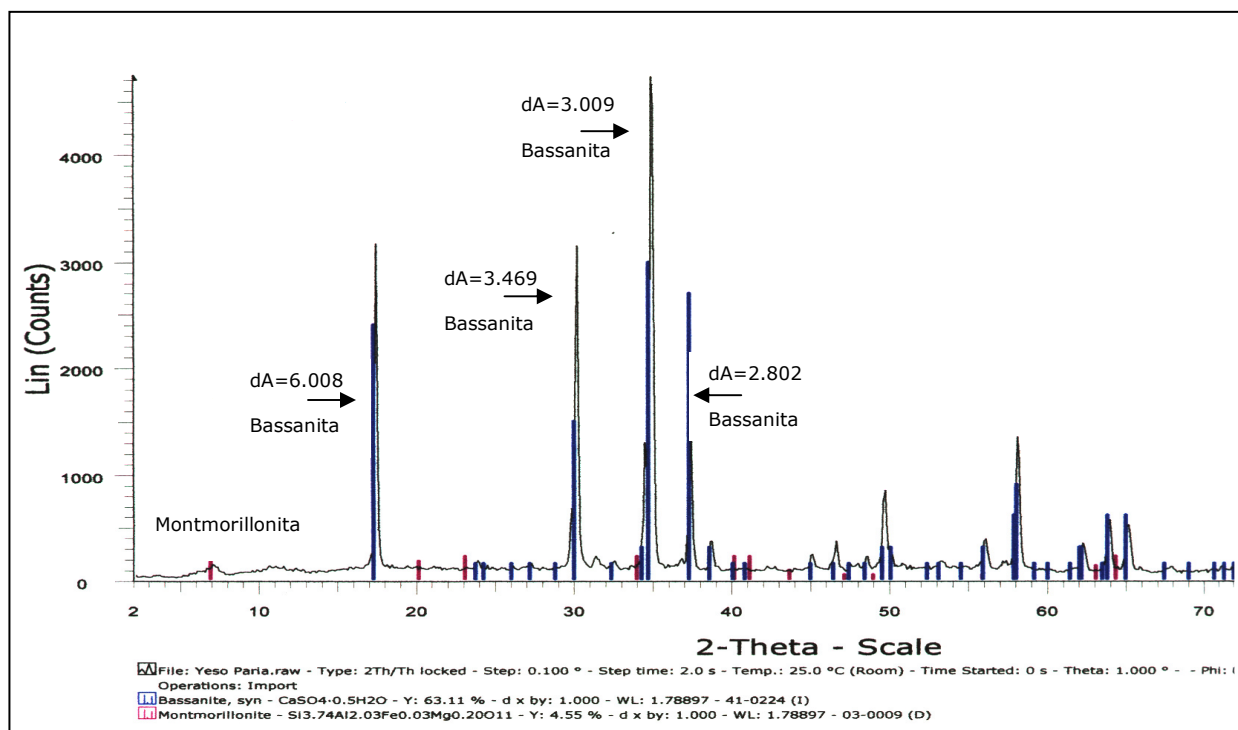


Figura 7.2.- Difracción de rayos X de YPTVII.

A manera de corroboración, en la tabla 7.2 se muestran las distancias interplanares del sulfato de calcio hemihidratado y las intensidades correspondientes, según las normas ASTM:

Tabla 7.2.- Ficha ASTM del sulfato de calcio hemihidratado. (ASTM, 1994).

dA	6.01	4.35	3.46	3.30	3.21	3.00	2.802	2.712	2.704	2.342	2.336	2.27	2.183
Intensidad	95	2	45	6	2	100	50	4	2	2	2	4	2

Se observa que la máxima intensidad corresponde a una distancia interplanar de 3.00, valor que coincide con el obtenido en el pico ubicado a los 35 grados en los espectros. Así mismo, los valores de dA correspondientes a las intensidades de 95, 45 y 50, son análogos a los obtenidos y mostrados en los picos de las muestras analizadas, por lo que se corrobora que el yeso nacional y el de referencia efectivamente se encuentran constituidos por el sulfato de calcio hemihidratado.

Por último, puede observarse que el pico ubicado a los 7 grados en ambos espectros corresponde a la presencia de material arcilloso del tipo montmorillonítico, el cual es encontrado comúnmente en la piedra de gypse y no sufre alteraciones a la temperatura de calcinación de la misma.

VII.1.3.- ANÁLISIS TÉRMICO GRAVIMÉTRICO.

A partir de la realización de este ensayo no sólo se determinan las variaciones de peso que experimentan los materiales ante la acción del calor, sino que además es posible detectar la presencia de compuestos o fases contenidos en las muestras. En la figura 7.3 se presentan las gráficas correspondientes al ensayo de ATG obtenidas para YF y YPTVII, notándose, en primer lugar, que la pérdida de peso de YPTVII es mayor a la experimentada por YF, siendo estos valores 7,05 y 6,59% respectivamente. Es de destacar que las mismas corresponden únicamente a la salida del agua presente en los yesos como consecuencia de las reacciones de deshidratación que tienen lugar en el rango de temperatura considerado.

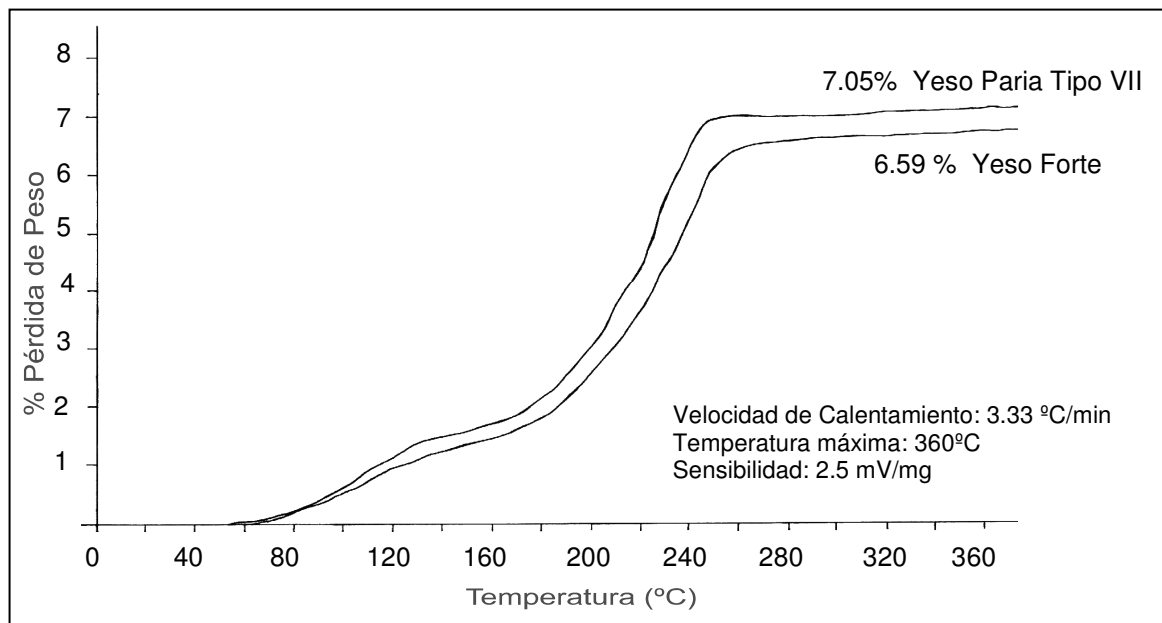


Figura 7.3.- Análisis térmico gravimétrico de YF y YPTVII.

El sulfato de calcio hemihidratado posee un porcentaje de humedad teórico de 6,2%, que corresponde al peso del agua contenida en la fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$. Sin embargo, es posible que este absorba humedad del ambiente, ocasionando la presencia de un agua libre o no combinada, tal y como se encontró en el análisis químico. En la figura 7.3 se observa que el desprendimiento de dicha agua esta representado por la primera pendiente de las curvas y ocurre para ambos yesos a una temperatura entre 60 y 130°C. Los valores obtenidos corresponden a una pérdida de peso aproximada de 1% para YF y de 1,5% para YPTVII, comportamiento que indica que la muestra de yeso nacional presenta características que le confieren mayor facilidad para absorber humedad del ambiente. El agua libre hallada en ambos yesos además de ser absorbida del ambiente, posiblemente se encuentra relacionada con el material montmorillonítico detectado por DRX o con gypse que no fue transformado a sulfato de calcio hemihidratado. En todo caso, no es la estequiométricamente necesaria para reaccionar con el hemihidrato y producir el fraguado.

La pérdida de peso correspondiente al desprendimiento del agua de constitución del hemihidrato para transformarlo en anhidrita soluble, ocurre a partir de 160°C en las dos

muestras. Es de destacar que el porcentaje de agua eliminado en esta deshidratación resulta de la diferencia entre la pérdida de peso total y el agua de humedad retirada, encontrándose valores análogos de 5,6% para el yeso nacional y el de referencia. La obtención de un porcentaje de agua de constitución inferior a la cantidad teórica en ambos yesos responde a la presencia de impurezas, las cuales fueron detectadas en el análisis químico del YPTVII. Las mismas reducen la proporción en la que se encuentra el hemihidrato y por lo tanto, la cantidad de agua combinada con el mismo.

VII.1.4.- ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL.

La realización de este ensayo permitió el desarrollo de un análisis más completo en cuanto al comportamiento de los yesos ante la acción de calor, a temperaturas considerablemente superiores a las establecidas para el análisis gravimétrico. En la figura 7.4 se muestran las gráficas obtenidas para los materiales YF y YPTVII.

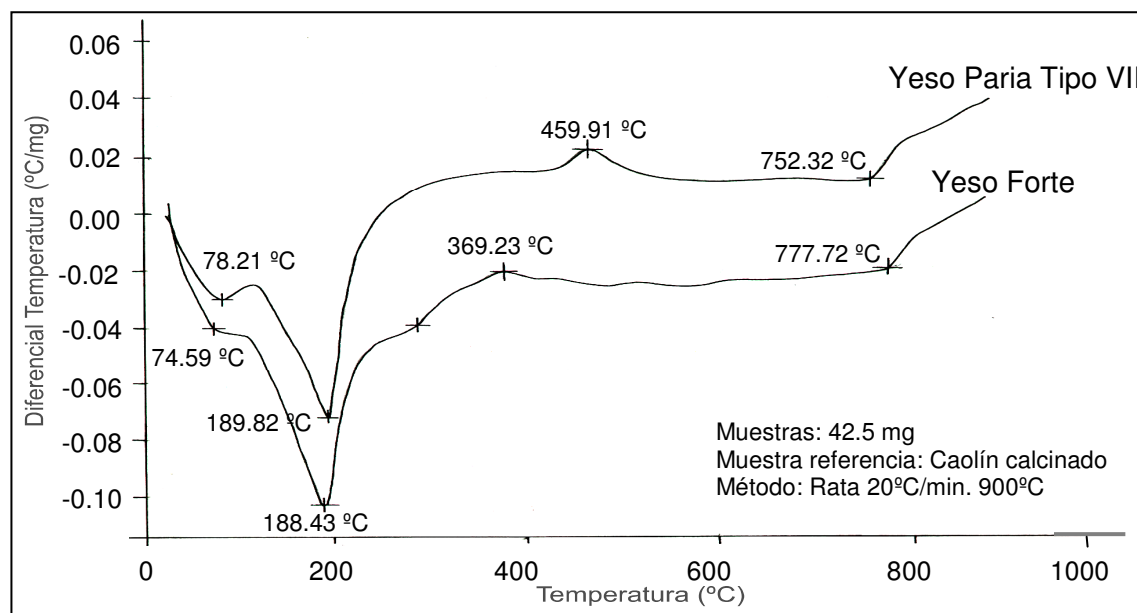


Figura 7.4.- Análisis térmico diferencial de YF y YF.

En esta puede notarse que la primera reacción corresponde a la separación del agua de humedad contenida en las muestras, encontrándose que la misma ocurre a una temperatura de

74°C para YF y de 78°C para YPTVII, valores que se encuentran dentro del rango determinado en el ATG (60-130°C). Posteriormente, se observan picos que representan la transformación química de sulfato de calcio hemihidratado en anhidrita soluble, a temperaturas de 188,4 y 189,8°C, para YF y YPTVII, respectivamente. El rango de temperatura indicado en la bibliografía para que se lleve a cabo esta reacción es 160-200 °C, observándose que los valores obtenidos se encuentran dentro del mismo. Se observan luego los picos que representan la transformación de anhidrita soluble a anhidrita insoluble. Aún cuando el rango de temperatura teórico para que ocurra esta transformación es 500-600°C, se obtuvieron temperaturas inferiores, específicamente 369°C para YF y 459°C para YPTVII. Esta diferencia tan significativa se atribuye principalmente a la forma, tamaño y distribución de las fases que constituyen cada yeso en particular.

Por último, se observan en ambas curvas picos que corresponden a la reacción de descomposición de la anhidrita insoluble en óxido de calcio y sulfato de calcio básico, la cual ocurre a una temperatura de 752,3°C y 777,7 °C para YF y YPYVII, respectivamente. La temperatura teórica en la que se da lugar esta separación es 1000°C, por lo que nuevamente se piensa que la forma y distribución de las moléculas que conforman los cristales de estos compuestos influyen de manera determinante en la energía necesaria para producir la disociación.

VII.1.5.- DENSIDAD REAL.

La densidad es una de las propiedades físicas más comúnmente consideradas para la caracterización de los materiales, ya que el conocimiento de la misma junto al de otras características, permite una identificación más acertada del material y la obtención de información relacionada con su apariencia y su comportamiento frente a procesos como la inmersión en líquidos. Se muestran en la tabla 7.3 las densidades encontradas en los polvos de YF y YPTVII.

Tabla 7.3. Densidad real de YF y YPTVII.

Tipo de yeso	Densidad real (grs/ cm³)
YF	2,629
YPTVII	2,572

Los valores de densidad real obtenidos en las muestras de YF y YPTVII se encuentran en el orden de magnitud señalado en la bibliografía para los distintos tipos de hemihidrato. De hecho, estos resultados se inclinan en mayor medida hacia la densidad del β -hemihidrato, comportamiento que resulta lógico si se considera que este último es el constituyente principal del llamado yeso para moldeo.

Aún cuando las densidades de YF y YPTVII son muy similares entre sí, se observó que la del yeso nacional resultó inferior a la obtenida para el yeso de referencia. Posiblemente la razón de este fenómeno tiene que ver con la estructura y la forma de las fases que constituyen los granos de sulfato de calcio hemihidratado de cada yeso, así como con la presencia de sustancias extrañas en los mismos.

VII.1.6.- GRANULOMETRÍA.

Es bien conocida la marcada influencia de la granulometría en las actividades que incluyen el procesamiento de polvos, específicamente sobre el hemihidrato, la fluidez de la mezcla y los parámetros de fraguado. Con el fin de determinar dicha influencia, se realizaron los ensayos para la determinación de la fase gruesa y fina de YF y YPTVII, tal y como se mencionó en la sección VI.1.3. En la figura 7.5 se muestran los resultados obtenidos mediante el tamizado de los mismos en mallas 80, 100 y 325.

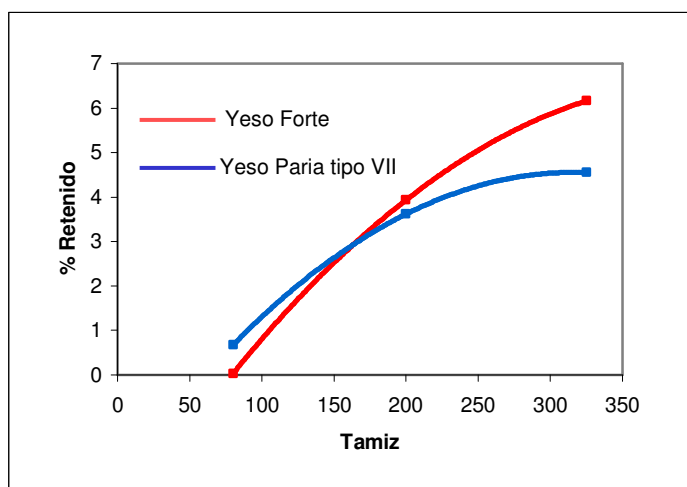


Figura 7.5.- Granulometría de la fracción gruesa de YF y YPTVII.

En esta figura puede observarse que el YPTVII presenta un retenido en malla 80 de 0,6%, mientras que el YF deja un retenido de sólo 0,03%, resultados que permiten indicar la presencia en el yeso nacional de un tipo de grano grueso cuya cantidad es considerablemente mayor que la encontrada en el yeso de referencia. Las fotografías de estos retenidos son mostradas en las figuras 7.6.a y 7.7.a, observando en esta última que los granos correspondientes al YPTVII tienen un tamaño superior al resto de las partículas que conforman el polvo, con presencia de aglomerados rígidos y cuerpos duros de coloración oscura, de aspecto arenoso.

Además, en la figura 7.5 puede notarse que el retenido en el tamiz 200 resultó similar para ambos yesos (3,9% para YF y 3,6% para YPTVII) observando en las figuras 7.6.b y 7.7.b que los granos obtenidos en ambas muestras son de color y tamaño uniformes. Finalmente, se observa que el porcentaje de retenido de YF en el tamiz 325 supera por 1,6 unidades al encontrado en el yeso nacional, pudiéndose notar en las figuras 7.6.c y 7.7.c que las partículas retenidas presentan también una coloración uniforme. Considerando la sumatoria de los retenidos en los distintos tamices, se obtuvo un porcentaje total de partículas que conforman la granulometría gruesa de 10,13 y 8,8 %, para YF y YPTVII, respectivamente.

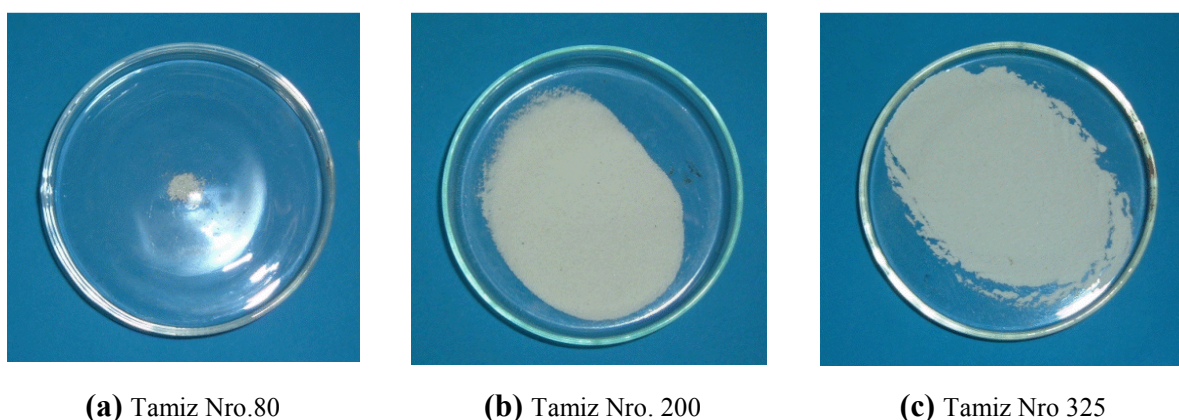


Figura 7.6.- Retenido de YF en tamices con distintos tamaño de orificio.

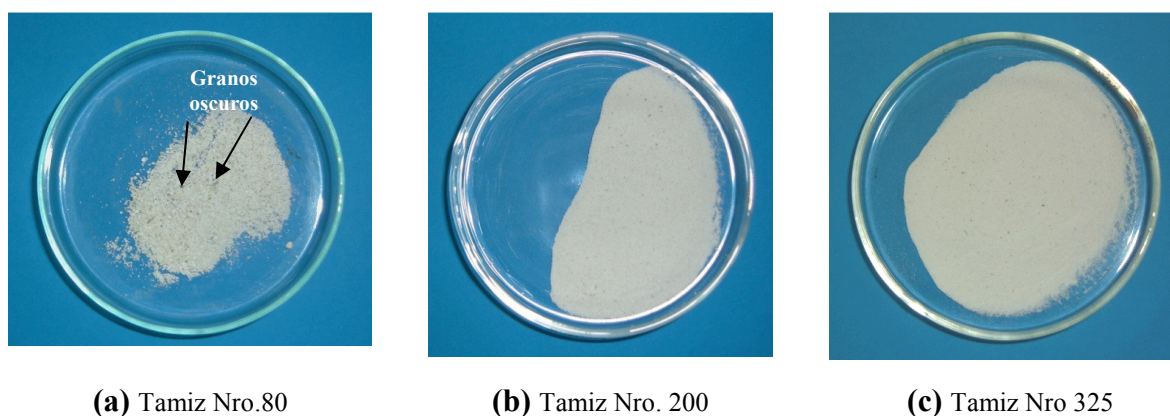


Figura 7.7.- Retenido de YPTVII en tamices con distintos tamaño de orificio.

En cuanto a la determinación de la granulometría fina, se pueden observar en la figura 7.8 las gráficas obtenidas mediante el ensayo la granulometría láser. En esta pueden notarse dos tipos de curvas, una de carácter lineal que corresponde al porcentaje en peso acumulado de yeso y otra que indica las poblaciones granulométricas existentes, llamada comúnmente curva de frecuencia. Las curvas acumulativas presentan un comportamiento similar para YF y YPTVII, sin embargo se observa una diferencia significativa entre los valores de tamaño de partícula comprendidos entre 2 y 100 μm . Esta situación se hace más evidente en las curvas de frecuencia, en las que se observa que el tamaño de grano medio es 40 μm para YF y 25

μm para YPTVII. Este último probablemente está relacionado con la tendencia a aglomerarse que presentan los granos del yeso nacional.

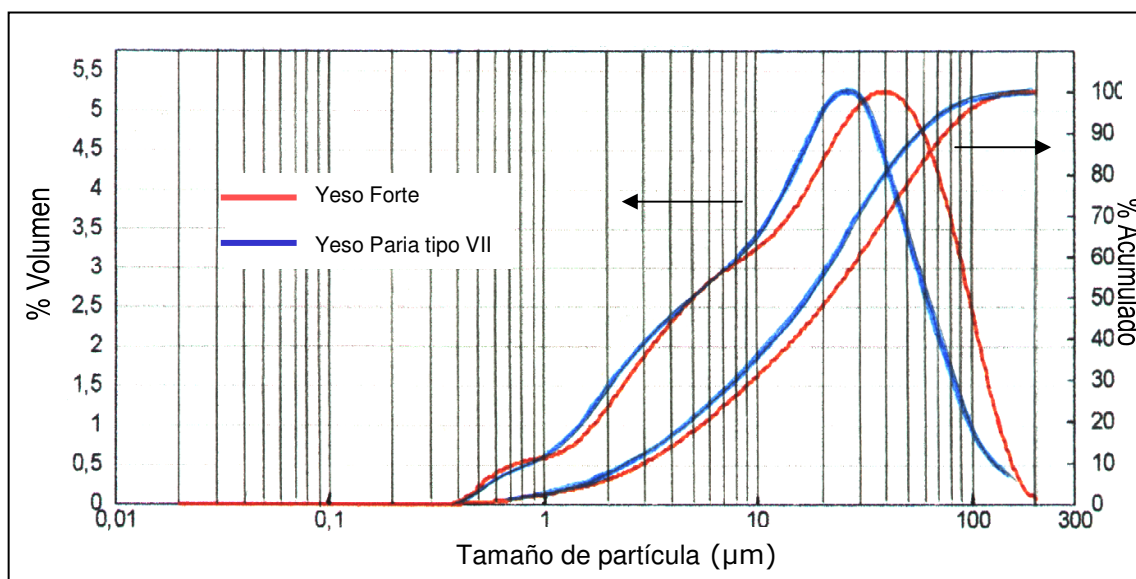


Figura 7.8.- Distribución y frecuencia granulométrica de la fracción fina de YF Y YPTVII.

Dicha condición lleva consigo múltiples complicaciones que influyen en gran medida en las propiedades de las masas fraguadas de YPTVII. Es así como a medida que cada aglomerado se va incorporando a la mezcla, se produce la humectación superficial del mismo y la posterior formación de una capa densa a su alrededor, que impide la difusión del agua hacia el núcleo. Estos aglomerados se encuentran formados por una gran cantidad de partículas, blandas y rígidas, entre las cuales hay presencia de aire. Es por ello que cuando se produce la precipitación de los mismos como consecuencia del incremento de peso durante el período de humectación, el aire contenido dentro de ellos queda retenido. Seguidamente, debido a la cinética del proceso de mezcla y a la transformación del hemihidrato en dihidrato, la viscosidad de la mezcla aumenta de manera progresiva en el tiempo, fenómeno que se hace más complejo a medida que la relación yeso/agua se incrementa. Esta situación no permite que las burbujas de aire tengan la fuerza de empuje para alcanzar a la superficie, por lo que quedan atrapadas definitivamente, proceso que se ve afectado aún más por el carácter turbulento de la agitación que ocasiona el movimiento desordenado de las burbujas en la

mezcla y trae como consecuencia la distribución y ubicación de las mismas en todas las zonas del cuerpo de fraguado.

Un ensayo no normalizado pero muy útil en las empresas cerámicas para determinar la calidad de los yesos, consiste en la colocación entre dos vidrios de una porción de mezcla yeso/agua preparada mediante agitación mecánica. Se realizaron pruebas con YF y YPTVII obteniendo los resultados mostrados en la figura 7.9.

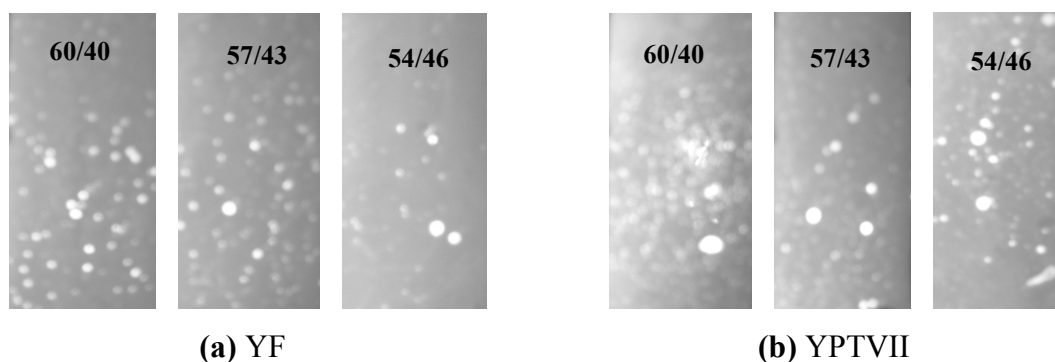


Figura 7.9.- Aire atrapado en mezclas de YF y YPTVII fraguadas entre dos vidrios.

Puede notarse la diferencia entre el tamaño y la distribución del aire atrapado en la mezcla de YF respecto a YPTVII, evidenciándose en esta última la presencia de espacios más grandes e irregularmente distribuidos en toda la superficie. Las burbujas de aire de menor diámetro y uniforme distribución encontradas en la mezcla de YF, especialmente para las relaciones 60/40 y 57/43, son indicios de un mejor comportamiento a la humectación de sus partículas y de la salida del aire atrapado con mayor facilidad. Contrariamente, se piensa que el tipo y distribución de burbujas presentes en YPTVII responde a la presencia de aglomerados en el polvo, los cuales dificultan la mojabilidad de sus partículas y conllevan al incremento de la cantidad de aire retenido. Esta situación se acentúa más aún con el constante incremento del límite de fluidez que experimenta la mezcla.

Aún cuando se encontró que el tamaño de grano es mayor en YF que en YPTVII tanto en la fase gruesa como en la fina, es de destacar que la distribución granulométrica del yeso de referencia es más uniforme que la encontrada en el yeso nacional. La presencia en este

último de la población granulométrica constituida por los macrogranos retenidos en el tamiz 80, trae como consecuencia la falta de regularidad y uniformidad en su granulometría y por lo tanto, la predisposición de las masas fraguadas a presentar un comportamiento característico que influye directamente sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Esta situación puede ser soportada por la teoría de procesamiento de polvos, que si bien ha sido descrita para materiales cerámicos, es válida también para otros materiales. La misma fue propuesta a finales de los años 70, época en la cual se consideró que la fiabilidad y reproducibilidad de una pieza dependía de su homogeneidad y uniformidad a nivel microscópico, logrando comprender la importancia de los sistemas particulados y de sus propiedades fisicoquímicas en el estudio de materiales cerámicos (Pask, 1979; Messer, 1983). En el procesamiento coloidal, tanto en suspensiones como en mezclas, cada etapa es una fuente potencial de defectos debido, en parte, a la tendencia de las partículas coloidales a aglomerarse espontáneamente, producto de las fuerzas atractivas de Van del Waals. Cuando estos aglomerados están presentes en el polvo, el resultado es una heterogeneidad microestructural que ejerce gran influencia en el comportamiento de la mezcla durante el procesamiento y supone nefastas consecuencias sobre el producto final (Lange, 1989).

Esta teoría permite visualizar que la baja calidad de YPTVII está relacionada con la presencia de aglomerados y partículas gruesas encontradas en el análisis de tamizado de este material. En este sentido, se hace imperante la necesidad de enfocar como objetivo de análisis la variabilidad en la distribución granulométrica del yeso nacional, considerando tanto las etapas del proceso de producción de YPTVII cuyo funcionamiento le confiere dicha heterogeneidad granulométrica, como las consecuencias de este fenómeno en el comportamiento de las masas fraguadas, principalmente, en la duración de la vida útil de los moldes utilizados para el conformado de piezas sanitarias.

VII.1.7.- MICROSCOPIA ÓPTICA.

Mediante este ensayo se logró analizar la forma y tamaño de los cristales que conforman las muestras de YF y YPTVII. Las micrografías correspondientes se presentan en la figura 7.10.

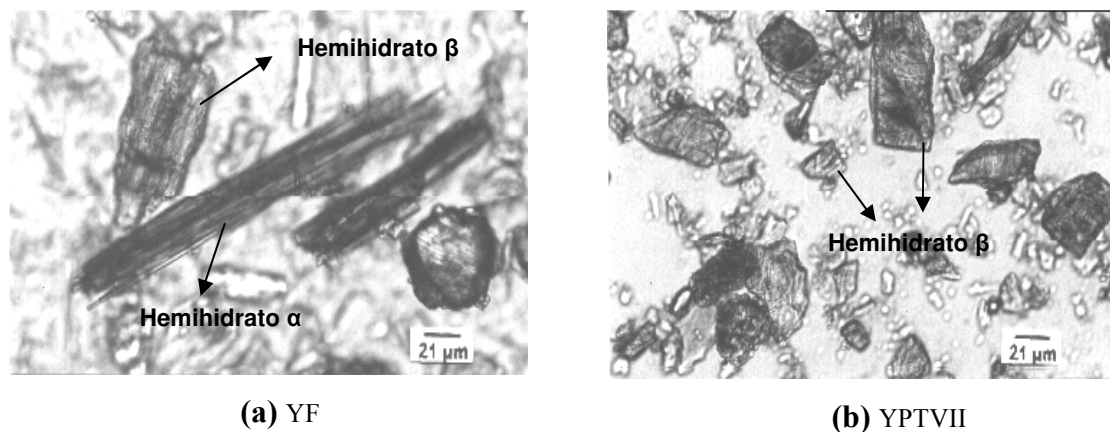


Figura 7.10. Microscopía óptica de polvos de YF y YPTVII, 200X.

Se observa que el YF se encuentra constituido por una mezcla de cristales de formas prismáticas y laminares que presentan longitudes de hasta 230 μm y 95 μm , respectivamente. A juzgar por la presencia de estos dos tipos de cristales, se infiere que el yeso de referencia está constituido por hemihidrato α y por hemihidrato β . Según los posibles métodos de obtención industrial de yeso señalados en la sección IV.6.1, la producción de YF debe realizarse mediante algún proceso que permite la formación de la fase α , o bien es una mezcla de dos tipos de hemihidratos. En todo caso, para la obtención de cristales prismáticos y/o tubulares, no sólo debe contarse con un tratamiento adecuado de transformación de la materia prima, sino que también debe disponerse de un gypse de buena calidad, fundamentalmente del tipo fibroso.

Por otra parte, en la figura 7.10.b puede notarse que los cristales que conforman el YPTVII presentan únicamente forma laminar o de placa irregular, encontrando una distribución de tamaños que varía entre 75 y 12 μm en su eje mayor. Según lo señalado en la

sección IV.5.1, los cristales con esta morfología son típicos del hemihidrato β , por lo que puede deducirse el tipo β es prácticamente el único constituyente del yeso nacional.

Por las diferentes características entre los cristales observados en ambos yesos, puede decirse que tanto el método como la materia prima utilizados para la obtención de YPTVII, son distintos a los utilizados para elaborar el YF. En este sentido, se tiene información de que el yeso nacional se produce a presión atmosférica y temperaturas entre 120 y 150°C en hornos abiertos, siendo estas las condiciones para la obtención del hemihidrato β que es también llamado yeso París. Según la bibliografía, esta técnica de producción es ineficiente debido a que en el producto generalmente se encuentran trazas de yeso dihidratado y/o anhídrita soluble que se forman en las zonas subcalentadas o sobrecalentadas del horno en la cual el gypse fue procesado. Una visita a la planta permitió constatar que los equipos de calcinación son marmitas, en los cuales, si no se tienen controles efectivos, se presentan problemas para llevar a cabo un calentamiento homogéneo. Aunado a esto, la materia prima utilizada es suministrada por distintos proveedores, por lo tanto se obtiene un producto cuyas características y propiedades difícilmente pueden mantenerse constantes.

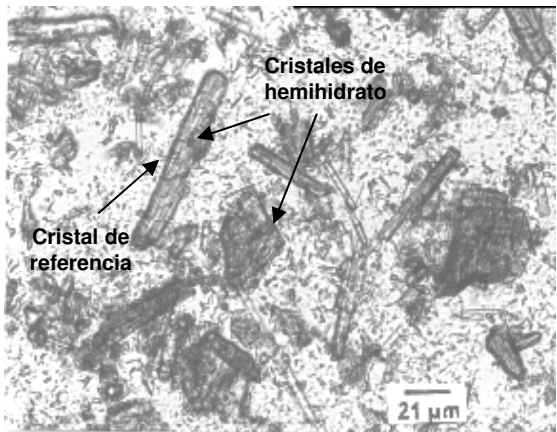
Un aspecto importante es la relación entre la forma y tamaño de los cristales de los yesos analizados y la granulometría obtenida de cada uno. En este sentido, se piensa que debido a la presencia en YF de cristales prismáticos y laminares de mayor tamaño a los encontrados en YPTVII, este presenta poblaciones granulométricas cuyo tamaño de grano es superior al encontrado en el yeso nacional, tanto en la fracción fina como en la gruesa.

Las marcadas diferencias relativas a la forma y distribución de los granos y las fases presentes en los dos yesos analizados, fueron los indicios que hicieron presumir la existencia de una relación entre la forma de los granos de hemihidrato, el mecanismo de fraguado y la morfología de los cristales de dihidrato, tanto para YF como para YPTVII. Con la finalidad de verificar la posible existencia de esta relación, se ideó un seguimiento del fraguado vía microscopía óptica.

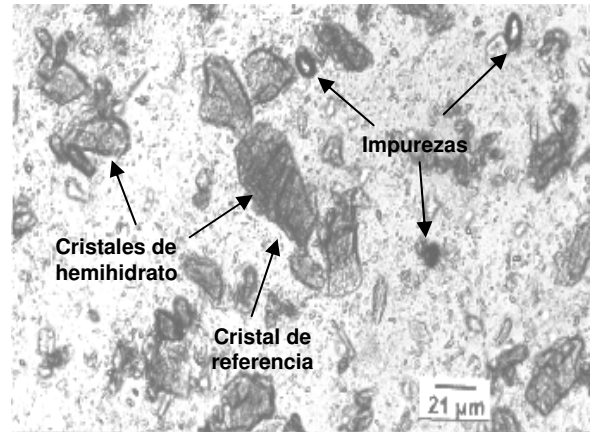
VII.2.- ANÁLISIS DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN Y FRAGUADO DEL SULFATO DE CALCIO HEMIHIDRATADO.

Durante el proceso de dilución del hemihidrato ocurren importantes fenómenos que permiten establecer algunos parámetros adicionales a cerca de la caracterización física y estructural de cada uno de los yesos, a partir de los cuales se puede incluso predecir el comportamiento de los cuerpos fraguados de YF y YPTVII. Para realizar este estudio se prepararon soluciones con una relación yeso agua 50/50, las cuales fueron llevadas al microscopio en un sistema cerrado que impidió la evaporación del agua. En la figura 7.11 se muestran las micrografías tomadas durante el proceso de fraguado de mezclas de YF y YPTVII, observando en éstas dos fenómenos importantes que se encuentran íntimamente relacionados entre sí y responden a la teoría cristalina del fraguado explicada en la sección IV.9.1. El primero de ellos es la reducción del tamaño de los cristales de sulfato de calcio hemihidratado y el segundo es la aparición y crecimiento de los cristales aciculares de dihidrato.

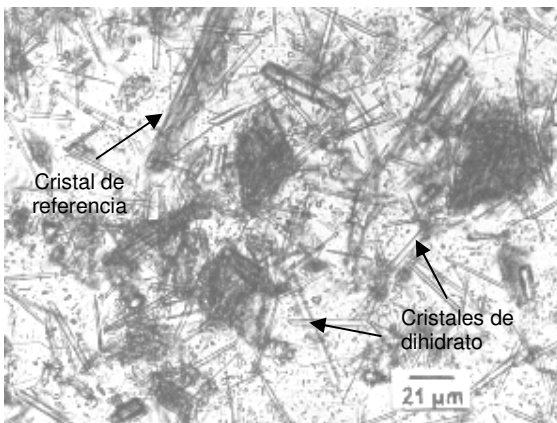
En la figura 7.11.a.1 pueden notarse cristales laminares de YF con longitudes que varían entre 46 y 12 μm y cristales prismáticos cuyo tamaño se encuentra entre 88 μm y 23 μm . A los 15 minutos de comenzado el proceso de fraguado (figura 7.11.a.2), se observa que los cristales prismáticos han experimentado una mayor disolución, lo cual se atribuye a la presencia en estos de centros activos de disolución más extensos. Además, los cristales aciculares formados hasta ese momento presentan una longitud de 38 μm . Luego de transcurridos 25 minutos de fraguado, se observa en la figura 7.11.a.3 la desaparición de casi la totalidad de los cristales de hemihidrato, así como los cristales de dihidrato completamente formados con longitudes aproximadas de 48 μm .



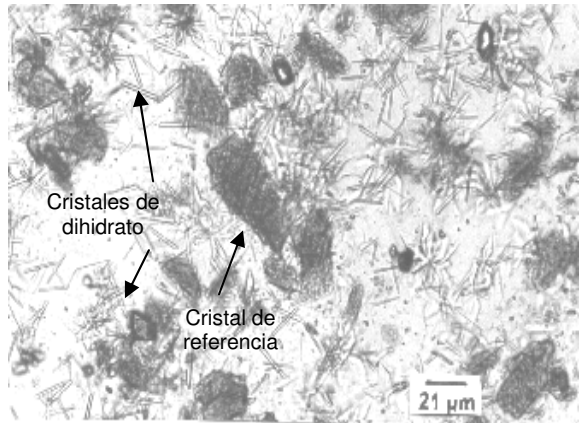
a.1) Tiempo inicial



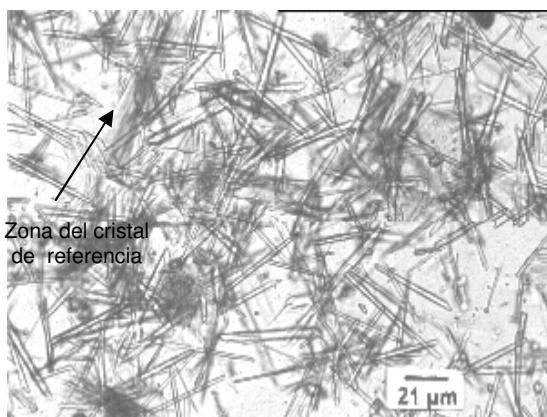
b.1) Tiempo inicial



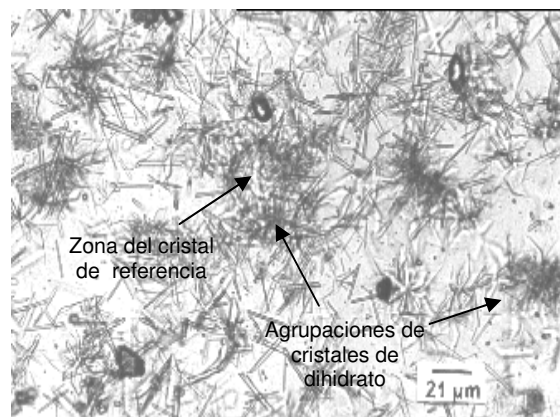
a.2) Tiempo de fraguado = 15 minutos



b.2) Tiempo de fraguado = 15 minutos



a.3) Tiempo final de fraguado = 25 minutos



b.3) Tiempo final de fraguado = 25 minutos.

Figura 7.11.- Proceso de fraguado de YF (a) y YPTVII (b) tomado mediante microscopía óptica, 200x.

Análogamente a lo observado para YF, es notoria la disolución progresiva que experimentan los cristales de hemihidrato de YPTVII en el agua. Inicialmente se observan (figura 7.11.b.1) cristales laminares cuya longitud mayor se encuentra entre 57 μm y 10 μm . Luego, se muestra en la figura 7.11.b.2 que no sólo se ha reducido el tamaño de los cristales más grandes, sino que los de menor tamaño ya han desaparecido para dar lugar a la formación de pequeñas agujas de dihidrato, cuya longitud aproximada es de 20 μm . Finalmente, a los 25 minutos de haberse iniciado el fraguado, se observa la disolución total de los cristales de hemihidrato y los lugares donde estos se encontraban ahora están ocupados por círculos oscuros que constituyen el centro de las agrupaciones aciculares, cuyos cristales han aumentado su longitud hasta alcanzar 25 μm .

Un último aspecto resaltante en la secuencia de fraguado de YPTVII es que en la parte superior derecha de las tres micrografías se observa la presencia de tres formaciones elipsoidales que, contrariamente a los cristales de hemihidrato, no experimentan desgaste y se mantienen inalteradas durante todo el proceso. La longitud de su eje mayor es 15 μm y por no presentar dilución en el agua para formar los cristales de dihidrato, puede aseverarse que se trata de impurezas cuya composición dista completamente del sulfato de calcio hemihidratado o dihidratado.

La diferencia fundamental en el seguimiento del proceso de fraguado realizado para ambos yesos, es la longitud de los cristales de dihidrato formados, encontrando que para YF esta última es doblemente mayor a la observada en YPTVII. Este fenómeno origina que el grado de entrelazamiento encontrado en los cristales aciculares formados en YF sea también más alto, lo que permite presumir la influencia directa de esta condición en los valores de resistencia a la flexión obtenidos posteriormente en los cuerpos fraguados.

Los resultados antes discutidos corroboran las marcadas diferencias existentes entre ambos materiales y si bien es cierto que las observaciones aquí señaladas deben ser verificadas con yesos de otras procedencias, también es cierto que representan una posibilidad para comprender las divergencias observadas en las propiedades correspondientes a cada uno de los yesos estudiados, lo cual podría convertirse en uno de los aportes más

significativos de esta investigación, tomando en cuenta que en la bibliografía consultada no existen referencias al respecto.

VII.2.1.- TIEMPO DE FRAGUADO.

Las gráficas obtenidas a partir de la determinación del tiempo de fraguado para los yesos YF y YPTVII, correspondientes a tres relaciones yeso/agua consideradas, se muestran en las figuras 7.12:

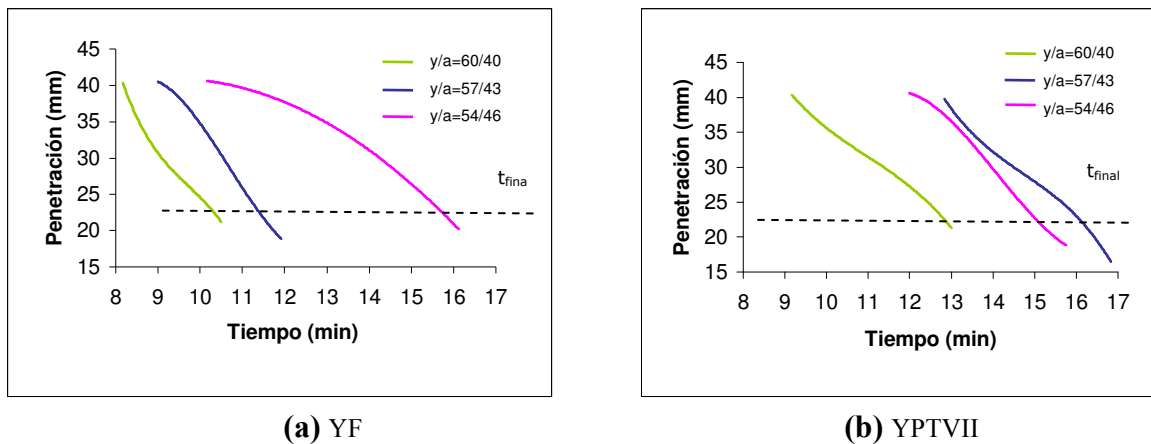


Figura 7.12.- Tiempo de fraguado inicial de mezclas de YF y YPTVII para diferentes relaciones yeso/agua.

En primer lugar, puede notarse la tendencia lineal y descendente de las curvas, lo cual indica que la penetración de la aguja de Vicat se redujo a medida que transcurrió el tiempo, debido a que la mezcla experimentaba el proceso de fraguado.

Los datos obtenidos en cada uno de los ensayos realizados fueron promediados para generar las curvas antes presentadas. Los puntos obtenidos en cada ensayo presentan una desviación respecto a los valores promedios, por lo que es importante tener en cuenta que el comportamiento del tiempo de fraguado no corresponde únicamente a una línea sino a un área cuyos límites están determinados por una barra de error. En este sentido, se obtuvo una desviación estándar de 0.36 minutos en el eje X y 1,5 milímetros en el eje Y para las curvas

correspondientes a YF y de 0.25 minutos y 1,2 milímetros para el yeso nacional en los ejes X y Y, respectivamente.

En todas las mezclas elaboradas con los dos tipos de yeso y con las diferentes relaciones yeso/agua, el momento en el que empieza el tiempo de fraguado corresponde al obtenido cuando la penetración de la aguja en la mezcla es de 40 mm, mientras que el momento en el cual finaliza pueden leerse en los puntos en los cuales la línea semicontinua corta a las curvas obtenidas. Esto último se debe a que, según lo mencionado en el apéndice I, se considera que las mezclas de yeso han fraguado cuando la penetración de la aguja de Vicat ha alcanzado un límite 22 mm, punto por el cual la línea semicontinua fue trazada. El tiempo de fraguado inicial corresponde entonces a la diferencia entre los tiempos en los cuales se inicia y culmina el mismo. Así, para las mezclas de YF se obtuvieron tiempos de 2, 2 ½ y 5 ½ minutos con relaciones 60/40, 57/43 y 54/46, respectivamente. Mientras que los resultados para YPTVII fueron 4 minutos de fraguado para la mezcla elaborada con la relación 60/40 y un poco más de 3 minutos para las mezclas de relaciones 57/43 y 54/46.

En YF es notoria la inversa proporcionalidad existente entre la cantidad de yeso en la mezcla y el tiempo necesario para que la misma frague, comportamiento que coincide con los comentarios realizados en la sección IV.11.2. En base a ello, puede decirse que a medida que se incrementa la relación yeso/agua, la cantidad de hemihidrato que se diluye en la mezcla es mayor. Por lo tanto más rápidamente se forman y precipitan los cristales de dihidrato, teniendo como efecto final la aceleración del proceso y la reducción del tiempo de fraguado inicial de la mezcla. Debido a que todas las mezclas consideradas fueron elaboradas bajo los mismos parámetros de humectación, agitación y temperatura del agua, la divergencia observada en los valores del yeso nacional respecto a los resultados obtenidos para el yeso de referencia, probablemente estén vinculadas con parámetros que afectan considerablemente la cinética de la reacción, como son la presencia de aditivos o impurezas en el hemihidrato y/o la influencia de factores externos al sistema. La variación de la temperatura del ambiente durante la realización de los ensayos es uno de los factores que pudo haber afectado el proceso, observando que cuando se hallaba entre 22 y 23°C, las mezclas de YPTVII presentaban mayor fluidez que las elaboradas a temperatura ambiente. Adicionalmente, se

piensa que el proceso pudo haber sido influenciado por la ausencia de control en la agitación de las mezclas de manera manual.

Aún con la posible afectación de estos factores, hubo una característica de las mezclas preparadas con YF que se mantuvo constante: estas presentaron una mayor fluidez que la observada en las mezclas elaboradas con YPTVII, para todas las relaciones yeso/agua consideradas. Esta condición no resultó influenciada por la variación de la temperatura del ambiente, contrariamente a lo observado en el yeso nacional. Adicionalmente, se piensa que su presencia no confirió predisposición de las mezclas a presentar un comportamiento en particular respecto a los resultados del tiempo de fraguado inicial.

Según la teoría de fraguado, el aumento de la relación yeso/agua no sólo disminuye el tiempo de fraguado sino que permite que el mismo se inicie más tempranamente. Es por ello que en la figura 7.12.a se observa que la mezcla de YF cuya relación yeso/agua fue de 60/40, inició su proceso de fraguado aproximadamente a los 8 minutos, mientras que para las mezclas de relaciones 57/43 y 54/46, se inició a los 9 y 10 minutos, respectivamente. De forma análoga, en el yeso nacional se observa (figura 7.12.b) que la mezcla de relación 60/40 comenzó a fraguar a los 9 minutos, mientras que las mezclas de relaciones 54/46 y 57/43 comenzaron a los 12 y 13 minutos, respectivamente. Puede notarse que las curvas correspondientes a estas últimas relaciones se encuentran muy cercanas entre sí, encontrándose que la mezcla de relación 57/43 comenzó su proceso de fraguado más tardíamente que la de relación 54/46, contrario a lo obtenido para el YF.

Del análisis desarrollado anteriormente, puede decirse que las mezclas elaboradas con YF comenzaron a fraguar antes que las mezclas de YPTVII, para todas las relaciones yeso/agua consideradas, coincidiendo este comportamiento con el observado en la práctica industrial. Adicionalmente, el período de fraguado fue entre 20 y 30% más corto para las mezclas de relación 60/40 y 57/43 elaboradas con el yeso de referencia que las elaboradas con el yeso nacional. Sin embargo, el tiempo de fraguado prácticamente se duplicó con la relación yeso/agua 54/46 para la mezcla de YF en comparación con la de YPTVII, aún

cuando la tendencia esperada era la contraria, lo cual se atribuye nuevamente a la influencia de factores involucrados en el proceso.

Con la condición de menor fluidez de las mezclas de YPTVII, se presumía que las mismas experimentarían un período de fraguado más corto que el obtenido para el yeso importado. Sin embargo, se pudo constatar que la fluidez inicial de la mezcla no tuvo efecto sobre el progreso y culminación del fraguado, sino que fueron las propiedades intrínsecas de cada material, sus características físicas y los factores externos anteriormente mencionados, los que determinaron dicho comportamiento. Es por ello que se recomienda llevar a cabo nuevamente los ensayos de tiempo de fraguado inicial para ambos materiales, procurando que las condiciones ambientales sean las mismas y realizando un mayor número de determinaciones. Con esto se corroborarían los resultados obtenidos y analizados en esta sección, e igualmente se lograría confirmar lo planteado acerca del motivo de las divergencias encontradas.

VII.2.2.- TEMPERATURA DE FRAGUADO.

Es bien conocido que la reacción de fraguado del hemihidrato es exotérmica, pudiéndose observar sobre una gráfica la variación de la temperatura en función del tiempo. Con la finalidad analizar dicho comportamiento, se llevó a cabo este ensayo para mezclas de YF y YPTVII, cuyas gráficas se presentan en la figura 7.13. En estas puede observarse que las curvas obtenidas presentan una temperatura máxima alcanzada para cada relación yeso/agua en un tiempo determinado. Dichas curvas, análogamente a lo realizado en el ensayo de Vicat, corresponden al ajuste de los puntos promedio obtenidos a partir de los datos experimentales. De manera que en este análisis también se cuenta con una desviación estándar que corresponde a 1 minuto y 0,5°C para YF y 1,2 minutos y 1 °C para YPTVII, en los ejes X y Y respectivamente.

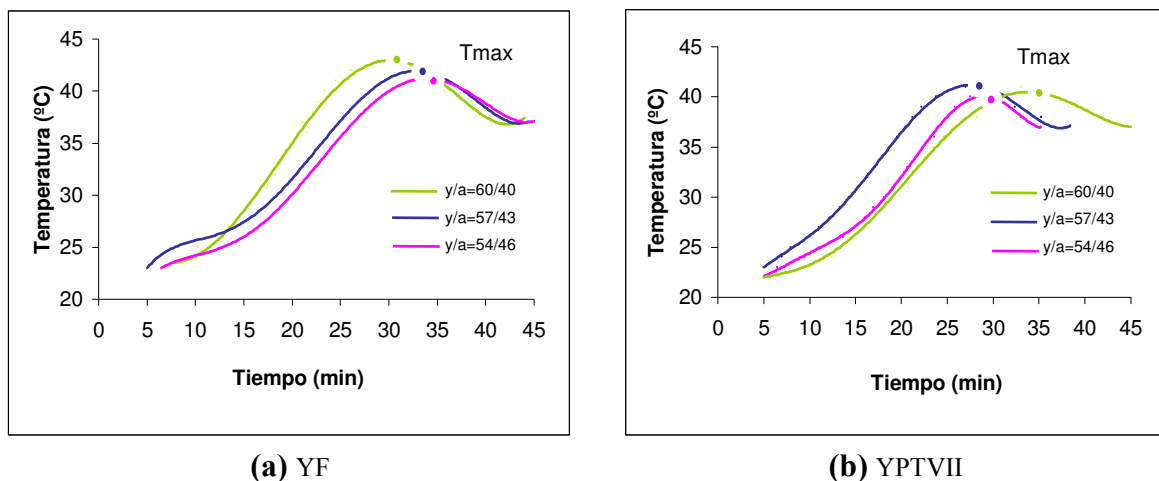


Figura 7.13.- Temperatura de fraguado de mezclas de YF y YPTVII con diferentes relaciones yeso/agua.

En el YF se observa que la temperatura máxima alcanzada fue de 43°C para la mezcla de relación 60/40, mientras que para las mezclas de relaciones 57/43 y 54/46 la temperatura máxima fue de 42 y 41 °C, respectivamente. Dicho comportamiento puede ser explicado de manera clara mediante el proceso correspondiente a la velocidad de fraguado mencionado en la sección IV.10. En este sentido, es de recordar que para dar lugar a la formación de los cristales de dihidrato, el hemihidrato debe reaccionar estequiométricamente con el agua. Debido a que el yeso posee una conductividad térmica relativamente baja y es necesario calentar la masa de agua que se encuentra en exceso en la mezcla, el aumento de temperatura se retrasa respecto al tiempo de reacción real. Es decir, que la porción de agua que se encuentra en exceso, además de servir para la elaboración de una mezcla moldeable, actúa como inhibidor de la temperatura puesto que la reacción de hidratación no genera el calor suficiente para calentarla. Por lo tanto, mientras menor sea la relación yeso/agua, menor debería ser la temperatura máxima alcanzada, comportamiento obtenido en las mezclas elaboradas con el yeso de referencia.

Esta directa proporcionalidad encontrada entre la cantidad de yeso en la mezcla y la temperatura máxima alcanzada, no se observa en el caso de YPTVII. Para este se encontró que la mezcla elaborada con la relación yeso/agua 57/43 fue la que obtuvo la temperatura máxima más alta, correspondiente a 42 °C. Luego se hallan las curvas de relación 60/40 y 54/46 con temperaturas máximas de 41 y 40 °C, respectivamente. Debido a que a todas las

mezclas se les preparó con una misma fuente de agua y utilizando los mismos períodos de humectación y agitación, se piensa que las divergencias encontradas en el yeso nacional pueden deberse a la influencia de factores externos como la ausencia de control en la realización del mezclado manual y la modificación de la temperatura del ambiente que, como ocurrió en los ensayos de Vicat, varió entre 22 y 25°C.

Como se mencionó en la sección IV.10, cuando es alcanzada la temperatura máxima la mayor parte de hemihidrato se ha convertido en dihidrato, por lo que puede decirse que para YF esta transformación ocurrió inicialmente en la mezcla cuya relación yeso/agua fue 60/40, ya que la temperatura máxima de esta se alcanzó a los 30 minutos, mientras que para las mezclas de relaciones 57/43 y 54/46 se alcanzó a los 32 y 33 minutos, respectivamente. De manera que la culminación del tiempo de fraguado inicial se llevó a cabo en el mismo orden de mezclas que el observado en los ensayos de Vicat, por lo que las explicaciones suministradas en esa sección, basadas en la teoría cristalina del fraguado, son las mismas que justifican el actual comportamiento.

Los tiempos en los cuales las temperaturas máximas fueron alcanzadas para las mezclas de YPTVII corresponden a 27, 28 y 34 minutos con las relaciones de 57/43, 54/46 y 60/40, respectivamente. Estas constantes divergencias encontradas en el yeso nacional respecto a la teoría y al comportamiento obtenido con YF, también pueden ser atribuidas a problemas durante la elaboración de la mezcla y a la influencia de los factores ya mencionados. Se piensa que si las relaciones yeso/agua consideradas hubiesen estado más separadas entre sí, la tendencia obtenida para YPTVII en cuanto a la temperatura máxima y al momento en el que la misma fue alcanzada, hubiese sido la misma encontrada con YF.

Aún cuando los factores mencionados pudieron influenciar la realización de los ensayos, las diferencias aquí encontradas resultan mucho menos notorias que las observadas en el análisis del tiempo de fraguado, ya que el rango de variación de la temperatura respecto a la relación yeso/agua es muy reducido. Esto posiblemente se deba a que el proceso de la determinación de la temperatura de fraguado tiene una duración considerablemente más larga que la del ensayo de Vicat, sobre la cual es más difícil la detección de afecciones puntuales

en el proceso. En todo caso, se recomienda la realización de estos ensayos bajo condiciones externas lo menos variantes posible, para así confirmar que son estas últimas las fuentes de error que originan las divergencias encontradas.

De manera general, estos ensayos permiten establecer que para los dos tipos de sulfato de calcio hemihidratado estudiados y para las tres relaciones yeso/agua consideradas, la temperatura máxima se encuentra entre 40 y 43 °C, alcanzada en un tiempo comprendido entre 27 y 33 minutos.

VII.3.- PROPIEDADES DE LAS MASAS FRAGUADAS.

Una vez analizadas tanto las propiedades del hemihidrato como los aspectos importantes observados durante el fraguado, se procedió a la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y estructuras de las masas fraguadas elaboradas con YPTVII y YF, finalizando con estas el ciclo de caracterización de ambos materiales.

VII.3.1.- RESISTENCIA A LA FLEXIÓN E ÍNDICE DE ABSORCIÓN.

En la figura 7.14 se muestran las gráficas obtenidas a partir de los ensayos de resistencia a la flexión en tres puntos e índice de absorción, tanto para YF como para YPTVII. La primera de estas variables corresponde a una caracterización mecánica y la segunda a una caracterización física, sin embargo, se analizan en conjunto debido a la mutua relación entre estos dos parámetros.

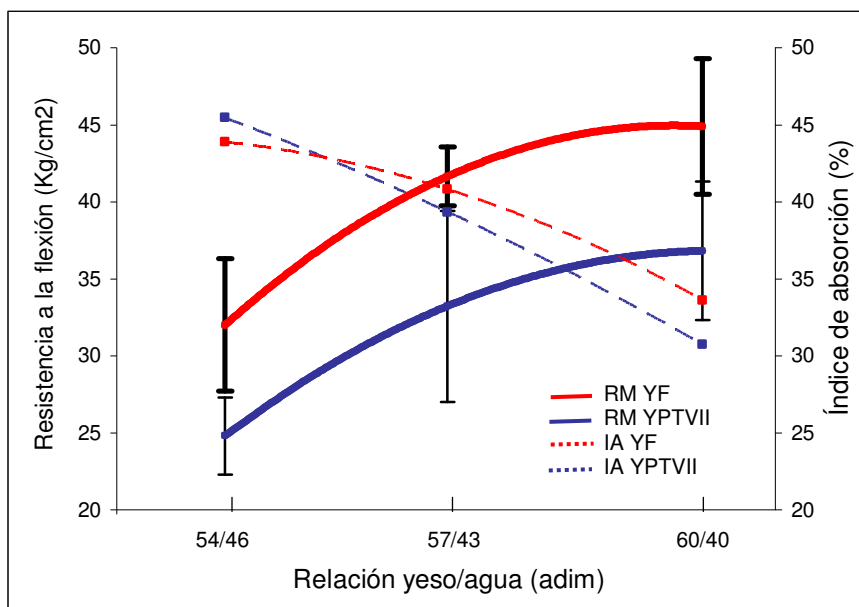


Figura 7.14.- Resistencia a la flexión (RM) e índice de absorción (IA) de YF y YPTVII para diferentes relaciones yeso/agua.

El ensayo de resistencia a la flexión fue realizado con barras de YPTVII y YF que presentaron una humedad de 1,5 y 0,17%, respectivamente. Dichas barras fueron elaboradas y conservadas bajo las mismas condiciones, por lo que la humedad contenida en ellas posiblemente responde a la capacidad higroscópica de cada material y al agua alojada en los espacios vacíos dejados por las burbujas de aire atrapadas en la mezcla. Adicionalmente, se piensa que una mayor cantidad de agua combinada se encuentra adherida a los cristales de dihidrato de YPTVII, ya que estos presentan menor tamaño y por lo tanto existe una superficie de contacto más extensa, originado que los frentes de acción sean más abundantes que los encontrados en YF. Sin embargo, estas aseveraciones deberían ser corroboradas con la determinación de la superficie específica de los cuerpos fraguados, para así considerarlas como ciertas.

Debe mencionarse que las curvas presentadas en la figura 7.14 fueron elaboradas con los valores promedios calculados a partir de los datos experimentales obtenidos para las múltiples barras de yeso elaboradas. De manera que el comportamiento de las dos variables mostradas en esta figura no responde únicamente a una línea sino que se encuentra dentro de un área de dispersión que indica las desviaciones de los resultados experimentales respecto a los valores promedios calculados, tal y como se muestra con las barras de error que fueron trazadas en las curvas de resistencia. En el caso del índice de absorción las desviaciones también fueron determinadas pero por razones prácticas se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4.- Desviaciones de los valores de índice de absorción obtenidos para YF y YPTVII con distintas relaciones yeso/agua.

Relación yeso/agua	YF	YPTVII
54/46	43,90 ± 1,97	45,46 ± 1,38
57/43	40,82 ± 1,02	39,35 ± 1,44
60/40	33,63 ± 1,25	30,75 ± 1,82

Como puede observarse, dichas desviaciones se encontraron entre 1 y 2 %, valores que resultan despreciables respecto a la magnitud de los índices de absorción encontrados y a la magnitud de los errores obtenidos para la resistencia a la flexión, los cuales se hallan entre 2 y 6 Kg/cm².

Se observa entonces en figura 7.14 que al aumentar la relación yeso/agua se obtiene un incremento en la resistencia a la flexión tanto para YF como para YPTVII, logrando curvas ascendentes y prácticamente paralelas. Estos resultados coinciden con lo mencionado en la sección IV.14, respecto a que la resistencia mecánica es proporcional a la cantidad de polvo de yeso utilizada en la mezcla. Adicionalmente, según lo señalado en la sección IV.13, la porosidad total de la pieza fraguada disminuye a medida que la cantidad de agua en la mezcla se reduce, teniendo en cuenta que la distribución, forma y tamaño de los microporos creados responden tanto al efecto del agua en exceso que queda sin reaccionar como a la interacción entre los cristales de dihidrato formados. Por lo tanto, mientras menor sea la relación yeso/agua, mayor es la porosidad de la masa fraguada y menor la carga que esta última es capaz de soportar.

Uno de los aspectos más resaltantes es que los valores de resistencia a la flexión obtenidos resultaron entre 20 y 30% mayores para el YF que para el YPTVII. Este fenómeno puede atribuirse a la configuración y distribución de los cristales de sulfato de calcio dihidratado formados a partir de cada yeso y al grado de entrelazamiento entre los mismos. En este sentido, se piensa que en el yeso de referencia estos cristales deben presentar una cierta condición que les confiere a las masas fraguadas de este una mayor resistencia a la flexión. Adicionalmente, estos resultados tienen relación directa con el grado de porosidad presente en las masas fraguadas, infiriéndose que en los cuerpos de YPTVII la porosidad debe ser menos uniforme, tanto en distribución como en tamaño, que la encontrada en los cuerpos de YF.

Por otra parte, puede notarse que las curvas del índice de absorción son de carácter ascendente, debido a que este parámetro resulta mayor a medida que se reduce la relación yeso/agua. Este comportamiento coincide con las referencias consultadas y responde

directamente al grado de porosidad presente en las masas fraguadas, ya que las mezclas que fueron elaboradas con menores cantidades de yeso permitieron la formación de cuerpos con mayores espacios vacíos en su interior y por lo tanto una mayor capacidad para la retención de líquido. Por lo tanto, se evidencia una relación de directa proporcionalidad entre el índice de absorción obtenido y el grado de porosidad existente.

Adicionalmente, se observa que, a diferencia de las curvas de resistencia a la flexión, las de índice de absorción se encuentran muy cercanas entre sí, llegando incluso a cruzarse entre las relaciones 54/46 y 57/43. En base a estos resultados, es de recordar que existe una desviación de 1-2% en los índices de absorción obtenidos, lo cual permite entrever una barra de errores dentro de la cual puede que la curva del índice de absorción de YPTVII se halle en todo momento por debajo de la curva de YF.

En la práctica se ha encontrado que los rangos recomendados de resistencia a la flexión e índice de absorción para moldes destinados al conformado de materiales cerámicos son 30-40 Kg/cm² y 35-40%, respectivamente. Tanto para YPTVII como para YF, se observa que la relación yeso/agua que arroja resultados más cercanos a los antes mencionados es la 57/43, por lo que la misma se consideró como óptima y constituyó una condición para la elaboración de las barras con las cuales se evaluó posteriormente el avance en la modificación de las propiedades físicas y mecánicas del yeso nacional.

Así mismo, se decidió considerar la resistencia a la flexión como una variable determinante y fundamental para la evaluación de las propiedades mecánicas del yeso nacional modificado, cuidando permanentemente que el índice de absorción se mantuviera dentro de los límites aceptados.

VII.3.2.- DENSIDAD APARENTE.

La determinación de la densidad aparente es importante porque permite relacionar el volumen que ocupa una cierta masa de yeso fraguada con otras características físicas como

porosidad, resistencia a la flexión e índice de absorción. En la tabla 7.5 se muestran los resultados obtenidos en los cuerpos elaborados con la relación yeso/agua considerada como óptima para YF y YPTVII.

Tabla 7.5.- Densidad aparente de masas fraguadas de YF y YPTVII con la relación 57/43.

Tipo de yeso	Densidad aparente (gr/cm³)
YF	0,995
YPTVII	0,987

Los valores presentados corresponden al promedio de tres determinaciones realizadas, en las cuales se obtuvo una desviación estándar inferior al 0,1 % para los dos tipos de yesos. Se evidencia el grado de similitud existente entre las densidades obtenidas para los cuerpos de YF y YPTVII, a partir de lo cual se infiere que el volumen de los espacios vacíos, debido tanto a la porosidad como al aire atrapado dentro de la mezcla, resulta similar en los cuerpos elaborados con el yeso nacional y con el yeso de referencia. Por estas razones, tanto la masa como el volumen total de estos cuerpos permitieron la obtención de densidades aparentes tan similares. Sin embargo, esto no implica que dichos espacios se encuentren uniformemente distribuidos en las masas fraguadas, especialmente en los elaborados con YPTVII, en los cuales se observó una menor resistencia a la flexión probablemente a causa de esta condición.

VII.3.3.- POROSIDAD.

Como se mencionó en la sección VI.1.3, esta propiedad se determinó a partir de los valores de densidad real y densidad aparente de los cuerpos con relación yeso/agua 57/43 calculados tanto para el YF y el YPTVII. En base a esto se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 7.6, en los que puede observarse que el porcentaje de porosidad obtenida para los cuerpos elaborados con el yeso de referencia es por 0.52 unidades superior a la encontrada en el yeso nacional.

Tabla 7.6.- Porosidad de las masas fraguadas de YF y YPTVII con la relación 57/43

Tipo de yeso	Porosidad (%)
YF	62,15
YPTVII	61,63

Este resultado explica el comportamiento de la curva del índice de absorción mostrada en la sección VII.3, en la que puede notarse que los valores de este parámetro para los cuerpos de YF con relaciones yeso/agua 57/43 y 60/40, superan los obtenidos con las mismas relaciones para las masas de YPTVII. En el caso de los cuerpos cuya relación fue de 54/46 el resultado hubiese sido análogo de considerarse las desviaciones estándar calculadas para cada punto. En todo caso, existe correspondencia entre los valores de porosidad e índice de absorción, demostrando que ambas variables son directamente proporcionales.

VII.3.4.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) Y MICROANÁLISIS.

A partir de las micrografías obtenidas mediante MEB es posible analizar la forma y tamaño de la porosidad encontrada, la estructura cristalina que presentan las muestras a la fractura, así como la forma, tamaño y composición de las impurezas presentes. Los resultados obtenidos a partir la realización de este análisis para cuerpos de YF y YPTVII con diferentes relaciones yeso/agua, son mostrados a continuación.

1) YESO FORTE.

- **RELACIÓN YESO/AGUA 60/40.**

En la figura 7.15.a puede observarse la presencia de poros de forma irregular uniformemente distribuidos en toda la superficie, con tamaños inferiores a 70 μm . Igualmente, es notoria la presencia de regiones más claras sobre las cuales se hicieron ampliaciones sucesivas (figuras 7.15.b y d). En la primera de ellas se observa una

partícula de geometría cuadrada con dimensiones laterales de 25 μm , cuyo microanálisis de rayos X (figura 7.15.c) indica que corresponde a una formación de calcio, azufre, sílice y oxígeno. La segunda partícula presenta una longitud de 55 μm y se encuentra constituida por calcio principalmente, con presencia de azufre y oxígeno en menor proporción, según el espectro mostrado en la figura 7.15.e.

- **RELACIÓN YESO/AGUA 57/43.**

En la micrografía de la figura 7.16.a se observan poros de forma irregular, abundantes y con una distribución más uniforme, tanto de tamaño como de forma, que la encontrada en la muestra con relación yeso/agua de 60/40. Este tipo de porosidad le confiere homogeneidad a la masa fraguada y, por lo tanto, una mejor resistencia mecánica y capacidad de absorción. El comportamiento de esta última se atribuye al hecho de que el efecto capilar se ve influenciado positivamente cuando los poros del cuerpo son de tamaño y distribución uniformes, evidenciándose la mejora en el incremento del índice de absorción de estas piezas respecto a las elaboradas con relación 60/40.

Adicionalmente, puede notarse la presencia de impurezas que resultan casi imperceptibles a la magnificación de la figura 7.16.a, pero que al ser amplificadas en las figuras 7.16.b y d, representan importantes formaciones. Es así como en la primera de ellas se observa una partícula de 13 μm de diámetro, cuyo microanálisis (figura 7.16.c) indica que se trata de un cuerpo constituido fundamentalmente por sílice y azufre en menor proporción. En la segunda puede notarse un aglomerado con un relieve bastante particular que presenta una longitud mayor de 100 μm y está conformado principalmente por calcio según el espectro correspondiente (figura 7.16.e).

- **RELACIÓN YESO/AGUA 54/46.**

En la micrografía realizada a la superficie de fractura (figura 7.17.a), se observa una porosidad con dos formas y distribuciones de tamaño bien definidas: una conformada por un conjunto de poros de morfología irregular con un tamaño aproximado de 45 μm , cuya

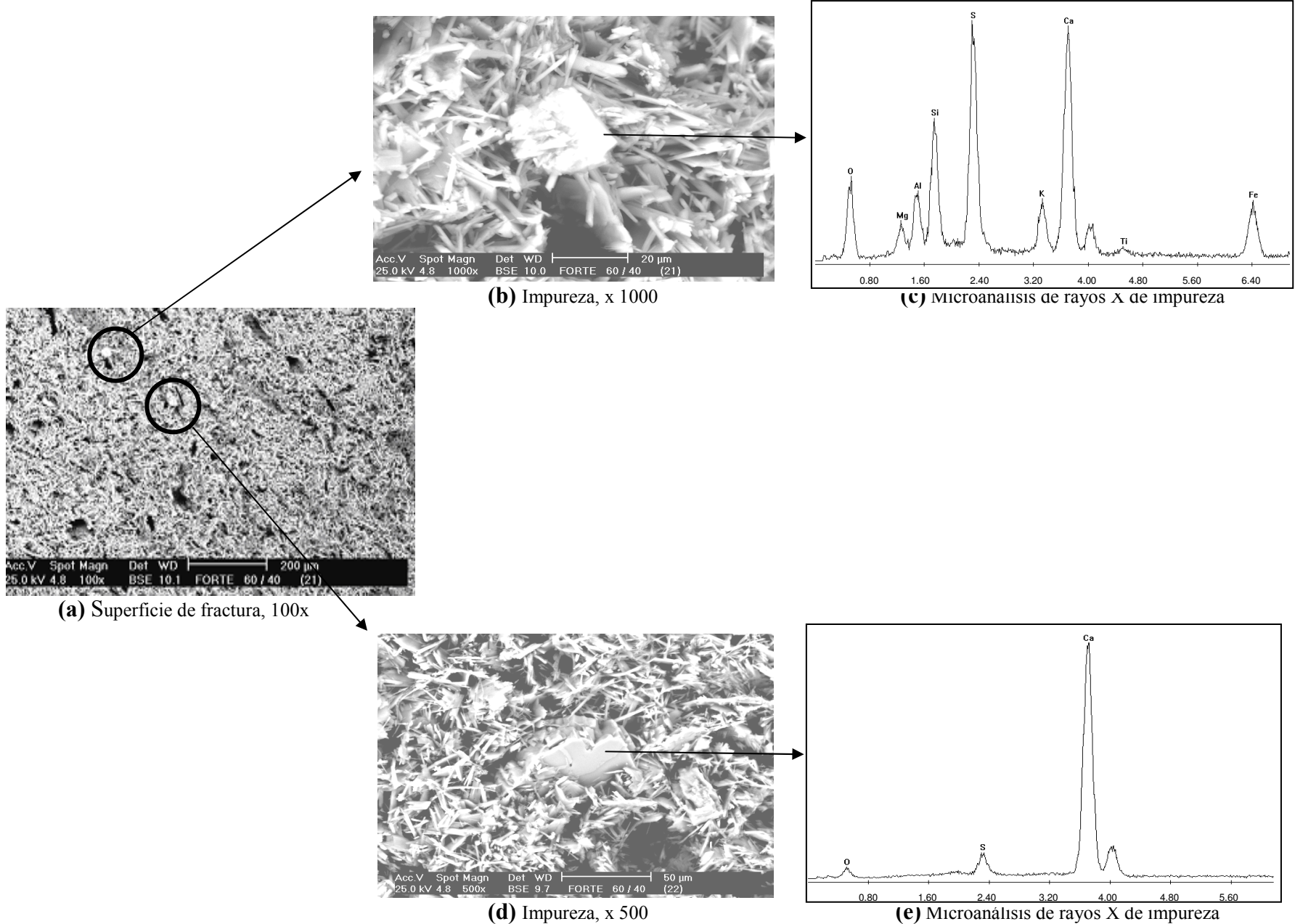


Figura 7.15.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YF de relación 60/40.

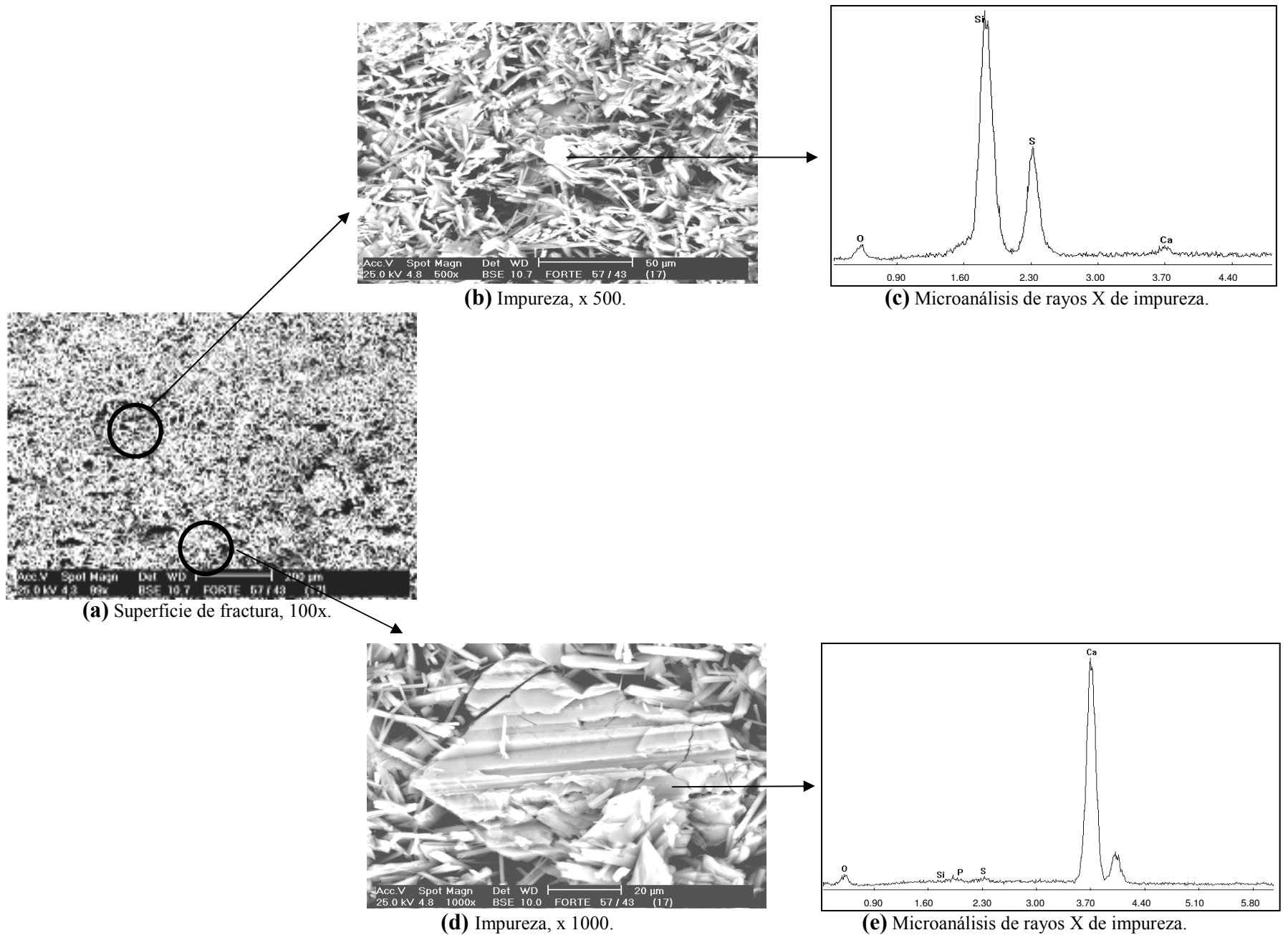


Figura 7.16. Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YF de relación 57/43.

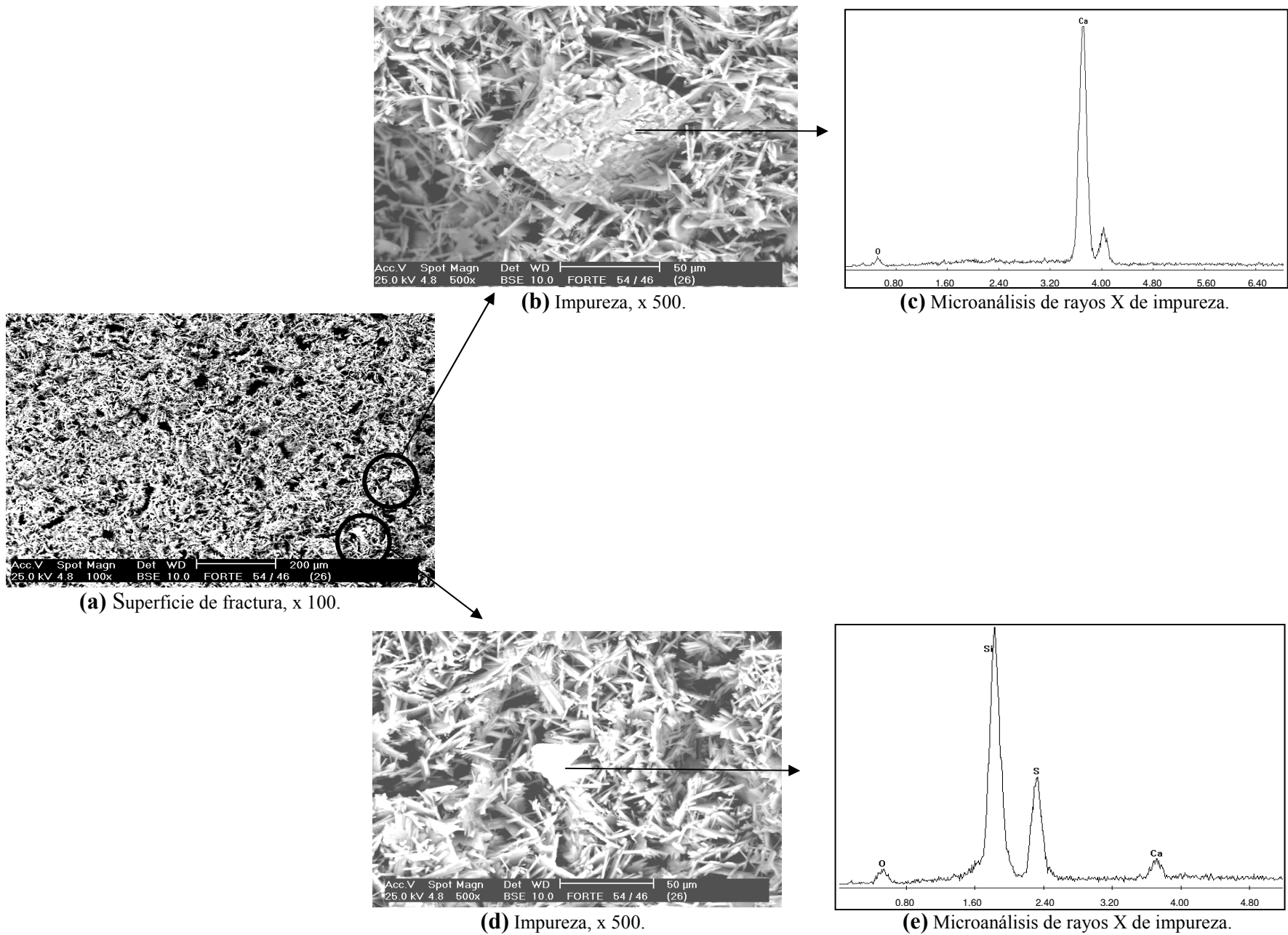


Figura 7.17.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YF de relación 54/46.

presencia se atribuye al agua que no reaccionó y quedó retenida en la masa fraguada, y otra constituida por poros pequeños o capilares de tamaño uniforme e inferior a 10 μm . Aún cuando se evidencia una porosidad total sumamente irregular por los dos tipos de poros encontrados, se piensa que esta condiciona aún más la pieza para la absorción, lo que explica los valores del índice de absorción mostrados para YF con esta relación yeso/agua en la sección VII.3.1.

En cuanto a las impurezas presentes, en la figura 7.17.b se observa un aglomerado constituido fundamentalmente por calcio y cuya longitud mayor es 100 μm , mientras que en la figura 7.17.d puede notarse una impureza de 25 μm , que según el microanálisis mostrado contiene sílice en mayor proporción pero también presenta azufre, oxígeno y calcio.

En general, puede decirse que los cuerpos fraguados de YF presentan una superficie de fractura variante respecto a la relación yeso/agua, encontrándose una porosidad de tamaño regular y distribución uniforme en las probetas elaboradas con la relación 57/43. Por otra parte, las impurezas encontradas se dividen en dos tipos, los aglomerados formados fundamentalmente por calcio y las que tienen como componente principal la sílice; estas últimas posiblemente provienen de las impurezas presentes en la piedra de gypse a partir de la cual se elaboró el hemihidrato.

2) YESO PARIÁ TIPO VII.

- **RELACIÓN YESO/AGUA 60/40.**

En la micrografía 7.18.a se observan huellas esféricas con diámetros aproximados de 150 μm , las cuales fueron dejadas por las burbujas de aire que quedaron atrapadas durante el proceso de fraguado. Como se sabe, la viscosidad de las mezclas y suspensiones se incrementa cuando aumenta el contenido de sólidos en el sistema polvo/agua con el que fueron elaboradas. En este sentido, se atribuye a la alta viscosidad

que presentó la mezcla 60/40 la dificultad para permitir la salida del aire, aún cuando se hizo énfasis en la vibración para facilitar el proceso. Este comportamiento no ocurre en las masas fraguadas de YF, debido a la baja viscosidad que presentaron estas mezclas respecto a las de YPTVII.

En cuanto a la porosidad encontrada, puede decirse que la misma viene dada por poros de alta irregularidad pero de uniforme distribución en toda la superficie, encontrándose que los de mayor tamaño están entre 25 y 50 μm . Adicionalmente, es notoria la presencia de estructuras cuya tonalidad es más clara y que por ser difíciles de analizar a la magnificación de la figura 7.18.a, fueron amplificadas (figuras 7.18.b y d). La primera de ellas constituye un aglomerado cuya longitud mayor es 90 μm , formado fundamentalmente por calcio, según el microanálisis realizado. La segunda impureza, que presenta una longitud aproximada es de 40 μm , se encuentra formada por un mayor número de elementos entre los que destaca sílice, aluminio y potasio, los cuales son mostrados en el espectro de la figura 7.18.d.

- **RELACIÓN YESO/AGUA 57/43.**

En la observación general de la superficie de fractura mostrada en la figura 7.19.a, se observan también huellas esféricas de aire atrapado, pero de menor tamaño ($\sim 80\mu\text{m}$) y proporción que las encontradas en la relación 60/40. La disminución en la cantidad de aire atrapado se atribuye a la reducción de la viscosidad de la mezcla como consecuencia de la utilización de una menor cantidad de yeso. Bajo esta condición, se facilitó la salida del aire durante el proceso de vibración de la mezcla.

La porosidad encontrada en este caso es más abundante y homogénea, tanto en tamaño como en morfología y distribución, que la encontrada con la relación 60/40. El tamaño promedio de los poros es 12 μm , aunque también se observan poros de hasta 30 μm , pero en menor proporción.

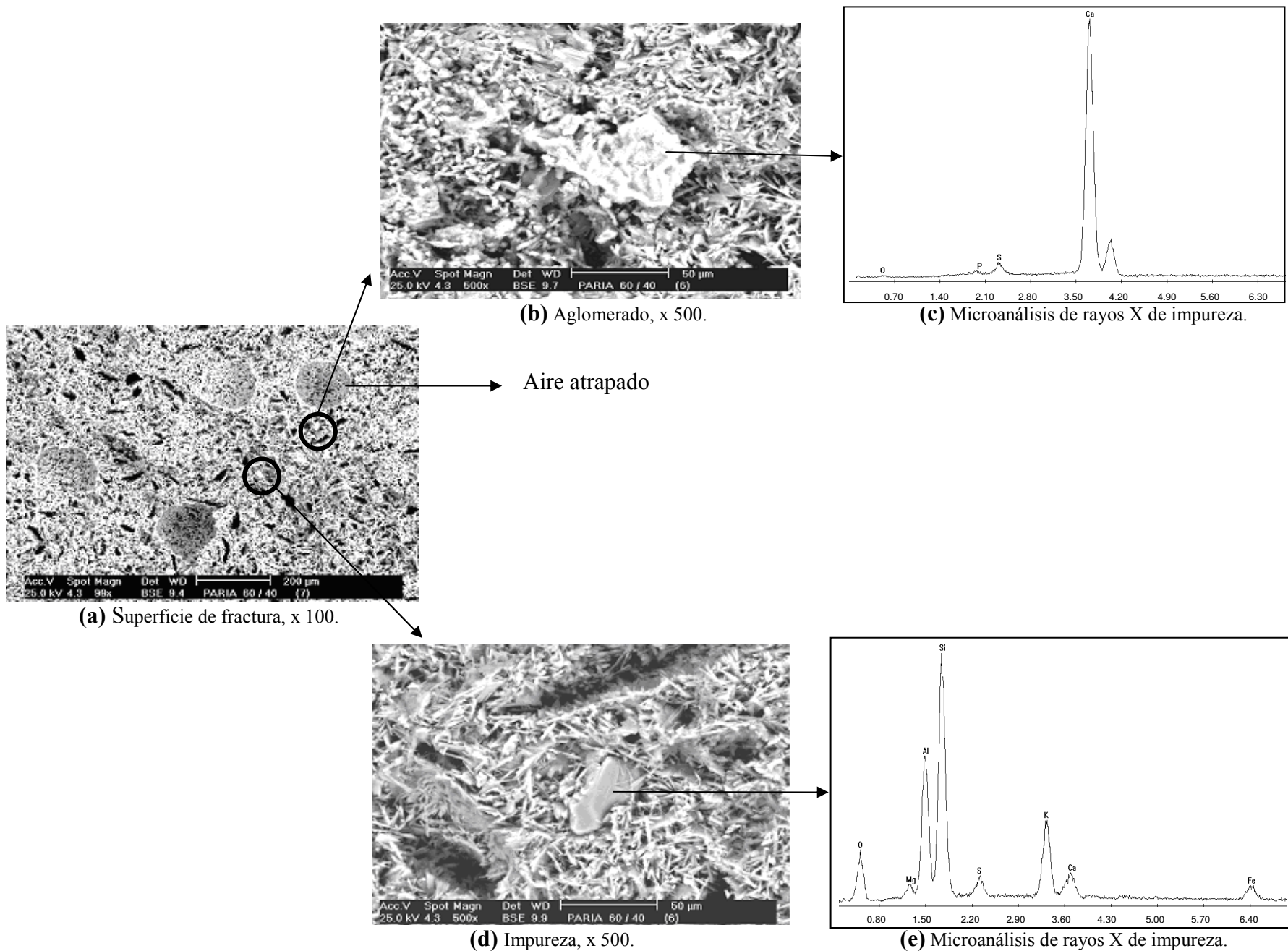


Figura 7.18.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YPTVII de relación 60/40.

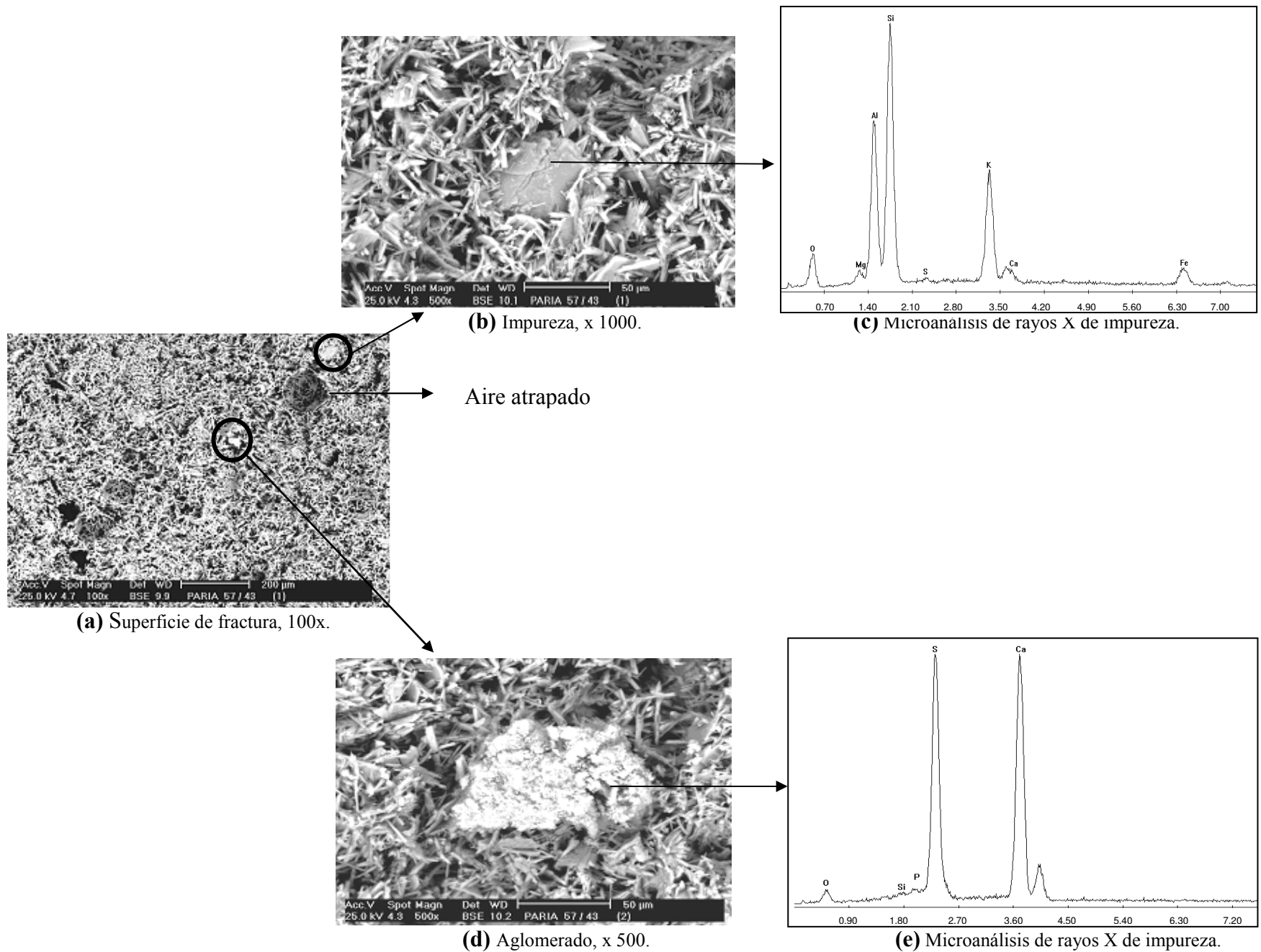


Figura 7.19.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YPTVII de relación 57/43.

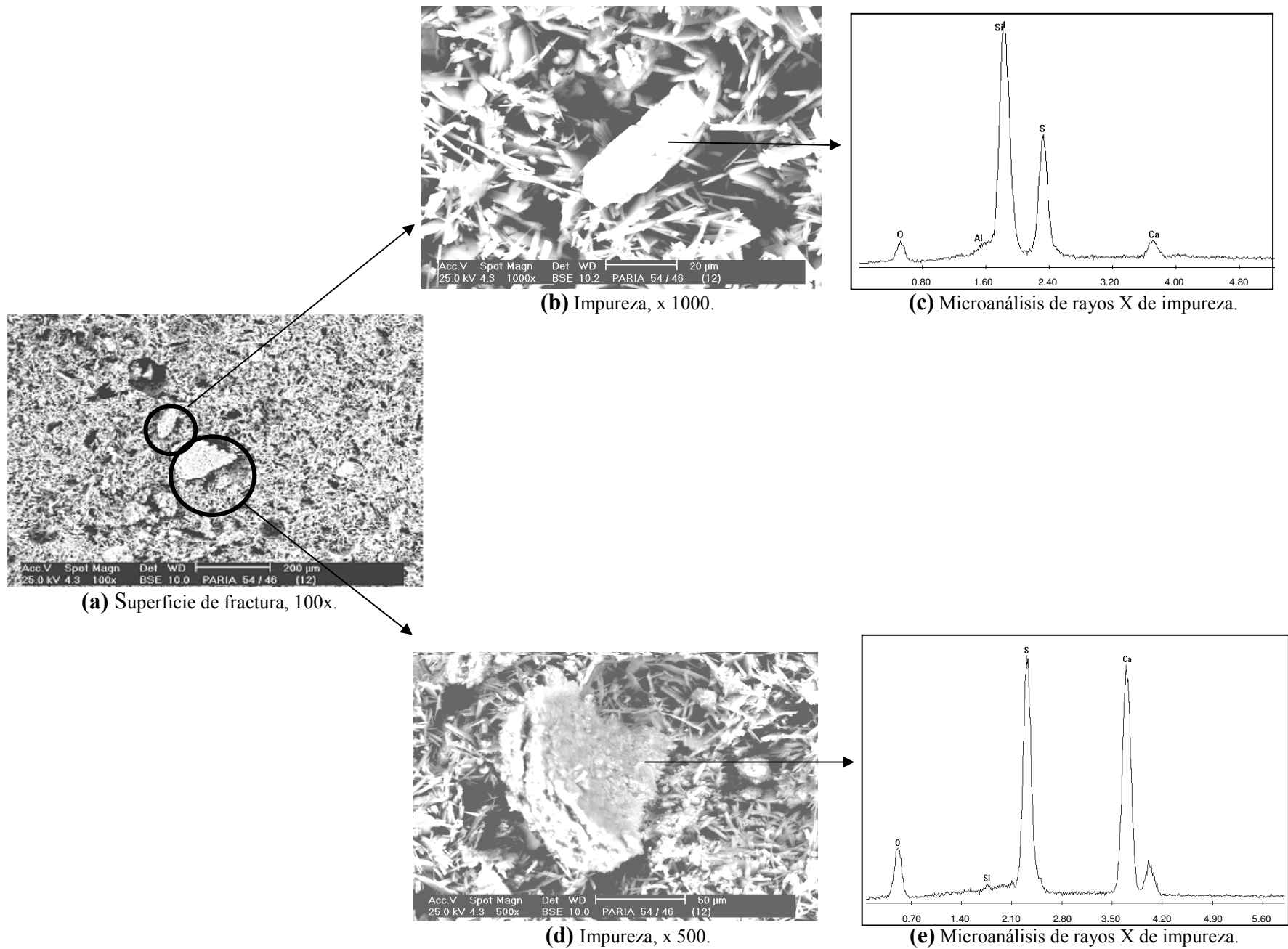


Figura 7.20.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para una muestra de YPTVII de relación 54/46.

Adicionalmente, se encontraron impurezas notorias, las cuales son mostradas a mayor magnificación (figura 7.19.b y d). En la primera de ellas se determinó la presencia de una partícula compuesta por sílice, aluminio y potasio (figura 7.19.c), cuya longitud mayor es 75 μm . En la segunda se observó que se trata de un aglomerado de 100 μm que según el microanálisis (figura 7.19.e) se encuentra constituido principalmente por calcio, azufre y oxígeno. Este último posiblemente se trata de la unión de microcristales de sulfato de calcio.

- **RELACIÓN YESO/AGUA 54/46.**

En la micrografía de la superficie de fractura (figura 7.20.a), se observan dos aspectos que resultan considerablemente diferentes a los comentados para las relaciones 60/40 y 57/43. En primer lugar, es notoria la diversidad de impurezas en la superficie, con tamaños variantes entre 25 y 180 μm . En segundo término, se observa que las huellas dejadas por las burbujas de aire prácticamente no están presentes y en su lugar se hallan poros irregulares cuyo tamaño se encuentra entre 20 y 100 μm , formados principalmente por el agua en exceso que quedó atrapada en la masa fraguada. La ausencia de las huellas de aire se atribuye a la disminución de la viscosidad de esta mezcla respecto a aquellas cuyo contenido de yeso fue mayor.

En cuanto a las impurezas halladas, el microanálisis de la figura 7.20.c indica que la partícula de forma cilíndrica cuya longitud aproximada es de 40 μm mostrada en la figura 7.20.b, se encuentra formada principalmente por óxidos de sílice y azufre. La impureza mostrada en la figura 7.20.d se trata de un aglomerado de microcristales de sulfato de calcio, con una longitud de 100 μm y un aspecto similar a los aglomerados encontrado en las muestras anteriores.

Puede decirse entonces que los resultados de MEB, al igual que los resistencia mecánica e índice de absorción, permiten corroborar que la relación yeso/agua de 57/43 utilizada en la industria cerámica para la fabricación de moldes, efectivamente resulta la más recomendable, puesto que tanto el tamaño como la distribución de la porosidad encontrada

en las probetas elaboradas con esta relación, presentan las mejores características obtenidas dentro del estudio realizado para las relaciones 60/40, 57/43 y 54/46 con el yeso nacional y el de referencia. Adicionalmente, se observó en ambos yesos la presencia de tres tipos distintos de impurezas: aquellas en las cuales predomina el sílice, en el caso de YF, otras conformadas por sílice, aluminio, potasio y trazas de otros materiales, en el caso de YPTVII, y por último, los aglomerados de calcio y sulfato de calcio encontrados en ambos yesos. Es probable que estas últimas sean producto de la unión de microcristales de calcio y sulfato de calcio que no lograron disolverse o dispersarse en el agua y pasaron a formar cuerpos porosos duros. Mientras que el origen de las impurezas constituidas por sílice y otros metales, se atribuye a las trazas de silicoaluminatos contenidos originalmente en la piedra de gypse y arrastrados durante el proceso de producción del hemihidrato.

Se observaron mayores dimensiones en las impurezas encontradas en el yeso nacional que en las obtenidas en el yeso de referencia, siendo estas las principales constituyentes de la población granulométrica de YPTVII que es retenida en malla 80. Este retenido si bien representa menos del 1% en peso del yeso, le confiere a la superficie de los cuerpos elaborados con YPTVII importantes irregularidades, es por ello que resulta de interés y constituye un punto de gran importancia en la elaboración de este proyecto el estudio de las consecuencias de la presencia de impurezas en el YPTVII durante proceso de colado de las piezas cerámicas, tanto por la cantidad en la que se encuentran como por su naturaleza. Con esa perspectiva se enfocarán las actividades a desarrollar posterior a la caracterización de ambos yesos.

VII.4.- EFECTOS DE IMPUREZAS EN YESO PARIA TIPO VII.

Es de recordar la diferencia entre las propiedades mecánicas y estructurales de YF y YPTVII encontrada en el desarrollo de la caracterización de los cuerpos fraguados. A partir de estos resultados se seleccionó la resistencia a la flexión como la variable a considerar para la evaluación del yeso nacional modificado y para estudiar el efecto de las impurezas y aglomerados presentes principalmente en la fracción gruesa. La presencia de estas se confirmó con los ensayos de microscopía óptica y posteriormente se determinó su composición mediante el microanálisis realizado durante la MEB. Es por ello que antes de evaluar los efectos de la modificación de variables sobre las propiedades del yeso nacional, se decidió desarrollar una sección para estudiar la constitución de dichas impurezas, observar su ubicación en los moldes y proponer un mecanismo relativo al deterioro de la superficie de estos últimos.

VII.4.1.- PERÍODO DE DURACIÓN DE MOLDES DE YESO.

Dos son los factores principales que limitan la duración de un molde de yeso. Uno es el cambio de sus dimensiones más allá de los límites tolerables debido al desgaste químico, y el otro es el deterioro superficial por acción de los materiales solubles y abrasivos de la barbotina. El cambio dimensional es particularmente grave en piezas de colada sólida, ya que su tamaño y peso aumentan con el desgaste del molde. (Norton, 1975). La existencia de condiciones adecuadas en el almacenamiento de estos influye también sobre su eficiencia y duración. Es por ello que una temperatura y humedad constantes, la ausencia de polvos y un adecuado secado de los moldes, son características deseables para obtener homogeneidad en el moldeo. En la figura 7.21, obtenida mediante estereografía, se muestra la superficie de un molde de YPTVII cuya vida útil ha finalizado (80 coladas).

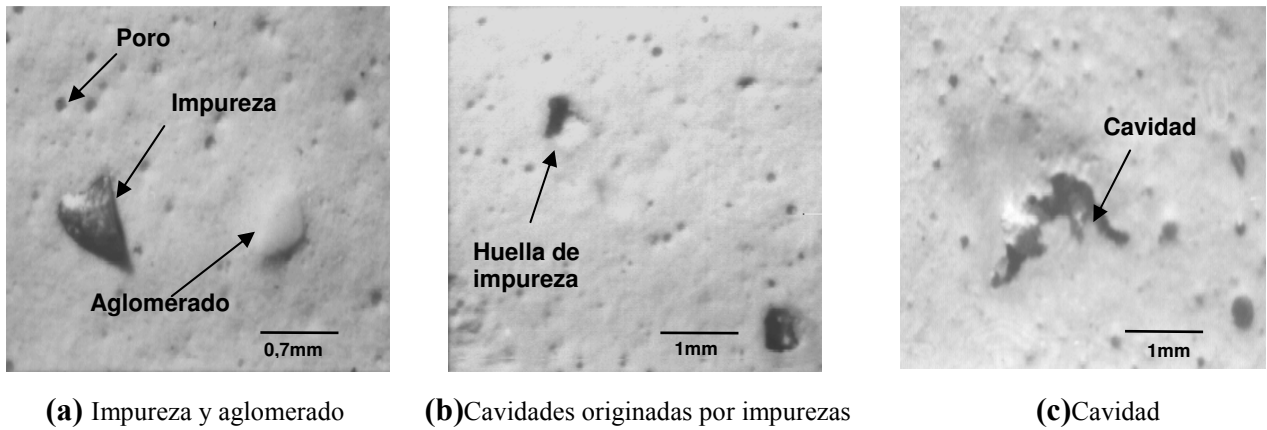


Figura 7.21.- Superficie de molde de YPTVII con 80 coladas.

En la figura 7.21.a se evidencia que el tamaño de la impureza y el aglomerado superan considerablemente el tamaño de los poros encontrados, además se observa que la porosidad mantiene una distribución y tamaño uniformes en las micrografías mostradas. En la figura 7.21.b puede notarse la presencia de cavidades de tonalidad oscura, morfología irregular y una profundidad drásticamente mayor que la encontrada en los poros, estas son huellas típicas del desprendimiento de impurezas incrustadas en la superficie del molde. Se muestra a mayor magnificación otra cavidad en la figura 7.21.c que carece de forma y profundidad definida.

A modo comparativo, se presenta en la figura 7.22 la superficie de un molde vencido de YF, en la cual no se observan el tipo de defectos anteriormente analizados en YPTVII, debido a que el tamaño de las impurezas y las consecuencias causadas por estas se encuentran en una proporción tan pequeña, que resultan imperceptibles a la observación en el estereógrafo.

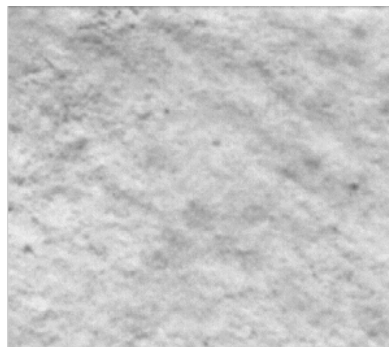


Figura 7.22.- Superficie de molde de YF con 120 coladas.

Con el fin de complementar estos resultados y estudiar las características de estas impurezas, una porción de la superficie de un molde de YPTVII con 80 coladas fue observada y analizada también mediante MEB, de donde se obtuvieron las micrografías mostradas en la figura 7.23. En la vista general de la superficie del molde (figura 7.23.a) puede notarse una porosidad de dimensiones regulares ($\sim 25\mu\text{m}$) y distribución uniforme, propia de los cuerpos fraguados cuya relación yeso/agua es 57/43. Sin embargo, se observa la presencia de cavidades con un tamaño superior a $100\mu\text{m}$, de origen no precisable. La ampliación de una de ellas (figura 7.23.d) permitió determinar que se trata de un aglomerado hueco con bordes densos y un tamaño aproximado de $150\mu\text{m}$, con un volumen interno y una morfología notablemente irregulares.

Se observa también en la figura 7.23.a una gran cantidad de impurezas, representadas por las zonas más claras de la micrografía. En este sentido, puede notarse en la figura 7.23.b un cuerpo cuya longitud aproximada es $25\mu\text{m}$, formado principalmente por sílice, aluminio y potasio según el espectro correspondiente (figura 7.23.c). Mientras que en la figura 7.23.e se observa una impureza constituida por sílice y aluminio con una longitud aproximada de $100\mu\text{m}$ (figura 7.23.f).

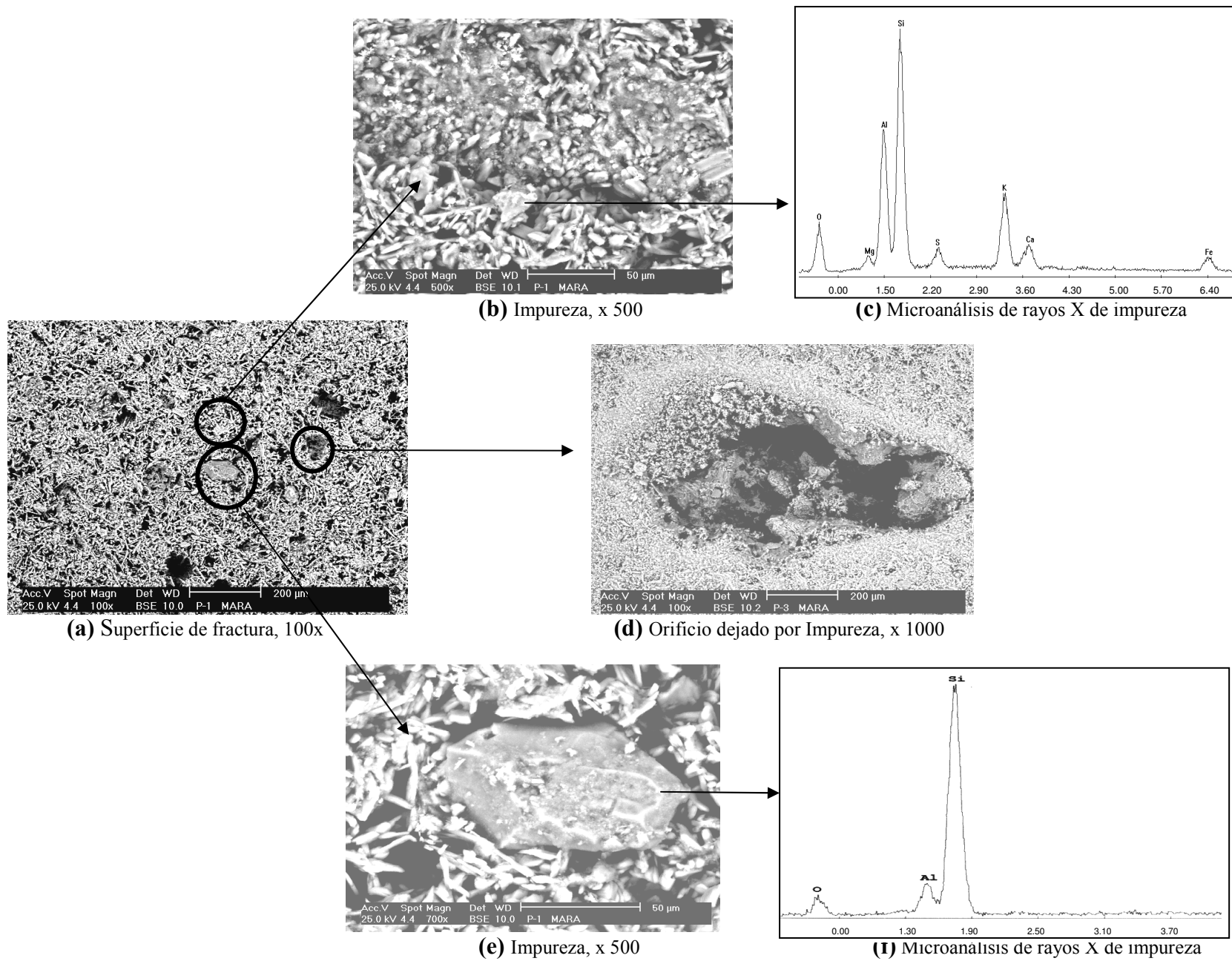


Figura 7.23.- Micrografías obtenidas por MEB y espectro de rayos X de impurezas para un molde YPTVII con 80 coladas.

VII.4.2.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE IMPUREZAS.

Una vez conocidas plenamente la morfología de las impurezas, se procedió a la determinación de las fases cristalinas presentes en las mismas mediante el ensayo de DRX, cuyo espectro se muestra en la figura 7.24. Para ello se analizó únicamente el retenido de YPTVII en malla 80, en el cual se observaron partículas de tonalidades claras y oscuras.

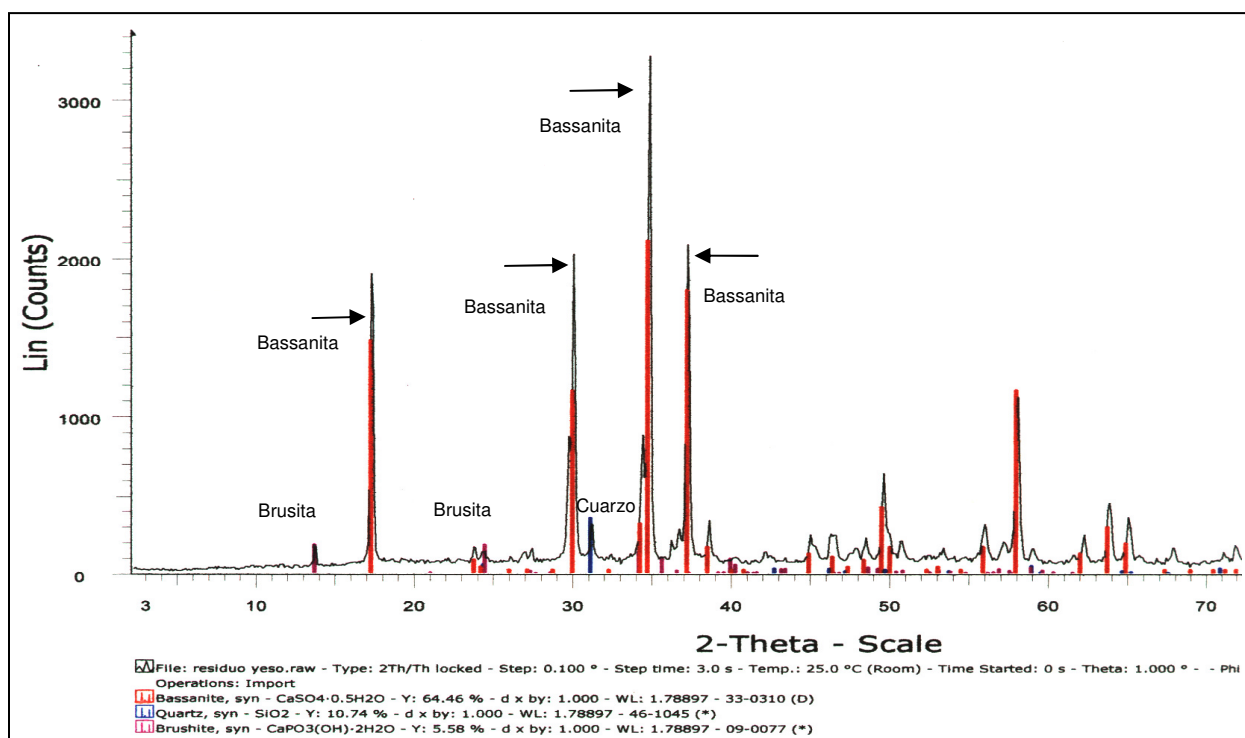


Figura 7.24.- Difracción de rayos X de impurezas presentes en el hemihidrato YPTVII.

En este espectro destacan los picos ubicados a 17, 30, 35 y 37 grados, que corresponden a la presencia de la bassanita o sulfato de calcio hemihidratado. Este se encuentra relacionado con las partículas del retenido cuya tonalidad era la más clara y se infiere que su existencia responde a un sistema de clasificación con deficiencias durante el proceso de elaboración del yeso, el cual no garantiza la homogeneidad del producto y ocasiona la existencia de hemihidrato en forma de partículas de gran rigidez y tamaño.

Adicionalmente, se observa un pico ubicado a 31 grados que corresponde a la presencia de la fase de cuarzo (SiO_2) en la muestra analizada.

Debido a que el origen de este tipo de impurezas se relaciona directamente con la composición inicial del gypse, ya que esta es la única materia prima utilizada para la elaboración del yeso, su presencia puede atribuirse a una inadecuada limpieza de la materia prima. De esta manera, se corroboran los resultados obtenidos en los microanálisis de rayos X realizados tanto a las impurezas encontradas en las probetas de los cuerpos fraguados como a las ubicadas en la superficie del molde de YPTVII.

Un tercer tipo de impureza puede observarse en el espectro y corresponde a estructuras de fosfato de calcio del tipo brusita. Los picos de esta se encuentran ubicados a los 14 y 24,5 grados, notándose que la intensidad de los mismos es menor a la del resto de los picos obtenidos, por lo que se deduce que el grado de cristalización en el que se encuentra la brusita es considerablemente inferior al de las otras fases presentes. Además, en ninguno de los microanálisis realizados durante el ensayo de MEB fue detectada la presencia de fósforo.

VII.4.3.-TEORÍA PROPUESTA SOBRE EL MECANISMO DE DETERIORO DE LOS MOLDES DE YESO PARIA TIPO VII.

En esta sección se expone la teoría concebida en relación al deterioro de la superficie de un molde de yeso nacional, la cual deriva de la observación de la misma en todas las etapas de la vida útil del molde durante el conformado de las piezas cerámicas sanitarias. Tal y como se muestra en la figura 7.25, la superficie de un molde se deteriora progresivamente, notándose al inicio de la campaña de colado (figura 7.25.a) que el mismo presenta una superficie lisa, por lo que las piezas cerámicas no tienen defectos.

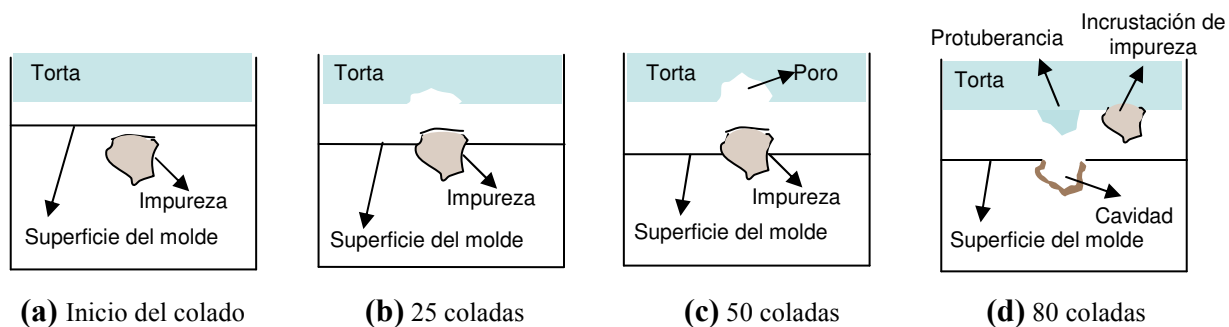


Figura 7.25.- Proceso de deterioro de la superficie de un molde de YPTVII.

Sin embargo, se observa una impureza justo debajo de la superficie, la cual sobresale y se hace físicamente notoria debido al desgaste que experimenta el molde luego de haber alcanzado las 25 coladas aproximadamente (figura 7.25.b). En este período, la superficie de la pieza cerámica comienza a presentar defectos como orificios, por lo que el reacabado de las mismas se debe realizar de manera más minuciosa. Al duplicar la cantidad de coladas (figura 7.25.c), la partícula sobresale ocasionando que los defectos se vuelvan más pronunciados, razón por la cual el reacabado de la superficie de la pieza se convierte en un proceso de aún más importancia y dedicación. En este punto de la campaña de colado las características del producto son afectadas también por el incremento progresivo de sus dimensiones.

Una vez cumplidas las 80 coladas o antes (figura 7.25.d), la partícula se desprende de la superficie del molde, incrustándose en la pieza cerámica y ocasionando la presencia de una cavidad. A partir de este momento las irregularidades no sólo tienen formas huecas sino que comienzan a estar en sobrerrelieve, debido a la introducción de la barbotina en las cavidades dejadas por las impurezas. Adicionalmente, la incrustación de estas últimas en la superficie de la pieza da lugar a la aparición de nuevos defectos en las piezas sinterizadas y esmaltadas. Dependiendo del tamaño y gravedad de estas irregularidades, las mismas pueden ser reparadas con materiales especiales o, por el contrario, las piezas defectuosas son descartadas de la línea de producción. La presencia de esta serie de inconvenientes, aunado al incremento del peso de las piezas conformadas por encima del valor permisible, son las razones por las

cuales se procede a la sustitución de los moldes de YPTVII, considerando que ha culminado la vida útil del mismo.

Con el fin de verificar la teoría expuesta, se ideó un ensayo en el cual se analiza la ubicación de las impurezas en las masas fraguadas de YPTVII, en la figura 7.26 se muestran las fotografías correspondientes:

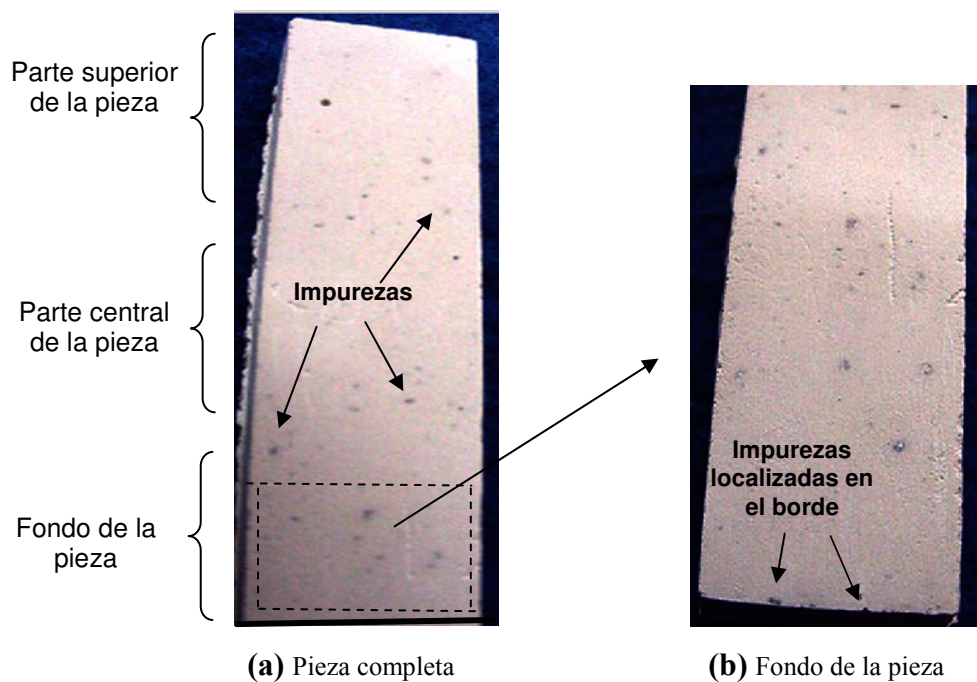


Figura 7.26.- Ubicación de las impurezas en las masas fraguadas de YPTVII.

Para la elaboración de esta pieza se procedió al tamizado en seco del yeso YPTVII en malla 100. La mayor parte de las impurezas retenidas en el tamiz presentaron tonalidades claras, razón por la cual fueron teñidas y añadidas nuevamente al polvo de yeso con el cual se procedió a preparar la mezcla, de esta manera se podía observar más claramente su ubicación en el cuerpo fraguado. Así, en la figura 7.26.a se observa que el número de impurezas se incrementa a medida que se acerca el fondo de la pieza, lo que demuestra que estos granos son más densos que el resto de la mezcla y por esa razón precipitan, ubicándose en el fondo del molde. Por su parte, en la figura 7.26.b puede observarse a mayor magnificación el fondo de la pieza, notándose el deteriorado borde inferior a causa de las impurezas sedimentadas y localizadas en él. Este último representa lo que en molde es la zona interior que se encuentra

en contacto con la barbotina, sirviendo estas fotografías para corroborar la teoría de deterioro de los moldes antes expuesta.

VII.5.- ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA EL MEJORAR LA CALIDAD DEL YESO PARIA TIPO VII.

La resistencia a la flexión de los cuerpos de yeso depende de varios factores, entre los que destacan la porosidad y el aire atrapado en las masas fraguadas, la presencia de impurezas en el hemihidrato y el ineficiente control sobre los parámetros determinantes del proceso de mezcla. Estas variables se encuentran íntimamente relacionadas entre sí, por lo que su influencia sobre la resistencia mecánica no se analiza de manera independiente sino como un efecto total. Con la premisa de solventar el efecto de las mismas, se promovió la búsqueda de condiciones que permitieran alcanzar una resistencia mecánica mayor en los cuerpos fraguados de YPTVII, manteniendo los niveles de absorción dentro de los límites recomendados. Para ello se hizo uso de aditivos y otras técnicas.

VII.5.1.- EMPLEO DE ADITIVOS.

En la bibliográfica consultada se cuenta con información referente al efecto de los aditivos sobre la velocidad de fraguado y sobre la resistencia mecánica de los materiales de yeso. Haciendo uso de la misma, se consideró la utilización de estas sustancias como un método viable para lograr el incremento de la resistencia de los cuerpos de YPTVII, por lo menos, hasta los valores obtenidos para el yeso de referencia. Su selección se realizó considerando que generalmente los acelerantes del fraguado, utilizados en bajas concentraciones, influyen positivamente sobre las propiedades mecánicas de los cuerpos de yeso (Millán, 2000). Además, se tomó en cuenta la disponibilidad de los mismos en el mercado nacional y que presentasen una relación calidad/precio aceptable. En base a estos aspectos, se seleccionaron los siguientes aditivos:

- **Urea:** Compuesto orgánico que según la bibliografía influye positivamente sobre la resistencia mecánica cuando es empleado en concentraciones menores al 2% (Millán, 2000). Aún cuando se incluye dentro de este renglón, no se especifica exactamente su composición u origen, por lo que se utilizó urea relacionada con los procesos de fertilización ya que esta era la única disponible. El rango de concentración en la que se empleó es del orden de 0,5-6% en peso.
- **Sulfato de zinc y sulfato de potasio:** Ambos compuestos son de origen inorgánico y justamente por su fracción activa, tienen acción acelerante sobre las masas fraguadas en concentraciones menores al 3% en peso. Se encuentran en el mercado nacional pero su disponibilidad es en cierta medida restringida. Sin embargo, los mismos pueden ser adquiridos en grandes cantidades y a costos aceptables, siempre que se justifique su utilización. Los rangos de concentraciones en las cuales fueron utilizados fueron de 0,5-3% para $ZnSO_4$ y de 0,1- 3% para K_2SO_4 .
- **Genapol PF:** Este es el nombre comercial de un tensoactivo no iónico disponible en el mercado nacional. Según los proveedores, actúa como dispersante y plastificante, facilitando la trabajabilidad en mezclas de yeso y cemento cuando es utilizado en concentraciones entre 0,1 y 0,5 % en peso, rango en el cual fue utilizado. Sin embargo, no se conoce su efecto sobre la variación de la velocidad de fraguado o la resistencia mecánica.

VII.5.2.- APLICACIÓN DEL TAMIZADO.

Este es un método disponible y efectivo para el retiro de las impurezas presentes en polvos finos y según lo obtenido en la sección VII.1.6, este constituye uno de los objetivos principales para lograr una mejora en la calidad del YPTVII. Por ello se procedió primeramente al tamizado del polvo en malla 80, logrando mejorar significativamente la resistencia mecánica (Apéndice 2). Sin embargo, se probó luego tamizar la mezcla yeso/agua, encontrando un incremento aún mayor en la resistencia debido a que se estaba logrando un doble efecto sobre las características de los cuerpos fraguados: la ausencia de impurezas y el

retiro del aire atrapado. Por estas razones fue ésta la forma de tamizado seleccionada, utilizando para ello una malla 50 debido a que se observó la obstrucción de aquellas cuyo tamaño de orificio era menor, lo cual ocasionaba la disminución de la eficiencia del tamizado.

VII.6.- EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS ADITIVOS Y EL TAMIZADO SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL YESO PARIA TIPO VII.

En esta sección se muestran y analizan los resultados correspondientes a la variación en la resistencia mecánica de los cuerpos de YPTVII con la presencia de aditivos y la implementación del tamizado en las mezclas de relación 57/43 con las cuales fueron elaborados. Sin embargo, fue imprescindible determinar inicialmente la velocidad y tiempo de agitación bajo los cuales se deben preparar las mezclas, debido a que no existen datos precisos sobre el rango en el que deben encontrarse estos parámetros. Como se sabe, la agitación tiene un efecto determinante en las condiciones finales de la mezcla y, por lo tanto, en la capacidad de los cuerpos de yeso para resistir la fractura. De hecho, existen referencias bibliográficas en las cuales se han empleado velocidades y tiempos específicos para algunos tipos de yeso, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los mismos (Phillips, 1973). En este caso, se determinaron las condiciones de agitación requeridas para producir el mismo efecto en los cuerpos elaborados con el yeso nacional.

Con el fin de establecer comparaciones entre los resultados obtenidos con el empleo de los aditivos y/o con la aplicación del tamizado, se muestran también resultados que evidencian el alcance de cada técnica sobre la mejora de las propiedades mecánicas del yeso nacional.

VII.6.1.- DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE AGITACIÓN.

En las figura 7.27 y 7.28 puede observarse el comportamiento de la resistencia mecánica en función de la velocidad y del tiempo de agitación empleados en la preparación de la mezcla 57/43 sin aditivos y sin tamizado. Además se muestra la variación del índice de absorción con la finalidad de verificar que este se encuentre dentro de los límites obtenidos para el yeso de referencia.

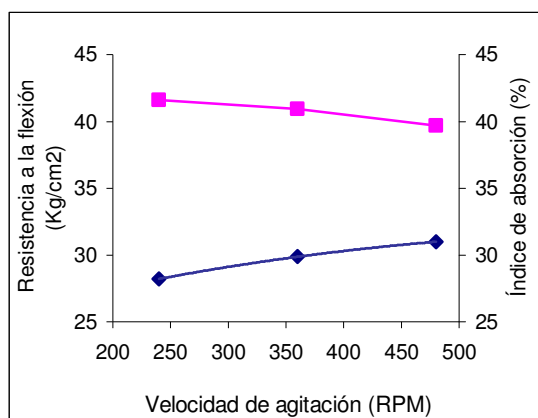


Figura 7.27.- Variación de RM e IA de YPTVII en función de la velocidad de agitación de la mezcla 57/43.

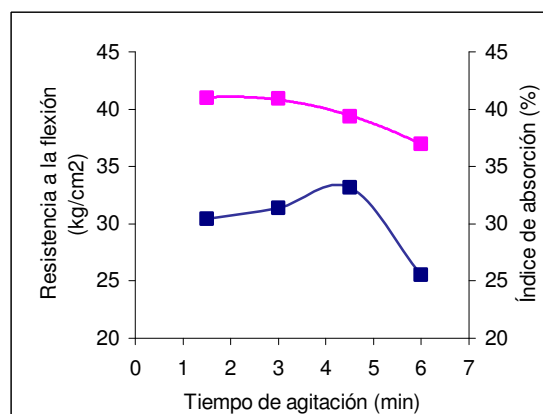


Figura 7.28.- Variación de RM e IA de YPTVII en función del tiempo de agitación de la mezcla 57/43.

En la figura 7.27 es notoria la tendencia ascendente de la resistencia a la flexión y descendente del índice de absorción respecto al incremento de la velocidad de mezclado, lo que demuestra la inversa proporcionalidad existente entre estas variables. Puede observarse que la velocidad óptima dentro del rango de velocidades de agitación trabajado es 480 RPM, ya que con esta se obtuvo la mayor resistencia (31 Kg/cm^2), además de una absorción de 39%. A esta velocidad se determinó luego el tiempo óptimo de duración del mezclado, a la vez que se continuó monitoreando el comportamiento de la absorción (figura 7.28). En la curva de resistencia observada en esta figura se evidencia la presencia de un máximo, a partir del cual comienzan a disminuir los valores de esta variable. Este comportamiento se atribuye comúnmente al sobremezclado, fenómeno que indica que la intensidad de la agitación se ha

incrementado hasta el punto de producir el rompimiento de los cristales de dihidrato formados, la reducción del entramado entre ellos y, el consecuente decremento de la capacidad del cuerpo fraguado para resistir una carga. De manera que el tiempo óptimo de duración de la agitación es de 4,5 minutos a una velocidad de 480 RPM, condiciones con las cuales se logra un aumento del 9% de la resistencia a la flexión ($33,19 \text{ Kg/cm}^3$) respecto a la obtenida en los cuerpos elaborados a partir de una mezcla 57/43 agitada manualmente por un período de 1 minuto ($30,50 \text{ Kg/cm}^3$). Adicionalmente, se obtiene con estas condiciones un índice de absorción 39%, cuyo valor se encuentra dentro del rango aceptable.

Es importante destacar que para cada velocidad y tiempo de agitación empleados se midieron los tiempos de fraguado finales de la mezcla, los cuales son mostrados en las tablas 7.7 y 7.8.

Tabla 7.7.- Tiempo de fraguado final para distintas velocidades de agitación.

Velocidad de agitación (RPM)	Tiempo final de fraguado (min)
240	45
360	35
480	30

Tabla 7.8.- Tiempo de fraguado final para distintos tiempos de agitación.

Tiempo de agitación (RPM)	Tiempo final de fraguado (min)
1,5	30
3	25
4,5	22
6	20

En estas se evidencia la reducción que experimenta el tiempo de fraguado final en función del incremento de la intensidad de la agitación, ya sea por el aumento de la velocidad o del tiempo de duración de la misma. Tal y como se explicó en la sección IV.11.2, este comportamiento se debe a que al aumentar la agitación se produce la división de los cristales de dihidrato formados, conduciendo a la aparición de un mayor número de centros de nucleación, a partir de los cuales continúa precipitando este compuesto. Es por ello que se disminuye el tiempo de reacción y a la vez se impide la formación de un entrelazamiento más intenso entre los cristales. Sin embargo, se observa un incremento de la resistencia mecánica paralelo a este fenómeno hasta los 4,5 minutos de agitación, tiempo a partir del cual se producen las consecuencias negativas del sobremezclado.

VII.6.2.- EFECTO DE LOS ADITIVOS UREA, $ZnSO_4$, K_2SO_4 Y GENAPOL PF.

Posterior a la determinación del tiempo y la velocidad de agitación más adecuados para elaborar las mezclas 57/43, se procedió a incorporar aditivos a la mezcla, disolviéndolos previamente en el agua requerida y preparando las mezclas según las condiciones de agitación anteriormente indicadas. En la figura 7.29 se muestran las gráficas correspondientes al comportamiento de la resistencia a la flexión y el índice de absorción respecto al uso de aditivos pero sin tamizado de la mezcla. En estas puede observarse el comportamiento fluctuante de las curvas de resistencia correspondientes al sulfato de zinc y de potasio, notándose que las mismas presentan un máximo en las concentraciones de 1 y 0,1%, respectivamente.

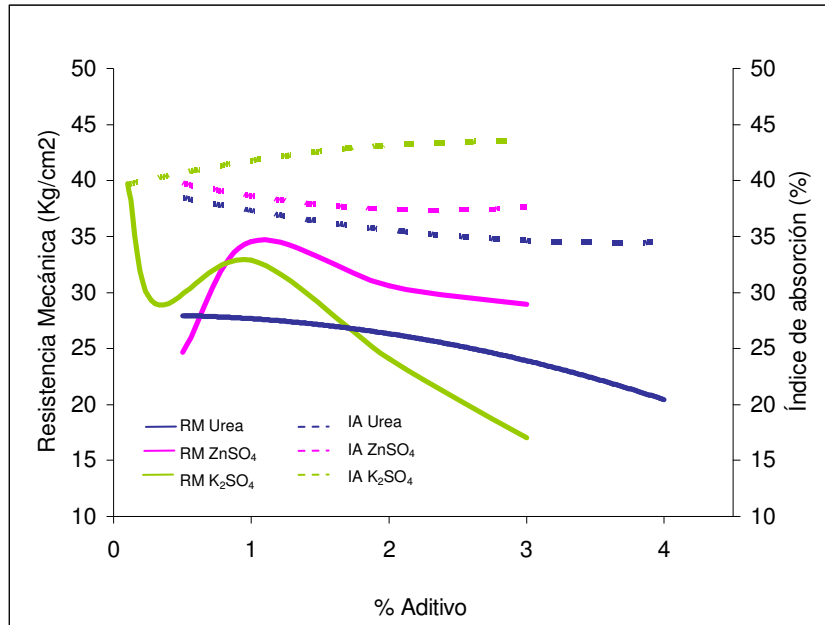


Figura 7.29.- Resistencia a la flexión (RM) e índice de absorción (IA) de cuerpos de YPTVII elaborados con distintos aditivos en las mezclas 57/43.

Así, en los cuerpos elaborados con mezclas en las que se utilizó el $ZnSO_4$ como aditivo, se logró una resistencia a la flexión de $34,5 \text{ Kg/cm}^2$, que resulta ligeramente mayor que la obtenida sin el uso del mismo ($33,19 \text{ Kg/cm}^2$). Mientras que para las masas de

YPTVII preparadas con K_2SO_4 , se obtuvo una resistencia de $39,7 \text{ Kg/cm}^2$, valor significativamente más alto y el mayor de los obtenidos con la utilización de aditivos. Se observa también que la disminución de la resistencia es progresiva a partir las concentraciones antes acotadas, llegando incluso a valores menores a 25 Kg/cm^2 para el K_2SO_4 , aún cuando la curva de este no presenta un comportamiento lineal. Estos resultados demuestran que el efecto de los aditivos sobre esta variable depende directamente de la concentración en la que se encuentren. Contrariamente, la curva obtenida con el uso de urea indicó que la resistencia a la flexión resultó en todo el rango de concentraciones considerablemente menor que la obtenida con los sulfatos, encontrándose el valor más alto (26 Kg/cm^2) a una concentración de $0,5 \%$.

En cuanto al índice de absorción, se observa que este tiende a disminuir respecto al aumento de las concentraciones de urea y $ZnSO_4$, observando que en el punto en la que se obtuvo la mayor resistencia con este último, se obtuvo un valor de absorción (35%) ligeramente inferior al deseado. Por su parte, el índice de absorción para las masas elaboradas con K_2SO_4 tiende al aumento a medida que la cantidad de este es incrementada, correspondiendo al 39% cuando su concentración es de $0,1\%$.

Los efectos del uso de Genapol PF sobre la resistencia a la flexión se muestran en la figura 7.30, independiente de los resultados obtenidos para los otros tres aditivos estudiados debido a que el rango de concentración en el que este fue utilizado se encuentra muy por debajo de los anteriormente analizados.

En esta figura se observa que la mayor resistencia a la flexión ($33,28 \text{ Kg/cm}^2$) se obtiene con una concentración de Genapol de $0,03 \%$, logrando un aumento inferior al 1% respecto al obtenido sin la utilización de aditivos. Por su parte, el índice de absorción relativo a dicha concentración fue de 38% , encontrándose dentro de los valores deseados.

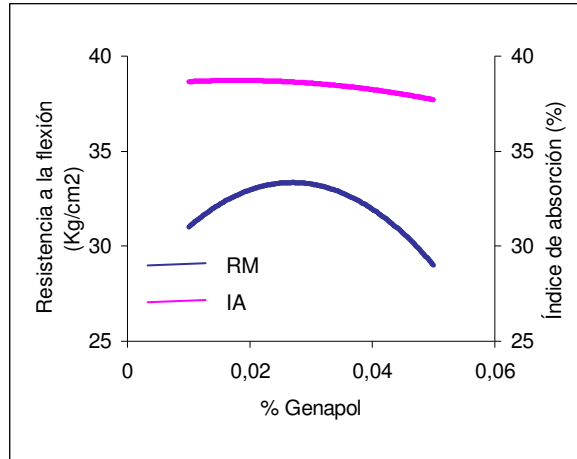


Figura 7.30.- Resistencia a la flexión (RM) e índice de absorción (IA) de cuerpos de YPTVII elaborados con genapol en la mezcla 57/43.

VII.6.3.- INFLUENCIA DE LOS ADITIVOS SOBRE EL TIEMPO DE FRAGUADO, LA VISCOSIDAD Y LA RESISTENCIA MECÁNICA.

Con la finalidad de conocer el efecto acelerante o retardante de los aditivos sobre la velocidad de reacción, se determinó el tiempo de fraguado inicial y final de las mezclas de relación 57/43. A partir de ellos es posible definir tanto el período disponible para transportar y moldear la mezcla de yeso, como el necesario para separar el molde sin distorsión. En la figura 7.31 se muestran las gráficas obtenidas mediante el ensayo de Vicat realizado a las mezclas aditivadas.

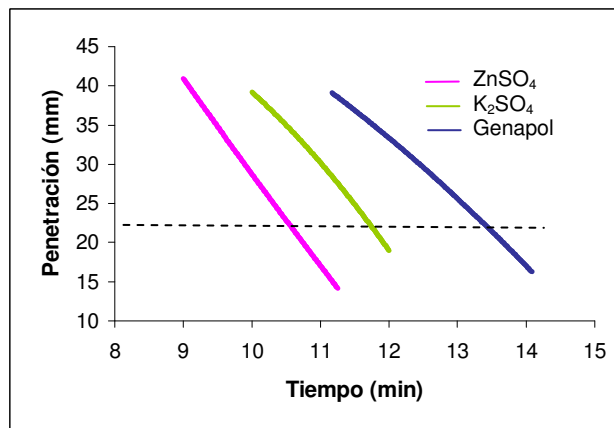


Figura 7.31.- Tiempo de fraguado inicial de mezclas de YPTVII 57/43 elaboradas con aditivos.

Puede notarse la presencia de tres curvas bien definidas, observándose que la primera de ellas es la mezcla que contiene ZnSO_4 , la cual comienza a fraguar a los 9 minutos, presentando un tiempo de fraguado inicial de 1,5 minutos de duración. Seguidamente se encuentra la curva de la mezcla elaborada con K_2SO_4 , en la cual se observa que el tiempo requerido para el fraguado inicial es de 1,8 minutos aproximadamente, iniciándose a los 10 minutos. Por último, se observa que la mezcla con genapol comienza el período fraguado inicial poco después de los 11 minutos requiriendo de aproximadamente 2,5 minutos para su completación.

Al comparar estos resultados con los obtenidos para las mezclas 57/43 de YPTVII preparadas sin el uso de aditivos, se corrobora el efecto acelerante de estos compuestos para dar comienzo al fraguado, ya que en esa oportunidad se obtuvo que el período de fraguado inicial comenzaba cerca de los 13 minutos, teniendo una duración aproximada de 3 minutos, ambos valores superiores a los encontrados en este ensayo.

Con el fin de determinar la influencia acelerante de los aditivos sobre todo el proceso de reacción, se determinaron los tiempos de fraguado final obtenidos para las mezclas aditivadas con todas las concentraciones empleadas, los cuales son mostrados en la tabla 7.9.

Tabla 7.9.- Tiempos de fraguado final de mezclas 57/43 de YPTVII con el uso de aditivos.

Aditivo	Concentración (% en peso)	Tiempo final de fraguado (min)
Urea	0,5	15
	1	20
	3	25
	6	30
ZnSO_4	0,5	17
	1	16
	2	15
	3	13
K_2SO_4	0,1	16
	0,3	15
	0,5	13
	1	10
	2	7
	3	6
Genapol	0,01	20
	0,03	20
	0,05	19

En el caso de la urea, el tiempo necesario para la completar el fraguado aumenta a medida que se incrementa la concentración de la misma. En base a esto y a los valores de resistencia obtenidos para este compuesto, se puede establecer sin dudas que el tipo de urea utilizada actúa como retardante del fraguado y que no es la indicada para lograr un efecto positivo en el incremento de la resistencia de los cuerpos fraguados, razón por la cual sería necesario llevar a cabo los mismos ensayos con otra calidad de este compuesto. Por otra parte, puede notarse que el incremento en las concentraciones de ZnSO_4 y K_2SO_4 provoca la disminución del tiempo de fraguado final de la mezcla, lo que indica que estos compuestos efectivamente funcionan como acelerantes en el rango de concentraciones considerado. Sin embargo, la influencia positiva de estos sobre la resistencia mecánica sólo se observa cuando son empleados a bajas concentraciones, lo que permite establecer que un aditivo con mayor capacidad acelerante no necesariamente conlleva a la obtención de una mayor resistencia mecánica. En todo caso, sería interesante verificar este comportamiento con otros aditivos.

En cuanto al genapol, puede notarse que el tiempo de fraguado final prácticamente no varió respecto al aumento en la concentración del mismo. Así mismo, es importante resaltar la diferencia observada en los tiempos obtenidos para cada aditivo en su concentración óptima, encontrándose que con el uso de genapol la mezcla fraguó completamente a los 20 minutos, mientras que con ZnSO_4 y K_2SO_4 fueron necesarios 16 minutos. A partir de esto puede establecerse que el genapol presenta cierto efecto retardante en el fraguado, comportamiento que tiene relación con el efecto dispersante observado en la mezcla. Posiblemente por este efecto retardante es que en los cuerpos en los que se usó este aditivo se logró un menor aumento en la resistencia a la flexión.

Debido a la necesidad de una buena fluidez en las mezclas yeso/agua, resultó importante considerar el efecto de los aditivos sobre la viscosidad, razón por la cual esta propiedad fue determinada y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.10. La viscosidad encontrada para la mezcla elaborada sin aditivos corresponde a 2000 cP, por lo que es notorio que tanto el ZnSO_4 como el K_2SO_4 provocan un incremento de esta propiedad en la mezcla.

Tabla 7.10.- Viscosidad de las mezclas 57/43 de YPTVII con el uso de aditivos.

Aditivo	Viscosidad (cP)
ZnSO ₄	2220
K ₂ SO ₄	2170
Genapol PF	1800

Este comportamiento tiene que ver con la presencia en estos compuestos de centros activos (fracción sulfática) a partir de los cuales se promueve el inicio de la reacción más tempranamente. Por su parte, el genapol provoca una disminución de la viscosidad, demostrando de este modo sus propiedades fluidificantes y dispersantes. A partir de estos resultados puede decirse que el incremento de la viscosidad de la mezcla viene acompañado de la reducción del tiempo de fraguado inicial y final de la misma, respecto a los valores obtenidos para las mezclas sin aditivos.

VII.6.4.- ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE FRAGUADO OBTENIDA EN LAS MEZCLAS ELABORADAS CON ZnSO₄, K₂SO₄ Y GENAPOL PF.

Con la finalidad de establecer la influencia de los aditivos utilizados sobre la temperatura de fraguado y las relaciones entre ésta y los tiempos de fraguado obtenidos, en la figura 7.32 se muestra el comportamiento de esta variable determinado a partir de mezclas con la concentración óptima de aditivo. En esta figura se observa nuevamente que tanto el ZnSO₄ como el K₂SO₄ funcionan como aceleradores del fraguado, ya que también acortan el tiempo necesario para alcanzar la máxima temperatura en la mezcla. En este sentido, se observa que para ambos esta última se alcanzada a los 22 minutos aproximadamente, cerca de 5 minutos antes del tiempo requerido para las mezclas sin aditivo. Sin embargo, con el uso de ZnSO₄ la temperatura máxima alcanzada es de 45 °C, mientras que con K₂SO₄ es de 42 °C, siendo esta última la misma obtenida en las mezclas sin ningún tipo de acelerantes.

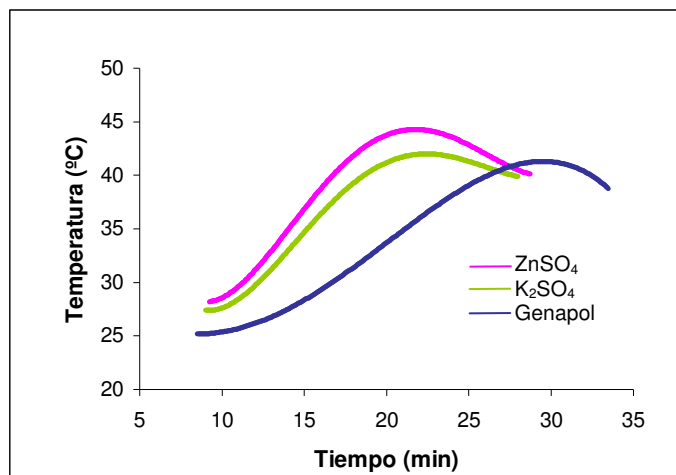


Figura 7.32.- Temperatura de fraguado en función del tiempo en mezclas 57/43 de YPTVII elaboradas con 1% de ZnSO₄, 0,1% de K₂SO₄ y 0,03% de Genapol.

Por su parte, la curva correspondiente al genapol corrobora que esta sustancia tiene un efecto retardante en la reacción, ya que la temperatura máxima es alcanzada cerca de los 30 minutos con un valor de aproximado de 41°C.

VII.6.5.- APLICACIÓN DEL TAMIZADO Y ADITIVOS EN CONCENTRACIONES ÓPTIMAS A LA MEZCLA 57/43.

Luego de determinados los efectos y las concentraciones óptimas de aditivo a utilizar, y conociendo la efectividad de los procesos de tamizado para separar partículas gruesas y aire atrapado, en esta sección se muestran los resultados de resistencia a la flexión e índice de absorción obtenidos combinando el uso de estos dos parámetros. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 7.11 junto con los resultados encontrados para las mezclas de YPTVII tamizadas pero elaboradas sin aditivos. En estos se observa una mejora en la resistencia mecánica obtenida en las mezclas sin aditivo tamizadas respecto a las que no fueron tamizadas, la cual no resulta muy significativa puesto estas últimas presentaron un valor de resistencia de 33,19 Kg/cm². Sin embargo, el cambio obtenido es suficiente como para demostrar que el tamizado efectivamente tiene un efecto positivo sobre esta variable.

Tabla 7.11.- Resistencia a la flexión e índice de absorción de cuerpos de YPTVII elaborados con mezclas 57/43 tamizadas.

Aditivo	Resistencia a la flexión (Kg/cm²)	Índice de absorción (%)
Sin aditivo	34,54	39,84
ZnSO ₄	34,79	43,60
K ₂ SO ₄	44,12	40,46
Genapol	44,21	38,79

En cuanto a las mezclas elaboradas con ZnSO₄ tamizadas, se logró un incremento de sólo el 0,23 Kg/cm² en la resistencia a la flexión y con la utilización de K₂SO₄ se logró alcanzar un valor de hasta 44,12 Kg/cm² en la resistencia a la flexión, lo cual constituye una mejora interesante si se tiene presente que el valor correspondiente al YF es de 41,66 Kg/cm². Con el uso del genapol se observa que, aunque la resistencia tiene el mismo orden de magnitud que la obtenida con K₂SO₄, el incremento alcanzado es considerablemente mayor puesto que pasa de 33,28 a 44,21 Kg/cm². La influencia de este aditivo se explica en función de la baja viscosidad que confiere a la mezcla, la cual permite un mayor aislamiento de los aglomerados, aumentando la tendencia de las burbujas de aire a colisionar formando burbujas más grandes. Al incrementarse el tamaño de dichas burbujas, se hace más sencillo su retiro de las mezclas mediante tamizado, razón por la cual se obtuvieron valores de resistencia a la flexión superiores en las mezclas tamizadas.

Puede notarse además que el índice de absorción obtenido para cada caso se encuentra cerca de los valores aceptables, excepto en los cuerpos elaborados con ZnSO₄ en los cuales se observa un ligero aumento en el valor de esta variable.

A manera ilustrativa, en la figura 7.33 se muestra un gráfico comparativo de los resultados obtenidos sobre la resistencia a la flexión en los cuerpos preparados con y sin aditivos y con la variante de haber sido sometidos o no al tamizado.

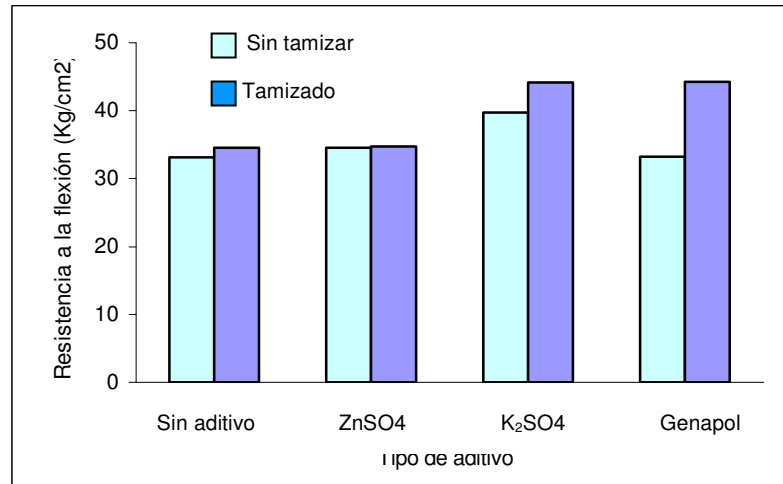


Figura 7.33. - Gráfico comparativo de valores de resistencia a la flexión obtenidos bajo diferentes condiciones de YPTVII

En esta figura se evidencia que las mezclas tamizadas permitieron, bajo todas las condiciones en las cuales fueron preparadas, la obtención de cuerpos con valores de resistencia a la flexión superiores que los encontrados en las masas cuyas mezclas no fueron tamizadas. Con estos resultados de comprueba que con la aplicación del tamizado se logran no sólo retirar las impurezas sino disminuir en gran medida la retención de burbujas de aire en la mezcla. Por lo tanto, los dos posibles fuentes de origen de grietas causantes de la fractura son eliminados y la carga soportable por los cuerpos fraguados resulta incrementada.

VIII.- REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS Y EQUIPOS NECESARIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL YESO PARIA TIPO VII MEJORADO.

En esta sección se muestran los equipos necesarios para la utilización del YPTVII modificado a nivel industrial, además de las cantidades requeridas de los aditivos a utilizar y su costo.

En primer lugar, puede decirse que debido a que los aditivos seleccionados se emplean en concentraciones que no superan el 1% en peso, la utilización de los mismos no amerita el uso de un dosificador. Además, la disolución de estos en el agua puede llevarse a cabo sin problemas en las tinajas disponibles para la preparación de las mezclas, antes de ser agregado el yeso. Por lo tanto, el único equipo requerido es un tamiz vibratorio de malla 50 a través del cual se hace pasar de la mezcla. Los costos asociados a su instalación no se considerarán en los análisis subsiguientes debido a que actualmente se dispone uno en la empresa Sanitarios Maracay, C.A.

En la tabla 8.1 se muestran los costos totales de compra y despacho de los yesos Paria tipo VII y Forte, en conjunto con el precio de los aditivos a partir de los cuales se logró incrementar la resistencia mecánica del yeso nacional. Es de destacar que el precio de $ZnSO_4$ y K_2SO_4 corresponde a los compuestos en grado analítico, teniendo ambos una pureza superior al 98%.

Tabla 8.1.- Precio de venta y tipo de presentación de yesos y aditivos utilizados.

Material	Costo (Bs)/Kg	Presentación
Yeso Paria tipo VII	434	Sacos de 30 Kg
Yeso Forte	460	Sacos de 25 Kg
ZnSO₄	1900	Sacos de 25 Kg
K₂SO₄	180.000	Envase de 1 Kg
Genapol PF	5380	Tambores de 200 Kg.

La empresa Sanitarios Maracay, C.A. consume en el departamento de moldes un promedio de 1166400 Kg de yeso anuales, que pueden ser tanto de yeso nacional como de yeso importado, dependiendo de la disponibilidad de estos en el departamento. Debido a que el despacho del yeso Paria tipo VII se realiza constantemente durante todo el año, contrario a lo que ocurre para el yeso Forte, la mayor parte de los moldes instalados en la planta son elaborados con yeso nacional. Considerando que la modificación de este último se realizó con el objeto final de estudiar la posibilidad de utilizarlo como sustituto del yeso Forte, se procedió a comparar el costo de adquisición de una (1) tonelada de yeso importado con los requerimientos necesarios para preparar la misma cantidad de yeso Paria tipo VII con el uso de aditivos. Los resultados correspondientes se muestran en la tabla 8.2, donde la proporción y costo de los aditivos se refiere a la concentración óptima determinada para cada uno, siendo éstos del 1% para el $ZnSO_4$, 0,1% para el K_2SO_4 y 0,03% para el Genapol.

Tabla 8.2. Datos comparativos entre el costo de una tonelada de yeso Paria tipo VII modificado y el precio de una tonelada de yeso Forte.

Tipo de aditivo	Cantidad de aditivo (Kg)/Ton	Costo de aditivo (Bs)/Ton	Costo de una tonelada de yeso Paria tipo VII aditivado (Bs)	Costo de una tonelada de yeso Forte (Bs)
$ZnSO_4$	10	19.000	453.000	460.000
K_2SO_4	1	180.000	614.000	
Genapol.	0.3	1.615	435.615	

Se observa que el costo de preparación de una tonelada de yeso modificado depende directamente del tipo de aditivo que se seleccione. En este sentido, puede notarse que el costo total del yeso Paria tipo VII con la utilización de genapol (Bs. 435.615) resulta similar al obtenido con el uso del $ZnSO_4$ (Bs.453.000), siendo ambos inferiores a la inversión necesaria para importar una tonelada de yeso Forte (Bs.460.000). Sin embargo, es de recordar que los aditivos con los cuales se logró el mayor aumento en la resistencia mecánica, fueron K_2SO_4 y genapol, cada uno en conjunto con la aplicación del tamizado de la mezcla. En base a esto, puede decirse que el genapol es el aditivo más recomendable porque el costo del yeso preparado con este resulta significativamente menor al de K_2SO_4 (Bs.614.000), e inferior al

de una tonelada de yeso importado. Es importante considerar que más que los beneficios económicos que pueden obtenerse con el uso de un aditivo en particular, es el incremento que se espera obtener en la vida útil de los moldes, lo que constituye el aspecto de mayor importancia, ya que en la medida en la que se reduzca la compra de materias primas para la preparación del yeso nacional modificado como respuesta a la mayor duración de los moldes y el aumento del período necesario para su reposición, las diferencias económicas observadas entre el uso de aditivos y la compra de yeso importado, serán más significativas.

IX.- CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, se puede concluir que:

1. Desde el punto de vista estructural, los yesos Forte y Paria tipo VII son dos variedades del sulfato de calcio hemihidratado, siendo una de sus diferencias fundamentales la forma y tamaño de los cristales de cada uno. A partir de ello se consideró que el método de producción y la materia prima utilizada son diferentes para cada yeso.
2. El polvo de yeso Paria tipo VII es más fino que el de referencia por lo que tiende a conformar aglomerados. Sin embargo, presenta una población granulométrica de impurezas, que aunque no superan el 1% en peso del yeso, originan junto con los aglomerados y el aire atrapado en la mezcla, efectos nefastos sobre la vida útil de los cuerpos fraguados, constituyendo estas las causas principales de la baja calidad encontrada en el yeso nacional.
3. El estudio del seguimiento del proceso de fraguado es determinante en el análisis de los cristales de dihidrato, y estos son la base para la obtención de una resistencia mecánica específica.
4. La ausencia de aglomerados, impurezas, aire atrapado y la presencia de un tipo de estructura cristalina más fuertemente enlazada en las masas fraguadas del yeso Forte, le confieren a este una mayor resistencia mecánica. Esta propiedad resultó la más apropiada para la evaluación de los cambios y los avances obtenidos en la calidad del yeso Paria tipo VII, por reflejar clara y rápidamente las consecuencias de la modificación de este último.
5. La obtención de un yeso Paria tipo VII modificado con propiedades similares a la del yeso Forte, se logra utilizando como aditivo K_2SO_4 en una concentración de 0,1% en peso

o utilizando Genapol en una concentración de 0,03% en peso, en ambos casos realizando el tamizado de la mezcla en malla 50. Con la implementación de estas técnicas se incrementa la resistencia mecánica hasta valores de 44,12 y 44,21 Kg/cm² respectivamente.

6. Se ha demostrado que las teorías y conceptos sobre los tratamientos de los polvos y el procesamiento coloidal propuestas por Pask y Lange para materiales cerámicos, son válidas para el yeso y sus mezclas.
7. La influencia de los factores físicos señalados en los polvos sobre las propiedades de las masas fraguadas, variará en la medida que las condiciones y características de cada lote de yeso también se modifique, por lo que no puede establecerse de manera definitiva las consecuencias del efecto de estos factores mientras el material analizado no provenga de un proceso de producción y clasificación que garantice la reproducibilidad en las características del mismo.
8. El Genapol PF se consideró el aditivo más recomendable para la preparación del yeso Paria tipo VII mejorado debido a que el costo de su implementación es inferior al encontrado con la utilización de K₂SO₄.
9. La obtención y utilización del yeso Paria tipo VII modificado constituye un proceso rentable debido a que los requerimientos económicos relacionados con el mismo resultan inferiores a los necesarios para la importación del yeso Forte.

RECOMENDACIONES.

1. La realización de moldes con el YPTVII modificado, el seguimiento de la campaña de colado y la evaluación de la superficie de los mismos durante el desarrollo de su vida útil, constituiría un punto de gran interés para la corroboración final de la mejora en la calidad del mismo.
2. En vista de que las causas principales de la baja calidad de los moldes de yeso Paria tipo VII radica en la forma y tamaño de las poblaciones granulométricas presentes en el hemihidrato, se recomienda establecer relaciones y objetivos en conjunto con la empresa productora del mismo para realizar un estudio del proceso de clasificación utilizado.
3. Se sugiere comprobar la efectividad de los aditivos utilizados sobre la resistencia mecánica en otros yesos, para así ampliar la información acerca de su funcionamiento y los límites de concentraciones en los cuales son recomendables.
4. Sería interesante incursionar en el uso de aditivos distintos a los utilizados en este proyecto, con la finalidad de determinar otras posibles vías de mejoras en la calidad del yeso nacional.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. ARZABE, José. “Preparación y caracterización de materiales de yeso aditivados con alumbre, carboximetil celulosa, arena silícea y talco”. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia, 1993.
2. ASTM. Standard Test Method for Chemical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete. Designación C471-2000.
3. ASTM. Standard Test Method for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete. Designación C472-90.
4. ASTM. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. Designación C373-82.
5. CORNELLIUS, Hurlbut Jr. “Manual de Mineralogía de Dana”. Tercera Edición. Editorial Reverté, S.A. España, 1998, 255-257.
6. Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation.
7. F. F. LANGE, “Powder Processing Science and Technology for Increased Reliability”. J. Am. Ceram. Soc. 72 (1), 1989, 3-15.
8. MILLÁN, Arnaldo. Apuntes del curso de conformado de materiales cerámicos IUTRC “DR. Federico Rivero Palacio”, 2000.
9. Monografías del “Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio”. Volumen 36. Número 6. Noviembre-Diciembre 1997.
10. Norma Venezolana de Yeso para Construcción y Moldeo COVENIN. Análisis Químico 3640:200.

11. NORTON, F. "Cerámica fina tecnología y aplicaciones". Ediciones Omega, S.A. España, 1975, 101-126.
12. O'BRIEN, William. "Materiales Dentales y su selección". Editorial Panamericana. Argentina, 1986, 56-63.
13. J. A. PASK. "Ceramic Processing. A Systematic Approach", Trans. Br. Ceram. Soc. 82 (6), 1979, 190-192.
14. PHILLIPS, Ralph. "La ciencia de los materiales dentales". Editorial Interamericana. México, 1973, 193-217.
15. PEYTON, Floyd. "Materiales dentales restauradores". Editorial Mundi. Primera Edición. Argentina, 1964, 214-238.
16. RODRIGUEZ, Simón. "Recursos Minerales de Venezuela". Boletín de Geología. Volumen XV. Número 27. Producciones Gráficas Reverón. Venezuela, 1986, 34-36.
17. STANLEY, Lefond. "Industrial Minerals and rocks". Cuarta Edición. Editorial Board. Estados Unidos, 1975, 185-199.

APÉNDICE I.

En esta sección se describen las normas, ensayos y pasos a seguir para el realizar las determinaciones referentes a la caracterización de los yesos Forte y Paria tipo VII.

1) *Análisis Químico*: la determinación de este análisis se basó en las siguientes determinaciones especificadas en la norma COVENIN 3640:2000 y ASTM C 471.

- ***Determinación del agua de cristalización***: por medición de la pérdida del peso del yeso sometido a calentamiento a temperaturas entre 215 °C y 230 °C. Con este análisis y el uso del factor gravimétrico es posible conocer el porcentaje de sulfato de calcio hemihidratado y anhidrita presente en la muestra.
- ***Determinación de sílice y otros residuos insolubles***: mediante la utilización del cloruro de amonio y ácido clorhídrico concentrado, los cuales actúan como fundente y disolvente en el proceso de descomponer la muestra y producir la separación de sílice y demás residuos insolubles.
- ***Determinación de óxido de calcio***: mediante la utilización de ácido nítrico concentrado que actúa como precipitante y mejora la separación de los iones metálicos Fe^{+3} y Al^{+3} . Este análisis se usa para determinar el contenido de carbonato de calcio en la muestra de yeso por medio del factor gravimétrico.
- ***Determinación de óxido de magnesio***: mediante el uso de trietanolamina para enmascarar los óxidos de hierro y aluminio y una solución de ácido etilendiaminotetracético (EDTA) para la valoración de la muestra. Este análisis se usa para determinar el contenido de carbonato de magnesio en la muestra de yeso por medio del factor gravimétrico.

- **Determinación del trióxido de azufre:** mediante el uso de cloruro de bario para precipitar el sulfato presente en la muestra como sulfato de bario, calculando luego el trióxido de azufre como su equivalente. Con este análisis es posible conocer el contenido de sulfato en forma de anhidrita por medio del factor gravimétrico.
- **Determinación de cloruros:** mediante el uso de nitrato de plata para la valoración con una solución de cromato de potasio como indicador.

2) **Tiempo de fraguado:** Los métodos más comunes a seguir para determinar esta propiedad se explican a continuación (Peyton, 1964):

1. **Método de la Aguja de Vicat:** Este método implica la utilización del Aparato de Vicat mostrado en la figura 5.18. Este equipo está compuesto por una varilla o cono penetrador con un peso de 300 gramos y un recipiente en forma de anillo para colocar la muestra. Se baja la varilla hasta estar al ras de la superficie y luego se libera para que penetre en la masa, realizando la penetración varias veces en distintos puntos y limpiando la aguja para cada determinación. El tiempo inicial de fraguado se da comienzo cuando la penetración de la aguja es de 40 mm y finaliza cuando la aguja sólo penetra 22 mm en la mezcla (ASTM, 1990).

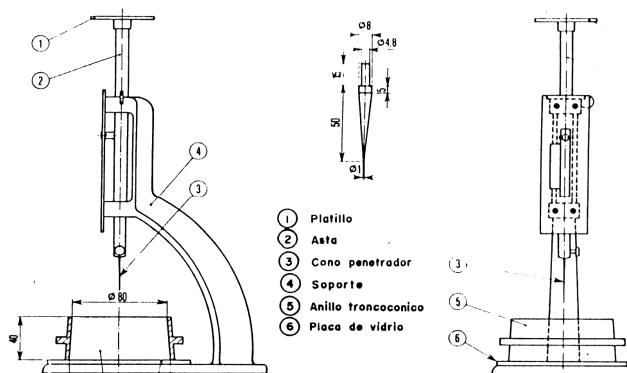


Figura 5.18.- Aparato de Vicat

2. **Método de la Aguja de Gilmore:** Este método utiliza las agujas mostradas en la Figura 5.19. La aguja de Gilmore pequeña tiene un peso de 112,5 gramos, un diámetro de 2 mm y es utilizada para determinar el tiempo de fraguado inicial. La grande tiene un peso de 454 gramos, un diámetro de 1 mm y es utilizada para hallar el tiempo final de fraguado. Se considera que la masa está fraguada cuando las agujas no producen ninguna marca circular en la superficie de la mezcla.



Figura 5.19.- Agujas de Gilmore

3) **Temperatura de fraguado:** Puede determinarse mediante el uso de termocuplas, termotransmisores o simplemente con el uso de un termómetro en contacto directo con la mezcla. Las mediciones deben comenzar desde el momento en el que el yeso se coloca en contacto con el agua (ASTM, 1990).

4) **Resistencia a la flexión:** Para determinar la resistencia a la flexión se utiliza una prensa provista de dos puntos de apoyo que sirven como soportes a las probetas sobre las cuales se aplica una carga con velocidad uniforme. La resistencia a la flexión se calculará aplicando la Ec.1, en la que se introduce el valor de la carga soportado por la probeta, así como sus dimensiones (ASTM, 1990).

$$Rm = MOR = \frac{3}{2} * \frac{C * L}{E^2 * A} \quad \text{Ec.1}$$

Donde: C = Carga aplicada (Kg)

L = Luz entre los apoyos (m)

E = Espesor de la probeta (m)

A = Ancho de la probeta (m)

5) **Índice de absorción:** Para la determinación de esta propiedad, se tomaron los pesos antes y después de que las barras de yeso Forte y yeso Paria tipo VII fueran sometidas a inmersión por un período de 3 horas. Posteriormente, haciendo uso de la Ec.2 se determinó el índice de absorción (ASTM, 1982).

$$IA = \frac{PF - PI}{PI} * 100 \quad \text{Ec.2}$$

Donde: IA = Índice de Absorción

PF = Peso Final de la probeta (grs)

PI = Peso Inicial de la probeta (grs)

6) **Porosidad:** Para su determinación se pueden aplicar uno de los siguientes métodos (Arzabe, 1993).

1. **Porosimetría de mercurio:** es una técnica muy empleada estudiar la porosidad. El principio de esta técnica está basado en el hecho de que para que el mercurio penetre en los poros y fisuras de una muestra es necesario aplicar una presión externa. Para ello se introduce la muestra seca en un tubo de diámetro pequeño, luego este es sometido a vacío y llenado con mercurio, aplicando una presión que se incrementa continuamente. La distribución de poros se puede determinar a partir de la ecuación de Washburn:

$$P = (2 * \sigma * \cos \theta) \frac{1}{r} \quad \text{Ec.3}$$

Donde: P = Presión aplicada al mercurio (MPa)

σ = Tensión superficial del mercurio (485 dinas/cm)

θ = Angulo de contacto

r = radio del tubo capilar.

2. **Porosidad como factor de la densidad:** en este caso se hace uso de la densidad real y de la aparente, aplicando estos valores en la siguiente fórmula (Arzabe, 1993):

$$P = \left(1 - \frac{\tau}{\delta}\right) * 100 \quad \text{Ec.4}$$

Donde: P = Porosidad

δ = Densidad real (Kg/cm³)

τ = Densidad aparente (Kg/cm³).

APENDICE II.

Tabla A.1.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII y yeso Forte con diferentes relaciones yeso/agua

YESO PARIÁ TIPO VII

PROBETA	CARGA	ESPEJOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 57/43	54,90	2,48	2,47	44,19	46,16	64,78	40,34
2) 57/43	41,40	2,49	2,54	32,11	43,19	59,85	38,57
3) 57/43	38,10	2,51	2,50	29,46	48,04	67,42	40,34
4) 57/43	40,30	2,51	2,56	30,52	46,14	63,98	38,66
5) 57/43	38,10	2,49	2,51	29,89	46,99	65,24	38,84
6) 60/40	39,20	2,45	2,45	32,41	47,30	60,78	28,50
7) 60/40	49,10	2,45	2,45	40,66	49,55	64,43	30,03
8) 60/40	38,50	2,39	2,46	33,53	49,12	64,92	32,17
9) 60/40	49,10	2,42	2,52	40,63	53,52	70,80	32,29
10) 54/46	24,20	2,15	2,48	25,75	38,41	56,01	45,82
11) 54/46	23,10	2,17	2,39	25,14	36,48	53,33	46,19
12) 54/46	30,40	2,37	2,44	27,09	38,07	54,60	43,42
13) 54/46	24,20	2,37	2,48	21,20	37,18	54,44	46,42

YESO FORTE

15) 57/43	46,50	2,45	2,36	40,26	43,09	60,49	40,38
16) 57/43	50,20	2,41	2,37	44,43	45,97	64,29	39,85
17) 57/43	44,30	2,37	2,34	41,08	42,28	59,54	40,82
18) 57/43	44,30	2,37	2,36	40,85	43,34	61,64	42,22
19) 60/40	49,40	2,36	2,54	42,83	50,79	68,00	33,88
20) 60/40	51,60	2,42	2,51	42,75	50,16	66,99	33,55
21) 60/40	65,20	2,46	2,52	51,98	43,02	57,33	33,26
22) 60/40	52,70	2,51	2,51	40,78	41,41	55,31	33,57
23) 60/40	60,40	2,52	2,52	46,19	53,02	70,98	33,87
25) 54/46	37,00	2,34	2,41	34,33	39,02	56,82	45,62
26) 54/46	37,40	2,32	2,45	34,69	39,07	55,38	41,75
27) 54/46	30,40	2,34	2,51	27,01	35,43	51,14	44,34

Distancia entre apoyos
(cm)=

8,132

Tabla A.2.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII para determinar velocidad óptima de agitación.

BARRA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 240 RPM	31,50	2,17	2,40	34,03	39,89	55,72	39,68
2) 240	32,20	2,41	2,50	27,07	48,11	68,47	42,32
3) 240	37,70	2,42	2,45	32,05	43,45	61,73	42,07
4) 240	26,40	2,36	2,51	23,10	42,15	59,41	40,95
5) 240	30,00	2,39	2,53	25,30	44,77	63,63	42,13
<hr/>							
6) 240	33,30	2,49	2,36	27,71	47,08	67,02	42,35
7) 360 RPM	43,60	2,51	2,53	33,35	45,83	65,07	41,98
8) 360	41,00	2,51	2,52	31,49	45,90	64,96	41,53
9) 360	34,10	2,35	2,51	30,14	43,82	61,59	40,55
10) 360	34,10	2,37	2,33	31,69	40,75	57,49	41,08
11) 360	37,00	2,53	2,44	28,91	47,63	67,08	40,84
<hr/>							
12) 360	27,80	2,47	2,36	23,57	40,81	56,91	39,45
13) 480 RPM	38,50	2,47	2,50	30,77	46,73	65,26	39,65
14) 480	45,80	2,49	2,52	35,59	48,93	67,92	38,81
15) 480	36,30	2,47	2,51	28,86	45,75	63,88	39,63
16) 480	35,20	2,50	2,47	27,95	48,93	68,57	40,14
17) 480	41,80	2,50	2,51	32,54	48,03	67,28	40,08
18) 480	36,60	2,46	2,44	30,15	44,38	62,12	39,97

Distancia entre apoyos (cm)= 8,132

Tabla A.3.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar la velocidad óptima de agitación

VELOCIDAD (RPM)	RM (Kg/cm ²)	IA (%)
240	28,21	41,58
360	29,86	40,91
480	30,98	39,71

Tabla A.4.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII para determinar el tiempo óptimo de agitación a la velocidad óptima.

PROBETA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 1,5 min	34,40	2,43	2,40	29,61	49,34	69,62	41,10
2) 1,5	35,50	2,56	2,50	26,43	52,17	73,53	40,94
3) 1,5	45,80	2,54	2,45	35,23	49,48	69,75	40,97
4) 3 min	39,60	2,43	2,53	32,49	47,48	67,02	41,15
6) 3	32,60	2,52	2,46	25,33	47,06	66,10	40,46
7) 3	38,80	2,52	2,53	29,42	48,86	68,74	40,69
8) 3	35,20	2,45	2,53	28,23	46,83	65,88	40,68
9) 3	44,70	2,49	2,48	35,36	48,56	68,52	41,10
10) 4,5 min	42,10	2,53	2,47	32,53	47,50	66,73	40,48
12) 4,5	41,40	2,53	2,53	31,29	48,69	67,95	39,56
13) 4,5	40,30	2,49	2,49	32,00	49,03	68,28	39,26
14) 4,5	42,10	2,47	2,47	33,91	46,94	65,19	38,88
15) 4,5	48,30	2,54	2,52	36,24	49,69	68,92	38,70
17) 6 min	31,90	2,48	2,51	25,34	47,80	65,24	36,49
18) 6	33,70	2,54	2,51	25,30	46,78	64,07	36,96
19) 6	36,30	2,54	2,54	27,11	46,58	63,83	37,03
20) 6	30,40	2,48	2,47	24,36	46,54	63,88	37,26

Distancia entre apoyos (cm)= 8,132

Tabla A.5.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar la velocidad óptima de agitación

TIEMPO (min)	RM (Kg/cm ²)	IA (%)
1,5	30,42	41
3	31,38	40,9
4,5	33,19	39,38
6	25,53	36,94

Tabla A.6.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII elaboradas con el uso de Genapol PF a la velocidad y tiempo óptimos de agitación.

BARRA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 0,01 %	39,20	2,54	2,50	29,99	46,17	64,38	39,44
2) 0,01	40,70	2,51	2,54	31,25	49,91	68,79	37,83
3) 0,01	40,70	2,49	2,54	31,81	48,58	67,62	39,19
4) 0,01	31,90	2,43	2,55	26,02	45,92	64,01	39,39
5) 0,01	43,60	2,40	2,53	36,66	48,25	66,67	38,18
<hr/>							
6) 0,01	39,60	2,50	2,56	30,37	47,25	65,18	37,95
7) 0,03 %	43,20	2,45	2,54	34,98	46,62	64,22	37,75
8) 0,03	30,00	2,24	2,40	30,64	41,82	58,26	39,31
9) 0,03	46,90	2,52	2,49	36,61	45,94	63,24	37,66
10) 0,03	45,80	2,51	2,53	35,47	49,81	68,98	38,49
11) 0,03	36,60	2,53	2,44	28,86	44,24	61,53	39,08
<hr/>							
12) 0,03	42,10	2,53	2,45	33,09	48,65	67,71	39,18
13) 0,05 %	39,20	2,45	2,54	31,50	44,84	61,89	38,02
14) 0,05	34,80	2,47	2,55	27,54	47,93	66,28	38,28
15) 0,05	31,90	2,47	2,54	25,34	43,28	59,56	37,62
16) 0,05	39,20	2,46	2,56	31,08	48,02	66,23	37,92
17) 0,05	35,50	2,53	2,33	29,20	46,23	63,60	37,57
<hr/>							
18) 0,05	36,30	2,52	2,40	29,31	47,50	64,99	36,82
19) T-80	38,80	2,57	2,50	28,99	47,71	66,10	38,55
20) T-80	35,90	2,49	2,56	27,82	46,17	63,57	37,69
21) T-80	33,00	2,47	2,56	25,95	49,26	67,66	37,35
22) T-80	36,30	2,48	2,55	28,54	48,93	67,20	37,34

T-80: Probetas elaboradas con polvo de yeso Paria tipo VII tamizado en malla 80.

Distancia entre apoyos (cm)= 8,132

Tabla A.7.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar influencia del uso de Genapol PF.

%Genapol	RM (Kg/cm ²)	IA (%)
0,01	31,02	38,66
0,03	33,28	38,58
0,05	29	37,71

Tabla A.8.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII elaboradas con el uso de Urea a la velocidad y tiempo óptimos de agitación.

BARRA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 0,5%	19	1,93	2,55	24,60	36,98	50,75	37,24
2) 0,5%	33,3	2,38	2,53	28,58	43,81	60,11	37,21
3) 0,5%	28,9	2,45	2,54	23,32	43,74	61,68	41,02
4) 0,5%	38,5	2,48	2,53	30,43	48,73	67,24	37,98
5) 0,5%	33	2,46	2,54	26,41	47,35	66,47	40,38
6) 0,5%	22	2,17	2,49	23,08	40,13	55,33	37,88
7) 1 %	38,5	2,48	2,55	30,19	46,02	63,12	37,16
8) 1 %	40,3	2,49	2,53	31,60	48,75	67,2	37,85
9) 1 %	36,6	2,5	2,56	28,14	44,91	61,98	38,01
10) 1 %	34,8	2,46	2,56	27,63	47,21	64,82	37,30
11) 1 %	38,1	2,42	2,53	31,63	44,91	62,21	38,52
12) 1 %	30	2,3	2,56	27,25	45,05	61,06	35,54
13) 1 %	39,3	2,28	2,56	36,32	44,4	60,15	35,47
14) 3 %	27,1	2,5	2,56	20,83	46,43	62,44	34,48
15) 3 %	33,7	2,54	2,54	25,29	45,69	62,85	37,56
16) 3 %	29,7	2,5	2,46	23,76	48,43	65,43	35,10
17) 3 %	30	2,53	2,54	22,70	48,91	66,53	36,03
18) 3 %	26,4	2,51	2,54	20,29	49,61	68,04	37,15
19) 3 %	27,1	2,5	2,54	21,00	47,87	63,02	31,65
20) 3 %	29,7	2,55	2,54	22,12	49,68	65,17	31,18
21) 6 %	29,3	2,56	2,54	21,65	49,07	66,09	34,69
22) 6 %	27,1	2,48	2,5	21,68	47,53	63,44	33,47
23) 6 %	28,6	2,48	2,56	22,34	49,04	66,44	35,48
24) 6 %	28,6	2,5	2,58	21,82	50,82	68,23	34,26
25) 6 %	24,2	2,54	2,48	18,60	47,63	63,92	34,20

Distancia entre apoyos (cm)=

8,132

Tabla A.9.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar influencia del uso de Urea.

%Urea	RM (Kg/cm2)	IA (%)
0,5	26,07	38,62
1	30,39	37,12
3	22,28	34,74
4	21,22	34,42

Tabla A.10.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII elaboradas con el uso de ZnSO₄ a la velocidad y tiempo óptimos de agitación.

BARRA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
1) 0,5%	26,70	2,44	2,51	21,98	42,69	60,21	41,04
2) 0,5%	28,90	2,47	2,49	23,40	46,89	64,76	38,11
3) 0,5%	25,60	2,40	2,53	21,61	44,67	62,99	41,01
4) 0,5%	35,20	2,28	2,52	33,05	45,02	62,68	39,23
5) 0,5%	16,10	1,83	2,53	23,37	34,89	48,86	40,04
6) 1 %	42,10	2,21	2,54	41,74	42,84	59,79	39,57
7) 1 %	36,30	2,38	2,54	31,03	40,46	56,44	39,50
8) 1 %	37,70	2,22	2,53	37,19	40,11	55,31	37,90
9) 1 %	31,50	2,03	2,54	37,02	34,32	47,14	37,35
10) 1 %	37,40	2,25	2,55	35,63	40,44	56,51	39,74
11) 1 %	28,20	2,06	2,56	31,93	39,18	53,86	37,47
12) 2 %	30,40	2,26	2,54	28,82	44,44	61,67	38,77
13) 2 %	31,10	2,33	2,48	28,41	41,04	56,75	38,28
14) 2 %	41,80	2,38	2,55	35,59	43,88	59,57	35,76
15) 2 %	41,10	2,44	2,55	33,30	49,30	66,93	35,76
16) 2 %	33,30	2,44	2,56	26,87	47,86	66,74	39,45
17) 3%	25,60	2,11	2,56	27,63	39,96	54,88	37,34
18) 3%	27,80	2,22	2,54	27,32	40,91	55,64	36,01
19) 3%	30,40	2,33	2,52	27,33	44,02	60,82	38,16
20) 3%	36,60	2,32	2,52	33,19	43,72	60,70	38,84
21) 3%	30,00	2,23	2,55	29,10	39,66	54,66	37,82
22) 3%	22,70	2,05	2,55	26,05	39,90	54,80	37,34

Distancia entre apoyos (cm)=

8,132

Tabla A.11.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar influencia del uso de ZnSO₄.

%ZnSO ₄	RM (Kg/cm ²)	IA (%)
0,5	24,68	39,89
1	34,56	38,39
2	30,6	37,6
3	28,94	37,59

Tabla A.12.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII elaboradas con el uso de KSO4 a la velocidad y tiempo óptimos de agitación.

BARRA	CARGA	ESPESOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	LABSORCIÓN
1) 0,1%	28,90	1,96	2,51	36,87	39,96	55,33	38,46
2) 0,1%	50,50	2,39	2,51	43,32	42,99	59,50	38,40
3) 0,1%	49,40	2,41	2,51	41,68	43,17	60,08	39,17
4) 0,1%	35,90	2,15	2,53	37,76	38,48	51,65	34,23
5) 0,1%	38,50	2,13	2,51	41,58	41,29	57,14	38,39
6) 0,1%	35,50	2,17	2,50	37,09	40,44	56,31	39,24
7) 0,3%	23,40	2,40	2,50	19,99	45,54	63,73	39,94
8) 0,3%	23,40	2,20	2,48	23,98	38,98	55,20	41,61
9) 0,3%	43,90	2,34	2,49	39,60	43,92	62,22	41,67
10) 0,3%	36,90	2,20	2,49	37,66	38,18	54,84	43,64
11) 0,3%	16,10	1,83	2,50	23,65	27,30	39,83	45,90
12) 1 %	31,10	2,07	2,50	35,71	41,50	58,60	41,20
13) 1 %	21,20	1,90	2,49	29,01	38,22	54,08	41,50
14) 1 %	24,50	1,89	2,49	33,88	37,06	52,10	40,58
15) 1 %	23,10	1,93	2,51	30,39	35,85	50,47	40,78
16) 1 %	27,10	2,00	2,49	33,47	38,53	54,17	40,59
17) 2 %	20,50	2,04	2,48	24,43	38,43	55,11	43,40
18) 2 %	20,50	1,99	2,46	25,88	38,66	55,25	42,91
19) 2 %	23,10	2,11	2,45	26,05	40,46	58,19	43,82
20) 2 %	23,80	2,19	2,48	24,61	42,21	60,68	43,76
21) 2 %	20,90	2,14	2,49	22,54	39,36	56,15	42,66
23) 3%	20,10	2,28	2,49	19,10	43,82	61,42	40,16
24) 3%	16,10	2,19	2,50	16,52	43,16	61,49	42,47
25) 3%	13,20	2,16	2,45	14,20	41,63	60,21	44,63
26) 3%	18,70	2,34	2,38	17,65	42,64	61,85	45,05
27) 3%	20,90	2,42	2,43	18,06	42,95	62,24	44,91

Distancia entre apoyos (cm)=

8,132

Tabla A.13.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar influencia del uso de KSO4.

%KSO4	RM (Kg/cm2)	IA (%)
0,1	39,72	37,98
0,3	28,98	42,55
1	32,86	40,92
2	24,08	43,31
3	17,03	43,46

Tabla A.14.- Resistencia a la compresión e índice de absorción de probetas de Yeso Paria tipo VII elaboradas con mezclas tamizadas en malla 50 y el uso de Genapol, ZnSO₄ y KSO₄ a la velocidad y tiempo óptimos de agitación.

BARRA	CARGA	ESPELOR	ANCHO	RESISTENCIA	PESO INICIAL	PESO FINAL	I. ABSORCIÓN
ZnSO₄							
1) 1%	46,50	2,54	2,50	35,46	45,44	63,92	40,67
2) 1%	43,60	2,48	2,56	34,06	39,49	60,32	52,75
3) 1%	41,80	2,49	2,50	33,17	40,05	60,06	49,96
4) 1%	49,40	2,50	2,52	38,58	45,64	62,88	37,77
5) 1%	41,40	2,50	2,55	31,95	42,34	61,81	45,98
KSO₄							
6) 0,1%	50,90	2,35	2,46	46,08	41,07	57,38	39,71
8) 0,1%	52,70	2,46	2,56	41,84	43,92	62,26	41,76
9) 0,1%	55,30	2,45	2,55	44,44	44,71	62,55	39,90
Genapol							
32) 0,03 %	56,80	2,43	2,57	46,04	44,20	61,39	38,89
33) 0,03 %	54,20	2,54	2,45	42,18	45,25	62,62	38,39
34) 0,03 %	55,70	2,46	2,55	44,40	44,69	62,16	39,09

Distancia entre apoyos
(cm)= 8,132

Tabla A.15.- Cuadro resumen de RM e IA para determinar influencia del uso aditivos y el tamizado de la mezcla.

Aditivo	%	RM (Kg/cm ²)	IA (%)
ZnSO ₄	1	34,79	43,6
KSO ₄	0,1	44,12	40,46
Genapol	0,03	44,21	38,79

Tabla A.16.- Datos promedios obtenidos respecto a la variación de la temperatura de fraguado en función del tiempo para mezclas 54/46, 57/43 y 60/40 de YPTVII.

Relación 54/46		Relación 57/43		Relación 60/40	
TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)
6,5	23	5,0	23	7,5	23
11,0	24	6,0	24	9,8	24
11,8	25	8,3	25	10,3	25
14,3	26	11,5	26	11,9	26
16,2	27	13,8	27	13,4	27
17,8	28	15,6	28	14,6	28
19,0	29	17,3	29	15,6	29
20,1	30	18,3	30	16,5	30
21,2	31	19,5	31	17,4	31
22,2	32	20,5	32	18,2	32
23,0	33	21,5	33	18,8	33
23,7	34	22,3	34	19,4	34
24,3	35	22,9	35	20,1	35
25,3	36	23,9	36	21,5	36
25,9	37	24,8	37	21,2	37
26,9	38	25,8	38	22,1	38
28,5	39	26,9	39	22,8	39
29,3	40	28,2	40	23,4	40
32,3	41	31,0	42	24,5	41
35,5	40	35,1	41	26,1	42
39,8	39	37,9	40	33,3	41
42,8	38	38,9	39	35,8	40
45,5	37	41,2	38	38,5	39
		44,4	37	40,9	38
				44,0	37

Tabla A.17.- Datos promedios obtenidos respecto a la variación de la temperatura de fraguado en función del tiempo para mezclas 54/46, 57/43 y 60/40 de YF.

Relación 54/46		Relación 57/43		Relación 60/40	
TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)
5,0	22	5,0	23	5,0	22
6,5	23	7,0	24	10,0	23
9,5	24	7,9	25	12,5	24
11,0	25	9,8	26	12,2	25
13,7	26	11,0	27	14,3	26
14,9	27	12,2	28	15,8	27
16,0	28	13,3	29	17,1	28
16,9	29	14,3	30	18,1	29
18,1	30	15,3	31	19,2	30
19,0	31	16,3	32	20,0	31
20,0	32	17,2	33	20,9	32
20,7	33	17,9	34	21,9	33
21,6	34	18,8	35	22,7	34
22,4	35	19,6	36	23,5	35
23,6	36	20,5	37	24,6	36
24,0	37	21,3	38	25,7	37
25,0	38	22,3	39	28,3	38
25,9	39	23,8	40	29,3	39
27,5	40	27,0	41	30,3	40
33	38	32,4	39	33,0	41
35	37	35,3	38	36,0	40
		38,4	37	39,0	39
				42,0	38
				45,0	37

Tabla A.18.- Datos promedios obtenidos respecto al tiempo de fraguado inicial de mezclas 54/46, 57/43 y 60/40 de YPTVII.

Relación 54/46		Relación 57/43		Relación 60/40	
PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO
(mm)	(min)	(mm)	(min)	(mm)	(min)
40,0	12,0	40,0	12,8	40,0	9,2
40,0	12,8	36,0	13,3	37,7	9,8
30,5	13,5	33,5	13,8	32,0	10,5
27,7	14,3	32,0	14,1	30,0	11,6
25,3	14,8	31,0	14,4	28,0	11,9
21,3	15,3	28,7	14,8	26,0	12,1
19,7	15,5	26,7	15,2	21,3	13,0
18,7	15,8	25,0	15,8		
		22,7	16,0		
		21,0	16,3		
		16,3	16,8		

Tabla A.19.- Datos promedios obtenidos respecto al tiempo de fraguado inicial de mezclas 54/46, 57/43 y 60/40 de YF.

Relación 54/46		Relación 57/43		Relación 60/40	
PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO
(mm)	(min)	(mm)	(min)	(mm)	(min)
40,0	10,2	40,0	9,0	40,0	8,2
39,0	12,0	38,3	9,8	35,0	8,6
36,0	12,8	34,7	10,1	32,0	8,8
31,5	14,0	31,3	10,4		
28,5	14,3	28,0	10,5	26,3	9,5
27,0	14,8	27,0	10,8	24,5	10,3
25,0	15,3	25,5	11,1	20,3	10,5
21,0	16,1	24,0	11,5		
		17,7	11,9		

Tabla A.20.- Datos promedios obtenidos respecto a la variación de la temperatura de fraguado en función del tiempo para mezclas con genapol, ZnSO4 y KSO4

Genapol		ZnSO4		KSO4	
TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. (°C)
8,5	25	9,3	28	9,0	27
11,3	26	10,3	29	10,0	28
12,9	27	11,1	30	11,3	29
14,5	28	11,8	31	12,1	30
15,8	29	12,6	32	12,8	31
16,9	30	13,1	33	13,5	32
17,8	31	13,9	34	14,2	33
18,8	32	14,3	35	14,8	34
19,6	33	14,6	36	15,3	35
20,4	34	15,0	37	16,0	36
21,3	35	15,4	38	16,5	37
22,2	36	16,0	39	17,0	38
22,8	37	16,7	40	17,8	39
23,5	38	17,2	41	18,4	40
24,4	39	18,2	42	19,3	41
25,6	40	21,5	44	21,9	42
29,5	40,5	24,5	43	25,0	41
33,5	39	26,5	42	28,0	40
		28,8	40		

Tabla A.21.- Datos promedios obtenidos respecto al tiempo de fraguado inicial de mezclas con genapol, ZnSO4 y KSO4.

Genapol		ZnSO4		KSO4	
PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO	PENETRAC.	TIEMPO
11,2	40,0	9,0	40,0	10,0	40,0
11,4	36,7	9,3	38,0	10,3	37,0
11,8	34,0	9,5	36,5	10,5	34,0
12,2	32,7	9,8	32,5	10,8	32,5
12,5	30,7	10,0	27,5	11,0	29,5
12,8	27,7	10,4	23,0	11,4	28,0
13,0	25,3	10,6	21,5	11,8	22,5
13,4	22,0	10,9	19,5	12,0	18,0
13,8	18,7	11,3	14,0		
14,1	16,7				

