



Editorial de la Universidad  
Tecnológica Nacional

**TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

# **REUTILIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DEL YESO RESIDUAL DE CONSTRUCCIONES**

AUTOR

**Begliardo, Hugo Félix**

ING. CIVIL

DIRIGIDA POR

**Dra. Panigatti, María Cecilia**

SANTA FE, ABRIL DE 2015

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional - edUTecNe  
<http://www.edutecne.utn.edu.ar>  
[edutecne@utn.edu.ar](mailto:edutecne@utn.edu.ar)

©[Copyright]  
edUTecNe, la Editorial de la U.T.N., recuerda que las obras publicadas en su sitio web son de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir la producción cultural y el conocimiento generados por autores universitarios o auspiciados por las universidades, pero que estos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.

# **REUTILIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DEL YESO RESIDUAL DE CONSTRUCCIONES**



**MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**DICTAMEN**

Título: "Reutilización y valoración del yeso residual de construcciones".

Aspirante: Ing. Hugo Félix BEGLIARDO

Fecha: 13 de Abril de 2015

Director: Dra. María Cecilia PANIGATTI

Reunidos en la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional, los integrantes del jurado de la tesis designados por Resolución 1645/2015 C.S, Dra. Nancy QUARANTA, Dr. Miguel MUSSATI y Dr. Carlos MARTÍN formulan el siguiente dictamen:

**Originalidad del trabajo:** Se trata de una Tesis que reviste interés tanto en el campo académico como en la aplicación industrial, con claros beneficios ambientales, fundamentalmente por la reducción de requerimiento de roca mineral, de la energía necesaria para su procesamiento y de los volúmenes de residuos de demolición y construcción dispuestos en rellenos sanitarios y vertederos.

Si bien se encuentran en bibliografía antecedentes sobre esta temática, los enfoques del estudio resultan originales.

**Nivel académico del trabajo:** El trabajo ha sido desarrollado con una profundidad superior a la requerida para una Tesis de Maestría, proporcionando nuevos conocimientos. El aspirante muestra un conocimiento acabado de los temas abordados y rigurosidad en su tratamiento.

**Metodología empleada:** La metodología de trabajo utilizada y las técnicas de análisis adoptadas son las recomendadas por el marco normativo de referencia. Se observa además que se ha desarrollado un método de ensayo interno con el objeto de obtener correlaciones de las propiedades mecánicas, datos que no se encuentran en la literatura para este material.

**Claridad y precisión de la redacción:** La Tesis está muy bien estructurada y organizada. La redacción es buena y el lenguaje es claro. La exposición oral fue clara y realizada en el tiempo estipulado, respondiendo con solvencia las preguntas efectuadas por este jurado.

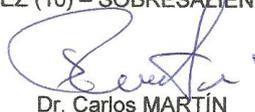
**Las fuentes de información:** Las fuentes bibliográficas son adecuadas y actuales.

**Las eventuales discrepancias con las conclusiones alcanzadas:** No hay discrepancias con los resultados presentados ni descenso con las conclusiones obtenidas.

Por lo expuesto, el jurado por unanimidad otorga la calificación DIEZ (10) – SOBRESALIENTE.

  
Dra. Nancy QUARANTA

  
Dr. Miguel MUSSATI

  
Dr. Carlos MARTÍN



# Índice General

---

Dedicatorias.....	V
Reconocimientos.....	VII
Resumen.....	IX
Abstract.....	XI
Contenido.....	XIII
Lista de Figuras.....	XVII
Lista de Tablas.....	XXI
Lista de Abreviaturas.....	XXIII
Capítulo 1- Presentación del problema. Hipótesis y objetivos.....	1
Capítulo 2 - Importancia estratégica y nuevos marcos regulatorios.....	13
Capítulo 3- Análisis del marco jurídico en relación a la valorización de residuos. El caso de los RCD.....	21
Capítulo 4- Generalidades sobre química del yeso.....	33
Capítulo 5- Producción de yeso. Generación de residuos.....	45
Capítulo 6- Aplicaciones del yeso.....	59
Capítulo 7- Investigación experimental.....	73
Capítulo 8- Conclusiones.....	105
Anexo A- Glosario.....	111
Anexo B- Procedimientos de Ensayos.....	121
Anexo C- Publicaciones.....	135
Referencias.....	139



# Dedicatorias

---

*A Vos Señor,  
A Vos, Madre Santísima.*

*A mi esposa Adriana y  
a mis hijos Francisco, Fernando,  
M<sup>a</sup> Constanza y M<sup>a</sup> Agustina,  
la hermosa familia que Dios me dio...*



# Reconocimientos

---

Agradezco de modo especial a las siguientes personas e Instituciones, sin las cuales no habría podido llevar adelante esta tesis:

- A la Ing. Mirta Sánchez, co-directora del Proyecto de Investigación MAUTNRA N° 1935, y a los becarios alumnos Sofía Garrappa, Omar Stellón y Ariel Delpupo, por el sacrificado esfuerzo de dos años acompañando el trabajo, siempre con la mejor predisposición.
- A la Dra. M. Cecilia Panigatti, Directora de la tesis, por su dedicación y aportes desde el Laboratorio de Química, sugerencias y oportunas correcciones al escrito.
- Al todo el personal de los Laboratorios de Ingeniería Civil y Química de la UTN FRRA, profesionales y becarios, por su colaboración siempre necesaria.
- A la Dra. Ester Destéfani y al MSc. Ing. Sebastián Gambaudo, por su asesoramiento en los temas específicos de sus profesiones que debieron ser abordados en este trabajo.
- Al INTI Rafaela, por la generosa disposición de su personal toda vez que debí recurrir al mismo.

Finalmente, agradezco a la Universidad Tecnológica Nacional, a través de sus Facultades Regionales Rafaela y Santa Fe, por haberme facilitado los medios y el ámbito para concretar los estudios de especialización y maestría.



# Resumen

---

El yeso es uno de los minerales más abundantes en la naturaleza. Su uso como material de construcción, a partir de la calcinación de la piedra de yeso, se remonta a tiempos de la revolución neolítica, cuando el hombre alcanzó el nivel tecnológico necesario para dominar el fuego a bajas temperaturas.

El yeso para la construcción fue producido de modo artesanal durante miles de años, hasta que con la revolución industrial comenzaron a industrializarse los procesos para su obtención. Asimismo, en la segunda mitad del siglo XX y por razones de gestión medioambiental en las industrias, tuvo lugar un incremento significativo de la producción de yeso sintético como subproducto de ciertos procesos. Progresivamente, esta variedad de origen químico, va sustituyendo al yeso natural en sus diversas aplicaciones.

La globalización de la economía, manifestación de las últimas décadas que se extiende hasta el presente, condujo a un gran crecimiento en la industria de la construcción y actividades afines. Como consecuencia de ello, devino una enorme generación de residuos de construcción y demolición (RCD) que, por lo general, tienen por destino final los rellenos sanitarios y vertederos no controlados.

La creciente acumulación de residuos motivó que muchos países, entre ellos el nuestro, comenzaran a dictar regulaciones medioambientales tendientes a reaprovechar los RCD, valorizándolos a partir de su reciclado o reutilización, a fin de lograr reducir el volumen de vuelco y reinsertar estos materiales al ciclo de su vida útil. El yeso es parte de dicha corriente de desechos. Si bien es considerado material no peligroso, su disposición final sin control puede provocar contaminación de las aguas subterráneas y, eventualmente, la generación de gases tóxicos.

La tesis que se presenta propone la recuperación y valorización del yeso residual de obras civiles, a partir de su reutilización como yeso en polvo agregado al yeso comercial para construcción.

La investigación realizada ha consistido en estudios exploratorios basados en ensayos de laboratorio sobre mezclas compuestas por residuos de yeso de obras, procedentes de pastas aplicadas en condiciones húmedas y de tableros prefabricados, tratados separadamente e incorporados en distintas proporciones al yeso comercial en polvo, para las cuales se evaluó su ajuste a determinados requisitos establecidos en la norma argentina IRAM 1607:70. Complementariamente, se extendieron los estudios comparándolas con lo requerido por la norma homóloga chilena NCh 143.Of.1999.

Los resultados obtenidos evidencian que el aprovechamiento del yeso residual para su uso con igual fin al primigenio es totalmente factible, lográndose con ello la valorización del material recuperado, además de los beneficios medioambientales que conlleva.

# Abstract

---

Gypsum is a common mineral, abundant in nature. Its use as a building material, obtained from mineral gypsum calcination, dates back to neolithic times, when human being reached technological level to master fire at low temperatures.

Gypsum plaster was produced in a traditional way for thousands of years, until industrial revolution industrialized the processes for their preparation. Also, in the second half of the twentieth century and for environmental management reasons, a significant increase in the production of synthetic gypsum as a byproduct of certain industrial processes took place. Gradually, this variety of chemical origin is replacing natural gypsum in its various applications.

The globalization of the economy, a manifestation of latest decades that extends to present times, led to strong growth in the construction industry and related activities. As a result of this, it became in a huge generation of construction and demolition waste (CDW), that usually have controlled or uncontrolled landfills as final destination.

The growing accumulation of waste caused that many countries, including Argentina, began to issue environmental regulations to recover the CDW, valuing them from recycling or reuse, to achieve reduce the discharge volume and reintegrate these materials to life cycle. Gypsum is part of the waste stream. While it is not considered hazardous material, unchecked disposal can cause contamination of groundwater and, eventually, generation of toxic gases.

This thesis proposes recovery and valorization of residual gypsum from building constructions, by using as gypsum powder added to commercial gypsum plaster.

Exploratory studies were taken out by means of laboratory tests on mixtures with gypsum waste, from mortars and plasterboards treated separately, added in different percentages in a matrix of commercial gypsum plaster, in order to analyze the feasibility of its reuse, assessing their adjustment to certain requirements established

in argentine IRAM 1607:70 and chilean NCh 143.Of 1999 standards.

Results show its feasibility of reuse, with the consequent environmental benefits involved.

# Contenido

---

<b>CAPITULO 1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. EL HECHO OBSERVADO.....	3
1.3. PLANTEO DEL PROBLEMA.....	5
1.4. HIPÓTESIS.....	6
1.5. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	6
1.6. RESULTADOS QUE SE PRESENTAN.....	6
1.7. ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
1.8. LUGAR DE REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.9. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	11
<b>CAPITULO 2. IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y NUEVOS MARCOS REGULATORIOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. LA IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y LOS NUEVOS MARCOS REGULATORIOS.	13
2.1.1. Estrategia nacional sobre ciencia, tecnología e innovación.....	14
2.1.2. Política de ciencia y tecnología de la U.T.N. ....	17
2.1.3. Marcos regulatorios legales sobre cuestiones ambientales.....	18
<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS DEL MARCO JURÍDICO EN RELACIÓN A LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS. EL CASO DE LOS RCD.....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	21
3.2. LEGISLACIÓN NACIONAL.....	21
3.2.1. Constitución de la Nación Argentina.....	22
3.2.2. Ley N° 25.675- Ley General del Ambiente.....	22
3.2.3. Ley N° 25.612- Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicio.....	23

3.2.4.	Ley N° 25.916- Gestión Integral de Residuos Domiciliarios....	25
3.3.	LEGISLACIÓN DE LA PROVINCIA DE SANTA FE.....	26
3.3.1.	Ley N° 11.717- Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable...	26
3.3.2.	Resolución N° 128.....	27
3.3.3.	Ley N° 13.055- Residuos Sólidos Urbanos. Basura Cero.....	28
3.4.	LEGISLACIÓN MUNICIPAL.....	30
3.5.	CONCLUSIONES.....	31
 <b>CAPITULO 4. GENERALIDADES SOBRE QUÍMICA DEL YESO....</b>		<b>33</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	33
4.2.	EL YESO NATURAL.....	33
4.2.1.	Fases del sulfato de calcio en la naturaleza (ciclo geológico)...	34
4.3.	EL YESO CONGLOMERANTE.....	34
4.3.1.	El ciclo del sulfato de calcio (ciclo tecnológico).....	35
4.3.1.1.	La deshidratación del dihidrato (yeso).....	35
4.3.1.2.	La hidratación del semihidrato (basanita).....	41
4.4.	EL YESO SINTÉTICO.....	42
4.4.1.	Desulfoyeso.....	42
4.4.2.	Fosfoyeso.....	42
4.4.3.	Yesos procedentes de otros procesos industriales.....	43
4.5.	LOS ADITIVOS.....	44
 <b>CAPITULO 5. PRODUCCIÓN DE YESO. GENERACIÓN DE RESIDUOS.....</b>		<b>45</b>
5.1.	LAS FUENTES DE YESO COMO MATERIA PRIMA.....	45
5.2.	PRODUCCIÓN MUNDIAL DE YESO.....	48
5.3.	PRODUCCIÓN DE YESO MINERAL EN ARGENTINA.....	52
5.4.	SOBRE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS Y EL TRATAMIENTO DE DATOS.....	54
5.4.1.	Estimaciones sobre la participación del yeso en el conjunto de los RCD.....	55
5.4.2.	El escenario futuro del yeso reciclado en el mundo.....	57
5.5.	COMENTARIO FINAL.....	58

<b>CAPITULO 6. APLICACIONES DEL YESO.....</b>	<b>59</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	59
6.2. APLICACIONES DEL YESO EN ARGENTINA.....	63
6.3. CAMPOS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN SOBRE APLICACIONES DEL YESO.	63
6.3.1. Industria del cemento.....	63
6.3.2. Industria de la construcción.....	64
6.3.3. Agronomía: yeso para uso agrícola.....	66
6.3.4. Geotecnia: estabilización de suelos.....	68
6.3.5. Ingeniería ambiental: remediación.....	68
6.4. CUADRO ESQUEMÁTICO DE LAS APLICACIONES DEL YESO.....	68
<b>CAPITULO 7. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....</b>	<b>73</b>
7.1. INTRODUCCIÓN.....	73
7.2. MATERIALES.....	73
7.2.1. Placas de yeso laminado.....	73
7.2.2. Pastas de yeso.....	74
7.2.3. Yeso comercial (yeso patrón) .....	76
7.3. METODOLOGÍA.....	77
7.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	83
7.4.1. Análisis físico-químicos.....	83
7.4.2. Finura.....	87
7.4.3. Tiempos de fraguado.....	88
7.4.4. Pasta de Consistencia Normal. Relaciones agua/yeso (a/y).....	88
7.4.5. Densidad aparente. Porosidad.....	91
7.4.6. Resistencia a la compresión (IRAM 1607).....	95
7.4.7. Resistencia a la flexión y compresión (NCh143).....	98
7.4.8. Módulo E.....	102
7.4.9. Cilindros.....	103
<b>CAPITULO 8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
8.1. INTRODUCCIÓN.....	105
8.2. CONCLUSIONES.....	106

8.3. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	109
<b>APÉNDICE A. GLOSARIO.....</b>	<b>111</b>
<b>APÉNDICE B. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS.....</b>	<b>121</b>
B.1. NORMA IRAM 1607:70. YESO COCIDO PARA CONSTRUCCIÓN: REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS.....	121
B.2. NORMA NCh 143.Of1999. YESO CALCINADO: REQUISITOS.....	122
B.3. ENSAYO DE FINURA (NORMA IRAM 1608: 73) .....	123
B.4. CONSISTENCIA NORMAL (NORMA IRAM 1608: 73).....	124
B.5. TIEMPO DE FRAGUADO (NORMA: IRAM 1608: 73) .....	125
B.6. PROCEDIMIENTO PARA LA CONFECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS.....	126
B.7. PROBETAS CÚBICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	127
B.8. PROBETAS PRISMÁTICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	128
B.9. PROBETAS PRISMÁTICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	129
B.10. PROBETAS PRISMÁTICAS: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	129
B.11. PROBETAS CILÍNDRICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	130
B.12. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL	131
B.13. DENSIDAD APARENTE. POROSIDAD.....	132
<b>APÉNDICE C. PUBLICACIONES.....</b>	<b>135</b>
C.1. INTRODUCCIÓN.....	135
C.2. REVISTAS INTERNACIONALES.....	135
C.3. CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS.....	136
C.4. CONGRESOS Y JORNADAS DE BECARIOS INVESTIGADORES.....	137
C.5. OTROS.....	138
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>139</b>

# Lista de figuras

---

## **CAPÍTULO 2. IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y NUEVOS MARCOS REGULATORIOS**

- Figura 2.1. Portadas de los documentos “Bases” y “Plan Bicentenario” de la SECyT de la Nación..... 14
- Figura 2.2. Portada del documento “Argentina Innovadora 2020” de la SPP de la Nación..... 17

## **CAPITULO 4. GENERALIDADES SOBRE QUÍMICA DEL YESO**

- Figura 4.1. Figura 4.1. Equilibrio de las fases DH-SH-AIII-AII..... 40
- Figura 4.2. El ciclo tecnológico del yeso..... 41

## **CAPITULO 5. PRODUCCIÓN DE YESO. GENERACIÓN DE RESIDUOS**

- Figura 5.1. Aplicaciones dadas al yeso en los EEUU, período 1975-2003. .... 46
- Figura 5.2. Evolución en la preferencia del uso del yeso sintético, por sobre el natural, en la industria europea de tableros de yeso..... 47
- Figura 5.3. Evolución anual de la producción mundial de yeso mineral. 50
- Figura 5.4. Evolución anual de la producción argentina de yeso mineral. .... 53
- Figura 5.5. Esquema de procesamiento del yeso, según su destino..... 54
- Figura 5.6. Distribución porcentual de los RC en peso..... 56
- Figura 5.7. Distribución porcentual de los RC en volumen..... 56
- Figura 5.8. Posible evolución del uso del yeso reciclado en la industria europea de tableros. Escenario 2000-2035..... 57

## **CAPÍTULO 6. APLICACIONES DEL YESO**

Figura 6.1.	Distribución de yeso reciclado con un esparcidor de cal....	67
<b>CAPITULO 7. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL</b>		
Figura 7.1.	Yeso aplicado en condiciones secas (YS) como revestimiento de paredes y cielorrasos, mediante PYL.....	74
Figura 7.2.	Residuos de PYL. ....	74
Figura 7.3.	Yeso aplicado en condiciones húmedas (YH) como revestimiento de paredes y cielorrasos.....	75
Figura 7.4.	Recortes de PYL limpios, sin cobertura de cartón (YS).....	77
Figura 7.5.	Aspecto del YS luego de pasado por el tamiz N°16.....	77
Figura 7.6.	Yeso recuperado de pastas para revestimientos (YH), limpio y triturado.....	78
Figura 7.7.	Aspecto del YH luego de pasado por el tamiz N°16.....	78
Figura 7.8.	Muestra de probetas confeccionadas.....	80
Figura 7.9.	Curado de las probetas en cámara húmeda.....	80
Figura 7.10.	Horno para secado de las probetas a $45^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .....	81
Figura 7.11.	Dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf.....	82
Figura 7.12.	Agua combinada en residuos YS secados a diferentes temperaturas.....	83
Figura 7.13.	Agua combinada en residuos YH secados a diferentes temperaturas.....	84
Figura 7.14.	Contenido de los diferentes sulfatos de calcio en residuos YS secados a distintas temperaturas.....	84
Figura 7.15.	Contenido de los diferentes sulfatos de calcio en residuos YH secados a distintas temperaturas.....	85
Figura 7.16.	Relaciones a/y para mezclas con YS. ....	90
Figura 7.17.	Relaciones a/y para mezclas con YH. ....	90
Figura 7.18.	Densidad promedio para mezclas con YS. ....	91
Figura 7.19.	Densidad promedio para mezclas con YH.....	91
Figura 7.20.	Relaciones a/y-Densidad-Porosidad para mezclas con YS...	92
Figura 7.21.	Relaciones a/y-Densidad-Porosidad para mezclas con YH..	93
Figura 7.22.	Cubos. Ensayo de resistencia a la compresión.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 7.23. Cubos (YS). Resistencia a la compresión.....	96
Figura 7.24. Cubos (YH). Resistencia a la compresión.....	96
Figura 7.25. Prisma. Ensayo a la flexión. ....	98
Figura 7.26. Prismas (YS). Resistencia a la flexión. ....	100
Figura 7.27. Prismas (YH). Resistencia a la flexión. ....	100
Figura 7.28. Prismas (YS). Resistencia a la compresión.....	101
Figura 7.29. Prismas (YH). Resistencia a la compresión. ....	102
Figura 7.30. Cilindro ensayado a la tracción por compresión diametral...	104
Figura 7.31. Cilindros. Ensayo de compresión simple. ....	104

## LISTA DE FIGURAS

# Lista de tablas

---

## **CAPITULO 2. IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y NUEVOS MARCOS REGULATORIOS**

Tabla 2.1. Prioridades estratégicas del Plan Bicentenario.....	16
--	----

## **CAPITULO 4. GENERALIDADES SOBRE QUÍMICA DEL YESO**

Tabla 4.1. Fases del sistema $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Especificaciones.....	37
---	----

Tabla 4.2. Fases del sistema $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Propiedades físicas.....	38
--	----

## **CAPITULO 5. PRODUCCIÓN DE YESO. GENERACIÓN DE RESIDUOS**

Tabla 5.1. Evolución en el cambio tecnológico y equipamiento de las plantas de tableros de yeso en Europa. ....	48
---	----

Tabla 5.2. Producción mundial de yeso mineral según el USGS.....	49
--	----

Tabla 5.3. Composición de los RCD según la Dirección general de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid.....	55
---	----

## **CAPITULO 6. APLICACIONES DEL YESO**

Tabla 6.1. Aplicaciones del yeso natural en Argentina. ....	62
---	----

Tabla 6.2. Aplicaciones del yeso calcinado en Argentina. ....	62
---	----

Tabla 6.3. Aplicaciones del yeso mineral (nuevo) y residual.....	69
--	----

## **CAPITULO 7. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

Tabla 7.1. Selección del YP. Resistencia a la compresión según IRAM 1608:73. ....	76
---	----

Tabla 7.2. Mezclas de yeso estudiadas.....	78
--	----

Tabla 7.3. Determinaciones físico-químicas sobre las mezclas (Norma IRAM 1608:73) .....	79
---	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 7.4. Ensayos físicos sobre probetas. ....	81
Tabla 7.5. Requisitos químicos. Mezclas con YS.....	86
Tabla 7.6. Requisitos químicos. Mezclas con YH.....	86
Tabla 7.7. Requisitos de finura. Material pasante (%). ....	87
Tabla 7.8. Tiempos de fraguado (minutos). ....	88
Tabla 7.9. Comparación de las densidades aparentes de diferentes yesos de construcción, según diferentes autores (g/cm <sup>3</sup> )..	94
Tabla 7.10. Resistencia a la compresión simple de yesos nacionales. Comparación con ensayos propios. ....	97
Tabla 7.11. Requisito de resistencia a la compresión según diferentes normas extranjeras. ....	99
Tabla 7.12. Módulo de elasticidad. ....	103
Tabla 7.13. Relación tracción por compresión diametral/compresión simple. ....	104

# Lista de abreviaturas

---

A $\alpha$	anhidrita alfa.
A $\beta$	Anhidrita II beta.
A.A.	Autoridad de Aplicación.
a/y	Relación agua/yeso.
AI	Anhidrita I.
AII	Anhidrita II
AII-E	Anhidrita parcialmente disociada (yeso de pavimentos).
AII-s	Anhidrita ligeramente soluble.
AII-u	Anhidrita totalmente insoluble.
AIII	Anhidrita III
AIII $\alpha$	Anhidrita III alfa.
AIII $\beta$	Anhidrita III beta.
AIII' $\beta$	Anhidrita III prima beta.
Art.	Artículo de una ley o normativa.
ATEDY	Asociación Técnica y Empresarial del Yeso de España.
B.O.	Boletín Oficial.
BGS	British Geological Survey.
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico.
CEN	European Committee for Standardization.
C.M.R.	Concejo Municipal de Rafaela
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil)
DGS	Desulphurisation Gypsum.
DH	Dihidrato
EC	European Commission (Comisión Europea).
EN	European Standard (Norma Europea)
ENGIRSU	Estrategia Nacional para la Gestión integral de Residuos Sólidos Urbanos.
EPS	Poliestireno expandido.

LISTA DE ABREVIATURAS

et al.	(lat. <i>et alii</i> ) y otros.
EVA	Etilvinilacetato.
FeG	Iron Gypsum (yeso sintético, derivado de la producción de pigmentos de óxido de titanio).
FGD	Flue Gas Desulphurisation (Desulfuración de gases de combustión).
GRI	Gypsum Recycling International.
H.C.M.	Honorable Concejo Municipal (Rosario)
H.C.N.	Honorable Congreso de la Nación.
HH	Hemihidrato
H.L.	Honorable Legislatura (Provincia de Santa Fe)
I+D	Investigación + Desarrollo.
inc.	Inciso que es parte del artículo de una ley o normativa.
INDEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
INN	Instituto Nacional de Normalización (Chile).
IPTS	Institute for Prospective Technological Studies.
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
JRC	Joint Research Center.
NSPE	Núcleos Socio-Productivos Estratégicos.
PG	Phosphogypsum (fosfoyeso).
PID	Proyecto de Investigación y Desarrollo.
PID MAUTNRA 1395	Código asignado por Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional al Proyecto de Investigación y Desarrollo vinculado a la presente tesis.
PROCQMA	Proyecto de Reciclado de Residuos para las Obras Civiles desde la Química, los Materiales y el Medio Ambiente.
PYL	Placa de yeso laminado.
RAE	Real Academia Española.
RC	Residuos de construcción.
RCD	Residuos de construcción y demolición.
RS	Rellenos sanitarios.
RSU	Residuos Sólidos Urbanos.
RSUDyC	Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios y Compatibles.
SAyDS	Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
SCTyP	Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado.

## LISTA DE ABREVIATURAS

SECyT	Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación.
SEGEMAR	Servicio Geológico Minero Argentino.
s.f.	Sin fecha.
SH	Semihidrato
SH $\alpha$	Semihidrato alfa.
SH $\beta$	Semihidrato beta.
SPP	Secretaria de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación.
UE	Unión Europea.
U.O.	Unidad observacional.
URE	Uso Racional de la Energía.
USGS	United States Geological Survey.
UTN	Universidad Tecnológica Nacional.
UTN FRRa	Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela.
UTN FRSF	Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.
WRAP	Waste & Resources Action Programme.
YH	Yeso aplicado en condiciones húmedas (referido a residuos recuperados).
YP	Yeso patrón o de referencia.
YS	Yeso aplicado en condiciones secas (referido a residuos recuperados).

LISTA DE ABREVIATURAS

## **PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

---

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El yeso es un noble material de construcción cuyo uso se remonta a tiempos muy antiguos, cuando durante la revolución neolítica se alcanzó el nivel tecnológico necesario para dominar el fuego a bajas temperaturas (Villanueva Domínguez, 2005). Se tienen registros de su empleo en el IX milenio a.C. en Anatolia, Turquía, y en el VI milenio a.C. en Jericó, Cisjordania. En España tuvo amplia difusión a partir de la conquista árabe (Villanueva, 2004; Asociación Técnica y Empresarial del Yeso [ATEDY], 2006); tras ello dicha nación influyó significativamente en el uso y en las diferentes aplicaciones que se dio al yeso en América Latina.

Su nobleza radica en un conjunto de propiedades y ventajas que lo destacan entre otros materiales: es fácilmente moldeable, liviano y estético; buen aislante térmico y acústico; adhiere excelentemente a materiales porosos y su fraguado es rápido, aunque regulable con aditivos; resiste al fuego, entre otras razones debido a su

porosidad y alto punto de fusión; el costo para su obtención es relativamente bajo (Gomá, 1979).

Se puede afirmar que el yeso es un material tradicional y nuevo a la vez, de uso milenario y muy actual en sus aplicaciones, por cuanto la investigación y las nuevas técnicas de fabricación van rejuveneciéndolo con el tiempo, al punto de que muchos de sus múltiples derivados se pueden entender como no tradicionales (ATEDY, 2006). Su versatilidad lo distingue, puesto que a partir del agregado de aditivos y/o adiciones pueden lograrse con él productos con disímiles características y de variadas aplicaciones, bien sea para ser utilizados en condiciones húmedas bajo forma de pastas o morteros (ejecución de revestimientos de paredes y cielorrasos), o en condiciones secas mediante prefabricados (placas laminadas, ladrillos, molduras).

La materia prima natural para su obtención es, básicamente, la roca sedimentaria de origen evaporítico denominada “piedra de yeso”. Esta es la génesis más común de las cuencas yesíferas en América Latina, desde México hasta Argentina (Ponce y Torres Duggam, 2005). La roca está compuesta, fundamentalmente, por sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) acompañado en mayor o menor grado de algunas impurezas, tales como arcillas, arenas, otras sales y, especialmente, anhidrita (Sanz Arauz, 2009).

La calcinación de la piedra de yeso a diferentes temperaturas lo transforma en diversas fases y estados alotrópicos. El yeso comercial en polvo utilizado en la construcción es un conglomerante bajo la forma de hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), el cual se obtiene deshidratando a temperaturas relativamente bajas (100-130 °C) al sulfato de calcio dihidratado (Gomá, 1979). Con el agregado de agua recupera las moléculas perdidas durante el proceso de calentamiento y se vuelve a transformar en dihidrato, más poroso y menos denso que el original (González Madariaga, 2005).

Otra fuente de generación de yeso, químicamente idéntico al yeso natural, es su obtención a partir de diversos procesos industriales, entre ellos por desulfuración de gases de combustión. Se lo conoce como yeso sintético o químico y, actualmente, se está transformando en un importante sustituto del yeso natural en la fabricación de paneles, la producción de cemento y aplicaciones agrícolas. Basta señalar que sólo en

Estados Unidos su aporte al suministro nacional de yeso pasó del 24% en 2002 al 54% en 2012 (Olson, 2003; Crangle, 2013).

La mayor parte de la producción mundial tiene por destino el campo de la construcción. Dentro de este ámbito, en los países sudamericanos se percibe el enorme crecimiento que ha tenido en los últimos años la aplicación del yeso en condiciones secas (placas laminadas, principalmente), tendiendo a desplazar a la tradicional, de aplicación artesanal, en revestimientos de muros y cielorrasos. Sin embargo, este hecho no es nuevo en el hemisferio norte: los tableros o placas de este material son el principal componente en la construcción de paredes y tabiques. Anualmente se producen en el mundo 80 millones de toneladas de placas de yeso, correspondiendo el 85% de ello a EEUU, Europa y Japón (Gypsum Recycling International [GRI], 2013).

## **1.2. EL HECHO OBSERVADO**

El crecimiento de la actividad de la construcción, acompañando la globalización de la economía, ha dado lugar a un gran aumento en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). El yeso forma parte del problema que acarrea la disposición final de los mismos, puesto que el descarte por sobrante, fraguado, caídas o rechazo de obras suele tener por destino final los Rellenos Sanitarios (RS) o vertederos. Anualmente 15 millones de toneladas (40.000 t/día) de productos que lo contienen se vuelcan en ellos (GRI, 2013; Ahmed, Ugai y Kamei, 2011a), de las cuales más de 4 millones corresponden a EEUU. Según Crangle (2013) sólo una pequeña cantidad es reciclada en ese país, básicamente con propósitos agrícolas y en la manufactura de nuevos paneles de yeso.

El vuelco de residuos de yeso en vertederos no controlados altera la alcalinidad del suelo y contamina el lecho freático (Farias Nascimento y Pimentel, 2010), lo cual tiene lugar cuando lixivian sulfatos al humedecerse (European Commission JRC IPTS, 2008). Asimismo, su disposición en RS debe evitar el contacto con materia orgánica y la exposición a la lluvia o altos niveles de humedad en ambiente anaeróbico, a fin de no generar la emisión de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), gas nocivo para la salud (Jang y Townsend, 2001; Montero et al., 2009; Godinho-Castro et al., 2012).

Las razones mencionadas, entre otras, han dado lugar a que muchos países, entre ellos los comprendidos en la Unión Europea (UE), comenzaran a dictar normas regulatorias en relación a los residuos en general y sus vertidos, estableciendo rigurosos requisitos a fin de impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos sobre el medioambiente (Unión Europea, 1999). En lo que a los residuos de yeso atañe, mediante la Decisión 2003/33/CE, la UE estableció que deben “eliminarse exclusivamente en vertederos de residuos no peligrosos, en compartimentos en los que se admitan residuos no biodegradables” (Unión Europea, 2003). Conforme lo destaca Fernández Casado (2013), esto ha tenido un enorme impacto en aquellos países donde se ha aplicado la legislación, habiendo disparado el costo de su disposición final.

Citando el caso del Reino Unido, el mencionado autor señala que de los más de 1.000 vertederos habilitados para el vertido del yeso en el año 2005, cuando la aplicación efectiva de dicha medida aún no era exigible, este número habría bajado a menos de 10 en el año 2010.

Hasta el mes de julio de 2005 la mayoría de las placas de yeso laminado eran clasificadas como “inertes, no peligrosos”, permitiéndose la disposición de sus residuos en RS conjuntamente con otros de igual catalogación. A partir de la Decisión mencionada, los residuos con alto contenido de sulfato fueron reclasificados como “no inertes, no peligrosos”, dando lugar a que los restos de placas de yeso, cuyo contenido de sulfato fuese superior de cierto nivel, deban ser dispuestos en RS para residuos no peligrosos, pero en celdas especialmente construidas. Este cambio condujo a que la tasa de vertido de estos residuos (considerados activos) en los primeros años de su implementación superaran en más de diez veces a la de los residuos inertes (Alcorn y Welch, 2007; Clamp, 2008).

La Directiva marco sobre residuos 2008/98/CE de la UE ha puesto nuevamente a los países comunitarios frente a otro objetivo difícil, al disponer que para el año 2020 se deberá preparar para su reutilización, reciclaje o valorización, al menos el 70% del peso de los residuos no peligrosos de la construcción y demoliciones, entre los cuales queda comprendido el yeso (Unión Europea, 2008). En dicha dirección se alinean las leyes llamadas de “basura cero”, vinculadas al reaprovechamiento, reutilización o reciclado de residuos.

Nuestro país no tiene aún una legislación tan precisa o restrictiva como la aplicada en la UE, sin embargo se avanza paulatinamente en el mismo sentido. Ello es motivo de análisis en el Capítulo 3.

Es conocido el hecho de que el yeso es reciclable si no está adherido firmemente a otros materiales, encontrándose para el mismo muchos mercados usuales, otros emergentes y también potenciales de aplicación. En tal sentido, actualmente se cuenta con técnicas que permiten reciclar el 100% de los residuos procedentes de paneles laminados. Según GRI (2013) el polvo de yeso reciclado puede reemplazar hasta un 25% del yeso natural, o bien del sintético, en la producción de nuevos tableros. Es importante advertir que, en el primero de los casos, dicho reemplazo contribuye a la preservación del recurso minero, fundamentalmente en los países no productores de yeso químico.

En el estudio de la posibilidad de reutilizar el yeso residual, se destaca la ya mencionada recuperación de sus propiedades conglomerantes a través del secado a diferentes temperaturas. Éste ha sido, precisamente, el camino seguido en esta tesis y sobre el cual se profundiza más adelante.

### **1.3. PLANTEO DEL PROBLEMA**

Frente a lo expuesto, la pregunta que ha motivado la investigación llevada adelante en este trabajo es:

*¿De qué manera es posible reutilizar en el mercado de la construcción el yeso recuperado del descarte de construcciones y demoliciones de obras civiles?*

Si bien se pueden ofrecer diferentes alternativas de respuesta a ella, algunas de las cuales ya son de aplicación, en esta tesis se propone la inclusión de distintos porcentajes de yeso recuperado en el yeso hemihidratado de expendio comercial, para reinsertarlo en el mercado bajo su forma original de yeso en polvo.

### **1.4. HIPÓTESIS**

Los estudios desarrollados partieron de la siguiente hipótesis fundamental:

- El yeso recuperado de obras, adecuadamente tratado mediante limpieza de impurezas, trituración, molienda y calentamiento, puede ser adicionado en distintos porcentajes al yeso comercial para su reutilización en la construcción con iguales aplicaciones a las de origen.

### **1.5. OBJETIVOS DE LA TESIS**

Sustentándose en la hipótesis mencionada, la investigación ha tenido los siguientes objetivos:

a) General:

- Determinar las condiciones para las cuales el yeso recuperado de obras de construcción y/o demolición, podría ser reutilizado en construcciones civiles.

b) Específicos:

- Determinar el rango de temperaturas de secado que permiten recobrar las propiedades conglomerantes del yeso recuperado.
- Determinar el rango de porcentajes en que puede agregarse yeso recuperado al yeso comercial, sin que la pasta obtenida pierda las condiciones de aceptación exigidas por la norma argentina IRAM 1607:70.
- Determinar las relaciones óptimas de temperaturas de secado - porcentaje de yeso recuperado a adicionar al yeso comercial, recomendables para las diferentes aplicaciones de la pasta.

### **1.6. RESULTADOS QUE SE PRESENTAN**

En función de los objetivos citados, en este trabajo se presentan los resultados de estudios y ensayos de laboratorio realizados con residuos de yeso de obras aplicado en condiciones húmedas (revestimientos de paredes y cielorrasos) y secas (placas laminadas), tratados separadamente e incorporados en distintas proporciones al yeso comercial en polvo, evaluando el ajuste de las mezclas a determinados requisitos establecidos en la norma argentina IRAM 1607:70 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM], 1970). Ésta establece las características que deberán tener dos tipos de yesos para construcción, el llamado yeso cocido blanco o

tipo A, apto para enlucidos (revoques finos), y el yeso cocido gris o tipo B, para revestimientos de primera mano (revoques gruesos).

De manera complementaria, también se evaluó el encuadre de dichas mezclas a lo requerido por la norma chilena NCh 143.Of.1999 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 1999a), la cual establece las condiciones que debe cumplir el yeso calcinado en dicho país.

### **1.7. ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se encuentran muy pocos aportes en la literatura, tanto nacional como extranjera, vinculados al aprovechamiento del yeso de desecho de obras civiles dentro del enfoque llevado a cabo en esta investigación, consistente en su reutilización como yeso en polvo en el mismo rubro a partir de la inclusión en distintos porcentajes al yeso comercial, bien sea de aquellos desechos que provienen de las aplicaciones por vía húmeda como por vía seca.

Ribeiro (2006) estudió en el marco de su tesis de maestría realizada en la Universidad Federal de Paraíba, Brasil, las posibilidades de recuperación de yeso a partir de residuos de cuatro de sus usos en la construcción civil: revestimientos de mamposterías (aplicaciones vía húmeda), placas laminadas, molduras ornamentales y moldes de piezas cerámicas de uso sanitario. Dicho trabajo tuvo entre sus objetivos el comparar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del yeso reciclado con lo requerido por las normas brasileras NBR 12.127, NBR 12.128 y NBR 12.129, atendiendo al propósito general de proveer un aporte a los requerimientos de la Resolución n° 307/02 del Consejo Nacional del Medioambiente de dicho país (Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA] 2002), la cual catalogaba por entonces al yeso como residuo Clase C (residuos para los cuales aún no se habían desarrollado tecnologías o aplicaciones técnicamente viables que permitiesen su reciclaje o recuperación)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Investigaciones como la señalada, entre otros aportes, permitieron que a partir del año 2011 el yeso quedara catalogado como residuo Clase B, categoría que comprende al conjunto de “residuos reciclables para otros destinos, tales como: plásticos, papel, cartón, metales, vidrios, maderas y yeso” (CONAMA, 2011).

Este autor destaca el novedoso aporte de su trabajo, por cuanto no le fue posible encontrar en la bibliografía especializada material similar, tal que le permitiese establecer comparaciones con lo hallado por otros investigadores.

En nuestro país, los estudios vinculados al aprovechamiento de los RCD tuvieron fuerte impulso en el ámbito de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) cuando, en el año 2004, desde Rectorado se implementó el Proyecto Integrador PROCQMA (Proyecto de Reciclado de Residuos para las Obras Civiles desde la Química, los Materiales y el Medio Ambiente). A partir del año 2007, y siempre dentro de dicho marco, se le encomendó a la Facultad Regional Rafaela (UTN FRRa) realizar estudios y producir un informe sobre recuperación del yeso de las construcciones civiles (Boglione et al., 2007). Paralelamente, en los Laboratorios de Ingeniería Civil y Química se comenzó a investigar sobre el comportamiento de mezclas compuestas por yeso comercial en polvo con el agregado de un 10% y un 15% en peso de yeso de desecho fraguado de obras, en las que había sido aplicado en condiciones húmedas (revestimiento de paredes y cielorrasos). El residuo fue secado previamente a las temperaturas de 110 y 130 °C a fin de recuperar sus propiedades conglomerantes. Estos estudios iniciales permitieron comprobar que (Begliardo et al., 2007):

a) La incorporación al yeso comercial de residuos de yeso recuperados de aplicaciones en condiciones húmedas, previamente sometidos a un proceso de limpieza, trituración, molienda y secado a temperaturas de 110 y 130 °C, en porcentajes variables del 10 y 15% en peso, permitía obtener mezclas que conservaban sus propiedades conglomerantes.

b) La presencia de contaminantes adquiridos en la obra (impurezas tales como papel, tierra, etc), disminuía la capacidad de recuperación de dichas propiedades.

c) El contenido de moléculas de hidratación dependía de la temperatura de secado del residuo de yeso.

d) Las pruebas de estiramiento practicadas evidenciaron una firme adhesión de las mezclas al sustrato, lo cual las tornarían aptas para su utilización como enlucido de base en paredes y cielorrasos, o como componentes en la elaboración de nuevos productos (pastinas).

Los trabajos de Marcoux y Beshay (1999), aplicando un proceso similar al implementado en UTN FRRa, realizaron un interesante aporte en la reutilización del yeso aplicado en condiciones secas (paneles de yeso) con destino a usos industriales, domésticos e incluso en la construcción, a partir de su mezcla con agentes adhesivos para uso en revestimientos. Sus resultados, que dieron lugar a la Patente de Invención U.S. 5980627, configuraron un antecedente y motivación importantes para decidir la ampliación de los estudios iniciados en nuestros laboratorios, abarcando también esta franja de materiales.

En la Universidad Politécnica de Madrid, Rodríguez Orejón (2010) estudió el comportamiento de la inclusión de 3%, 4% y 5% de yeso laminado calcinado en una matriz de distintos tipos de yeso españoles, aproximándose en cierta medida a la propuesta de la presente tesis. Sin embargo, su alcance ha sido más limitado por cuanto los porcentajes adicionados son sustancialmente inferiores a los propuestos en esta investigación; tampoco se evaluó la respuesta para distintas temperaturas de calcinación, ni se abordó el estudio con yesos recuperados de aplicaciones en condiciones húmedas.

En consonancia con lo expresado por Ribeiro (2006) al analizar el estado actual del conocimiento, Rodríguez Orejón (2010, p.17) manifiesta que “de toda la documentación y bibliografía consultada no aparecen trabajos sobre la incorporación de residuos de placa de yeso laminado (PYL) en el proceso de fabricación de pastas con matriz de yeso”, ratificando con ello la carencia de literatura en concordancia con lo proyectado y desarrollado en la presente tesis.

No obstante ello, se encuentran numerosas y variadas aplicaciones del reciclado con otros fines y en otras industrias. En tal sentido, Guillén Viñas (2005) menciona su utilización en fabricación del cemento (regulador de fraguado), en la agricultura (aportador de calcio, regulador de pH en suelos), en la fabricación de papel, plásticos y pinturas (carga industrial), en la depuración de aguas y en la manipulación y transporte de agentes biológicos y residuos clínicos (barrera protectora), entre otros usos. Crangle (2013) señala la potencialidad de los mercados de absorción de grasas, tratamiento de aguas y secado de lodos.

Dentro del campo de la construcción se han demostrado sus bondades en la estabilización de adobe (Degirmenci, 2008) o en la de taludes y en el mejoramiento de suelos (Ahmed, Ugai y Kamei, 2011a, 2011b; Ahmed y Ugai, 2011). Otros han estudiado la generación de materiales compuestos, tal como la combinación corcho-yeso (Hernández-Olivares et al., 1999), o la de poliestireno expandido (EPS)-yeso para la fabricación de placas (González Madariaga, 2005). Si bien en este último caso el residuo reciclado no es el yeso sino el EPS, nada impide que también el yeso recuperado pueda sustituir al yeso nuevo en dichas placas.

Fernández Casado (2010) refiere a la construcción de una planta de reciclado de PYL por parte de Knauf GmbH España, para la recuperación y reutilización con el mismo fin de tres tipos de residuos de yeso originados en procesos dentro de la misma planta (productos no conforme húmedos, productos no conforme secos y polvo de yeso). Dentro de una línea similar, Marvin (2000) destaca las oportunidades de reciclado y reutilización de placas de yeso promovidas por el Estado de Vermont (EEUU).

Sobre estas y otras posibilidades de aplicación y ventajas del yeso recuperado, se amplía en el Capítulo 6.

### **1.8. LUGAR DE REALIZACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

El trabajo fue desarrollado durante los años 2011 y 2012 en el Área Laboratorios de la Facultad Regional Rafaela de la Universidad Tecnológica Nacional. Su núcleo esencial estuvo conformado por el Proyecto de Investigación y Desarrollo titulado “Reutilización de Residuos de Construcción con Yeso en la Construcción”, homologado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado (SCTyP), dependiente de Rectorado de la Universidad, bajo el Código PID MAUTNRA 1395.

La investigación ha consistido en una profundización de los estudios iniciados en la UTN FRRa en el año 2007, citados en la sección 1.7, relativos a las propiedades y posibilidades de empleo de mezclas de yeso comercial en polvo para construcción, con yeso recuperado de obras civiles.

### **1.9. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La redacción de la tesis se ha organizado en capítulos, del siguiente modo:

Tras la introducción desarrollada, en el Capítulo 2 se destaca la importancia que guarda el recupero y valorización del yeso en el marco de la estrategia nacional sobre ciencia, tecnología e innovación, y en la política de ciencia y tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional.

El Capítulo 3 aborda, desde un enfoque crítico, el análisis del marco jurídico de los RCD en Argentina, la Provincia de Santa Fe y la ciudad de Rafaela, poniendo énfasis en el yeso residual.

El Capítulo 4 presenta generalidades sobre la química del yeso, a fin de proveer una mejor comprensión del ciclo del sulfato de calcio y las fases dentro de las cuales se operó en esta tesis.

El Capítulo 5 suministra datos sobre la producción mundial y nacional de yeso, la generación de residuos del mismo y pronósticos para el futuro cercano.

El Capítulo 6 provee un panorama amplio sobre el campo actual, emergente y potencial de las aplicaciones del yeso, tanto nuevo como residual.

En el Capítulo 7 se presenta la investigación realizada, la metodología empleada, sus resultados y discusión de estos, finalizando con las conclusiones en el Capítulo 8.

Seguidamente, en el Anexo A se agrega un glosario de términos relacionados al contenido del presente escrito. En el Anexo B se describen los procedimientos para la realización de los ensayos físicos aplicados en esta tesis y, en el Anexo C, se mencionan las publicaciones vinculadas a los avances y finalización de la investigación que tuvieron lugar durante su desarrollo, para concluir con las referencias que dan sustento y coherencia a la misma.

## CAPÍTULO 1

# IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y NUEVOS MARCOS REGULATORIOS

---

## 2.1. LA IMPORTANCIA ESTRATÉGICA Y LOS NUEVOS MARCOS REGULATORIOS

La problemática presentada en la sección 1.2 pone en evidencia la preocupación que ha provocado a nivel global el aumento en la generación de los residuos de construcciones y demoliciones, y la importancia que reviste la reutilización, reciclaje y valorización de aquellos no peligrosos, entre los cuales el yeso queda comprendido.

En nuestro país, a los motivos expuestos se asocian otras razones que les dan aún mayor sustento y justificación a estudios como los que se presentan en esta tesis. Éstas se pueden agrupar en tres vertientes que se complementan: 1) aquellas fundadas en el enfoque estratégico nacional sobre ciencia, tecnología e innovación; 2) las basadas en criterios que orientan la política de ciencia y tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, recinto dentro del cual se ha desarrollado el trabajo, y 3) las sustentadas en los marcos regulatorios legales sobre cuestiones medioambientales.

### 2.1.1. Estrategia nacional sobre ciencia, tecnología e innovación

Las investigaciones iniciales con yeso recuperado realizadas en la UTN Facultad Regional Rafaela comenzaron en el año 2007. Entonces, se apoyaron en el documento denominado *Bases para un plan estratégico de mediano plazo en ciencia, tecnología e innovación 2005-2015*, y en el que le sucedió, *Plan estratégico nacional de ciencia, tecnología e innovación “Bicentenario” (2006-2010)* (Figura 2.1), ambos emitidos por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación (SECyT) en los años 2005 y 2006, respectivamente (SECyT, 2005; 2006).



**Figura 2.1.** Portadas de los documentos “Bases” y “Plan Bicentenario” de la SECyT de la Nación.

Las mencionadas “*Bases*” surgieron a partir de la necesidad, planteada en el año 2003, de elaborar un plan estratégico nacional de mediano y largo plazo en la materia. Este conjunto de estudios y propuestas preliminares, contemplaba la inclusión de investigaciones como la presente dentro de las áreas Medioambiente y Recursos Mineros, identificándolas como dos de sus dieciséis áreas temáticas prioritarias. Al expresar su objetivo estratégico, ponían de manifiesto la importancia dada a la “creación y aplicación de conocimiento para la explotación responsable de los recursos naturales, protegiendo el ambiente” (SECyT, 2005, p.164).

El apartado 7.3.4 (Recursos Mineros) indicaba:

“Los minerales y metales son recursos esenciales para mantener y mejorar la calidad de vida, el desarrollo económico y la equidad entre las generaciones actuales y futuras; su producción, uso, reutilización, reciclaje y disposición segura en el ambiente se integran en el concepto de desarrollo sustentable. (...). Por tales motivos, es indispensable que la ciencia y la tecnología apunten a maximizar los aportes sociales, económicos y ambientales que la actividad minera pueda hacer para un desarrollo sustentable durante todo el ciclo de vida de los minerales y metales”. (SECyT, 2005, p.172).

Tras dichas consideraciones, establecía entre sus líneas prioritarias el desarrollo de “nuevos productos vinculados con los minerales industriales y materiales de construcción, que ofrezcan distintas opciones comerciales para ampliar la oferta minera”. (SECyT, 2005, p.173).

El siguiente documento, también conocido como “*Plan Bicentenario*” y elaborado a partir de los lineamientos planteados en las “*Bases*”, reformuló algunos de sus propósitos teniendo en cuenta el nuevo horizonte temporal del año 2010, y seleccionó un conjunto de prioridades estratégicas agrupándolas en lo que dio en llamar Áreas Problema-Oportunidad y Áreas Temáticas. A su vez, dentro de cada una de ellas, estableció líneas prioritarias. Aquellas dentro de las cuales queda comprendido este trabajo se identifican en la Tabla 2.1.

Al referirse a la línea prioritaria “Contaminación urbana”, revela la pertinencia del tema abordado en esta investigación al expresar:

“Un problema muy serio en la Argentina es la gestión de los residuos sólidos. En última instancia, la sustentabilidad del ciclo económico tendrá que apoyarse en la reutilización y el reciclado de los residuos como insumos para las industrias o generación de nuevos productos. Las investigaciones con esa orientación, además de propender a soluciones que se adoptarían en el largo plazo, pueden ayudar a resolver algunos de los problemas de la gestión de los residuos en el corto y mediano plazo”. (SECyT, 2006, Anexo p.44).

Asimismo, en referencia al uso racional de la energía, área dentro de la cual se encuentra la línea “Eficiencia energética y ahorro en procesos productivos”, indica:

“La demanda de los sectores socioeconómicos es la que determina las necesidades en cantidad y calidad de la energía. Los sectores industrial, residencial, comercial y público se encuentran entre los más importantes consumidores de energía (...). Es enorme el potencial que la tecnología y las innovaciones productivas pueden aportar para reducir los consumos y el gasto en diferentes cadenas productivas aumentando la eficiencia de los sistemas de transformación (...).” (SECyT, 2006, Anexo, p.67).

**Tabla 2.1.** Prioridades estratégicas del Plan Bicentenario.

<b>Designación</b>	<b>Área de interés</b> (vínculo con la tesis)	<b>Líneas prioritarias</b>
<b>Áreas Problema-Oportunidad</b>	Conocimiento y Uso Sustentable de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente	Contaminación urbana.
	Infraestructura Energética. Uso Racional de la Energía (URE).	Eficiencia energética y ahorro en procesos productivos.
<b>Áreas Temáticas Prioritarias</b>		En estas Áreas Temáticas Prioritarias se apunta a fortalecer proyectos de I+D orientados hacia resultados concretos de alto impacto económico y social (p.16 del documento).
a) Con énfasis en aspectos sociales y ambientales.	Medio Ambiente y Remediación de la Contaminación Ambiental.	
	Recursos mineros.	
b) Con énfasis en aspectos productivos y tecnológicos.	Materiales.	

Finalmente, durante el desarrollo de la presente investigación, la Nación a través de la Secretaria de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, (SPP), emitió un tercer documento al que designó *Argentina Innovadora 2020: Plan nacional de ciencia, tecnología e innovación. Lineamientos estratégicos 2012-2015* (SPP, 2011), (Figura 2.2). El mismo, dentro de lo que da en llamar

“estrategia de focalización” para direccionar los esfuerzos hacia la producción de impactos significativos en sectores productivos de bienes y servicios, ha hecho del Sector Ambiente y Desarrollo Sustentable uno de los seis escogidos, destacando que “(...) El conocimiento científico y la adopción de tecnologías apropiadas son herramientas indispensables para preservar y asegurar una utilización racional de los abundantes recursos naturales con que cuenta Argentina.” (SPP, 2011, p.60).



**Figura 2.2.** Portada del documento “Argentina Innovadora 2020” de la SPP de la Nación.

Al abordar la identificación de los núcleos socio-productivos estratégicos (NSPE) para el sector mencionado, incluye al “Reciclado de distintas corrientes de residuos”, refiriéndose al mismo como a la “incorporación de nuevos desarrollos y procesos tecnológicos para el tratamiento y generación de nuevos usos de los residuos a fin de mitigar la problemática de las áreas de disposición final.” (SPP, 2011, p.64).

### **2.1.2. Política de ciencia y tecnología de la UTN**

La Universidad Tecnológica Nacional, en su Documento de Trabajo N° 7, establece los criterios que orientan su política de ciencia y Tecnología (Consejo Superior Universitario UTN [CSU], 1998). El aprovechamiento de los materiales residuales es una de las Áreas Prioritarias definidas para el Programa “Materiales”.

La tesis desarrollada se enmarca dentro del concepto de “investigación aplicada”, siendo consonante con los lineamientos dictados en el punto 21 del apartado IV (Prioridades) del citado documento, el cual señala:

“La Universidad Tecnológica Nacional atenderá prioritariamente a la investigación aplicada y al desarrollo tecnológico e innovación que le sea requerido por el Estado Nacional, las Provincias y Municipios y el sector productor de bienes y servicios permitiendo satisfacer el concepto ínsito a la ingeniería de utilizar en forma económica los materiales y fuerzas de la naturaleza en beneficio de la humanidad”. (CSU, 1998, p.17).

Asimismo, el punto 28 del mismo establece:

“Será admitido el desarrollo requerido o promovido desde el propio ámbito de la Universidad Tecnológica Nacional para incrementar su capacidad instalada para la enseñanza de la ingeniería y/o en campos y disciplinas de interés a efectos de incrementar su proyección e inserción en el sector productivo. En particular será promovido, según un esquema matricial, el que deban realizar los tesis de los posgrados que se pongan en marcha. En estos casos los desarrollos tendrán una finalidad pragmáticamente tangible, fácilmente comprensible para la comunidad universitaria y deberán ser socialmente aceptables, demostrando, con hechos, beneficios para la misma”. (CSU, 1998, p.19).

Lo expresado en esta sección, así como en la precedente, evidencian la relevancia que tanto la Nación como la Universidad otorgan a estudios de esta naturaleza.

### **2.1.3. Marcos regulatorios legales sobre cuestiones ambientales**

Hay otras razones que impelen a realizar estudios y profundizar investigaciones sobre la recuperación para el reciclado o reutilización de residuos que tienen por destino común su disposición final en vertederos, fundadas en la legislación cada vez más exigente de muchos países, entre ellos el nuestro, preocupados por su creciente aumento como consecuencia de actividades fundamentalmente antrópicas, los impactos medioambientales negativos de inadecuadas explotaciones de recursos

naturales y la necesidad de ahorros en consumos energéticos. Sobre ellas se ha hecho una breve mención en la sección 1.2 al referirse, básicamente, a normas de la Unión Europea. En este trabajo se ha destinado el Capítulo 3 para abordar el marco jurídico nacional sobre este aspecto, complementándolo con los correspondientes a la Provincia de Santa Fe y la ciudad de Rafaela.

## CAPÍTULO 2

# 3

## **ANÁLISIS DEL MARCO JURÍDICO EN RELACIÓN A LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS. EL CASO DE LOS RCD**

---

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se realiza un análisis crítico tanto de la legislación nacional, como de la correspondiente a la Provincia de Santa Fe y a la Municipalidad de Rafaela, destacándose la importancia que tales normativas le asignan a la valorización de los residuos, a su reinserción en el ciclo de la vida útil, minimizando su generación y disposición final, así como a la utilización racional de los recursos naturales.

En la legislación nacional se observa la ausencia de normas específicas que traten de manera concreta y expresa sobre la clasificación, gestión y vertido de los RCD. La provincia, en cambio, legisla con mayor claridad al respecto sin entrar en contravención con aquella.

### **3.2. LEGISLACIÓN NACIONAL**

### **3.2.1. Constitución de la Nación Argentina**

La Constitución Nacional (República Argentina, 1994), al hacer mención a los nuevos derechos y garantías, incorpora en el Artículo 41° los preceptos fundamentales del derecho ambiental, garantizando a todos los habitantes el derecho a un ambiente sano y equilibrado, en tanto establece que las autoridades proveerán “(...) a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica, y a la información y educación ambientales.”

Dicho artículo consagra con rango constitucional el principio de desarrollo sustentable. Su fuerza radica en que se proyecta sobre toda la Nación e ilumina las leyes de presupuestos mínimos, las especiales y provinciales que se dictaron a posteriori, o se habrán de dictar en la temática ambiental.

### **3.2.2. Ley N° 25.675 - Política Ambiental Nacional**

La Ley N° 25.675 (República Argentina, 2002a), conocida como “Ley General del Ambiente”, fue sancionada en noviembre de 2002 y promulgada parcialmente el mismo año. Esta norma establece los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable. Debido a su carácter de orden público es de aplicación obligatoria en todo el territorio de la Nación (Art.3°), siendo deber de las Provincias y Municipios velar y accionar en procura de su efectiva implementación dentro de sus respectivas jurisdicciones.

El Artículo 2° determina cuáles son los objetivos de la política nacional ambiental, promueve el uso racional y sustentable de los recursos naturales, así como los cambios en los valores y conductas de la sociedad que hagan posible la sustentabilidad ecológica, económica y social del desarrollo. En esa línea pone énfasis en la educación ambiental, aspecto clave para poder entender, aceptar y promover la valorización de residuos.

Del Artículo 4° se destacan los siguientes principios de la política ambiental que guardan relación con dicha valorización:

- Principio precautorio: establece que ante el peligro de daño grave e irreversible, la ausencia de información o certeza científica no es razón para postergar la adopción de medidas eficaces que impidan o detengan la degradación;
- Principio de equidad intergeneracional: obliga a las autoridades responsables de la protección ambiental a “(...) velar por el uso y goce apropiado del ambiente por parte de las generaciones presentes y futuras”;
- Principio de responsabilidad: responsabiliza al generador de efectos degradantes del ambiente, haciéndole cargo de los costos de las acciones preventivas y correctivas de recomposición;
- Principio de sustentabilidad: destaca que, tanto el desarrollo económico y social como el aprovechamiento de los recursos naturales, “deberán realizarse a través de una gestión apropiada del ambiente, de manera tal que no comprometa las posibilidades de las generaciones presentes y futuras.”

Queda claro, a partir de lo expuesto, que la preservación y uso racional de los recursos naturales merecen especial atención. Ello debe ser apoyado con políticas educativas adecuadas que instruyan a la sociedad sobre su importancia, así como la de su valorización, a partir de la explotación y el uso sustentable. En tal sentido, conforme al principio de equidad intergeneracional, la ley hace particularmente responsables de ello a las autoridades pertinentes.

### **3.2.3. Ley N° 25.612 - Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicio**

La Ley N° 25.612 (República Argentina, 2002b), sancionada y promulgada parcialmente en el mes de julio del año 2002<sup>1</sup>, y aún no reglamentada, establece los presupuestos mínimos de protección ambiental sobre la gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicio. Al inicio, la norma define:

“Art.2°. Se entiende por residuo industrial a cualquier elemento, sustancia u objeto en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, obtenido como resultado de un proceso industrial, por la realización de

---

<sup>1</sup> Por Decreto N° 1.343/2002, el Poder Ejecutivo vetó los artículos 51° al 54°, sobre la responsabilidad penal y el primer párrafo del artículo 60°, que dejaba sin efecto la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos.

una actividad de servicio, o por estar relacionado directa o indirectamente con la actividad, incluyendo eventuales emergencias o accidentes, del cual su poseedor productor o generador no pueda utilizarlo, se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo.”

De acuerdo a ello, los desechos o determinado tipo de residuos generados en la industria de la construcción, o en sus actividades complementarias de servicio, quedarían alcanzados por la ley, deberían ser considerados residuos industriales y gestionados como tales. La elaboración de hormigones en planta, por ejemplo, y el transporte de estos o sus residuos, quedarían incluidos.

Si bien la norma no menciona expresamente a los RCD, Mercante et al. (2009) citan un borrador de su decreto reglamentario que los incluye, titulado “Residuos de la construcción y demolición, incluyendo carreteras: hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, maderas, vidrios, plástico, metales, hierro, acero, cables”.

Sin embargo se está ante una ley muy cuestionada por distintos especialistas en la materia dado que, a partir de lo que establece en el Artículo 3º, convierte en “peligroso” a todo residuo proveniente de procesos industriales o actividad de servicio complementaria:

“Art. 3º - Se entiende por gestión integral de residuos industriales y de actividades de servicio al conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí, que comprenden las etapas de generación, manejo, almacenamiento, transporte, tratamiento o disposición final de los mismos, y que reducen o eliminan los niveles de riesgo en cuanto a su peligrosidad, toxicidad o nocividad, según lo establezca la reglamentación, para garantizar la preservación ambiental y la calidad de vida de la población.”

Conforme al mismo, al hacer mención a la “reducción” o “eliminación” presupone peligrosidad. Esta ley ha sido tildada de defectuosa, ambigua y de “un ejemplo acabado de lo que NO deber ser una ley ambiental” (Bec y Franco, 2002). Según ella, un residuo industrial generado en una actividad industrial, o de servicio complementaria a ésta, que bajo el marco normativo de la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos (República Argentina,1992) era considerado “no peligroso”,

debe recibir un tratamiento similar al que da esta última norma a los “residuos peligrosos” (Marcos, 2002).

Sin embargo, y al margen de su inseguridad jurídica, redundancia y falta de autosuficiencia, es de aplicación efectiva al haber sido sancionada, por lo que debe tenerse por referente o complementaria en la gestión integral de los residuos de construcción derivados de procesos industriales o actividades de servicios, desde su generación hasta el tratamiento o disposición final, pasando por los estadios intermedios de manejo, almacenamiento y transporte.

#### **3.2.4. Ley N° 25.916 - Gestión Integral de Residuos Domiciliarios**

La Ley N° 25916 (República Argentina, 2004), sancionada en agosto de 2004 y promulgada parcialmente en setiembre del mismo año, establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de residuos domiciliarios. Por su carácter de ley de presupuestos mínimos, también obliga a las Provincias.

El Artículo 1°, precisa el origen que pueden tener los residuos para ser considerados domiciliarios, incluyendo en ello a los de “(...) origen residencial, urbano, comercial, asistencial, sanitario, industrial o institucional, con excepción de aquellos que se encuentren regulados por normas específicas”. En tanto, los define en el Artículo 2° al denominar “(...) residuo domiciliario a aquellos elementos, objetos o sustancias que como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados.”

En tal sentido, el documento titulado *Estrategia nacional para la gestión integral de residuos sólidos urbanos*, *ENGIRSU* (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación [SAyDS], 2005, p.112), aclara:

“La norma utiliza el término *residuo domiciliario* en consonancia con la amplia gama de residuos integrados en el concepto residuos sólidos urbanos, ya que comprende residuos de origen no sólo residencial, que es lo que *prima facie* se puede interpretar por “domiciliario”, sino también a los provenientes del aseo urbano y los de demás orígenes asimilables a aquellos (o sea, los que pueden ser gestionados en forma conjunta).”

A partir de lo expresado, la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) es alcanzada por esta ley. Si bien aún no existe una normativa nacional que aborde el tratamiento de los RCD de modo específico, los desechos de esta naturaleza originados en el ámbito urbano, o buena parte de los mismos, en la medida de que puedan ser gestionados como domiciliarios, quedan implícitamente comprendidos.

Por la razón señalada, y sustentados en sus propias legislaciones provinciales, algunos municipios dictaron ordenanzas que los incluyen dentro de la gestión de RSU, dándoles por lo tanto el carácter de domiciliarios o asimilables a estos.

Asimismo, en el Artículo 3°, inciso f), la ley define los conceptos de “tratamiento”, “acondicionamiento” y “valorización” dentro de la gestión integral:

“*Tratamiento*: comprende el conjunto de operaciones tendientes al acondicionamiento y valorización de los residuos.

Se entiende por *acondicionamiento* a las operaciones realizadas a fin de adecuar los residuos para su valorización o disposición final.

Se entiende por *valorización* a todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, mediante el reciclaje en sus formas física, química, mecánica o biológica, y la reutilización.”

Al establecer sus objetivos en el Artículo 4°, promueve tanto la valorización como la búsqueda de minimización de los residuos, a partir del manejo adecuado y racional cristalizado en una gestión integral protectora del ambiente y la calidad de vida.

En consecuencia, para la implementación efectiva y eficiente de esta ley, un instrumento necesario debe ser aplicar la recolección diferenciada de los residuos para facilitar su tratamiento y valorización posterior.

### **3.3. LEGISLACIÓN DE LA PROVINCIA DE SANTA FE**

#### **3.3.1. Ley N° 11.717- Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable**

La Ley N°11.717 (Provincia de Santa Fe, 1999) establece el régimen de preservación, conservación y mejora del medioambiente. En lo que guarda relación con la valorización de residuos a partir de un desarrollo sustentable, enuncia en el

Artículo 2° que la preservación, conservación, mejoramiento y recuperación del medio ambiente comprende, en carácter no taxativo: la utilización racional de los recursos naturales; los incentivos para el desarrollo de las investigaciones científicas y tecnológicas orientadas al uso racional de tales recursos y a la protección ambiental; la educación ambiental y la promoción de modalidades de consumo y de producción sustentable, entre otros aspectos.

La normativa, que es anterior a la Ley Nacional General del Ambiente N° 25.675 y no se contrapone a ella, vuelve a destacar la importancia del desarrollo sustentable basado en políticas concretas que incluyan los aspectos enunciados. Merece destacarse, por su vínculo con este trabajo, la promoción de las investigaciones dirigidas al uso racional de los recursos naturales, dentro de las cuales se encuadran las aplicadas al aprovechamiento de los RCD.

### **3.3.2. Resolución N° 128**

La Resolución N° 128 de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Santa Fe (Provincia de Santa Fe, 2004) define el marco legal, formula precisiones y alcances, y establece normas técnicas sobre el tratamiento y disposición final de los RSU. En sus “considerandos” menciona sustentarse en la Ley Nacional N° 25.916 de presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de residuos domiciliarios, en tanto que en el Artículo 2°, inciso c), establece que la recuperación de materiales en la gestión de tales residuos debe realizarse “mediante selección manual o mecánica, con disposición final en relleno sanitario de los materiales no recuperados”.

El Artículo 23° precisa qué se entiende por “valorización”, definiéndola como “todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos”. Asimismo, establece que dentro de los RSU quedan comprendidos “los residuos sólidos domiciliarios, residuos sólidos inertes o áridos y residuos asimilables a urbanos”.

Para la Resolución N° 128/2004 los residuos sólidos “inertes” o “áridos” son aquellos que no experimentan transformaciones químicas, físicas o biológicas significativas, ni afectan negativamente a otros materiales con los que entren en contacto, en tanto que denomina residuos “asimilables” a urbanos a aquellos que

carecen de las características de peligrosidad, inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad, patogenicidad, lixivilidad, teratogenicidad, mutagenicidad, carcinogenicidad y radioactividad, todo lo cual debe ser constatado tras la realización de los debidos test de validación.

Llegado a este punto cabe preguntarse dónde quedan incluidos los residuos de yeso. Por tratarse de un material que experimenta transformaciones químicas y físicas, debe entenderse como no inerte. Además, por lixiviar sulfatos en contacto con agua, tampoco se lo debería incluir como asimilable a urbano. Sin embargo, debidamente resguardado de esto último, así como de la exposición a altos niveles de humedad en ambiente anaeróbico, conforme se indicara en la sección 1.2, carece de peligrosidad. Es por ello que se lo debería catalogar como “reactivo, no especial”, como lo propone Mercante (2005) o, expresado de otra manera, como “no inerte, no peligroso”, según lo hace actualmente la UE en su Decisión 2003/33/CE (Unión Europea, 2003).

Surge de lo anterior que los residuos de yeso debidamente resguardados de las condiciones que los pueden tornar peligrosos (emisión de H<sub>2</sub>S o lixiviación), quedarían incluidos en lo que la Resolución llama “residuos asimilables a urbanos”. En consecuencia, la recuperación de este material bajo la propuesta de la presente tesis es plenamente consonante con el Artículo 2° de esta normativa, al proponer la recuperación de materiales como una de las alternativas de tratamiento de los RSU.

### **3.3.3. Ley N° 13.055 - Residuos Sólidos Urbanos. Basura Cero**

La Ley Provincial N° 13.055 (Provincia de Santa Fe, 2009) ratifica y reproduce las normas de diseño y disposiciones complementarias de los rellenos sanitarios consignados en la Resolución N° 128/2004, además de establecer definiciones, especificar quién será la Autoridad de Aplicación (A.A.) y crear el Programa de Reducción de la Producción de RSU, sustentándose en el concepto de “basura cero” como principio fundamental para la gestión de estos en su territorio.

En el Artículo 2° define a "basura cero", como al

“(...) principio de reducción progresiva de la disposición final de los residuos sólidos urbanos, con plazos y metas concretas, por medio de la

adopción de un conjunto de medidas orientadas a la reducción en la generación de residuos, la separación selectiva, la recuperación y el reciclado.”

Dentro del programa de reducción progresiva de la disposición de residuos en RS, establece que “la prohibición de la disposición final en relleno sanitario de materiales tanto reciclables como aprovechables debe cumplirse para el año 2030” (Art.3°). Dicho año marca un hito, representando un significativo avance en materia de legislación ambiental dentro de las provincias argentinas.

La ley explicita sus objetivos generales y específicos en el Artículo 7°, observándose claramente en todos sus incisos la importancia que la normativa asigna al aprovechamiento de los residuos, al consumo responsable y al emprendimiento de acciones de concientización en los habitantes, en procura del cumplimiento de tales objetivos. Además, incluye entre ellos la protección y racionalización del uso de los recursos naturales, promueve de modo particular “a la industria y al mercado de insumos obtenidos con el reciclado”, y fomenta “(...) el uso de objetos o productos en cuya fabricación se utilice material reciclado o que permita la reutilización o reciclado posterior”, todo lo cual guarda directa relación con la investigación llevada adelante en esta tesis.

Se le asigna a la A.A. la responsabilidad en la elaboración de un programa de educación y concientización, el cual habrá de promover la reducción de la generación de basura, la utilización de productos más duraderos o reutilizables y la “(...) reutilización y el reciclaje de productos susceptibles de serlo.” (Art.11°).

La ley, en el Artículo 14°, transfiere a las Municipalidades y Comunas de la Provincia la responsabilidad de llevar a cabo sus mandatos dentro de sus respectivas jurisdicciones, implementando las medidas necesarias para su cumplimiento.

Es obvio que los dictados tan trascendentes que surgen de esta norma, para poder concretarse en sus objetivos y tiempos establecidos, no podrán realizarse si las acciones no se sujetan a un programa de reducción de la producción de RSU. El Capítulo V (Generación y Disposición Final) trata sobre ello. En lo atinente a la valorización de residuos, establece que la A.A. conformará un Programa que promoverá y asistirá técnicamente la adopción de estrategias y técnicas de

producción y distribución orientadas a “incorporar materiales reciclados en los procesos de producción.” (Art.19°, inc. f).

Asimismo, al referirse al aprovechamiento de residuos, promueve la “recuperación, mediante la reobtención, en su forma original, de materiales incluidos en los residuos para volverlos a utilizar” (Art. 32°, inc. c), lo cual sintoniza con lo realizado en este trabajo.

### **3.4. LEGISLACIÓN MUNICIPAL**

Ante la ambigüedad e incertidumbre que plantea la legislación nacional en relación a los RCD al no hacer mención expresa de ellos, como ya se hizo mención en 3.2.4., algunos municipios han tomado partida en el tema incorporándolos dentro de los RSU. Tal es el caso de la Municipalidad de la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe, quien en el Art.1° de la Ordenanza N° 7.600 define a los RSUDyC (Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios y Compatibles) como:

“(…) aquellos elementos, objetos o sustancias que, como subproducto de los procesos de consumo domiciliario y del desarrollo de las actividades humanas, son desechados, con un contenido líquido insuficiente como para fluir libremente y cuyo destino natural debería ser su adecuada disposición final, salvo que pudiera ser utilizado como insumo para otro proceso.” (Municipalidad de Rosario, 2003).

En el mismo artículo la Ordenanza incorpora dentro de estos últimos a los “restos de construcción, en volumen mayor a  $\frac{1}{4} \text{ m}^3$ ”, llamándolos “residuos inertes”. Asimismo, dentro de las definiciones de RSU incluye al de “residuos voluminosos”, nombre con que designa a “aquellos que por su tamaño y peso no podrán ser retirados con el resto de los residuos por el servicio de recolección convencional y requerirán la utilización de camiones y equipos especiales”, dentro de lo cual también quedan comprendidos los originados en la actividad constructiva urbana.

En tanto, la ciudad de Rafaela, de 100.000 habitantes y tercera de la provincia de Santa Fe en importancia, cuenta dentro del organigrama municipal con la Secretaría de Servicios y Espacios Públicos y Medio Ambiente como dependencia encargada de llevar adelante las acciones dispuestas en materia medioambiental, tanto las

derivadas de normativas provinciales destacadas en la sección anterior como de las propias Ordenanzas dictadas por el Municipio.

La Ordenanza N° 3.243 (Municipalidad de Rafaela, 1999) regula la disposición de los residuos sólidos y semisólidos en el Relleno Sanitario local, en tanto que el Decreto N° 21.270 (Municipalidad de Rafaela, 2003a) reglamenta las condiciones de recepción y disposición, así como la prohibición del ingreso de determinados tipos de productos, sustancias y compuestos que impliquen peligrosidad en el marco de la Ley Nacional 24.051 y su Decreto reglamentario N° 831.

Mediante Ordenanza N° 3.618 (Municipalidad de Rafaela, 2003b), al hacer referencia a la Ley Provincial N° 11.717/1999 de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, deja claramente establecido en sus “considerandos” que “no corresponde (a la Municipalidad) mantener normas de rango inferior que se superpongan”. Asimismo, al destacar que “en la práctica la función del municipio es velar por el cumplimiento de la legislación Provincial, promoviendo la intervención de dicho ente en los casos que se detecten incumplimientos a la Ley Provincial” manifiesta claramente su adhesión a la misma.

El Artículo 3° de la Ordenanza citada es elocuente al expresar que el gobierno municipal debe llevar adelante “(...) acciones tendientes a promover e impulsar iniciativas públicas y privadas que estimulen la participación ciudadana en las cuestiones relacionadas al medio ambiente y la promoción de modalidades de consumo y producción ambientalmente sostenibles”. Es claro, a partir de lo citado, el apoyo que debe darse a investigaciones y desarrollos como la presente, vinculados a la valorización de residuos.

### **3.5. CONCLUSIONES**

Del análisis de la normativa legal vigente en Argentina, se tiene que tanto en la legislación nacional, como en la de la Provincia de Santa Fe y la del municipio de asentamiento de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, se destaca la promoción del aprovechamiento de los residuos en un marco que incluye minimizar su generación, la educación ambiental y el consumo responsable.

En relación a la legislación nacional se observa que no se ha dictado aún una normativa específica que legisle de manera concreta y expresa sobre la clasificación, gestión y vertido de los RCD.

Solamente un borrador reglamentario de la Ley Nacional N° 25.612/2002, sobre gestión integral de residuos industriales y actividades de servicio, cuestionada y tildada por especialistas por sus defectos y ambigüedades, hace mención de ellos (Mercante et al., 2009). La ley aún sigue sin reglamentar.

Por su parte, la Ley Nacional N° 25.916/2004 incluye implícitamente a los RCD dentro de los RSU, al quedar comprendidos dentro de los desechos que son consecuencia del desarrollo de actividades humanas en el ámbito de las urbes. Así también surgiría del citado documento “*ENGIRSU*” (SAyDS, 2005). Sin embargo, puesto que los RCD pueden ser generados tanto en órbitas urbanas o fuera de ellas, como consecuencia de procesos que pueden, o no, tener un origen de actividad industrial o complementaria a ésta, se advierten vacíos y sombras que provocan dudas acerca de cómo gestionarlos íntegramente, desde su origen hasta su tratamiento o disposición final. Es necesario en Argentina, por lo tanto, legislar claramente al respecto.

Dentro del plexo normativo provincial santafesino, la Ley N° 11.717/1999 de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable ha efectuado un aporte trascendente al consagrar los principios ambientales, teniendo en cuenta que aún no estaba vigente la Ley Nacional N° 25.675/2002. Del mismo modo, trasciende la Resolución N°128/2004 al definir las distintas clases de residuos comprendidos en los RSU y la Ley N° 13.055/2009 de Basura Cero, que establece que el año 2030 será la fecha límite para la disposición final de estos en rellenos sanitarios, y delega en los municipios y comunas la responsabilidad de la gestión integral de los RSU producidos en su jurisdicción, debiendo establecer las normas complementarias para el cumplimiento efectivo de la ley.

En cuanto al orden municipal, ciudades grandes, como Rosario, han avanzado en la elaboración de ordenanzas complementarias a las leyes provinciales y nacionales. En el caso de localidades menores, como Rafaela, la normativa se remite en la práctica a la legislación provincial.

# GENERALIDADES SOBRE QUÍMICA DEL YESO

---

## 4.1. INTRODUCCIÓN

Con la palabra “yeso” se designa tanto al mineral llamado “piedra” o “roca de yeso” como al conglomerante utilizado en la construcción, obtenido industrialmente a partir de aquél. En el presente capítulo se exponen generalidades sobre el comportamiento químico de este material distinguiendo su “ciclo geológico”, puesto de manifiesto en su estado natural, de su “ciclo tecnológico”, el cual se hace presente cuando la roca, tras su extracción, es sometida a calcinación y posterior rehidratación. El capítulo se complementa con un apartado dedicado al yeso de origen sintético.

## 4.2. EL YESO NATURAL

Recibe el nombre de “yeso natural” la roca de yeso. También se lo conoce como “yeso crudo”, “yeso mineral” o “aljez”. Su composición esencial es sulfato de calcio dihidratado y, si bien se lo puede encontrar con alto grado de pureza, suele estar

acompañado por otro sulfato de calcio, la piedra anhidrita (anhidrita natural), y de ciertas impurezas (arcillas, arena y otras sales).

#### **4.2.1. Fases del sulfato de calcio en la naturaleza (ciclo geológico)**

El sulfato de calcio de modo natural se presenta bajo tres fases, dos de ellas hidratadas (yeso y basanita) y una tercera anhidra (anhidrita). En el ciclo geológico del yeso estos minerales suelen relacionarse entre sí debido a transformaciones por compactación de los sedimentos (diagénesis), o por transformaciones y alteraciones originadas tras su exhumación (hipergénesis).

- **Fase yeso** ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):

Químicamente es sulfato de calcio hidratado con dos moléculas de agua (dihidrato). Es muy abundante y está ampliamente distribuido sobre la corteza terrestre, salvo en zonas volcánicas donde, al igual que la anhidrita natural, no se lo encuentra (Wirsching, 1996).

- **Fase basanita** ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ):

Corresponde al sulfato de calcio hidratado con media molécula de agua (hemihidrato). Se lo localiza raramente en la naturaleza, apareciendo habitualmente como alteración de otros minerales, de allí que su estructura, hábitos y demás propiedades se investigan sobre variedades sintéticas fabricadas en laboratorio (Sanz Arauz, 2009).

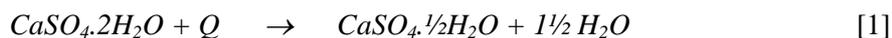
- **Fase anhidrita natural** ( $\text{CaSO}_4$ ):

Como lo manifiesta su nombre, corresponde al sulfato de calcio sin agua. Junto al sulfato de calcio dihidratado es uno de los principales minerales de depósitos evaporíticos.

#### **4.3. EL YESO CONGLOMERANTE**

El yeso conglomerante obtenido industrialmente es, químicamente, sulfato de calcio hemihidratado (basanita). Se llega al mismo por deshidratación térmica del dihidrato a una temperatura aproximada de 130 °C, conforme al esquema siguiente:

(130 °C)



Cualquier otra sustancia distinta que contenga supone una impureza. Gomá (1979, p.31) destaca que el yeso aglomerante<sup>1</sup> comercial contiene, además de hemihidrato, “cantidades notables de anhidritas y dihidrato, debiéndose ello a la poca diferencia que existe entre las temperaturas de deshidratación para la obtención de las distintas fases y a la dificultad de seleccionar técnicamente los estrechos intervalos de temperatura”. Esta falta de pureza conduce a que el dihidrato actúe como carga inactiva disminuyendo las resistencias; en cambio, las anhidritas presentes mejoran las cualidades técnicas del producto final.

Asimismo, dicho autor indica que la base para obtener yeso industrial aglomerante, a partir del yeso natural, es contar con canteras en las que el sulfato de calcio dihidratado tenga una pureza cercana al 90%, o no menor al 80% en el caso de contener anhidrita. Su obtención involucra una serie de estadios que forman parte del llamado “ciclo del yeso”, o “ciclo del sulfato de calcio”.

#### **4.3.1. El ciclo del sulfato de calcio (ciclo tecnológico)**

Se puede resumir en dos etapas: la primera está ligada a la deshidratación térmica de la roca de yeso por calcinación; la segunda es la hidratación de la basanita para que actúe como aglutinante (Rodríguez Navarro, 2012).

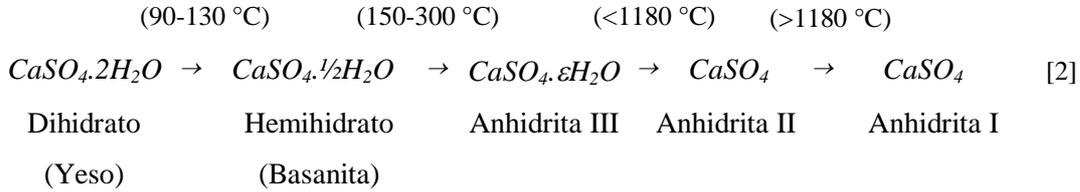
Este proceso de deshidratación-hidratación del yeso, en el que quedan implicados todos los procesos de transformación y cambios de fase del yeso industrial, es llamado de modo más preciso por Sanz Arauz (2009) “ciclo tecnológico” del yeso, para diferenciarlo del ciclo geológico visto en 4.2.1.

##### **4.3.1.1. La deshidratación del dihidrato (yeso)**

---

<sup>1</sup> En rigor, el yeso, al igual que la cal y el cemento, son materiales “conglomerantes”, es decir, capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto mediante procesos químicos. Los “aglomerantes”, en cambio, lo hacen por medios exclusivamente físicos (p.ej. el asfalto). Muchos autores utilizan ambos términos como sinónimos, como lo hace F. Gomá en este caso.

Las principales fases y estados alotrópicos de interés técnico durante este proceso responden al siguiente esquema de transformaciones del dihidrato, debidas a la pérdida del agua estructural al incrementarse la temperatura:



Este conjunto de cinco fases sólidas, productos o compuestos químicos obtenidos por la deshidratación térmica del yeso, y a sus polimorfos, se lo conoce también como “sistema sulfato cálcico-agua”. De ellos, sólo las cuatro primeras son de interés para la industria del yeso (Wirsching, 1996; Sanz Arauz, 2009). En las Tablas 4.1 y 4.2 se encuentran sus especificaciones y propiedades físicas, respectivamente.

Fue Le Chatelier quien en 1887, tras continuar las investigaciones iniciadas en 1765 por Lavoisier, puso por primera vez en conocimiento de la comunidad científica el mecanismo de hidratación del yeso. Sin embargo, la secuencia de transformación de cambio de fases es un proceso muy complejo y que puede suceder de múltiples maneras (Sanz Arauz, 2009). Aún hoy persiste la discusión, sin lograrse consenso, en relación a la naturaleza precisa del mecanismo de descomposición térmica de este material (Rodríguez Navarro, 2012).

▪ **Fase yeso o dihidrato (DH):**

Otra de sus denominaciones es “doble hidrato”. Este compuesto tiene dos moléculas de agua débilmente unidas al sulfato cálcico, perdiéndolas con calentamiento a baja temperatura. A partir de ello se van obteniendo gradualmente los restantes productos que integran el sistema señalado. Tras la rehidratación se vuelve a obtener como fase estable, lo cual se conoce como “yeso rehidratado”.

▪ **Fase hemihidrato (HH) o semihidrato (SH):**

Este producto químico, que recibe también el nombre de “basanita”, es sulfato de calcio hidratado con media molécula de agua, pudiendo presentarse bajo dos formas alotrópicas: “semihidrato alfa” (SH $\alpha$ ) y “semihidrato beta” (SH $\beta$ ).

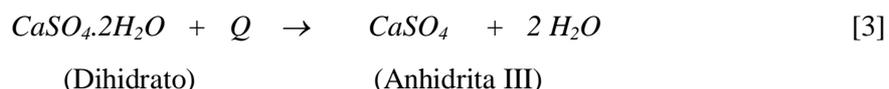
**Tabla 4.1.** Fases del sistema  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Especificaciones.  
(Fuente: Wirsching, 1996)

CARACTERÍSTICAS	SULFATO DE CALCIO DIHIDRATO	SULFATO DE CALCIO SEMIHIDRATO	ANHIDRITA III	ANHIDRITA II	ANHIDRITA I
<b>Fórmula</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaSO}_4$
<b>Masa molecular</b>	172,17	145,15	136,14	136,14	136,14
<b>Estabilidad termodinámica °C</b>	< 40	Metaestable *	Metaestable *	40-1180	> 1180
<b>Forma</b>	-----	2 formas: $\alpha$ y $\beta$	3 formas: III $\beta$ , III $\beta'$ y III $\alpha$	AII - s AII - u AII - E	-----
<b>Otros nombres</b>	Aljez, materia prima Yeso sintético Yeso subproducto Yeso químico Yeso fraguado Yeso endurecido.	Forma $\alpha$ Hemidrato de autoclave Hemidrato $\beta$ Escayola Yeso de París	Anhidrita soluble	Anhidrita natural Anhidrita sintética Anhidrita química Anhidrita subproducto Anhidrita calcinada	Anhidrita de alta temperatura
<b>Condiciones de síntesis, temperatura °C y condiciones atmosféricas</b>	< 40	Forma $\alpha$ > 45 a partir de soluciones acuosas. Forma $\beta$ , 45-200 en atmósfera seca.	A $\alpha$ y $\beta$ : 50 °C y vacío o 100 °C en aire. A $\beta'$ : 100 °C en atmósfera seca.	200-1180	> 1180
<b>Fabricación: Temperatura °C</b>	< 40	Forma $\alpha$ - 80-180 Forma $\beta$ - 120-180	A $\beta$ y Ad': 290 A $\alpha$ - 110	300-900 AII s < 500 AIII u: 500 -700 AIIIE > 700	No se fabrica comercialmente
* Metaestable en agua saturada con vapor de agua					

**Tabla 4.2.** Fases del sistema  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Propiedades físicas.  
(Fuente: Wirsching, 1996)

CARACTERÍSTICAS	SULFATO DE CALCIO DIHIDRATO	SULFATO DE CALCIO SEMIHIDRATO	ANHIDRITA III	ANHIDRITA II	ANHIDRITA I
Agua de cristalización	20,92	6,21	0,00	0,00	0,00
Densidad $\text{g/cm}^3$	2,31	2,757 2,619-2,637	2,580	2,93-2,97	—
Dureza, Mohs	1,5	0,67-0,88		0,27	—
Solubilidad en agua (20 °C), g/100 g disolución	0,21	0,67 - 0,88	Hidrata a semhidrato	(0,27)	--
Índices de refracción	$n_\alpha$	1,521	1,501	1,570	—
	$n_\beta$	1,523	1,501	1,576	—
	$n_\gamma$	1,530	1,584	1,614	—
Característ. ópticas	+	—	+	+	—
Orientación óptica	$n_\beta \mid b$ $n_\gamma \mid c = 52^\circ\text{C}$	$c \mid n_\gamma$	$c \mid n_\gamma$	$n \mid c$	—
Angulo axial 2V	58-60°	14°	$\approx 0^\circ$	42-44°	—
Red de simetría	Monoclínico	Rómbico	Hexagonal	Rómbico	Cúbico
Distancia red, $\text{\AA}$ a b c	1,047	0,683	0,699	0,696	—
	1,515	0,683	0,699	0,695	—
	0,628	1,270	0,634	0,621	—

Se obtiene SH $\alpha$  cuando la presión parcial de vapor de agua sobre el yeso que se deshidrata es igual o mayor a 1 atm, en tanto que cuando es menor a esa presión se forma anhidrita III (ec.[3]), muy inestable, por cuanto pasa inmediatamente a SH $\beta$  al entrar en contacto con la humedad del aire. Los comportamientos y morfología cristalina de ambos semihidratos son diferentes.



En ausencia de vapor de agua, o por arrastre de éste por corriente de gases en el tiro forzado de ciertos procesos industriales, se obtiene SH $\beta$ , producto más esponjoso y de menor densidad que el SH $\alpha$  (Tabla 4.2), siendo este último más resistente (Gomá, 1979).

▪ **Fase anhidrita III (AIII):**

Se la conoce también como “anhidrita gamma” (A $\gamma$ ) o “anhidrita soluble” (Sanz Aráuz, 2009).

Se manifiesta en la primera fase de la deshidratación total del yeso, dándose en atmósfera libre a temperaturas que van de los 150 a 300 °C (Gomá, 1979). Constituye un estadio intermedio entre el semihidrato y la anhidrita II. Contiene siempre una proporción muy baja y variable de agua, de difícil extracción, alojada en los canales de su estructura, de allí que Sanz Aráuz (2009) también la exprese como CaSO<sub>4</sub>· $\epsilon$ H<sub>2</sub>O, siendo  $\epsilon$  el factor indicativo de dicha fracción. Guillén Viñas (2005) asigna a éste valores dentro del entorno 0,06 <  $\epsilon$  < 0,11.

En presencia de vapor de agua, a muy bajas presiones, puede formarse directamente desde el dihidrato sin pasar por los semihidratos, como se indicó anteriormente. Se han descrito tres estados alotrópicos: la “Anhidrita III beta” (AIII $\beta$ ), “Anhidrita III prima beta” (AIII' $\beta$ ) y “Anhidrita III alfa” (AIII $\alpha$ ).

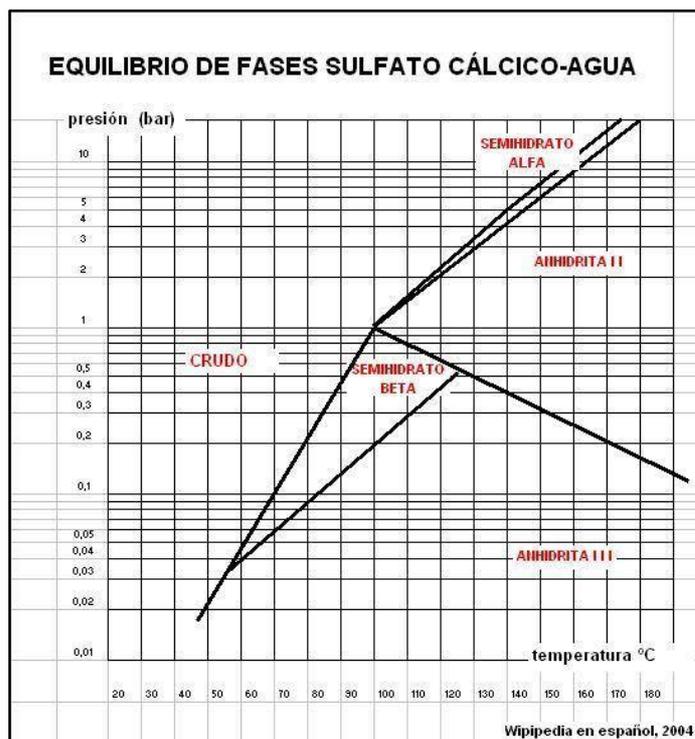
Dado su gran avidez de agua la AIII es inestable. Asimismo, desde el punto de vista industrial presenta poco interés (ATEDY, 2006).

▪ **Fase anhidrita II (AII):**

La anhidrita II es la fase anhidra que existe en la naturaleza. En condiciones atmosféricas normales, y entre 40 °C y 1.180 °C, es estable. También puede ser obtenida por la calcinación de un DH y de una AIII a altas temperaturas.

Otras designaciones de este compuesto son “anhidrita II beta” (Aβ) o “anhidrita insoluble”. Se trata de una fase totalmente anhidra de la cual se han descrito tres polimorfos: la “anhidrita ligeramente soluble” (AII-s), producida entre 300 y 500 °C; la “anhidrita totalmente insoluble” (AII-u), producida entre 500 y 700 °C y la “anhidrita parcialmente disociada” (AII-E)<sup>2</sup>, obtenida por encima de los 700 °C (Wirsching, 1996). Su capacidad de reacción con el agua es muy lenta por lo que, como producto, es prácticamente inerte (ATEDY, 2006).

La Figura 4.1 ilustra sobre el equilibrio de las fases descriptas.



**Figura 4.1.** Equilibrio de las fases DH-SH-AIII-AII (Fuente: Enciclopedia Libre Universal en Español, 2010)

<sup>2</sup> El polimorfo AII-E también es conocido como yeso “estrichgips” (del alemán: *yeso de pavimentos*), por estar vinculado a su aplicación como solado, desde tiempos muy antiguos.



La Figura 4.2, reproducida de Rodríguez Navarro (2012, p.93), muestra el ciclo tecnológico del yeso con imágenes obtenidas por microscopía de barrido de electrones. En ellas se aprecian las formas lenticulares del yeso previo a la calcinación, las variedades alotrópicas SH $\alpha$  y SH $\beta$  del hemihidrato, y la del yeso rehidratado.

#### 4.4. EL YESO SINTÉTICO

Hay diversas fuentes de procedencia de este tipo de yesos, pero de ellas dos subproductos industriales son los más abundantes y de uso más extendido: el “desulfoyeso” y el “fosfoyeso”.

##### 4.4.1. Desulfoyeso

Se lo obtiene de la desulfuración de gases de combustibles de origen orgánico (antracita, carbón bituminoso, aceites), especialmente de centrales eléctricas. Básicamente se lo hace mediante un proceso de lavado a contracorriente de dichos gases empleando suspensiones acuosas de piedra de cal o de óxido de calcio.

Este subproducto, que también es conocido como yeso FGD (*Flue Gas Desulphurisation*) o DGS (*Desulphurisation Gypsum*), es un polvo húmedo, fino, blanco y extremadamente puro, constituyéndose en excelente materia prima para la industria yesera. Su contenido de agua libre es inferior al 10% (Wirsching, 1996).

##### 4.4.2. Fosfoyeso

Procede, básicamente, de la industria del ácido fosfórico, por lo que su producción está muy ligada a la de los fertilizantes a base de fosfatos. Se compone principalmente de CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O y parcialmente de algunas impurezas, tales como fosfatos, fluoruros, sulfatos iónicos y materia orgánica (Zhou et al., 2012). Según Calvacanti Canut (2006, p.54) “es el más importante de los residuos de yeso debido a la gran cantidad generada mundialmente”, destacando que es, en proporciones, de 4 a 6 veces mayor que la propia de ácido fosfórico, constituyéndose en un importante pasivo ambiental a resolver por parte de las empresas de fertilizantes.

El fosfoyeso o PG (siglas en inglés de *phosphogypsum*) se obtiene mediante un tratamiento por vía húmeda de la fosforita o fluorapatita con ácido sulfúrico, dando

por resultado un polvo fino, húmedo y con una significativa cantidad de impurezas muy ligadas al origen de la roca y al proceso de fabricación. Su contenido de agua es del orden del 20 al 30%.

Además de las impurezas como factor limitante para una utilización más extensiva de este subproducto en la industria de yeso, se le deben sumar fluctuaciones en su calidad y el mayor nivel de radiactividad natural, dependiendo de la roca fosfórica (fosforita), especialmente en comparación con otras fuentes de yeso lo cual crea, además, una barrera psicológica para su uso (Eurogypsum, 2007).

Wirsching (1996) menciona que, como la purificación es onerosa y la relación costo/beneficio no resulta favorable, para la industria yesera sigue siendo preferido el yeso natural a esta alternativa. No obstante ello, Sanz Aráuz (2009) señala que las investigaciones para su aplicación se han orientado a neutralizar el efecto negativo de las impurezas, a partir del agregado de adiciones (cenizas volantes, cemento portland) con el objeto de lograr yesos resistentes al agua. Actualmente, algunos países asiáticos han avanzado en la utilización de este subproducto industrial en el campo de la construcción. Tal es el caso de Japón, donde el fosfoyeso pasa a competir económicamente con el yeso natural, por cuanto no cuenta con canteras del mineral (Cavalcanti Canut, 2006). India es otro de los países que viene realizando ingentes esfuerzos de investigación en el sentido de dar utilidad a la enorme cantidad de PG generada anualmente, de la cual sólo una pequeña fracción es aprovechada (Singh y Garg, 2000).

#### **4.4.3. Yesos procedentes de otros procesos industriales**

Además de los mencionados, hay otros procesos industriales en los que se sintetiza el yeso o la anhidrita. Son procesos de la industria química (mineralurgia) mediante los cuales se realiza el ataque de sales de calcio con ácido sulfúrico. Entre los subproductos obtenidos se encuentran la “fluoranhidrita” (a partir del ácido fluorhídrico); el “boroyeso” (procedente del ácido bórico); el “citroyeso” (derivado del ácido cítrico) y el “lactoyeso” (obtenido del ácido láctico).

Como bien lo señala Guillén Viñas (2005), todos estos subproductos plantean, sino un problema de contaminación, uno de gestión de residuos y de almacenamiento. La creciente producción de desulfoyeso y de fosfoyeso en particular, ha venido

demandando mucho tiempo y esfuerzo durante los últimos años para encontrar aplicaciones de utilización. Sobre esto se vuelve en el Capítulo 6 (Aplicaciones).

#### **4.5. LOS ADITIVOS**

Es habitual incorporar aditivos al yeso, como producto industrial, para que alcance un desempeño más eficaz en la construcción como material conglomerante. Los hay de diferentes tipos y para cumplir distintas funciones (retardadores, acelerantes, plastificantes, espesantes, aireantes y defloculantes). Los dos primeros son los más utilizados; su función es la de dilatar o acelerar el fraguado, respectivamente.

Dentro de los retardadores se encuentran las bases fuertes, y los ácidos orgánicos débiles (ácidos carboxílicos) y sus sales. Dentro del grupo de los acelerantes, los más comunes son los ácidos fuertes inorgánicos, las sales de ácidos fuertes y las bases débiles (cal). Sanz Aráuz (2009) señala al ácido cítrico como al más eficaz de los retardadores y al sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ) como al más eficaz de los acelerantes.

Los aditivos ejercen un efecto muy variado y afectan, principalmente, a la retracción y a la expansión de yeso. Gomá (1979) destaca el acuerdo de la mayoría de los autores en que, al igual que lo que ocurre con el aumento de la relación agua/yeso (a/y), cualquier aditivo reduce la resistencia y dureza final del material. En cambio, se perciben sensibles aumentos de resistencia cuando, mediante el empleo de retardadores y plastificantes, se ensaya a una misma “consistencia”, por el hecho de que permiten alcanzarla con una menor relación a/y. De lo expresado se infiere, claramente, que la relación a/y es un factor determinante en la resistencia mecánica que habrá de alcanzar el yeso endurecido.

## PRODUCCIÓN DE YESO GENERACIÓN DE RESIDUOS

---

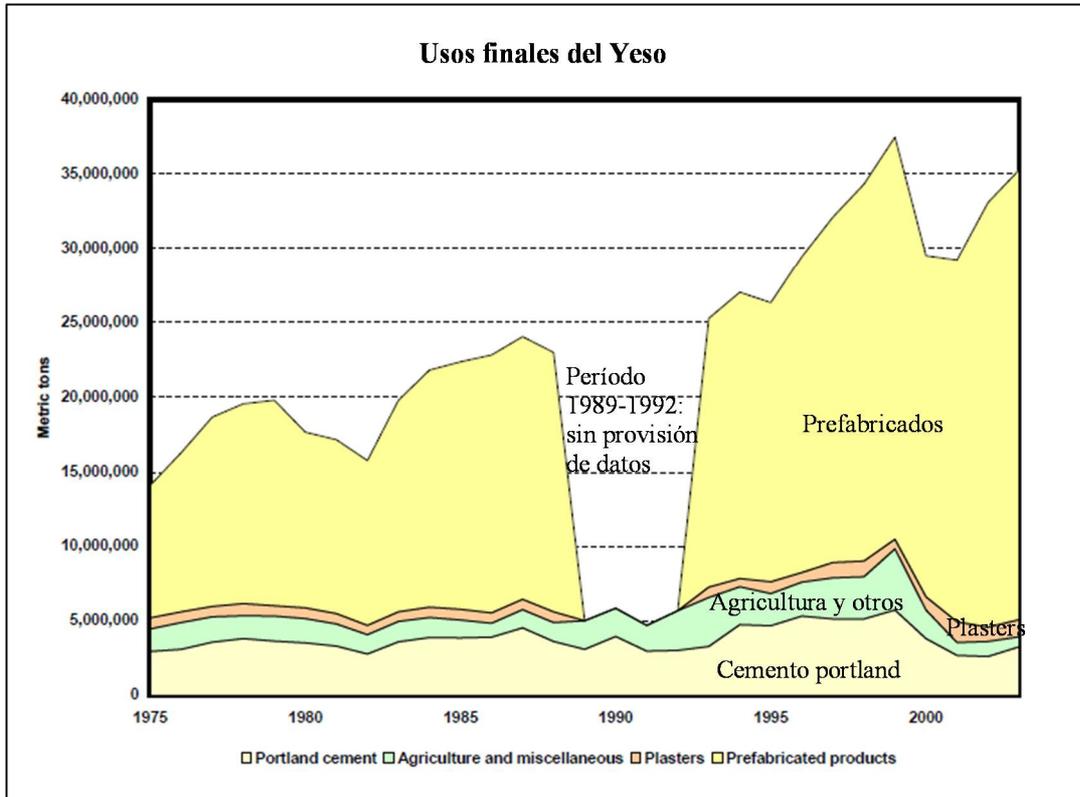
### 5.1. LAS FUENTES DE YESO COMO MATERIA PRIMA

Se ha mencionado en los Capítulos 1 y 4 que el yeso se puede obtener a partir de la explotación de canteras (yeso mineral), o bien puede tener su origen como subproducto en procesos de gestión de residuos industriales (yesos sintéticos).

La gran demanda de este material, cualquiera sea su origen, procede primordialmente de la industria de la construcción y la del cemento. En menor medida el yeso también es requerido en el ámbito de la agricultura destinándose, básicamente, a la remediación de suelos.

El grado de demanda para los diversos fines es variable según el país del cual se trate, estando muy vinculado a su nivel de desarrollo y actividades productivas. Como referencia de ello, la Figura 5.1 da una idea de la magnitud del uso del yeso en el ámbito de la construcción en los Estados Unidos, por sobre el resto de campos o

disciplinas en los que también se lo aplica. Los datos corresponden al período 1973-2003 (Matos y Founie, 2005).



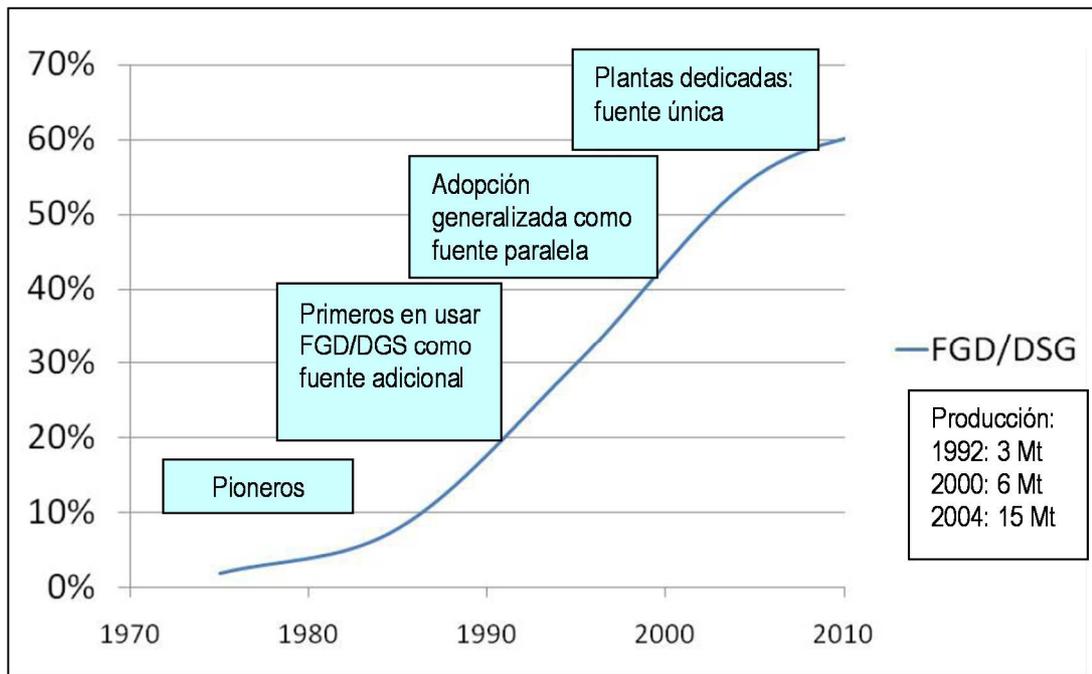
**Figura 5.1.** Aplicaciones dadas al yeso en los EE.UU, período 1975-2003. (Fuente: adaptada de Matos y Founie, 2005).

En dicho país el 90% del consumo interno del año 2012 (unos 20 Mt) se destinó a la fabricación de PYL (paneles, tableros o *wallboards*) y a la de yesos para la construcción (*plasters*); aproximadamente 1,5 Mt se destinaron a la producción de cemento y a aplicaciones agrícolas, en tanto que el resto se derivó a una amplia gama de procesos industriales, según lo cita Crangle (2013) en el informe anual para el United States Geological Survey (USGS).

El autor destaca que, en el campo de la construcción, un aspecto muy particular del yeso es el hecho de que con el mismo se pueden sustituir materiales tales como la cal o el cemento en la ejecución de revoques, o en el uso como mortero conglomerante. Asimismo, los tableros ejecutados con este material pueden reemplazar con ventajas a ladrillos, maderas, vidrios, metales o plásticos en la ejecución de tabiquerías o cerramientos. Sin embargo, si bien puede sustituir a otros en aplicaciones como las

indicadas, es un material que se torna irremplazable en la fabricación de cemento portland.

En los últimos años ha venido incrementándose de manera significativa la producción de yeso sintético, el cual va sustituyendo progresivamente al yeso natural en sus diversas aplicaciones. Según el USGS, en Estados Unidos el aporte de aquél al suministro de la demanda de yeso en el mercado interno ha pasado del 15% en el año 2001 al 54% en 2012 (Olson, 2002; Crangle, 2013). Esa tendencia de cambio, que en dicho país se inició prácticamente en la década de 1990 (Balazik, 1997), se presentó con cierta anticipación en Europa. En relación a ello, la Figura 5.2 ilustra cómo fue evolucionando este proceso desde mediados de la década de 1970 a partir de su implementación en la industria de fabricación de PYL en los países nórdicos, en primer término, para luego ir extendiéndose al resto del continente.



**Figura 5.2.** Evolución en la preferencia del uso del yeso sintético, por sobre el natural, en la industria europea de tableros de yeso. (Fuente: adaptada de Lund-Nielsen, 2010).

Lund-Nielsen (2010) señala que las plantas pioneras en la adopción de yeso sintético derivado de desulfuración de gases de combustión (FGD o DSG), tenían a éste como fuente adicional de la roca de yeso en la provisión de materia prima para la fabricación de tableros. Esto se dio prácticamente hasta el año 2000. A comienzos

del nuevo milenio se extendió por toda Europa el uso de yeso químico, y el origen de la provisión para atender la demanda se fue equilibrando. En tiempos más recientes, desde fines de la primera década del presente siglo, ya se cuenta con plantas diseñadas para utilizar sólo FGD como materia prima, no estando habilitadas para incorporar yeso mineral. La Tabla 5.1, sintetiza lo reseñado.

**Tabla 5.1.** Evolución en el cambio tecnológico y equipamiento de las plantas de tableros de yeso en Europa. (Fuente: adaptada de Lund-Nielsen, 2010).

Tipo de planta	La importancia del FGD		Cambios en el equipamiento de la producción
Plantas de uso mixto	Pioneros + tempranos usuarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fuente principal: roca de yeso</li> <li>▪ Fuente adicional: FGD</li> </ul>	Cambios marginales para acomodar el nuevo tipo de materias primas.
	Adopción generalizada	Fuentes paralelas: uso indistinto de roca de yeso ó FGD.	Cambios fundamentales en líneas existentes para utilizar FGD / DSG + uso de líneas de producción exclusiva para FGD/DSG.
Plantas exclusivas	Fuente única: FGD		Plantas enteramente diseñadas para usar FGD/DGS de modo exclusivo (no habilitadas para uso de roca de yeso).

Lo expuesto ofrece una visión de los grandes cambios que se han dado en las últimas décadas, en cuanto a la procedencia de la materia prima yeso para su aplicación, principalmente, en el rubro de la construcción.

## 5.2. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE YESO

La producción mundial de yeso crudo en 2012 fue de 150 Mt. La Tabla 5.2., elaborada a partir de datos provistos por el USGS, indica que un total de veintiún países producen el 90% del total mundial, de los cuales China es el principal productor con el 32%, seguida por Irán y España, quienes proveen fundamentalmente

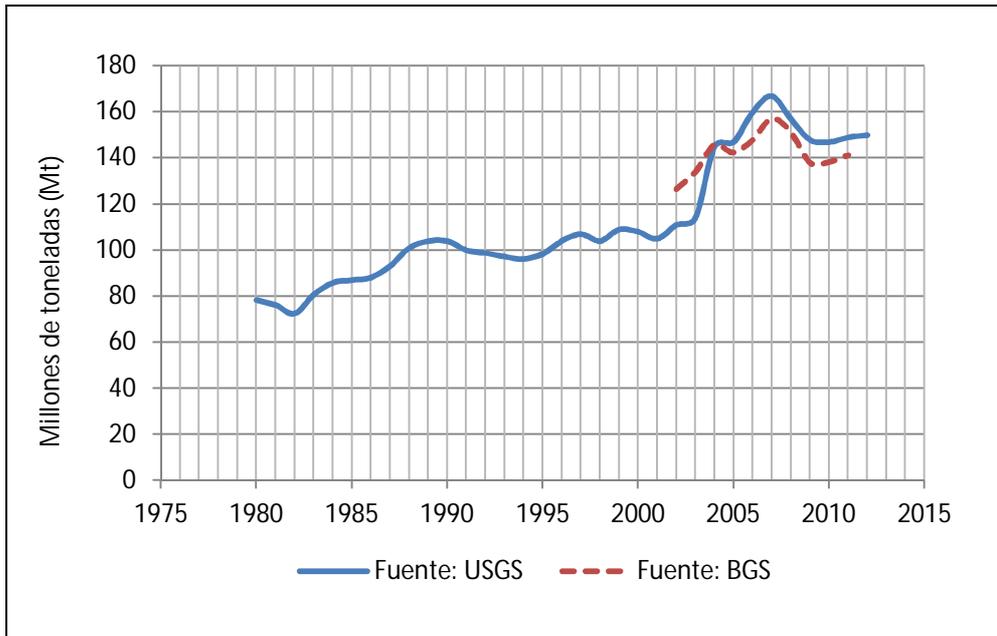
a Oriente Medio y a Europa Occidental, respectivamente. Estados Unidos ocupa el quinto lugar, detrás de Tailandia, siendo además un importante importador de otros grandes productores (Canadá, México, España) para atender la demanda interna. En Sudamérica se destacan Brasil (2,8 Mt), que cuenta con una de las mayores reservas mundiales de yeso natural, y Argentina (1,2 Mt) (Crangle, 2013).

**Tabla 5.2.** Producción mundial de yeso mineral según el USGS. (Fuente: elaboración propia, basada en Crangle, 2013).

<b>Producción de yeso mineral (miles de toneladas métricas)</b>			
<b>País</b>	<b>2011</b>	<b>2012<sup>e</sup></b>	<b>Participación</b>
<b>China</b>	48.000	48.000	31,7%
<b>Irán</b>	13.000	14.000	9,3%
<b>España</b>	11.500	11.500	7,6%
<b>Tailandia</b>	9.900	10.000	6,6%
<b>EEUU</b>	8.900	9.900	6,5%
<b>Japón</b>	5.600	5.700	
<b>Italia</b>	4.130	4.100	
<b>México</b>	3.840	3.850	2,5%
<b>Rusia</b>	3.000	3.100	
<b>Australia</b>	3.500	3.000	
<b>Turquía</b>	3.200	3.000	
<b>Brasil</b>	2.750	2.800	1,9%
<b>India</b>	2.700	2.750	
<b>Arabia Saudita</b>	2.100	2.300	
<b>Canadá</b>	2.560	2.200	
<b>Francia</b>	2.300	2.300	
<b>Alemania</b>	2.020	2.050	
<b>Reino Unido</b>	1.700	1.700	
<b>Algeria</b>	1.650	1.650	
<b>Argentina</b>	1.340	1.200	0,8%
<b>Polonia</b>	1.200	1.200	
<b>Otros países</b>	14.500	14.900	9,9%
<b>Totales</b>	<b>149.390</b>	<b>151.200</b>	<b>100,0%</b>
<sup>e</sup> Estimado			

La producción mundial de yeso mineral ha ido creciendo en las últimas décadas. La globalización de la economía ha sido, quizá, el factor más determinante de dicho crecimiento. La Figura 5.3, elaborada a partir de datos tomados del USGS y el BGS

(British Geological Survey)<sup>1</sup>, presenta la evolución registrada a lo largo de los últimos treinta años. Claramente se percibe en ella un fuerte período de crecimiento iniciado a comienzos del milenio con un pico experimentado en 2007, para luego descender bruscamente en coincidencia con la crisis del año 2008, y presentar leve recuperación a partir del año siguiente.



**Figura 5.3.** Evolución anual de la producción mundial de yeso mineral. (Fuente: elaboración propia, basada en datos del USGS y el BGS).

Según el USGS, en la medida de que las nuevas culturas reconozcan las ventajas de uso del yeso y la eficiencia de los paneles prefabricados con este material, la producción va a aumentar. Precisamente, la tendencia en el rubro de la construcción, ya puesta de manifiesto también en Asia y en Sudamérica, es la de desplazar las aplicaciones del mismo bajo condiciones húmedas por aquellas en seco (prefabricados), en razón de su limpieza, economía, mano de obra de fácil capacitación y menores tiempos de ejecución.

Crangle (2013) opina que si continúa la construcción de plantas de fabricación de paneles de yeso diseñados para el uso de yeso sintético, a partir de unidades de FGD como materia prima, ello repercutirá en una menor extracción de yeso natural. Sin embargo, en su visión la disponibilidad de gas natural de bajo costo puede limitar el

<sup>1</sup> <http://www.bgs.ac.uk/>

aumento de las futuras unidades a base de este subproducto y, por lo tanto, la producción de yeso sintético.

Un planteo similar realizan Monier et al. (2011) al expresar que hay elementos que hacen que sea difícil dar un pronóstico fiable a largo plazo sobre el futuro de la producción de yeso FGD en Europa, pudiendo cambiar el escenario preanunciado. Estos tienen que ver con el compromiso de la UE para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, la creciente necesidad de utilizar fuentes de energía renovables y la existencia de tecnologías más nuevas y eficientes en las centrales eléctricas.

Es interesante analizar el presagio de F. Wirsching cuando hacia 1985, al referirse al FGD en tiempos en que el concepto de “desarrollo sostenible” aún estaba en sus albores (United Nations, 1987), señalaba:

“A causa de las grandes cantidades de desulfoyeso que van a estar disponibles en el futuro, será difícil su absorción tanto por parte de la industria del yeso como por la del cemento. Una posibilidad viable es la de procesar las cantidades sobrantes, junto con otros subproductos de las centrales eléctricas, para obtener un producto apropiado para su uso en la agricultura o como material de relleno de canteras” ” (Wirsching, 1996, p.20).

Asimismo, indicaba:

“No se esperan grandes cambios en la industria del yeso, tanto en la producción como en el consumo. La industria de la construcción será el mayor consumidor, seguido por la industria del cemento. Únicamente se espera un incremento del consumo en algunos países como China, países del Golfo Pérsico y determinadas zonas del Lejano Oriente, como respuesta al incremento de las actividades de construcción” (Wirsching, 1996, p.38).

Tras haber transcurrido tres décadas, y conforme a lo expuesto, lo acontecido es que sí se han producido cambios en la industria del yeso en relación a la producción y al consumo a consecuencia de la globalización de la economía, incrementándose significativamente en todo el mundo. La industria de la construcción y el cemento

siguen siendo los mayores consumidores y, en acuerdo con lo pronosticado, los países asiáticos aumentaron no sólo el consumo, sino que también la producción.

En relación al subproducto fosfoyeso, según Godinho-Castro et al. (2012) la producción mundial es del orden de 100-280 Mt anuales, de las cuales su tercera parte es desaprovechada convirtiéndose en residuo. Zhou et al. (2012), señalan que las estimaciones indican que ya ha trepado a las cercanías de los 280 Mt, Sin embargo, indican que sólo el 15% es utilizado (materiales de construcción, fertilizantes, estabilización de suelos, retardador del cemento portland, etc.), en tanto que el 85% restante se vuelca en vertederos, ríos, mares y lagos sin tratamiento alguno.

A modo de conclusión se puede expresar que con el incremento de la producción, tanto de yeso mineral como sintético, paralelamente creció la generación de residuos en todo el mundo. Como contrapartida, las nuevas regulaciones medioambientales, al obligar a la minimización del vuelco de residuos en vertederos, han conducido al desarrollo de investigaciones como la presente y a la constante búsqueda de nuevas aplicaciones para su recuperación y valorización.

### **5.3. PRODUCCIÓN DE YESO MINERAL EN ARGENTINA**

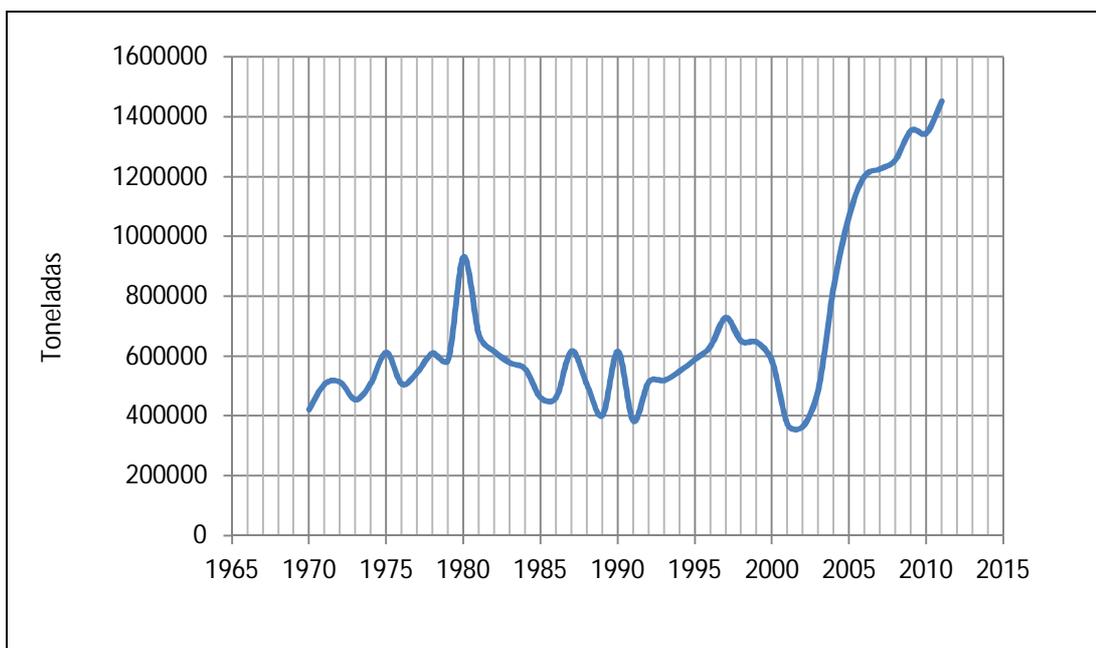
La extracción de yeso mineral en Argentina, tras llegar en 2002 al nivel más bajo de los últimos treinta años, con 365.000 t, ha tenido un crecimiento sostenido desde entonces hasta alcanzar una producción del orden de 1.4000.000 t en el año 2011, como consecuencia de la implementación del Plan Minero Nacional (Secretaría de Minería, 2004). La Figura 5.4, elaborada a partir de fuentes nacionales y extranjeras, es elocuente al respecto<sup>2</sup>. Argentina se autoabastece de este mineral; la importación es insignificante y varía anualmente conforme a distintas necesidades, en tanto que el remanente de lo producido es exportado.

El yeso crudo es consumido prácticamente en su totalidad por la industria cementera, la cual lo utiliza como componente del cemento portland. Estas plantas productivas

---

<sup>2</sup> Datos obtenidos, compilados y ordenados de: Moori K. (1999); USGS: Velazco (1995,1998); Torres (2004, 2005, 2009) y Wacaster (2013); British Geological Survey; Servicio Geológico Minero Argentino (<http://www.segemar.gov.ar/>; accesos: 14/8/10 y 19/6/13) y las Encuestas Nacionales Mineras 2005, 2007 y 2010 del INDEC (<http://www.indec.gov.ar/>; acceso: 18/7/13).

se localizan, por lo general, en las cercanías de las canteras (Servicio Geológico Minero Argentino [SEGEMAR], 2013). Una fracción menor de la producción se destina a uso agrícola, aunque en los últimos años esta demanda ha crecido como necesidad de enmienda de suelos destinados, básicamente, al cultivo de la soja.

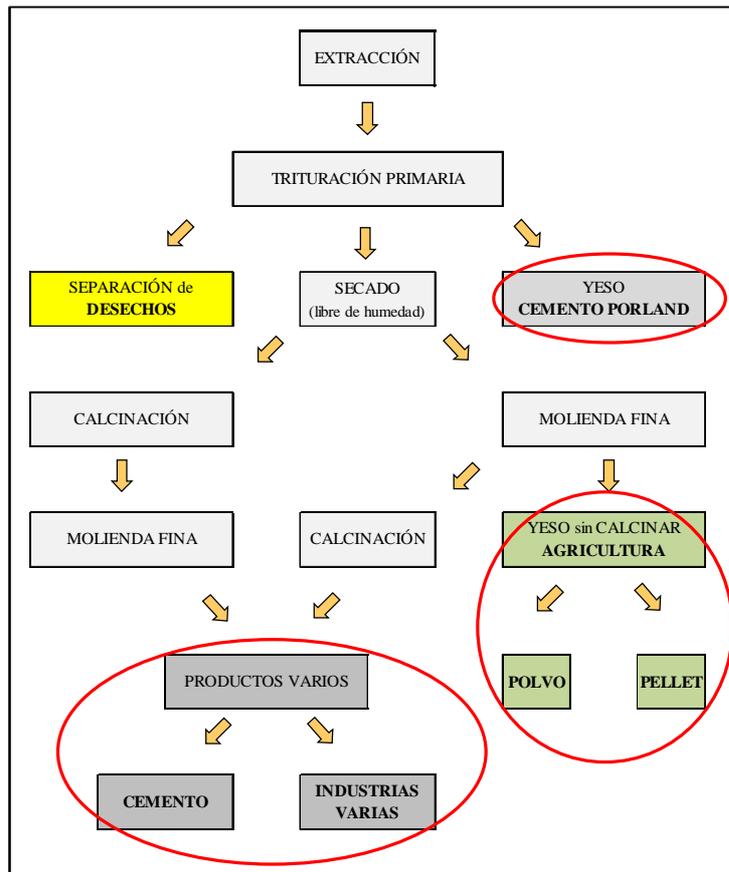


**Figura 5.4.** Evolución anual de la producción argentina de yeso mineral.  
(Fuente: elaboración propia, basada en datos del USGS y el BGS).

Las canteras de yeso están ampliamente distribuidas en la geografía nacional, siendo al menos trece las provincias argentinas que extraen dicho mineral, destacándose entre ellas Buenos Aires, La Pampa, Mendoza y Río Negro.

En cuanto al yeso calcinado, su oferta se orienta mayoritariamente a la industria de la construcción, para la elaboración de yeso de obra o para la producción de componentes prefabricados (paneles, bloques, etc.). Conjuntamente con la industria del cemento, consumen aproximadamente el 90% del yeso sea natural o ya calcinado ofrecido al mercado nacional (SEGEMAR, 2013).

La Figura 5.5 esquematiza la línea de procesamiento del yeso natural y su destino.



**Figura 5.5.** Esquema de procesamiento del yeso, según su destino.  
(Fuente: adaptada de Ponce y Torres Duggam, 2005).

#### 5.4. SOBRE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS Y EL TRATAMIENTO DE DATOS

Monier et al. (2011) elaboraron un informe para la Unión Europea el cual reveló que no hay estadísticas de residuos de yeso disponibles a nivel europeo, ni tampoco las hay a nivel de cada nación, por cuanto en la mayoría de los casos estos se mezclan con otros materiales (inertes, cartón, etc.). El trabajo expresa que, en tal contexto, es imposible calcular las tasas de reciclado de yeso.

Ante esta realidad del grupo de países más avanzados en materia de legislación medioambiental, no debe sorprender que Argentina carezca de estadísticas sobre residuos de este material, como tampoco las tiene de los RCD en su conjunto. Así lo manifiestan Arena y Mercante (2008) al señalar que la gestión de los mismos es realmente desconocida y desordenada en la mayoría de los países, incluyendo el nuestro.

Sin embargo, es destacable el hecho de que en el informe de Monier et al. (2011) se haya escogido al yeso como a una de las siete fracciones de materiales y sustancias sobre las que deben trabajar la mayoría de los países de la UE, para alcanzar el *target* u objetivo de reciclar o reutilizar al menos el 70% en peso de los RCD no peligrosos a más tardar en el año 2020, como se mencionó en la sección 1.2.

#### 5.4.1. Estimaciones sobre la participación del yeso en el conjunto de los RCD

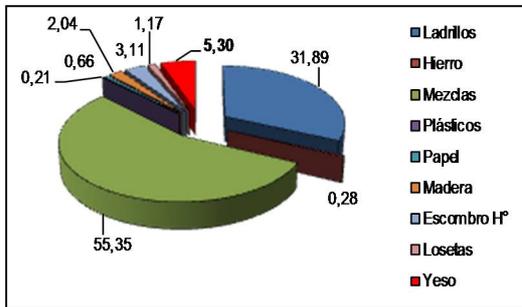
La participación del yeso en la composición de la corriente de residuos guarda relación directa con las modalidades constructivas de cada país o región, y se la suele medir en peso o en volumen. En España, por ejemplo, se estima que aporta entre un 0,5% y un 1,5% en volumen de los residuos totales de construcción (Fernández Casado, 2013). La Tabla 5.3 ilustra sobre la composición de los RCD en la Comunidad de Madrid, según datos provistos por su Dirección General de Medioambiente. Los residuos de yeso están básicamente compuestos de PYL procedente de demoliciones de obras menores de 40 años, por cuanto antes de ello primaba la aplicación del material bajo condiciones húmedas, hecho que genera tal grado de adhesión al sustrato que torna difícil su separación.

**Tabla 5.3.** Composición de los RCD según la Dirección general de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid. (Fuente: Fernández Casado, 2013).

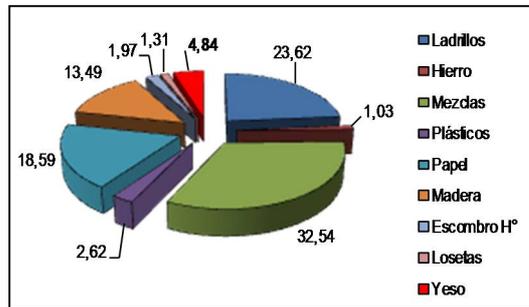
<b>Composición de los Residuos de Construcción y Demolición</b>	
<b>Material</b>	<b>% de Volumen</b>
Cerámicos	54
Hormigón	12
Piedra	5
Arena, grava y áridos	4
Madera	4
Vidrio, papel y yeso	1
Plásticos	1,5
Metales	2,5
Asfalto	5
Basura	7
Otros	4

En Argentina no se cuenta con datos oficiales que provean la participación de este material en el conjunto de los RCD. El conocimiento, o su estimación, pasan por estudios privados sustentados, básicamente, en comunicaciones de investigaciones

científicas. Mercante (2005), por ejemplo, realizó una evaluación de la composición de los RC (residuos de construcción) sobre la base de un conjunto compuesto por ocho viviendas residenciales de 65 m<sup>2</sup> cada una ejecutadas en la ciudad de Mendoza. Para ello aplicó el método directo basado en la selección manual del material residual por tipo y etapa en la obra. Sus resultados, que incluyen la fracción correspondiente al yeso tanto en peso como en volumen, se vuelcan en las Figuras 5.6 y 5.7, observándose que, en ambos casos, la participación es del orden del 5%.



**Figura 5.6.** Distribución porcentual de los RC en peso (Fuente: Mercante, 2005).



**Figura 5.7.** Distribución porcentual de los RC en volumen. (Fuente: Mercante, 2005).

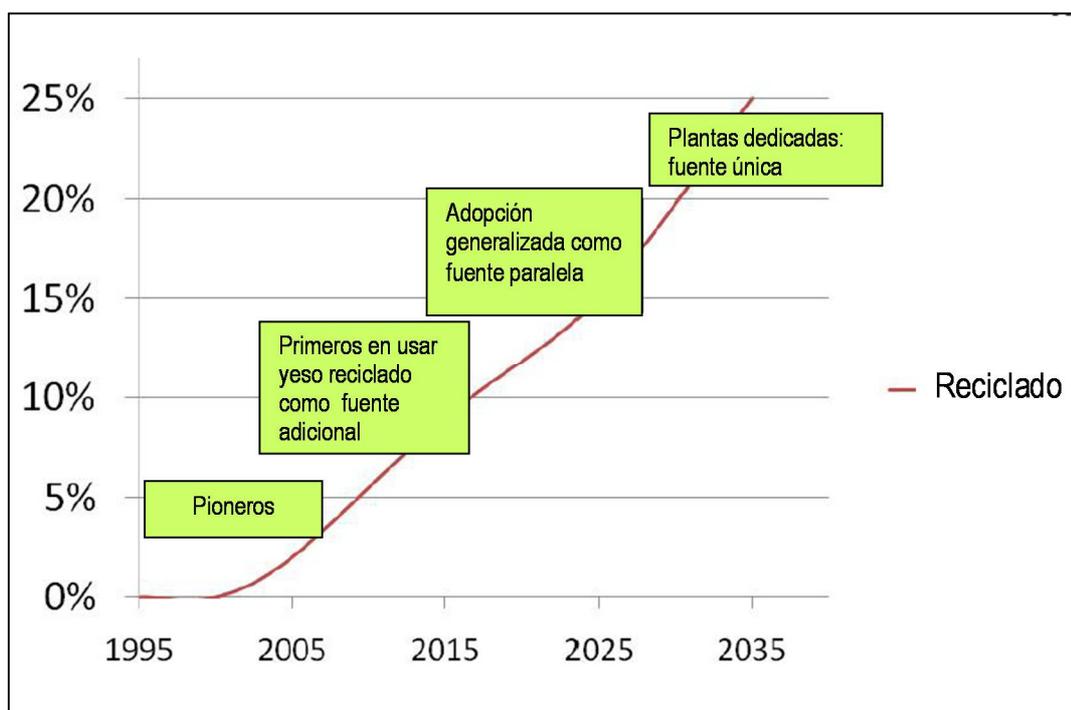
En ocasión de tener que planificar la gestión de los RCD en una región determinada cuando se carece de datos fidedignos o de calidad, en cuanto a composición y cantidad, y se deben considerar variables que no siempre se encuentran disponibles, se recurre a métodos y procedimientos indirectos de cálculo. Estos relacionan variables tales como el nivel de actividad de la construcción (medido en superficie construida o demolida por año) y los índices de generación por metro cuadrado de superficie construida o demolida (Mercante et al., 2011). Puesto que la obtención de estos datos suele ser laboriosa y de largo plazo, los autores mencionados desarrollaron una metodología que luego aplicaron en el área del Gran Mendoza. Fuera de los aportes de este grupo de investigadores, la información disponible y de fácil o libre acceso sobre el resto de Argentina es escasa.

En orden al mismo fin, tampoco se cuentan con datos, medidos en volumen o peso, del yeso residual ingresado al Relleno Sanitario de la ciudad de Rafaela según la información recabada, lo cual indica que si bien se trata de una de las ciudades más avanzadas en la gestión de RSU de la República Argentina, aún queda la recolección diferenciada de los RCD como materia pendiente.

### 5.4.2. El escenario futuro del yeso reciclado en el mundo

Al marco presentado se debe agregar que la generación de residuos de yeso es creciente en todo el mundo, tanto en el ámbito de las construcciones y demoliciones como en las industrias. Monier et al. (2011) revelaron que en 2007 se depositaron en vertederos de todo el mundo aproximadamente 10 Mt de descartes de PYL, y que la tasa de vuelco anual en los vertederos europeos era cercana a los 4 Mt, sin incluir los de las plantas de producción, estimados en 0,6 a 1,2 Mt.

Lund-Nielsen (2010) señala que en Europa se prevé que para el año 2020 estará disponible una enorme cantidad de yeso reciclado para ser reutilizados en la industria de los tableros de este material, como consecuencia de las cada vez más exigentes disposiciones medioambientales de la UE en materia de gestión y aprovechamiento de residuos. La Figura 5.8 presenta la proyección a futuro del uso de yeso reciclado en la fabricación de paneles laminados en Europa, previéndose llegar al 15% en el año 2025 y alcanzar el 25% en el 2035.



**Figura 5.8.** Posible evolución del uso del yeso reciclado en la industria europea de tableros. Escenario 2000-2035. (Fuente: adaptada de Lund-Nielsen, 2010).

Este panorama alcanza también a países del continente asiático. Según Pappu, Saxena y Asolekar (2007), tan sólo en India a mediados de 1990 se generaban 6 Mt anuales de residuos de yeso, fundamentalmente sintético, procedentes de actividades industriales, mineras, municipales, agrícolas y otros procesos. Ello motivó la realización de estudios a partir de los cuales se logró demostrar las ventajas de su aplicación como componentes de materiales de construcción, con comprobación del mejoramiento de algunas de sus propiedades y la carencia de efectos nocivos.

### **5.5. COMENTARIO FINAL**

Se han provisto datos sobre la producción mundial y nacional de yeso, y también se hizo referencia a la generación de residuos de este material y a los pronósticos para el futuro cercano. Los números presentados en algunos casos proceden de fuentes gubernamentales, como el USGS, el BGS, la SEGEMAR o el INDEC y, en otros pocos, de fuentes bibliográficas recientes. Sin embargo, es importante destacar que la información sobre los datos que hacen a la producción nacional, puestos a disposición en las páginas de los organismos oficiales, son escasos o desactualizados. Por tal motivo, la fuente más importante de consulta han sido los informes anuales del USGS<sup>3</sup>.

Otro aspecto a resaltar es la enorme producción de yeso sintético en el mundo. Si bien los guarismos volcados no son oficiales y hasta presentan disparidad entre sí, todos revelan que se ha superado la producción del yeso natural. La mayor preocupación reside no sólo en el gran porcentaje del mismo que no es utilizado, sino en el impacto ambiental que tiene lugar debido al vuelco descontrolado que se hace del subproducto en vertederos inadecuados y en reservorios de agua.

---

<sup>3</sup> Minerals Yearbooks. Argentina.  
Ediciones disponibles en: <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/sa.html#ar>

## APLICACIONES DEL YESO

---

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La demanda en cuanto a la recuperación y valorización de los RCD está creciendo de manera sostenida en todo el mundo. Los motivos son varios: dictado de normas regulatorias medioambientales; altas tarifas de vuelco en vertederos, como sucede en ciertos países de la Unión Europea, o carencia de espacios físicos para construirlos, como se da en el caso de Japón; altos costos de transporte de la materia prima a los centros de producción; necesidad de ahorrar energía y conservar los recursos; etc. Por ello el reciclado eficiente de estos residuos es hoy un problema mundial, para cuya resolución se requiere de una amplia labor de I+D hacia la exploración de nuevas aplicaciones, maximizando el uso de tecnologías existentes para lograr una gestión eficiente y sostenible del medioambiente (Pappu, Saxena y Asolekar, 2007; Godinho-Castro et al., 2012).

Se ha mencionado en el Capítulo 5 que la gestión de los RCD es desconocida y desordenada en la mayoría de los países, incluido Argentina (Arena y Mercante,

2008). Una gestión adecuada incluye la minimización de residuos en origen (reduciéndolos o eliminándolos en la fuente de producción), y su recuperación mediante el reciclado o la reutilización (Begum et al., 2007). Todo ello conduce a la importancia de “deconstruir” más que “demoler”, lo cual constituye en cierta medida un cambio de paradigma en lo que se hace habitualmente. Demoler lleva implícito el derribo desordenado, por lo que todos o el grueso de los materiales quedan incorporados a la misma corriente de desechos; deconstruir, en cambio, es aplicar un proceso ordenado de desarme (desmantelamiento) y clasificación en obra lo cual, en esencia, es gestionar adecuadamente.

La importancia de la deconstrucción es subrayada en el informe de Monier et al. (2011) realizado para la Unión Europea, citado en la sección 5.4, el cual la recomienda como uno de los caminos necesarios para alcanzar el *target* de preparar para reciclar o reutilizar al menos un 70% (en peso) de los residuos de construcción y demolición no peligrosos, a más tardar para el año 2020.

Los RCD fueron identificados por la Comisión Europea (EC), dependiente de UE, como línea prioritaria de atención, debido a la gran cantidad generada anualmente en los estados miembros y al alto potencial de reutilización y reciclado contenido en ellos. En el mencionado informe se enfatiza en que una adecuada gestión redundará en el uso efectivo y eficiente de los recursos naturales, así como en la mitigación de los impactos medioambientales sobre el planeta. El yeso fue uno de los siete materiales o sustancias empleados en edificios y la ingeniería civil seleccionados para producirlo, además del hormigón, el asfalto, los cerámicos, las maderas, y ciertas sustancias peligrosas o que afectan la capa de ozono. El criterio de selección de los mismos se basó en su importancia dentro de la corriente total de residuos, por su contribución potencial para alcanzar el mencionado objetivo del 70%, o en el peligro asociado al material.

Los residuos de yeso pueden proceder de tres fuentes: a) los generados en la producción; b) los de construcción y c) los de demolición.

En la primera de ellas se presentan todas las ventajas para su recuperación y reciclado por cuanto el material, en general, no está contaminado (es el caso de las fábricas de PYL). En la segunda, si se tratase de componentes prefabricados de

montaje en seco las posibilidades son muy buenas, dado que generalmente consisten en recortes. Si fuesen restos de aplicaciones de morteros o pastas de yeso (p.ej.: caídas o sobrantes de revestimientos) tienen normalmente una carga de contaminantes importante, pero no por ello debe despreciárselos, como se propone en esta tesis. La última de las fuentes suele presentar la situación más difícil y delicada, sobre todo cuando se trata de viejas edificaciones, puesto que generalmente el yeso se encontrará adherido firmemente a otros materiales por haber sido aplicado bajo condiciones húmedas.

Vrancken y Laethem (2000), tras destacar la importancia de los residuos de yeso dentro del conjunto de los RCD en el mercado belga, expresan que aunque el yeso puro puede ser reciclado indefinidamente, los materiales a base de yeso a menudo son dispuestos en una corriente de desechos de construcción y demolición muy dispersa, cargándose de impurezas.

En situaciones como la mencionada es importante identificar al yeso firmemente adherido a otros materiales, como la mampostería, por cuanto es común triturar los escombros para utilizarlos como agregados en nuevos hormigones, como complemento (o en sustitución) de la piedra y la arena. Puesto que la presencia de yeso incrementa el contenido de sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) en el agua, la reacción entre estos y el aluminato tricálcico del cemento puede provocar la formación de estringita expansiva, también conocida como “sal de Candlot”, produciendo fisuración, hinchazón y desprendimiento progresivo de la pasta de cemento conglomerante, quedando los áridos (piedra, arena) sin cohesión entre sí (Fernández Cánovas, 1977). Lo recomendable, en estos casos, es adoptar medidas de selección y separación en origen, e implementar un sistema de recolección y tratamiento centralizado de los RCD que incluya al yeso.

Cuando la separación en obra no es suficiente o adecuada los residuos son difíciles de reciclar. Si bien el yeso es clasificado como un material no inerte y no peligroso, ya se ha mencionado que el eventual contacto de éste con restos de materia orgánica, al disponérselo en vertederos no apropiados, propende al riesgo de generación de sulfuro de hidrógeno (Montero et al., 2009).

Recuperar un RCD, en este caso el yeso, implica en sí mismo hallar aplicaciones para su nuevo uso. En consonancia con ello, la presente investigación expone una alternativa de reciclado del yeso recuperado, diferente a lo comúnmente presentado en la literatura. Si bien el trabajo no incurre en un análisis económico del mismo, por cuanto excede el alcance planteado, aquí pasa a cobrar importancia el concepto de valorización por sobre el de precio. La valorización está estrechamente ligada al beneficio medioambiental, y eventualmente energético, que procede de su recuperación y reciclado.

## 6.2. APLICACIONES DEL YESO EN ARGENTINA

Conforme a la información provista por la SEGEMAR (2013), los principales usos del yeso natural y calcinado en Argentina son los que se resumen en las Tablas 6.1 y 6.2<sup>1</sup>. La calidad y las especificaciones técnicas requeridas para ambos tipos de yeso dependen del uso final en el cual se lo aplique.

**Tabla 6.1.** Aplicaciones del yeso natural en Argentina.

Campo	Usos
Industria del cemento portland	Uso como retardador del fraguado
Agricultura	Acondicionador (enmienda) de suelos
Aplicaciones industriales varias (elaboración de pinturas; industria papelera)	Carga mineral; material en filtros

**Tabla 6.2.** Aplicaciones del yeso calcinado en Argentina.

Campo	Observaciones	Fase de yeso utilizada
Industria de la construcción	Yeso de obra	Hemihidrato beta (SH $\beta$ ) con retardador; puede llevar otros agregados.
	Yeso para paneles	Hemihidrato beta (SH $\beta$ ) con acelerador y otros agregados.

<sup>1</sup> Obtenida de [http://www.segemar.gov.ar/P\\_Oferta\\_Regiones/Oferta/index.htm](http://www.segemar.gov.ar/P_Oferta_Regiones/Oferta/index.htm) (acceso 19-6-2013). La información ya no está disponible en la página web. Los datos corresponden, probablemente, al año 1997.

**Tabla 6.2.** Aplicaciones del yeso calcinado en Argentina (cont.).

Campo	Observaciones	Fase de yeso utilizada
Industria de la construcción	Moldes para industria cerámica	Hemihidrato beta o alfa (SH $\beta$ o SH $\alpha$ ), o mezcla de ambos.
Medicina	Yeso para ortopedia	Hemihidrato alfa (SH $\alpha$ ), o mezcla con beta (SH $\beta$ ), más un acelerador
Otros	Yeso como agente desecante	Anhidrita soluble (AIII)

### 6.3. CAMPOS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN SOBRE APLICACIONES DEL YESO

La sección presenta un somero panorama sobre algunas de las investigaciones que actualmente se vienen desarrollando en torno al yeso, y las posibilidades de ser usado (yeso virgen o nuevo) o reutilizado (yeso residual). Su finalidad es mostrar el interés que tiene la comunidad científica en estudiar y aprovechar las ventajas que ofrece este material. En algunos casos los estudios están movilizados por la necesidad de resolver un problema de acumulación de subproductos industriales a base de yeso, o de residuos de este material generados tanto en las demoliciones como en las fábricas de PYL. En otros casos los mueve la preservación del recurso natural y, en ciertas situaciones, la necesidad de encontrar una vía de reutilización del residuo debido a los altas tasas aplicadas para su disposición final, por tratarse de un material no-inerte, como sucede en el Reino Unido (Alcorn y Welch, 2007).

#### 6.3.1. Industria del cemento

El empleo de yeso crudo como aportante de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) en la elaboración del cemento tiene por finalidad regular el fraguado. Éste es un constituyente secundario de dicho material, al igual que la cal y magnesia libres (CaO y MgO, respectivamente). El SO<sub>3</sub> se utiliza no sólo en el cemento portland, el más conocido de los cementos, también se lo emplea en la fabricación de otras variedades del conglomerante, tales como el siderúrgico, el puzolánico y los compuestos. Dosificado adecuadamente le confiere al cemento buenas cualidades resistentes, estabilidad y durabilidad. La proporción a adicionar varía entre el 3,5 y 4,5% en peso, guardando relación directa con el contenido de uno de los

constituyentes principales, el aluminato tricálcico, (Fernández Cánovas, 1977; Giovambattista, 2011).

Si bien ya en el año 2007 se tenía el registro de la existencia de dos fábricas de cemento portland que emplean residuos de PYL como insumo, una ubicada en Seattle (EEUU) y la restante en el Reino Unido, continúan realizándose investigaciones a fin de ir eliminando barreras que permitan maximizar su empleo en esta industria (Alcorn y Welch, 2007).

Clamp (2008) destaca que los estudios documentales identifican que se presentan claros beneficios económicos al emplear yeso reciclado procedente de PYL, en lo que se refiere a los costos en la producción de cemento y en los de disposición final en la industria de la construcción. Los impactos medioambientales detectados conciernen más a la extracción del yeso de las canteras, al suministro del material y a la gestión de su disposición final (sea yeso natural o FGD), que al reciclado convencional en sí. El estudio revela que hay un menor impacto ambiental asociado con el yeso reciclado que con el yeso natural.

Un trabajo académico más reciente realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña, estudió la incorporación de pequeños porcentajes de residuos de placas de cartón-yeso en sustitución de yeso natural en el proceso de fabricación de mezclas binarias y ternarias formadas por cemento portland, cemento de aluminato cálcico y sulfato de calcio, informando sobre comportamientos similares al de la mezcla patrón de referencia (Morales Martínez, 2010).

### **6.3.2. Industria de la construcción**

#### **▪ Prefabricados, con yeso como componente principal**

La Figura 5.1, aunque referida a los EEUU, refleja en gran medida lo que ocurre en otras partes del mundo y pone en evidencia la importancia del yeso aplicado a la prefabricación de placas laminadas o *wallboards*, básicamente, en toda su amplia gama de variedades hoy ofrecidas al mercado. También comprende a las placas para cielorrasos, molduras, ladrillos, etc. Se utiliza para ello tanto yeso nuevo como residual, sea éste sintético o recuperado de obras.

Como ya se citó en la sección 1.7, Knauf GmbH de España desde hace pocos años recicla el 100% de las PYL no conformes de su fábrica en la localidad de Escúzar en Granada, una de las más modernas de Europa (Fernández Casado, 2010).

Barbosa y Cabral da Silva (2011) presentan avances de su propuesta de fabricación de PYL con el yeso recuperado de las obras de albañilería, con el objetivo de cumplir con las exigencias medioambientales implementadas en Brasil, reducir el consumo energético y evitar el daño ambiental que implica la extracción del yeso natural.

▪ **Prefabricados, con yeso como componente secundario**

Otros prefabricados están elaborados no a base de yeso puro, sino con un compuesto de materiales que lo contienen. En tal sentido, Godinho-Castro et al. (2012) informan que es viable la sustitución de un 20% de arcilla por yeso recuperado de obras en la fabricación de ladrillos cerámicos, por cuanto el producto final sigue cumpliendo con los estándares brasileros para la fabricación de los mismos, sin que los lixiviados causen un impacto medioambiental de significancia.

Hernández-Olivares et al. (1999) estudiaron las propiedades mecánicas y determinaron los coeficientes de absorción acústica y conductividad térmica de compuestos de corcho-yeso, a fin de que puedan ser utilizados como datos de diseño para su empleo en tabiquería interior de edificaciones, en razón de la compatibilidad hallada experimentalmente entre ambos materiales. En una investigación con fin similar, Eires, Camões y Jalali (2007), estudiaron compuestos de corcho-yeso con la adición de fibras de papel celulósico y de goma reciclados, para ser destinados a tabiquería seca y cielorrasos, como aporte a la construcción sostenible.

Degirmenci (2008) reportó mejoras obtenidas en sus investigaciones con adobes al incorporarles hasta un 25% de fosfoyeso. Comprobó sus beneficios en cuanto a una mayor resistencia a la compresión y flexión, así como a un menor ablandamiento en agua y contracción por secado. El adobe es un material de amplia difusión en su país, Turquía, tanto por razones climáticas como sociales. La incorporación de fosfoyeso, además de mejorar sus propiedades, aportaría una respuesta al problema de gestión o manejo de este residuo industrial.

Zhou et al. (2012), movilizados por el mismo objetivo medioambiental, informan sobre las ventajas de un ladrillo no cocido elaborado en base a la incorporación de un

alto porcentaje de PG (75%), combinado con arena de río (20%), cemento (4%) y cal hidratada (1,5%).

#### ▪ **Yeso de construcción en polvo**

Es el típico yeso cocido en polvo destinado a ser aplicado en revestimiento de paredes y cielorrasos. También se lo llama *plaster*, por su designación en el mercado de habla inglesa.

La Figura 5.1 revela que en EEUU este tipo de aplicación es el tercer destino final en orden de importancia, luego de los prefabricados y la industria cementera.

Oliveira et al. (2012) proponen la utilización de revestimientos (revoques) compuestos por yeso con residuos de etilvinilacetato (EVA) y vermiculita, para protección térmica en obras de albañilería. Ya se ha citado en la sección 1.7 el trabajo de Rodríguez Orejón (2010), quien estudió el comportamiento de la inclusión de 3%, 4% y 5% de yeso laminado calcinado en una matriz de distintos tipos de yeso españoles.

La presente tesis, en sí misma, es una investigación orientada al uso del yeso como material en polvo para construcción, cuya propuesta demuestra la posibilidad de reemplazo de determinado porcentaje de yeso comercial por yeso recuperado de placas de yeso laminado, o bien con el recogido de sobrantes de aplicaciones en condiciones húmedas durante la etapa constructiva.

#### **6.3.3. Agronomía: yeso para uso agrícola**

La Norma IRAM 22452:06 (IRAM, 2006) define al yeso agrícola como al “constituido por el sulfato de calcio dihidratado natural que se emplea como enmienda agrícola de suelos y fertilizantes, en forma de sólido granulado, pelletizado o polvo”.

El yeso agrícola, por lo tanto, procede de la roca natural en estado crudo molida industrialmente a la granulometría deseada. En su composición química básica contiene un 17-19% de azufre (S) y un 22-23% de calcio (Ca), y se lo utiliza para enmienda y fertilización de suelos degradados física y químicamente. En el primero de los casos se lo emplea, fundamentalmente, como mejorador de impedimentos físicos tales como el planchado (encostrado) y la compactación (superficial o sub-

superficial), y como corrector del pH de suelos alcalinos o salino-alcalinos; en el segundo de los casos, como fuente de aporte de S y Ca, aunque su uso con fines de fertilización en la agricultura latinoamericana aún es escaso (Mon e Irurtia, 2004; Ponce y Torres Duggam, 2005; Gambaudo, 2006).

También recibe el nombre de yeso agrícola la variedad de yeso sintético fosfoyeso cuando se lo emplea con tales fines. En Brasil, es la agricultura el mayor consumidor nacional del mismo, siendo sus aplicaciones similares a las del yeso agrícola natural (Cavalcanti Canut, 2006).

Organizaciones como la WRAP (Waste & Resources Action Programme)<sup>2</sup>, del Reino Unido, han venido desarrollando investigaciones sobre la incorporación de residuos de placas de yeso-cartón para beneficio agrícola (Figura 6.1). Entre sus conclusiones destacaron no haber observado fitotoxicidad en los cultivos y que, en general, los niveles de elementos potencialmente tóxicos y metales pesados presentes en las muestras de yeso reciclado no excedieron los presentes en el yeso agrícola. Por tal motivo, sostienen que si éste es un material de origen natural que se puede suministrar para dicho uso sin restricciones, el empleo de yeso reciclado con niveles iguales o inferiores de aquellos elementos puede sustituir de forma segura al yeso agrícola (Cartwright, 2007).



**Figura 6.1.** Distribución de yeso reciclado con un esparcidor de cal. (Fuente: Cartwright, 2007)

<sup>2</sup> <http://www.wrap.org.uk/>

#### **6.3.4. Geotecnia: estabilización de suelos**

Como ya se citara en la sección 1.7, la estabilización de taludes, terraplenes y mejora de suelos es otro de sus campos de aplicación. En sus trabajos, Ahmed, Ugai y Kamei (2011a; 2011b) y Ahmed y Ugai (2011) hacen mención a la reciente incorporación de residuos de placas laminadas para tales fines en Japón, lo cual aún está poco difundido en el mundo. Sus estudios se orientan a encontrar aplicaciones a las 1,6 Mt de residuos de esta naturaleza que, anualmente, se genera en dicho país (10% del total mundial).

En China, Hua et al. (2010) informaron sobre las mejoras en las propiedades mecánicas de subbases de caminos al emplear FGD en combinación con cal apagada y silicato de sodio.

#### **6.3.5. Ingeniería ambiental: remediación**

Rodríguez-Jordá, Garrido y García (2010a, 2010b) han investigado la potencialidad de la aplicación de ciertos subproductos industriales, entre ellos el fosfoyeso, para la remediación de suelos ácidos contaminados con plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni), y arsénico (As), entre otros metales.

Varjo et al. (2003) propusieron una nueva técnica a base de yeso para reducir el metano y la liberación de fósforo de los sedimentos de lagos eutroficados.

### **6.4. CUADRO ESQUEMÁTICO DE LAS APLICACIONES DEL YESO**

En la Tabla 6.3, y a modo de resumen, se presentan las aplicaciones conocidas, emergentes y potenciales del yeso, sea nuevo de origen mineral (crudo o cocido) o residual (sintético o natural, procedentes de RCD). La tabla recoge lo hallado en la literatura consultada en relación al tema. Ella no es excluyente de otras posibilidades de uso del material, como tampoco de que puedan utilizarse en ciertos campos algunas de las procedencias mencionadas en otros.

**Tabla 6.3.** Aplicaciones del yeso mineral (nuevo) y residual.

Ámbito	Campo	Aplicación	Observaciones	Procedencia del yeso empleado	
				Mineral	Residual
Construcciones.	Industria de la construcción.	Revestimientos.	Yeso en polvo de aplicación manual; de proyección mecánica. Especiales antifuego.	Cocido.	PYL; Pastas y morteros. (Esta tesis)
				Cocido.	PYL; FGD; PG.
				Cocido.	PYL; FGD; PG
		Prefabricados.	Placas laminadas.	Cocido.	PYL
				Cocido.	PYL; FGD; PG
				Cocido.	PYL
		Otros materiales compuestos.	Adobes estabilizados con yeso.	Cocido.	PG.
				Cocido.	PYL.
		Sanitarios.	Artefactos para baños.	Cocido.	
				Crudo	
Cocido.					
Pinturas y masillas.	Carga mineral.	Cocido.			
		Crudo			
Adhesivos y morteros especiales.	Carga mineral.	Cocido.			
		Cocido.			

**Tabla 6.3.** Aplicaciones del yeso mineral (nuevo) y residual. (Continuación).

Ámbito	Campo	Aplicación	Observaciones	Procedencia del yeso empleado	
				Mineral	Residual
Construcciones.	Industria del cemento.	Cemento portland.	Componente secundario; regulador del fraguado.	Crudo.	PYL; FGD; PG.
				Cocido.	PYL; PG.
	Geotecnia.	Suelos/taludes.	Estabilización.	Cocido.	PG.
	Ingeniería Vial	Bases/ Sub-bases.	Regulador de humedad.	Facilitador de lixiviado de la sal para deshielo.	Cocido.
Banquinas.					
Agropecuario.	Ingeniería agronómica	Suelos.	Enmienda; Fertilizante.	Crudo.	PG; FGD.
	Veterinaria.	Lechos de animales.	Absorción de humedad; reductor de olores de heces.	Crudo.	PYL.
Medio ambiente.	Ingeniería Ambiental.	Remediación.	Metales pesados.		PG; PYL.
			Tratamiento de aguas.	Crudo.	FGD; PYL.
			Secado de lodos.	Crudo.	FGD; PYL.
			Recuperación de minas.	Crudo.	PYL.
			Eutroficación	Crudo.	Fe-G; PG.

**Tabla 6.3.** Aplicaciones del yeso mineral (nuevo) y residual. (Continuación).

Ámbito	Campo	Aplicación	Observaciones	Procedencia del yeso empleado	
				Mineral	Residual
Salud.	Medicina.		Moldes ortopédicos; férulas.	Cocido.	
	Odontología.		Moldes odontológicos. Pastas dentífricas.	Cocido.	
	Farmacia.	Desinfectante.		Cocido.	
Otros	Industria del papel.	Papel.	Carga mineral.	Cocido.	
	Industria de la cerámica.	Moldes. Tizas. Esculturas.		Cocido.	
	Bebidas.	Elaboración de vino.	Regulador del pH del mosto.	Cocido.	
		Elaboración de cerveza.	Aditivo flocculante.	Cocido.	
	Insecticidas.	Polvo p/pulgas.	Carga mineral.	Cocido.	PYL.
	Plásticos y vidrios.		Carga mineral.	Cocido.	
	Fundiciones.	Moldes.	Yeso de fundición.	Cocido.	

**Tabla 6.3.** Aplicaciones del yeso mineral (nuevo) y residual. (Continuación).

Ámbito	Campo	Aplicación	Observaciones	Procedencia del yeso empleado	
				Mineral	Residual
Otros,	Deportes.	Campos atléticos.	Demarcador sustituyente de la cal.	Cocido.	PYL; FGD.
	Varios	Talleres	Absorción de grasas.	Cocido.	PYL.
<b>Observaciones:</b> PYL: placas de yeso laminadas (de confección con yeso natural, sintético o mixtos). FGD: desulfoyeso (sintético). PG: fosfoyeso (sintético). Fe-G: <i>iron gypsum</i> (sintético).					

# INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

---

## 7.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo relata la investigación experimental llevada a cabo, conforme a los objetivos planteados. Se describen los materiales utilizados y la metodología aplicada, para concluir con la exposición de los resultados hallados y la discusión de los mismos.

## 7.2. MATERIALES

### 7.2.1. Placas de yeso laminado

Los residuos de yeso aplicado en condiciones secas (YS) consistieron en recortes y roturas de placas de yeso con cobertura de cartón recogidas de obras civiles. Estos pertenecieron a una misma marca comercial a fin de homogeneizar la calidad del material para los estudios. Normalmente estos recortes de PYL suelen tener una baja

carga contaminante de otros restos de RCD (clavos, maderas, alambres), siendo por lo general de muy fácil limpieza o separación (Figuras 7.1 y 7.2).

Según informe recibido del fabricante, las placas están compuestas por sulfato de calcio (95%), papel (4%) y aditivos (1%).



**Figura 7.1.** Yeso aplicado en condiciones secas (YS) como revestimiento de paredes y cielorrasos, mediante PYL.



**Figura 7.2.** Residuos de PYL. (Fuente: Fernández Casado, 2013).

### 7.2.2. Pastas de yeso

Los residuos de yeso de obras en las que fue aplicado en condiciones húmedas (YH), consistieron en restos de pastas para revestimientos de paredes y cielorrasos, descartados por haber fraguado o caído durante su aplicación (Figura 7.3).

Si bien el material de esta procedencia es, inevitablemente, de composición más heterogénea que el obtenido de las PYL, debido a la naturaleza artesanal de su preparación, investigaciones previas realizadas en los Laboratorios de la UTN FFRa han revelado la posibilidad de su reutilización (Begliardo et al., 2007). En aquella oportunidad el material fue recogido de un edificio en altura en su etapa constructiva, donde se lo había separado selectivamente en bolsas de polipropileno del resto de los RCD de la obra.



**Figura 7.3.** Yeso aplicado en condiciones húmedas (YH) como revestimiento de paredes y cielorrasos.

Puesto que cada colocador tiene su dosificación preferida conforme al material de base (yeso comercial) que emplee o disponga, para el desarrollo de la presente investigación el YH se lo recuperó de una misma obra en construcción (vivienda unifamiliar), a fin de acotar el rango de su heterogeneidad. El material recogido estuvo conformado por una mezcla de la pasta empleada para el revoque de primera mano (engrosado) y la del fino de acabado (enlucido). El engrosado, que siempre constituye la mayor parte del volumen total, fue preparado con una dosificación de 3 partes de yeso negro (gris) más 5 partes de yeso blanco por balde, con el añadido final del contenido de “un puño”<sup>1</sup> de cemento portland; el enlucido se compuso de 8 a 9 partes de yeso blanco por balde, más “un puñado” de cemento portland blanco,

<sup>1</sup> “Puño” o “puñado” son términos que constituyen una expresión habitual en la jerga de la construcción, representado una medida empírica equivalente al volumen que se puede contener en una mano.

para otorgarle mayor dureza al acabado. El agua de composición siempre queda sujeta a la apreciación del yesero, lo cual profundiza aún más el empirismo de este tipo de preparados.

**7.2.3. Yeso comercial (yeso patrón)**

La Norma IRAM 1607:70, conforme se ha mencionado en la sección 1.3, establece las características que deberán tener dos tipos de yesos para construcción, el llamado yeso cocido blanco o tipo A, apto para enlucidos (revoques finos), y el yeso cocido gris o tipo B, para revestimientos de primera mano (revoques gruesos).

El sello de certificación IRAM en las bolsas, sacos o envases es optativo, por lo que en el mercado argentino de yesos comerciales en polvo no todos cuentan con el mismo, lo cual no es indicativo de que estos queden excluidos de cumplir con tales requisitos de calidad. Por tal motivo, al momento de decidir cuál yeso tomar como patrón de referencia (YP), se practicó una selección previa basada en requisitos de resistencia a la compresión según el procedimiento establecido en la Norma IRAM 1608:73 (IRAM, 1973), sobre la base de dos de las marcas de mayor demanda en el mercado argentino, una certificada y la restante sin el citado sello. El YP finalmente escogido perteneció a la segunda de las mencionadas. La Tabla 7.1 presenta los resultados de los ensayos previos (promedio de cinco probetas por cada una).

**Tabla 7.1.** Selección del YP. Resistencia a la compresión según IRAM 1608:73.

Identificación	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la compresión (daN/cm <sup>2</sup> )	Clasificación IRAM <sup>(1)</sup>	Certificación IRAM	Observaciones
Yeso comercial 1	1,188	81,21	Tipo A	Sí	---
Yeso comercial 2	1,248	106,10	Tipo A	No	Adoptado como YP.

<sup>(1)</sup>Requisito de resistencia a la compresión: Tipo A ≥ 80 daN/cm<sup>2</sup>; Tipo B ≥ 50 daN/cm<sup>2</sup>.

### 7.3. METODOLOGÍA

A los trozos recuperados de placas, se los sometió a un proceso manual de separación gruesa de impurezas, tras lo cual se les extrajo la cobertura de cartón, previa inmersión en agua, para luego pasarlos a un tratamiento de secado, trituración, molienda y posterior cribado por el tamiz N° 16 (IRAM 1,18 mm), (Figuras 7.4 y 7.5). Para los yesos tipo A (IRAM, 1970) es requisito físico que el 100% del material pase a través del mismo. Tras ello, se llevó el producto a distintas temperaturas de secado de crecimiento escalonado (100, 110, 120, 130 y 140 °C).



**Figura 7.4.** Recortes de PYL limpios, sin cobertura de cartón (YS).



**Figura 7.5.** Aspecto del YS luego de pasado por el tamiz N°16.

Al material recuperado de las obras en las que el yeso se aplicó en condiciones húmedas, se le dio un tratamiento similar al de los recortes de placas, en cuanto a la separación de impurezas, secado para su trituración, molienda y posterior tamizado (Figuras 7.6 y 7.7).

Por cada temperatura de secado se elaboraron tres tipos de mezclas, tanto para las compuestas con YS como con YH. Cada una de ellas estuvo conformada por la inclusión de yeso recuperado, en un 10, 20 y 30% del peso total, en una matriz del yeso cocido blanco tomado como patrón de referencia. Las treinta mezclas que integraron el estudio, además de la del YP, se identifican en la Tabla 7.2.



**Figura 7.6.** Yeso recuperado de pastas para revestimientos (YH), limpio y triturado.



**Figura 7.7.** Aspecto del YH luego de pasado por el tamiz N°16.

**Tabla 7.2.** Mezclas de yeso estudiadas.

Designación		Composición de la mezcla	
		Residuo incorporado	Temperatura de secado
YP-0 (Yeso patrón)		0%	-
YS 10-100	YH 10-100	10%	100 ±1 °C
YS 20-100	YH 20-100	20%	
YS 30-100	YH 30-100	30%	
YS 10-110	YH 10-110	10%	110 ±1 °C
YS 20-110	YH 20-110	20%	
YS 30-110	YH 30-110	30%	
YS 10-120	YH 10-120	10%	120 ±1 °C
YS 20-120	YH 20-120	20%	
YS 30-120	YH 30-120	30%	
YS 10-130	YH 10-130	10%	130 ±1 °C
YS 20-130	YH 20-130	20%	
YS 30-130	YH 30-130	30%	
YS 10-140	YH 10-140	10%	140 ±1 °C
YS 20-140	YH 20-140	20%	
YS 30-140	YH 30-140	30%	
Referencias: YP: Yeso Patrón YH: Yeso de aplicación en condiciones húmedas YS: Yeso de aplicación en condiciones secas			

A su vez, sobre estas mezclas se efectuaron las determinaciones físico-químicas consignadas en la Tabla 7.3. Para ello se realizaron análisis tomando como base los establecidos en la norma IRAM 1608. Se determinó el contenido de agua combinada (secado en estufa a 215-230 °C), además del contenido de calcio (método complejométrico) y de sulfato (método gravimétrico), precisando para cada caso la fase de sulfato de calcio presente (anhidrita, hemihidrato o dihidrato). La caracterización se completó con los ensayos de finura, consistencia normal y tiempos de fraguado inicial y final conforme a la metodología indicada en la norma citada.

**Tabla 7.3.** Determinaciones físico-químicas sobre las mezclas (Norma IRAM 1608:73).

Unidades Observacionales (U.O.)	Variables relevantes	Indicadores
U.O.1: Muestras de yeso recuperado, secado a diferentes temperaturas escalonadas, crecientes (100 a 140 °C.)	Agua combinada.	Contenido de agua por secado de la muestra a 215-230 °C /masa de la muestra (%).
	Sulfato de calcio hemihidratado + sulfato de calcio anhidro.	[CaSO <sub>4</sub> ·½H <sub>2</sub> O+ CaSO <sub>4</sub> ]/masa de la muestra (%).
U.O.2: Muestras de yeso comercial (yeso patrón). U.O.3: Muestras de mezcla de yeso comercial con recuperado (yeso patrón + X% yeso recuperado secado a diferentes temperaturas).	Finura.	Material pasante por cada tamiz (%).
	Consistencia normal.	Agua para obtener pasta de consistencia normal/masa yeso seco (%).
	Tiempos de fraguado inicial y final.	Lectura de aguja de Vicat (minutos).

Por cada una de las mezclas se confeccionaron cinco probetas cúbicas (70,7 mm de lado), para su ensayo a compresión simple según la norma IRAM 1608; tres probetas prismáticas (40x40x160 mm), para su ensayo a flexo-compresión conforme a la norma chilena NCh 144.Of1999 (INN, 1999b), con medición de la deflexión para la determinación indirecta del módulo de Young y, finalmente, seis probetas cilíndricas de 46,2 mm de diámetro por 92,4 mm de altura (relación 1:2). De estas últimas, tres para ser ensayadas a tracción por compresión diametral y el resto a compresión simple, aplicándose un procedimiento interno del laboratorio con el objeto de obtener

correlaciones tracción/compresión, por carecerse de este tipo de datos para el yeso en la literatura.

Dado la numerosa cantidad de mezclas estudiadas, se elaboró el número mínimo de probetas establecido en las correspondientes normas, con el objetivo de realizar estudios exploratorios para determinar tendencias. La Figura 7.8 ilustra parte del total confeccionado.



**Figura 7.8.** Muestra de probetas confeccionadas.

Las probetas de cada mezcla fueron elaboradas con la relación en peso agua/yeso obtenida de la correspondiente determinación de la pasta de consistencia normal (IRAM 1608:73). Luego de ser desmoldadas se curaron en cámara húmeda por 72 horas (Figura 7.9).



**Figura 7.9.** Curado de probetas en cámara húmeda.

Tras el curado se secaron en horno a  $45^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  hasta obtener masa constante ( $\pm 0,1\%$ ), (Figura 7.10).



**Figura 7.10.** Secado de las probetas a  $45^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Con posterioridad a ello, se les realizaron los ensayos físicos anteriormente mencionados, los cuales se reseñan en la Tabla 7.4.

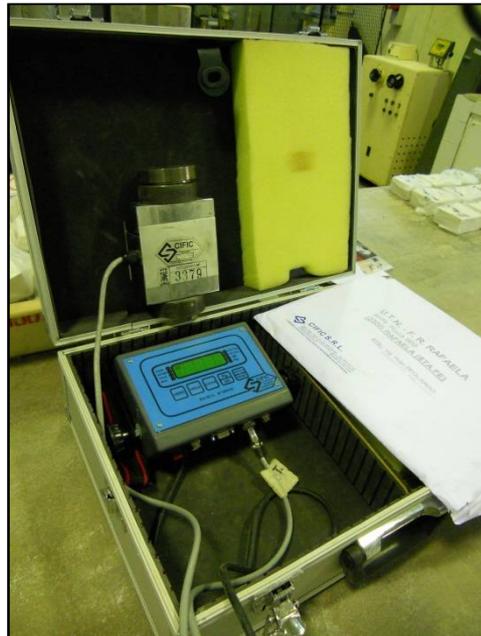
**Tabla 7.4.** Ensayos físicos sobre las probetas.

Unidades Observacionales (U.O.)	VARIABLES RELEVANTES	INDICADORES
<b>U.O.4:</b> Probetas cúbicas (70,7 mm de lado )	Densidad aparente del yeso seco, en condiciones de ensayo.	( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
	Resistencia a compresión simple ( $R_c$ ).	Lectura de la prensa ( $\text{daN}/\text{cm}^2$ ).
<b>U.O.5:</b> Probetas cilíndricas (46,2 mm diámetro x 92,4 mm altura).	Densidad aparente del yeso seco, en condiciones de ensayo.	( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
	Resistencia a compresión simple ( $R_c$ ).	Lectura de la prensa ( $\text{daN}/\text{cm}^2$ ).
	Resistencia a tracción por compresión diametral.	Lectura de la prensa ( $\text{daN}/\text{cm}^2$ ).
<b>U.O.6:</b> Probetas prismáticas (40x40x160 mm)	Densidad aparente del yeso seco, en condiciones de ensayo.	( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

**Tabla 7.4.** Ensayos físicos sobre las probetas. (Cont.).

Unidades Observacionales (U.O.)	VARIABLES relevantes	Indicadores
U.O.6: Probetas prismáticas (40x40x160 mm).	Resistencia a flexión (F).	Lectura de la prensa F (daN/cm <sup>2</sup> ).
	Flecha (f).	Lectura del comparador f (mm).
	Módulo de Young (E) indirecto.	E (MPa).
	Resistencia a compresión simple (Rc) sobre fracciones del ensayo a flexión.	Lectura de la prensa (daN/cm <sup>2</sup> ).

Para la realización de los ensayos de las probetas a compresión y flexión se adaptó un pórtico para ensayos triaxiales de suelos. La medición de las cargas aplicadas se realizó mediante un dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf (precisión: 0,5 kgf) acoplado al mismo (Figura 7.11).

**Figura 7.11.** Dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf.

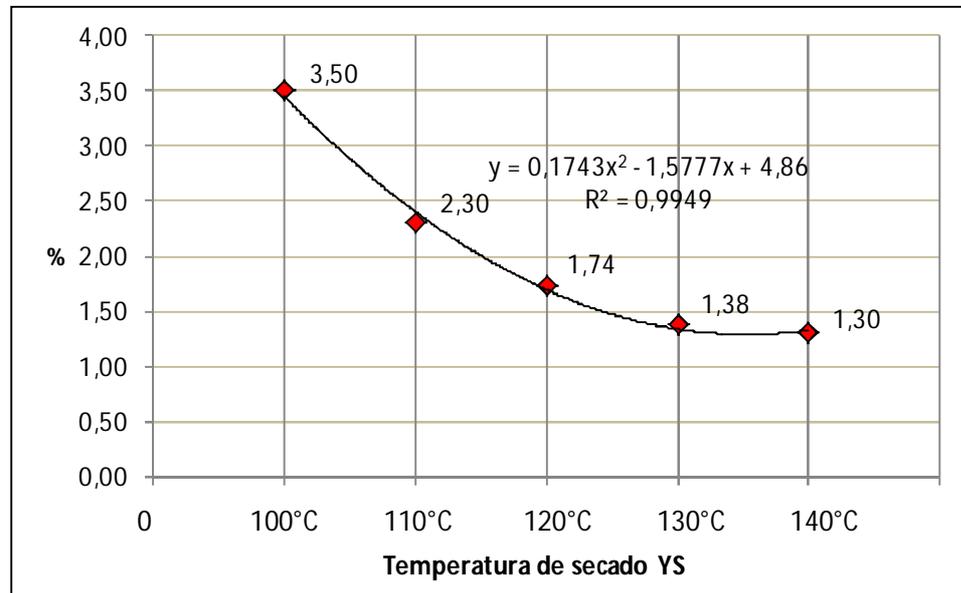
Se obtuvo la densidad aparente de cada probeta como la razón entre su masa desecada y el volumen; la porosidad fue valuada como el cociente entre el volumen de poros, determinado a partir de la diferencia entre el peso de la muestra al quitarla de la cámara de curado y su peso en condiciones secas, y el volumen aparente (Borrelli, 1999).

El módulo de elasticidad se determinó a partir del registro de la flecha de las probetas prismáticas en el ensayo de flexo-tracción (Guillén Viñas, 2005), empleándose para tal fin un comparador digital SCHWYZ (1/1000 mm).

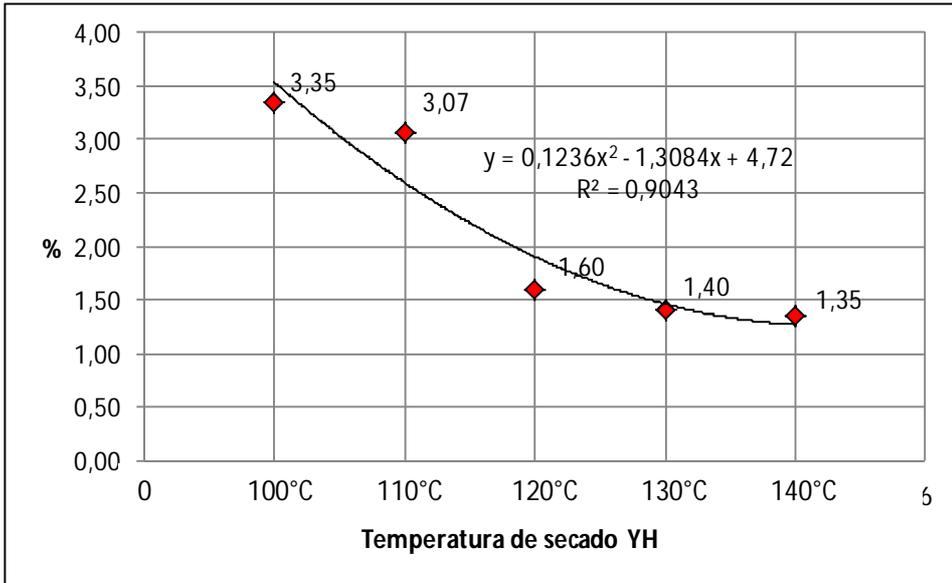
## 7.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.4.1. Análisis físico-químicos

El agua combinada de los residuos, molidos y cocidos a 100, 110, 120, 130 y 140 °C, disminuyó en la medida que la temperatura de secado se fue incrementando, conforme se ilustra en las Figuras 7.12 y 7.13.

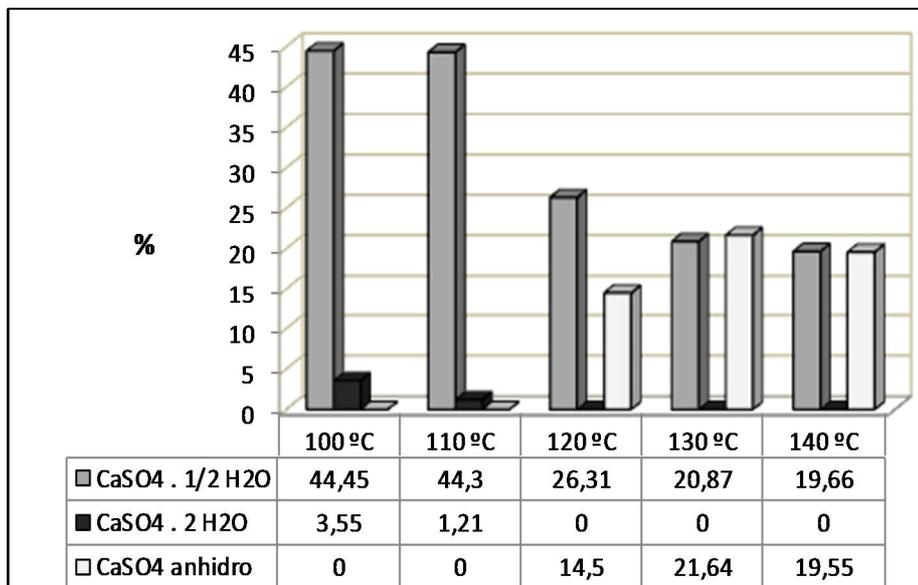


**Figura 7.12.** Agua combinada en residuos YS secados a diferentes temperaturas.

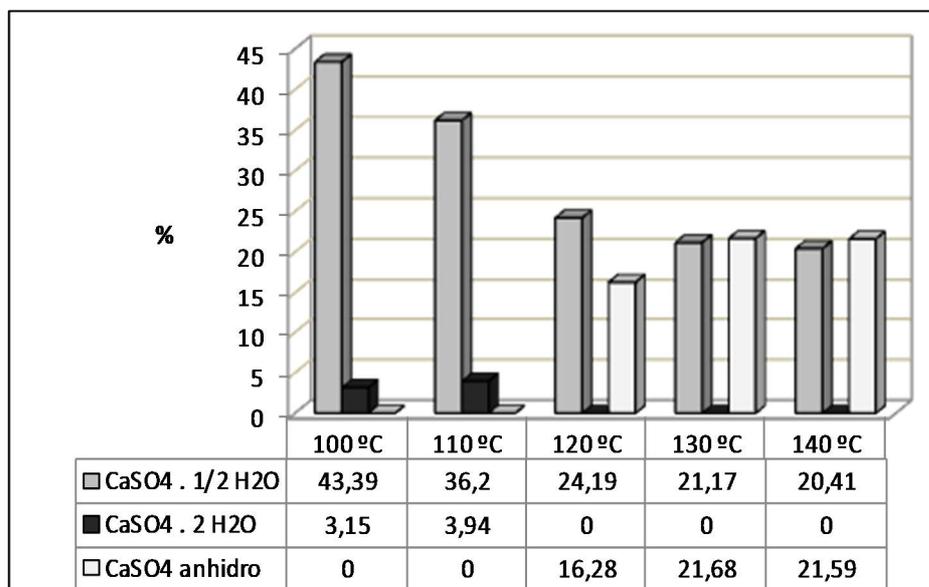


**Figura 7.13.** Agua combinada en residuos YH secados a diferentes temperaturas.

En la determinación del contenido de sulfato de calcio se halló que, en aquellos residuos secados a 100 y 110 °C, el mayor porcentaje del mismo se encontraba como hemihidrato, y un pequeño porcentaje como dihidrato; en los que fueron secados a 120, 130 y 140 °C, no se encontró dihidrato, en tanto que se presentaron moléculas de sulfato de calcio anhidro (Figuras 7.14 y 7.15).



**Figura 7.14.** Contenido de los diferentes sulfatos de calcio en residuos YS secados a distintas temperaturas.



**Figura 7.15.** Contenido de los diferentes sulfatos de calcio en residuos YH secados a distintas temperaturas.

Como se observa en ellas, en general los contenidos de sulfato de calcio en las muestras correspondientes a los YS, han sido levemente superiores en relación a las de YH. Se destaca, asimismo, que no se apreciaron diferencias significativas en el contenido de agua combinada y en las especies de sulfato de calcio encontradas en los residuos de ambos tipos de yesos, secados a 130 y 140 °C.

El yeso utilizado como matriz ha sido provisto por el fabricante con un tenor de pureza de contenido mínimo del 85% de  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  y del 8% de  $\text{CaSO}_4$  anhidro. En función de los resultados hallados en las determinaciones practicadas sobre los YS y YH, en las Tablas 7.5 y 7.6 se presenta el encuadre de las diferentes mezclas a lo requerido por las normas de ambos países. Los análisis químicos se efectuaron según la normativa argentina, según se indicó en la sección 7.2.

Conforme se observa en ellas, han quedado asegurados los requisitos químicos establecidos por la norma IRAM 1607 para yesos tipo A en todas las mezclas con hasta un 20% de residuo; las restantes se ubicaron dentro de lo exigido para yesos tipo B. Las evaluaciones de ajustes a la NCh143 presentaron notoria similitud.

**Tabla 7.5.** Requisitos químicos. Mezclas con YS.

Requisito:	IRAM 1607:70		NCh143.Of1999	
	CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O + CaSO <sub>4</sub>		CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O	
	Tipo A	Tipo B	Verifica	No verifica
	≥ 80%	≥ 60%	≥ 73%	< 73%
<b>YP-0</b>	mín.93%	-	mín.85%	-
YS 10-100	88%	-	81%	-
YS 20-100	83%	-	77%	-
YS 30-100	-	78%	73%	-
YS 10-110	88%	-	81%	-
YS 20-110	83%	-	77%	-
YS 30-110	-	78%	73%	-
YS 10-120	88%	-	79%	-
YS 20-120	83%	-	73%	-
YS 30-120	-	77%	-	67%
YS 10-130	88%	-	79%	-
YS 20-130	83%	-	-	72%
YS 30-130	-	78%	-	66%
YS 10-140	88%	-	78%	-
YS 20-140	82%	-	-	72%
YS 30-140	-	77%	-	65%

**Tabla 7.6.** Requisitos químicos. Mezclas con YH.

Requisito:	IRAM 1607:70		NCh143.Of1999	
	CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O + CaSO <sub>4</sub>		CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O	
	Tipo A	Tipo B	Verifica	No verifica
	≥ 80%	≥ 60%	≥ 73%	< 73%
<b>YP-0</b>	mín.93%	-	mín.85%	-
YH 10-100	88%	-	81%	-
YH 20-100	83%	-	77%	-
YH 30-100	-	78%	73%	-
YH 10-110	87%	-	80%	-
YH 20-110	82%	-	75%	-
YH 30-110	-	76%	-	70%
YH 10-120	88%	-	79%	-

**Tabla 7.6.** Requisitos químicos. Mezclas con YH. (Cont.).

Requisito:	IRAM 1607:70		NCh143.Of1999	
	CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O + CaSO <sub>4</sub>		CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O	
	Tipo A	Tipo B	Verifica	No verifica
	≥ 80%	≥ 60%	≥ 73%	< 73%
YH 20-120	82%	-	73%	-
YH 30-120	-	77%		67%
YH 10-130	88%	-	79%	-
YS 20-130	83%	-	-	72%
YH 30-130	-	78%	-	66%
YH 10-140	88%	-	79%	-
YH 20-140	83%	-	-	72%
YH 30-140	-	78%	-	66%

#### 7.4.2. Finura

El yeso comercial empleado cumplió con los requisitos de finura del yeso cocido de construcción tipo A dispuestos en la norma IRAM 1607, con un pasante del 100% por los tamices n° 16 y 30, y del 85% por el tamiz n° 100. Asimismo, tras efectuarse el tamizado húmedo conforme al procedimiento indicado en la norma IRAM 1608, el yeso recuperado procedente de PYL y de pastas para revestimientos, también satisfizo los requisitos establecidos para los yesos tipo A (Tabla 7.7). Todo ello garantizó que las mezclas estudiadas (Tabla 7.2) también quedarán encuadradas en dicha categoría.

**Tabla 7.7.** Requisitos de finura. Material pasante (%).

Requisitos (IRAM 1607:70)	Tipo A		Tipo B		Yeso comercial YP	Yeso recuperado	
	Mín	Máx	Mín	Máx		YS	YH
Material que pasa a través del tamiz IRAM 1,2 mm (N° 16).	100	-	93	-	100	100	100
Material que pasa a través del tamiz IRAM 0,6 mm (N° 30).	95	-	85	-	100	99,6	99,7
Material que pasa a través del tamiz IRAM 0,15 mm (N° 100).	70	-	45	-	85	98,1	91,1

### 7.4.3. Tiempos de fraguado

Los tiempos de inicio y final de fraguado de todas las mezclas, tanto las de YS como las de YH, incluyendo al YP, quedaron comprendidos dentro del rango 7 y 21 minutos, por lo que se ajustaron a lo requerido para los yesos tipo A en Norma IRAM 1607 y en la Norma NCh143. La Tabla 7.8 resume sus exigencias.

**Tabla 7.8.** Tiempos de fraguado (minutos)

Tiempo de fraguado	IRAM 1607:70		NCh 143.Of1999
	Tipo A	Tipo B	
Inicio	$\geq 3$	$\geq 3$	7 a 35
Fin	$\leq 25$	$\leq 35$	

### 7.4.4. Pasta de Consistencia Normal. Relaciones agua/yeso (a/y)

La norma IRAM 1608 establece que las probetas destinadas al ensayo de compresión deben ser elaboradas con la relación a/y necesaria para obtener una pasta de consistencia normal, la cual queda determinada cuando se obtienen, en las condiciones de ensayo,  $30 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de penetración de la sonda de Tetmajer instalada sobre el Aparato de Vicat modificado. La relación a/y es un factor de influencia decisiva en las características y propiedades que, finalmente, habrá de tener el yeso endurecido, tales como su densidad aparente, su porosidad y resistencia mecánica (Tesárek, Hájková y Plachý, 2011).

En el proceso físico y químico que experimenta la pasta de yeso a partir de su amasado, se pueden distinguir tres fases que se van sucediendo (ATEDY, 2006):

- a) La *disolución* de las partículas del yeso en el agua, tomando la pasta una consistencia líquida que va pasando progresivamente a viscosa.
- b) El *fraguado*, proceso con el que comienzan las reacciones de hidratación y se va formando la malla cristalizada, adquiriendo la pasta una consistencia plástica con aumento de volumen y temperatura. Durante unos minutos el material se puede trabajar con facilidad, período que se denomina “tiempo de empleo”.

c) La última fase es el *endurecimiento*, lo que acontece cuando el material adquiere consistencia sólida. Ello marca el fin del fraguado y del tiempo de empleo. Durante el endurecimiento desciende la temperatura del yeso y comienza a perder el agua que no necesitó para las reacciones de hidratación, hasta alcanzar la denominada “humedad de equilibrio”.

El agua químicamente necesaria para las reacciones de hidratación responde a una relación a/y en peso del orden de 0,20<sup>1</sup>. Sin embargo, según la clase de yeso (tradicionales o sin aditivar; especiales y de proyección o aditivados) suele emplearse una cantidad de 2,5 a 5 veces mayor a la que se necesita para lograr dichas reacciones, fundamentalmente para compensar las pérdidas por evaporación y absorción del sustrato o soporte (ATEDY, 2006).

Generalmente el agua que se adiciona en obra está gobernada por el parecer del yesero, como se indicó en la sección 7.1.2. Si bien el fabricante de yeso comercial suele recomendar una dosificación para obtener la consistencia adecuada para su aplicación, es común que el yesero lo trabaje “a saturación”, lo cual consiste en llenar con agua un recipiente y espolvorear sobre ella el yeso hasta que el mismo quede saciado y deje de humedecerse. En todos los casos, el exceso de agua que no intervendrá en las reacciones, al evaporarse genera una microestructura porosa en la masa, por lo que la densidad del yeso rehidratado desciende a valores del orden del 40 al 50% de los 2,3 g/cm<sup>3</sup> de la roca de yeso (Tabla 4.2). La mayor porosidad le aporta al material mejoras en la aislación acústica y resistencia al fuego; como contrapartida, disminuyen la resistencia mecánica y la dureza.

La relación encontrada en el laboratorio para la pasta de consistencia normal del yeso de referencia, en peso, fue del 57,50%. En tanto, el rango de lo determinado para las mezclas con YS quedó comprendido entre el 59,50 y el 67,50%, y el de las de YH entre el 60,75 y el 69,50%.

En las Figuras 7.16 y 7.17 se presentan los resultados hallados. En ellas se han destacado los valores extremos y, como se puede observar, la demanda de agua ha sido creciente con el aumento del porcentaje de yeso recuperado. Tanto para las

---

<sup>1</sup> Teóricamente, el agua necesaria para el fraguado es igual al 18,6% en peso del yeso en polvo (González Madariaga, 2005).

mezclas con YS como para aquellas con YH, la variación en función del incremento de la temperatura ha sido pequeña, presentando relaciones comprendidas en el entorno del 1,5 al 2% para mezclas con el 10 y 30% de yeso recuperado. En el caso de las mezclas con el agregado del 20% de yeso residual, dicho rango fue del 0,5% para mezclas con YH y del 3,25% para aquellas con YS. Los desvíos apreciados en algunas tendencias pueden deberse a que las bolsas de yeso comercial empleadas como matriz procedieron de diferentes partidas.

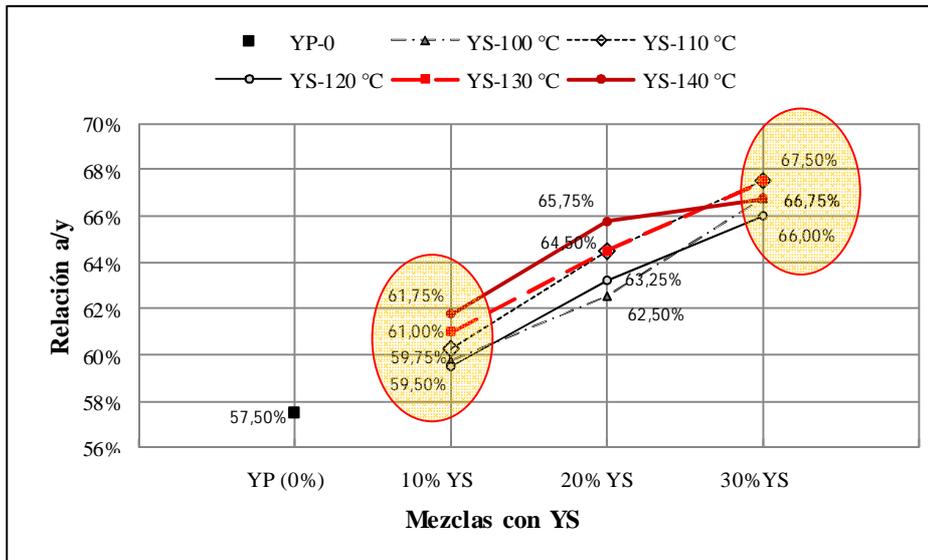


Figura 7.16. Relaciones a/y para mezclas con YS.

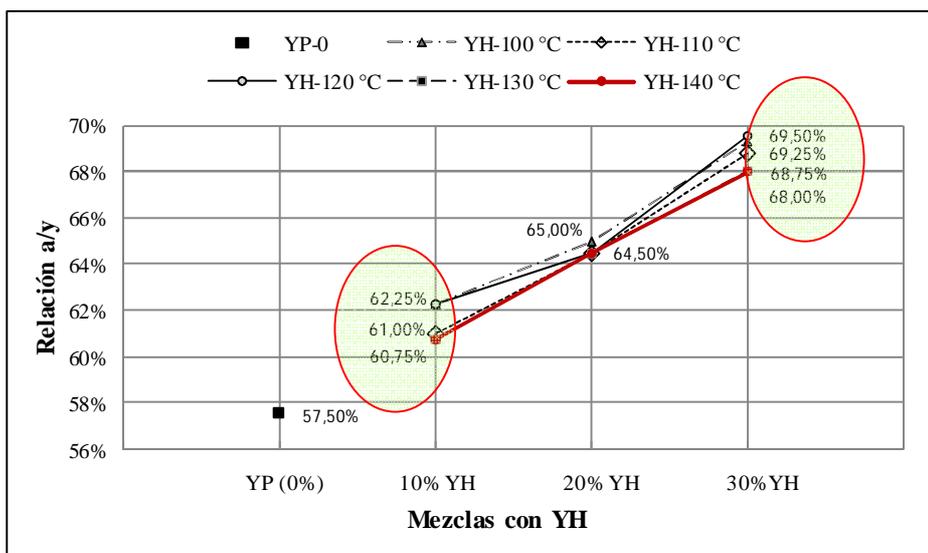
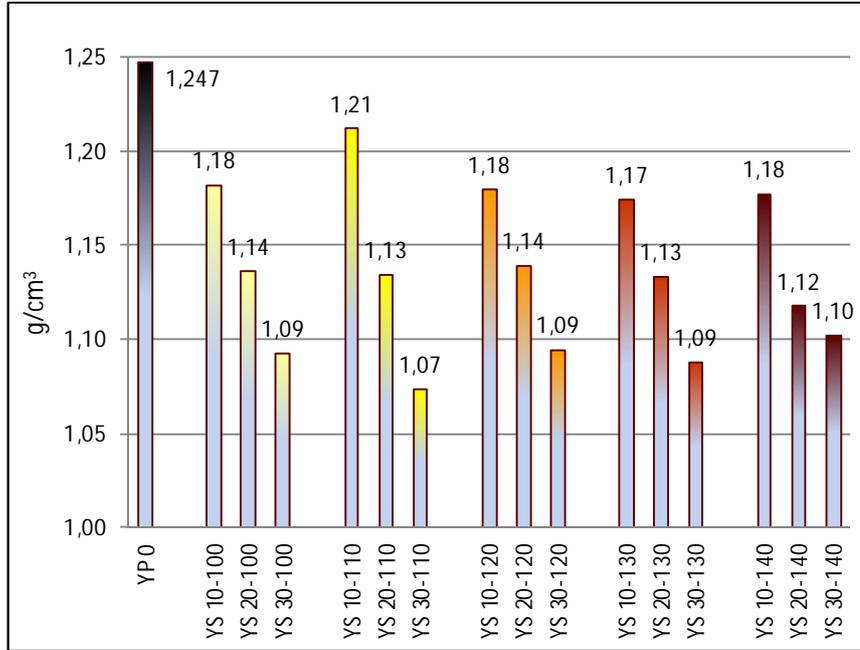


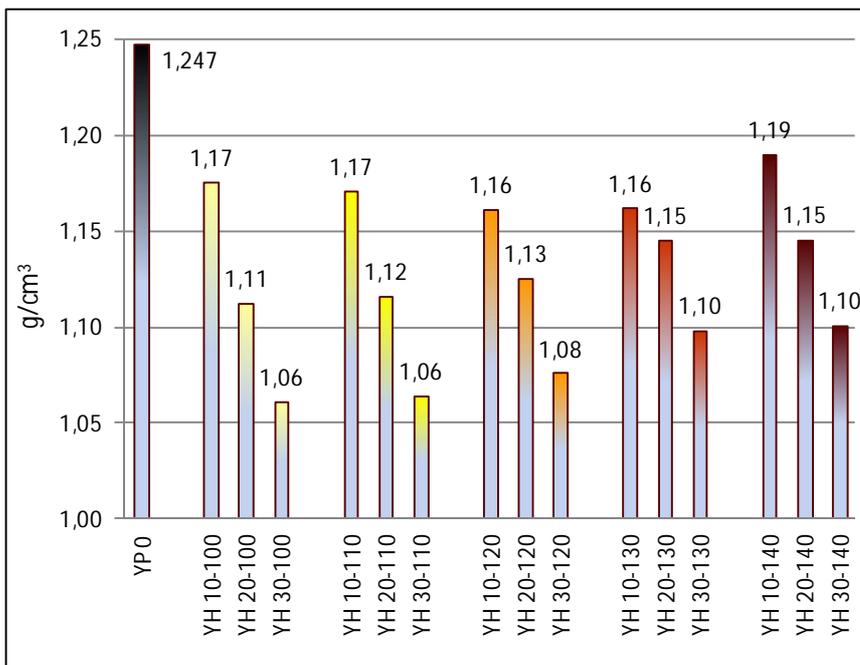
Figura 7.17. Relaciones a/y para mezclas con YH.

**7.4.5. Densidad aparente. Porosidad**

Las densidades promedio de las diferentes mezclas estudiadas fueron menores a las del YP-0 (1,25 g/cm<sup>3</sup>), y tendieron a decrecer con el incremento del yeso reciclado (Figuras 7.18 y 7.19).



**Figura 7.18.** Densidad promedio para mezclas con YS.



**Figura 7.19.** Densidad promedio para mezclas con YH.

Como se deduce de los gráficos, en ninguno de los casos se observan variaciones sustanciales de las densidades con el incremento de la temperatura de secado, en el rango de temperaturas estudiado.

Las mermas en las densidades fueron acompañadas por el aumento de la porosidad promedio de las correspondientes mezclas, la cual fue del 37% para el YP-0, y se encuadró en el entorno del 38 al 42% para las de YS y del 39 al 46% para las de YH.

Las Figuras 7.20 y 7.21 comparan las relaciones agua/yeso, las densidades y porosidades de las mezclas con YS y YH, respectivamente. Sus valores representan el promedio de lo hallado para los diferentes tipos de probetas confeccionadas (cúbicas, prismáticas y cilíndricas). En ellas se aprecia cómo el incremento del agua necesaria para el logro de una pasta de consistencia normal, condujo a una disminución de la compacidad por aumento de la porosidad en ambos tipos de mezclas.

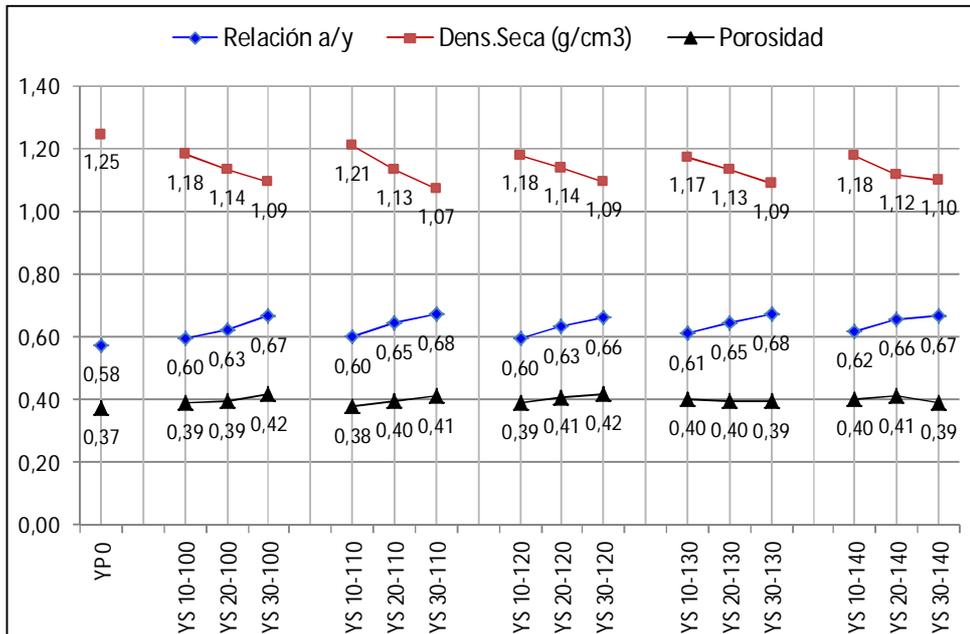
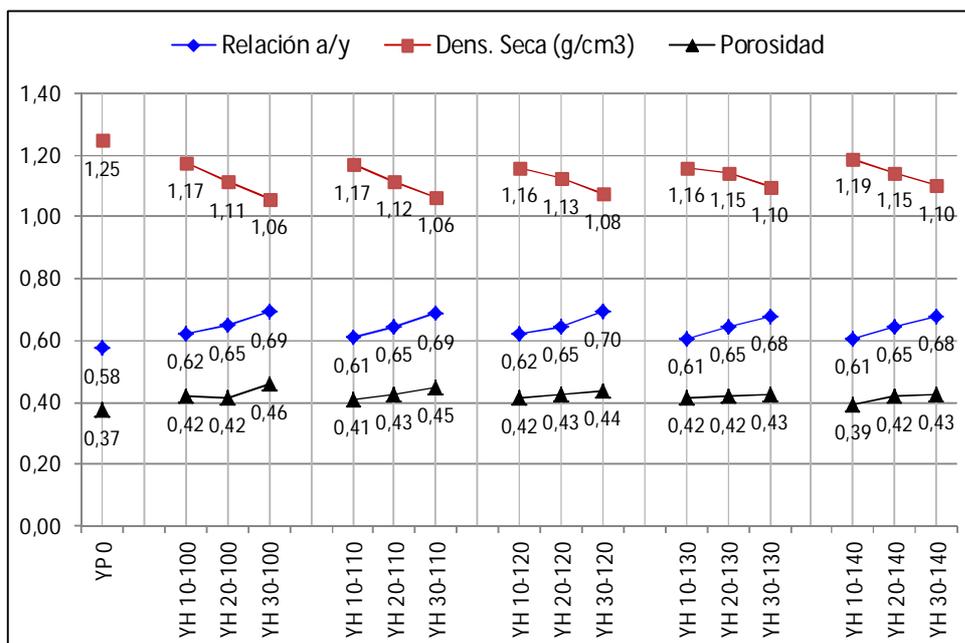


Figura 7.20. Relaciones a/y-Densidad-Porosidad para mezclas con YS.



**Figura 7.21.** Relaciones a/y-Densidad-Porosidad para mezclas con YH.

González Madariaga (2005) compara en su tesis doctoral las densidades aparentes informadas por diversos autores para yesos de construcción, preparadas con distintas relaciones agua/yeso (Tabla 7.9). En la última columna de dicha tabla se agregaron las obtenidas en la presente investigación, tanto para el YP como para sus combinaciones con diferentes porcentajes de yeso reciclado. Como se puede observar, los resultados hallados en este trabajo guardan notoria correspondencia con los valores notificados.

Dicho autor menciona que los valores de densidades surgidos de sus experimentaciones difieren entre el 6 y el 16% de las de los otros investigadores, sin omitir destacar la diferencia existente entre los datos de estos mismos. Manifiesta que ello pudo deberse a las variadas razones que se citan: al proceso de fabricación; al empleo de materiales comerciales adquiridos al por menor; a los posibles errores durante la fabricación y manipulación de las muestras; a las características de la piedra de origen y a la mezcla particular de semihidratos e hidratos del yeso empleado en cada caso (al respecto indica que, normalmente, se estila informar de modo genérico que se emplearon “yesos de construcción”, sin ofrecerse mayores detalles).

Asimismo, señala que en España la oferta de yesos comerciales para la construcción es amplia y de variados tipos, y que cada una de ellas tiene diversas formulaciones

que no están disponibles al público. Finalmente menciona que, aunque ha buscado utilizar materiales simples, cualquier aditivo o agregado en ellos puede producir una variación en los resultados.

**Tabla 7.9.** Comparación de las densidades aparentes de diferentes yesos de construcción, según diferentes autores (g/cm<sup>3</sup>). (Fuente: adaptada de González Madariaga, 2005).

Relación a/y (en peso)	C.S.T.B (1)	Blancher (2)	Sastre (3)	Arredondo (4)	Villanueva (5)	Gonzalez Madariaga (6)	Begliardo (7)
0,6	1,15	1,20	-	1,30	1,10	1,19	1,25 (YP)
							1,17-1,21 (YS)
							1,16-1,19 (YH)
0,7	-	-	-	-	-	1,07-1,10 (YS)	
						1,06-1,10 (YH)	
0,8	1,00	1,00	1,25	1,02	1,00	1,16-1,17	-
1,2				0,79	0,75	0,87-0,91	-

(1) Datos tomados del S.N.F.I.P. *Chaiers Techniques*. París 1973-1974. De Villanueva L. *Documentación técnica de las propiedades del yeso*. Madrid, 1975, p. 6.  
(2) Blanchere L. (1967) *Construir*. Barcelona. De Villanueva L. op. cit. p. 6.  
(3) Sastre, R. (2000). *Propietats dels materials i elements de construcció*. Barcelona: Edicions UPC, p. 21.  
(4) Arredondo, F. (1991). *Yesos y cales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos. p. 30.  
(5) De Villanueva, L.; García, A. (2001). *Manual del yeso*. Madrid: ATEDY. p. 65.  
(6) González Madariaga (2005). Tesis doctoral.  
(7) Corresponden a la presente investigación. Las relaciones a/y se redondearon a un dígito.

Las argumentaciones dadas por dicho investigador son plenamente extrapolables a la presente investigación, por cuanto la realidad argentina de los yesos de construcción no difiere sustancialmente de la presentada para los yesos españoles. Si bien no existe tan amplia oferta de yeso comercial, las formulaciones no están disponibles al público y las diferentes partidas no están exentas de presentar distinto

comportamiento. Del mismo modo, tampoco se está libre de errores al fabricar y manipular las probetas, aun cuando se procuren tomar los resguardos debidos.

A modo de conclusión, González Madariaga (2005, p.360) pone énfasis en destacar que “la poca información disponible acerca de la densidad de los materiales endurecidos de yeso (...), sugieren que esta propiedad no representa un interés mayor para la industria dadas las aplicaciones usuales de los conglomerantes”.

#### **7.4.6. Resistencia a la compresión (IRAM 1607)**

La Figura 7.22 ilustra sobre el ensayo de probetas cúbicas a la compresión, ajustado a los procedimientos de la Norma IRAM 1608, en tanto que las Figuras 7.23 y 7.24 presentan los valores de resistencias a la compresión de las mezclas con YS y YH, respectivamente.



**Figura 7.22.** Cubos. Ensayo de resistencia a la compresión

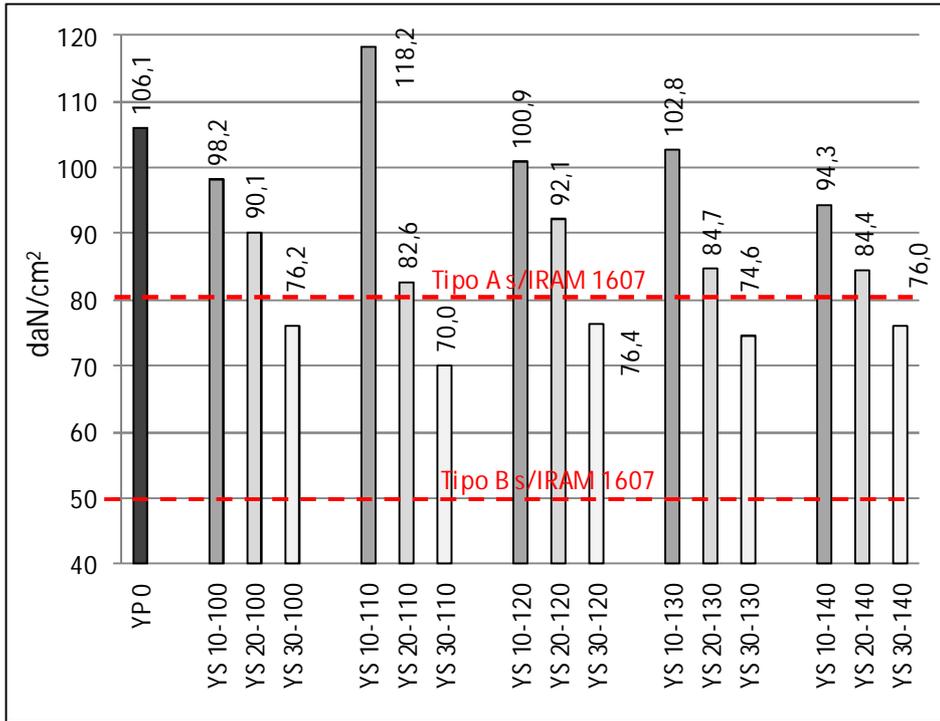


Figura 7.23. Cubos (YS). Resistencia a la compresión.

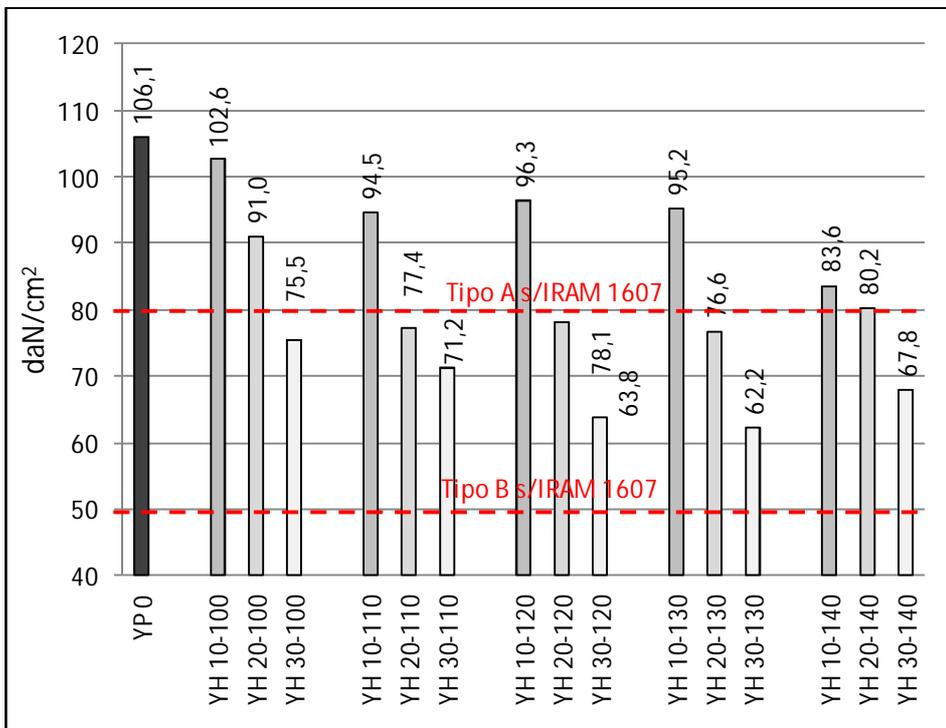


Figura 7.24. Cubos (YH). Resistencia a la compresión.

En el caso de las mezclas con YS, aquellas con hasta el 20% de yeso reciclado han superado las exigencias de la norma IRAM 1607 establecidas para yesos blancos, tipo A ( $\geq 80$  daN/cm<sup>2</sup>). Las que tuvieron una inclusión del 30% presentaron resistencias menores, quedando encuadradas en la categoría de yesos grises, tipo B ( $\geq 50$  daN/cm<sup>2</sup>).

En cuanto a las mezclas con YH, sólo aquellas con el agregado de un 10% de reciclado superaron lo requerido para los yesos tipo A; el resto, con el 20% y el 30% de material recuperado, quedaron incluidas en la categoría de yesos tipo B. En general, las menores resistencias alcanzadas por estas últimas mezclas, comparadas con sus homólogas de YS, tiene su explicación en la mayor cantidad de impurezas con las que están compuestas, dada su elaboración artesanal.

Las mermas registradas en las resistencias, al pasar la composición de las mezclas del 10 al 30% de reciclado, han sido significativas. Al igual que lo señalado en el apartado 7.4.4., en relación a las densidades, no se observaron tendencias definidas en cuanto al aumento o disminución de las resistencias con el incremento de la temperatura en el rango de secado analizado.

No se han hallado publicaciones relativas a las resistencias cúbicas a la compresión, procedente de investigaciones realizadas con yesos comerciales nacionales. El único aporte, y muy limitado, lo proveen las hojas o informes técnicos de algunas marcas. La Tabla 7.10 presenta los valores para cuatro yesos conocidos del mercado, agregándole lo obtenido para dos de ellos en nuestros laboratorios, como resultados de ensayos realizados con motivo de la presente tesis.

**Tabla 7.10.** Resistencia a la compresión simple de yesos nacionales. Comparación con ensayos propios.

Yeso comercial ensayado	Resistencia a la compresión (daN/cm <sup>2</sup> )	Fuente de la información
Marca 1 <sup>(1)</sup>	114,0	Hoja técnica del fabricante (s.f.).
	<b>106,1</b>	Ensayos del autor (Agosto/2012).
	110	Informe interno comparativo del fabricante de Marca 2 (Julio/1997).

**Tabla 7.10.** Resistencia a la compresión simple de yesos nacionales. Comparación con ensayos propios. (Continuación).

Yeso comercial ensayado	Resistencia a la compresión (daN/cm <sup>2</sup> )	Fuente de la información
<b>Marca 2</b>	85-88	Hoja técnica del fabricante (s.f.).
	<b>81,2</b>	Ensayos del autor (Agosto/2012).
<b>Marca 3</b>	101,6	Hoja técnica del fabricante (s.f.).
<b>Marca 4</b>	98	Informe interno comparativo del fabricante de Marca 2 (Julio/1997).
<sup>(1)</sup> Adoptado como YP.		

**7.4.7. Resistencia a la flexión y compresión (NCh143)**

Los prismas se ensayaron a la flexión y compresión conforme a la norma chilena de ensayos físicos para yesos calcinados NCh144.Of1999 (INN, 1999b). Los requisitos de aceptación están establecidos en la norma NCh143, ya citada. Este ensayo no está contemplado en la norma argentina IRAM 1607 de yeso cocido para revoques (Figura 7.25).



**Figura 7.25.** Prisma. Ensayo a la flexión.

La NCh144 establece resistencias mínimas de 35 kgf/cm<sup>2</sup> para la flexión y de 130 kgf/cm<sup>2</sup> para la compresión. Este último valor es elevado si se lo compara, de modo particular, con lo requerido en la norma europea para yesos de construcción EN 13279-1:2008 (European Committee for Standardization [CEN], 2008). La Tabla 7.11 resume sobre lo dispuesto para este ensayo en dicha norma y las de algunos países latinoamericanos.

**Tabla 7.11.** Requisito de resistencia a la compresión según diferentes normas extranjeras.

Norma	Designación del yeso	Resistencia a la compresión		Dimensiones de las probetas
Norma Europea EN 13279-1:2008	Gypsum building plaster (B1)	≥ 2,0 N/mm <sup>2</sup> (≅ 20 kgf/cm <sup>2</sup> )		40x40x160 mm <sup>(1)</sup> (prismáticas)
Norma Oficial Chilena NCh143.Of1999	Yeso calcinado	≥ 130 kgf/cm <sup>2</sup>		40x40x160 mm <sup>(1)</sup> (prismáticas)
Norma Brasileira NBR 13207:1994 <sup>(2)</sup>	Yeso para construcción civil	> 8,4 MPa (≅ 84 kgf/cm <sup>2</sup> )		50x50x50 mm (cúbicas)
Norma Venezolana COVENIN 3638:2000 <sup>(3)</sup>	Yeso de construcción	≥ 10.342 kPa (1500 lb/pulg <sup>2</sup> ) (≅105 kgf/cm <sup>2</sup> )		2x2x2 in (50,8x50,8x50,8 mm) (cúbicas)
Norma Argentina IRAM 1607:70	Yeso cocido para revoques	Tipo A	Tipo B	70,7x70,7x70,7 mm (cúbicas)
		≥ 80 daN/cm <sup>2</sup>	≥ 50 daN/cm <sup>2</sup>	
		(1 daN/cm <sup>2</sup> ≅ 1 kgf/cm <sup>2</sup> )		
<sup>(1)</sup> El ensayo a compresión se practica sobre el par de trozos remanente del ensayo a flexión. <sup>(2)</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994). <sup>(3)</sup> Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad (2000).				

El ensayo a la flexión para las diferentes mezclas aseguró el cumplimiento de la resistencia normada para el YP y para aquellas con contenido de hasta el 10% de yeso reciclado, tanto para las de YS como YH, así como la exclusión de todas

aquellas con el 30% de residuo incorporado. Sólo algunas mezclas con el 20% de residuo superaron lo requerido (Figuras 7.26 y 7.27).

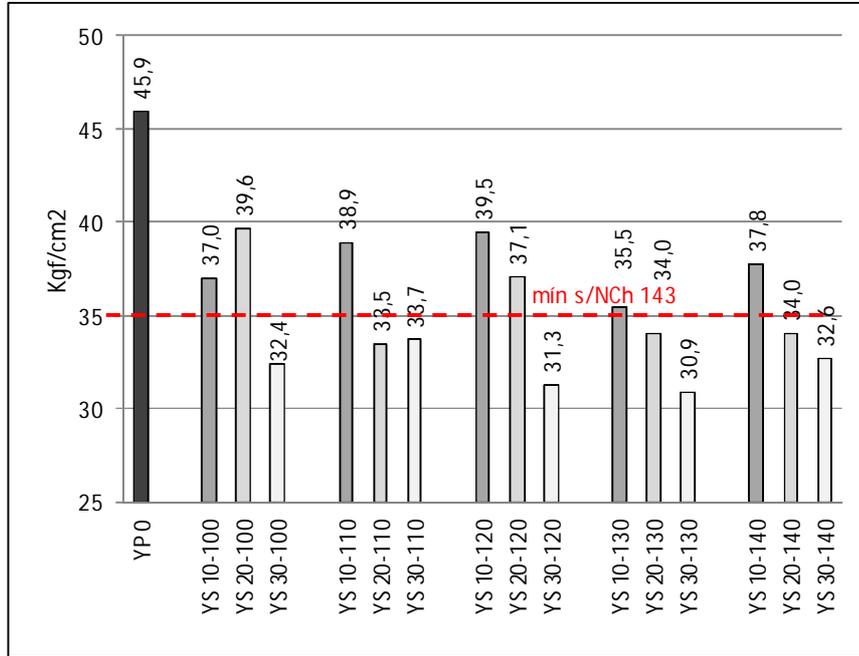


Figura 7.26. Prismas (YS). Resistencia a la flexión.

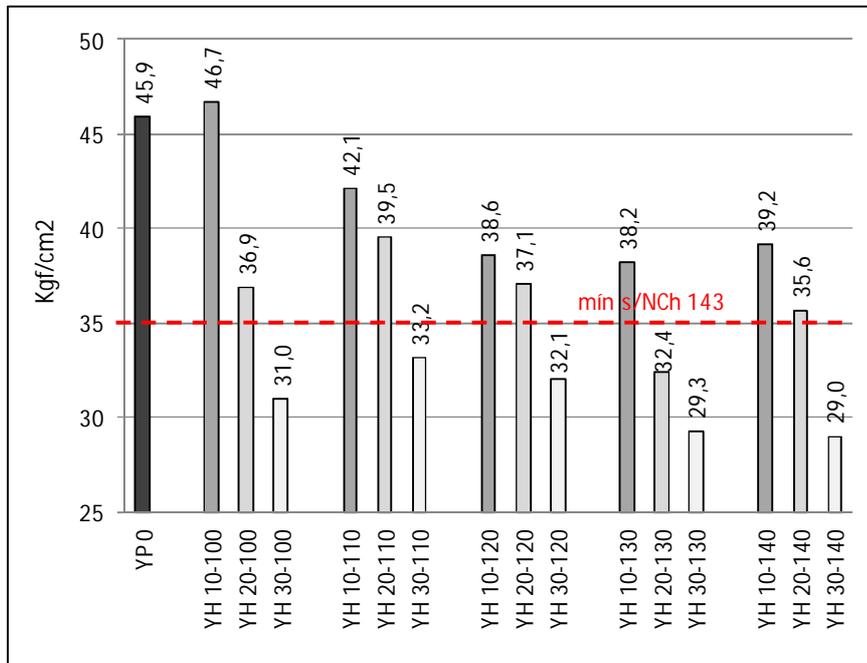
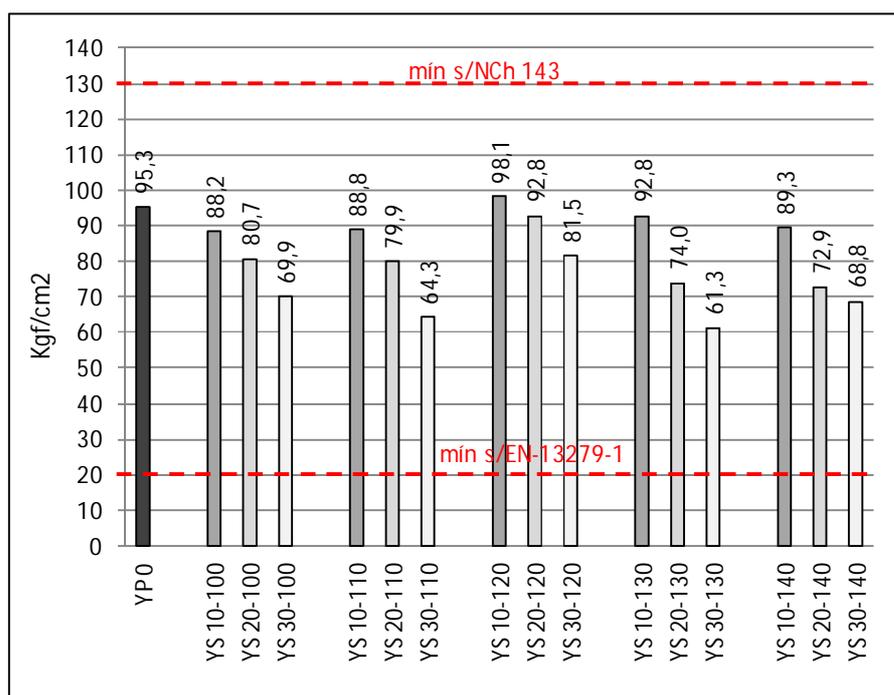


Figura 7.27. Prismas (YH). Resistencia a la flexión.

Como se observa en los gráficos, algunos valores no siguen el patrón esperado de disminución de la resistencia en función del incremento del residuo. No puede afirmarse que, tanto ellos como los picos o depresiones registrados, se correspondan con datos anómalos; más bien deben atribuirse al limitado número de piezas ensayadas, conforme se mencionó en la sección 7.3. El aumento del número de series de ensayos permitiría regularizar este aspecto.

Las Figuras 7.28 y 7.29 presentan los resultados de los ensayos a la compresión. Se observa que los valores alcanzados han estado por debajo de lo exigido por la norma NCh143, aún para las muestras de YP. Sin embargo, todas las mezclas cumplen con la menos exigente norma europea EN 13279-1. La observación realizada sobre los resultados de los ensayos a la flexión, en cuanto a las aparentes anomalías detectadas, es extensiva a este caso.



**Figura 7.28.** Prismas (YS). Resistencia a la compresión.

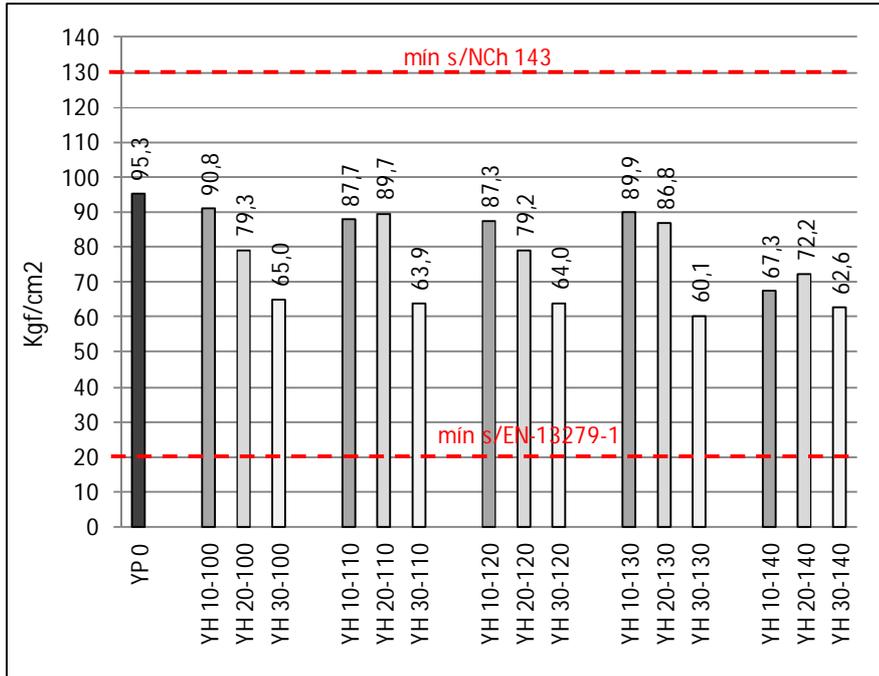


Figura 7.29. Prismas (YH). Resistencia a la compresión.

#### 7.4.8. Módulo de elasticidad (E)

El ensayo para determinar el módulo de elasticidad del yeso cocido para revocos no está normalizado en nuestro país. A su vez, es escasa la información que se puede encontrar en la bibliografía sobre mediciones del módulo de este material, y menos aún en su condición de reciclado. El objeto de su determinación ha sido hallar uno de los parámetros necesarios para llevar a cabo investigaciones con modelización numérica del yeso.

Serna et al. (2012) han informado un módulo de 824 MPa para un yeso de construcción cuyas probetas (40x40x160 mm) fueron elaboradas con una relación a/y de valor 0,7. Se trató de un yeso comercial identificado como B1, según la norma UNE-EN 13279-1 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2009). Esta clase de material exige un contenido mínimo del 50% de sulfato de calcio en su composición. La norma contempla la incorporación en fábrica de aditivos y agregados, lo que la investigación citada no precisa.

Hájková et al. (2011) informaron haber registrado un módulo promedio de 3.800 MPa para un yeso reciclado procedente de FGD, con una relación a/y que debió llevarse de 0,627, sugerida por las normas checas, a 1,020 debido a las condiciones

de ensayo en laboratorio. En este caso, se destacó la pureza del yeso, con un contenido de 98 % de sulfato de calcio.

La Tabla 7.12 presenta los resultados promedios hallados para las mezclas con yesos YS y YH estudiados en esta investigación, conforme a los diferentes porcentajes de residuo agregado. Los valores obtenidos indican claramente que, en este caso, se ha tratado de yesos de bajo módulo, de comparárselos con lo informado por los autores antes mencionados. No obstante, debe tenerse presente que la información es meramente ilustrativa sobre los distintos valores que se pueden alcanzar, por cuanto se están comparando yesos de composición, relación a/y y procedencias diferentes.

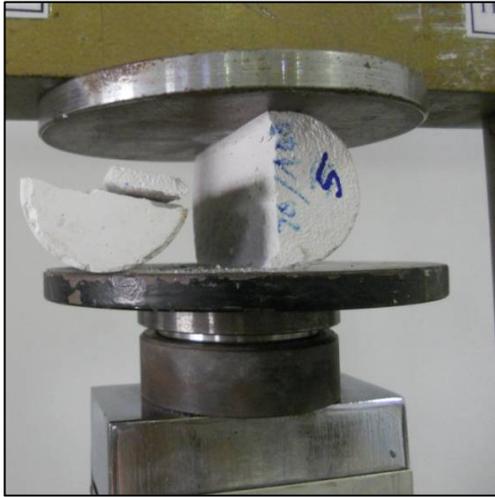
**Tabla 7.12.** Módulo de elasticidad.

E (MPa)			
Residuo (%)	YP	YS	YH
0%	230	-	-
10%	-	220	291
20%	-	230	231
30%	-	191	208

#### 7.4.9. Cilindros

El ensayo de tracción por compresión diametral sobre probetas cilíndricas no está normalizado para yesos, por lo que se siguió un procedimiento interno del laboratorio similar al aplicado a probetas de hormigón, pero sin la inclusión de tablillas de reparto de carga en las dos generatrices. Se adoptó para ello una velocidad de carga comprendida entre 13 kgf/s y 33 kgf/s (Figura 7.30). En el ensayo de compresión simple, que tampoco se encuentra normalizado, la velocidad aplicada se mantuvo entre 33 kgf/s y 100 kgf/s (Figura 7.31).

La Tabla 7.13 presenta los valores promedio hallados de tracción por compresión diametral/compresión simple para el YP y las mezclas, comparándolos con registros similares obtenidos para otras mezclas con yeso y otros dos materiales de construcción, el hormigón y el suelo-cemento fluido, estos últimos ensayados a la edad de 28 días.



**Figura 7.30.** Cilindro ensayado a la tracción por compresión diametral.



**Figura 7.31.** Cilindros. Ensayo de compresión simple.

Los resultados de ensayos efectuados sobre probetas de yeso que no son parte de lo investigado para esta tesis, corresponden a estudios complementarios realizados sobre un YP con certificación IRAM y mezclas con YH y YS, a los que se les incorporó bórax al agua de amasado (1,4% en peso). El agregado de bórax como aditivo retardador provocó un descenso en las densidades secas, aumento de la porosidad y disminución de las resistencias mecánicas (Begliardo et al. 2012a; 2012b). En tal sentido, y en lo que al yeso se refiere, los valores de la tabla revelan que dicha relación se incrementa con la disminución de las densidades.

**Tabla 7.13.** Relación tracción por compresión diametral/compresión simple.

Yeso			Hormigón [28 días] <sup>(4)</sup>	Suelo-cemento fluido [28 días] <sup>(5)</sup>
Yeso Patrón (YP)	Mezclas YS	Mezclas YH		
13,5%	17,7%	14,4%	9-10%	20-25%
14,9% <sup>(1,2,3)</sup>	19,4% <sup>(1,2)</sup>	18,8% <sup>(1,3)</sup>		
<sup>(1)</sup> Probetas moldeadas con la incorporación de bórax al agua de amasado (1,4% en peso); el yeso patrón fue blanco tipo A, con certificación IRAM. <sup>(2)</sup> Begliardo et al. (2012a). <sup>(3)</sup> Begliardo et al. (2012b). <sup>(4)</sup> Tonda, Begliardo y Panigatti (2008). <sup>(5)</sup> Sánchez et al. (2011).				

## CONCLUSIONES

---

### 8.1. INTRODUCCIÓN

La investigación realizada ha tenido por objetivo general determinar las condiciones para las cuales el yeso recuperado de obras de construcción y/o demolición, podría ser reutilizado en construcciones civiles. Para ello se partió de la hipótesis que sostiene que tales residuos de yeso, adecuadamente tratados mediante limpieza de sus impurezas, trituración, molienda y calentamiento a temperaturas controladas para provocar la pérdida del agua de rehidratación, pueden ser adicionados en distintos porcentajes al yeso comercial en polvo para su reutilización en la construcción, con iguales aplicaciones a las de origen.

Para el logro del mencionado objetivo general, se trabajó sobre los siguientes objetivos específicos, ya mencionados en la sección 1.5, y que se reproducen seguidamente:

- a) Determinar el rango de temperaturas de secado que permiten recobrar las propiedades conglomerantes del yeso recuperado.
- b) Determinar el rango de porcentajes en que puede agregarse yeso recuperado al yeso comercial, sin que la pasta obtenida pierda las condiciones de aceptación exigidas por la norma argentina IRAM 1607:70.
- c) Determinar las relaciones óptimas de temperaturas de secado - porcentaje de yeso recuperado a adicionar al yeso comercial, recomendables para las diferentes aplicaciones de la pasta.

De manera complementaria, la investigación también incluyó la evaluación del encuadre de dichas mezclas a lo requerido por la norma chilena NCh 143.Of.1999 sobre yesos calcinados.

## **8.2. CONCLUSIONES**

Tras las pruebas experimentales realizadas, se arribó a las siguientes conclusiones:

En relación al objetivo a):

- La incorporación al yeso comercial, blanco cocido para construcción, de residuos de yeso recuperados de placas laminadas (YS), o descartes de aplicaciones en condiciones húmedas (YH), sometidos a un proceso de molienda y secado de 100 a 140 °C, en porcentajes de hasta el 30% en peso, permite obtener mezclas que conservan sus propiedades conglomerantes, con tiempos de inicio y final de fraguado enmarcados dentro de los requisitos de norma IRAM 1607:70 para yesos tipo A, y los de norma NCh 143.Of.1999 para yesos calcinados.

En relación al objetivo b):

- Todas las mezclas estudiadas, compuestas por residuos de YS o YH incorporados hasta en un 30% en peso, satisficieron los requisitos de finura del yeso cocido de construcción tipo A prescritos en la norma IRAM 1607:70.
- Las mezclas con hasta un 20% de residuo, tanto de YS como YH, cumplieron con los requisitos químicos establecidos por la norma IRAM 1607 para los yesos tipo A; aquellas con la inclusión del 30% se ubicaron dentro de lo exigido para los

yesos tipo B. El ajuste a las exigencias de NCh143 guarda notoria similitud para con los yesos tipo A, en aquellas que verifican, y con los yesos tipo B para los que no lo hacen.

- Las resistencias a la compresión de las probetas de las mezclas con hasta un 20% de yeso recuperado de aplicaciones en condiciones secas, elaboradas y ensayadas conforme a la norma argentina IRAM 1608:73, superaron las exigencias de la norma IRAM 1607:70 establecidas para yesos blancos tipo A, aptos para revoques finos. En el caso de las mezclas elaboradas con yeso recuperado de aplicaciones en condiciones húmedas, el cumplimiento de dicho requisito sólo quedó asegurado para el agregado de un 10% de reciclado. El resto de las mezclas que no quedaron encuadradas en esta categoría, han satisfecho con amplitud lo requerido para la de los yesos grises tipo B, aptos para revoques gruesos.
- En general, las resistencias alcanzadas por mezclas con yeso recogido de aplicaciones en condiciones húmedas, han sido menores que las de sus homólogos elaboradas con la incorporación de residuos de placas, debiéndose ello a su mayor contenido de impurezas.
- En todos los casos, se observaron caídas en las resistencias con el incremento del porcentaje de yeso reciclado en las mezclas.
- La norma argentina para ensayos de yeso cocido para revoques, vigente desde principios de la década de 1970, difiere sustancialmente de la chilena para yesos calcinados utilizada para comparación en el estudio complementario realizado, en lo que hace al tipo de probetas, ensayos físicos y requisitos de resistencia, entre otros aspectos. Por los pisos de resistencia más elevados requeridos por esta última, sólo el yeso patrón y las mezclas con hasta el 10% de yeso reciclado cumplieron con la resistencia mínima a la flexión, en tanto que ninguna satisfizo la de compresión.

En relación al objetivo c):

- Siendo el requisito de resistencia un factor determinante para las normas, no se detectaron tendencias sustanciales, en cuanto al aumento o disminución de las resistencias, con el incremento de la temperatura de secado de los residuos

incorporados a las diferentes mezclas analizadas, dentro del rango de 100 a 140 °C estudiado.

A lo mencionado precedentemente, corresponde agregar:

- En este trabajo se han obtenido valores que relacionan la tracción por compresión diametral con la compresión simple del yeso comercial y las diferentes mezclas, configurando un aporte novedoso por carecerse de estos datos en la literatura. Asimismo, se han provistos registros del módulo de elasticidad, determinados tanto para el yeso de referencia como para las diferentes mezclas, según el porcentaje de residuo agregado.
- La investigación ha cubierto un amplio abanico de mezclas pero que, en todos los casos y por su extensión, se limitó a un estudio exploratorio conformado por el número mínimo de ensayos normalizados, con el objeto de hallar indicios de la aptitud de los residuos para su reaprovechamiento. Ello explica la presencia de resultados, aparentemente anómalos, en los que las resistencias de algunas mezclas han sido comparables, o incluso han superado, a las del yeso patrón.
- Los estudios realizados señalan un camino posible para reciclar de modo racional los residuos de yeso de obras civiles, aplicados tanto en condiciones húmedas como secas, con el objeto de volver a ser utilizados con su fin original de yeso en polvo para construcción. Su recuperación conduce al beneficio medioambiental de preservación de un recurso natural no renovable (roca de yeso), valorizándolo. A dicho impacto positivo se debe sumar el hecho de evitar que tales residuos sean dispuestos de manera incontrolada en Rellenos Sanitarios o vertederos, por cuanto pueden tener lugar la contaminación del lecho freático y la generación de gases tóxicos, entre otros efectos adversos. Todos estos aspectos se alinean con la legislación vigente en algunas provincias argentinas y Directivas de países desarrollados, sobre preservación de recursos naturales y de “basura cero”.

### **8.3. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

Los estudios realizados han abierto un claro panorama sobre la factibilidad de reaprovechamiento y valorización de los residuos de yeso, basados en la hipótesis de trabajo que se sustentó en esta tesis. Sin embargo, tras la conclusión de los mismos,

se han presentado nuevos interrogantes e inquietudes que sugieren las siguientes futuras investigaciones o líneas de trabajo:

- Incremento de las series de ensayos, a fin de obtener el número suficiente de resultados tal que permita el tratamiento estadístico descriptivo de los mismos, y obtener conclusiones con un margen de confianza de reducida incertidumbre.
- Aumento del rango de temperatura de secado del yeso recuperado.
- Estudio de la variación de las propiedades mecánicas de las mezclas de yeso en función del grado de molienda del yeso residual (finura granulométrica).
- Obtención de parámetros que faciliten la modelización numérica del material.
- Revisión de las normas nacionales. Elaborar propuestas de actualización y ajuste a tendencias internacionales.
- Ampliación de los estudios sobre probetas cilíndricas, determinar su correlación con las probetas cúbicas y evaluar la factibilidad de sustitución de éstas, o bien la de su complementación.
- Ampliación de los estudios a otras marcas comerciales de yesos argentinos, para ser utilizados como patrón de comparación.



# A

## GLOSARIO

---

Se incluye un glosario con algunos de los términos empleados en el cuerpo del trabajo que, por lo específicos, se juzgó necesario incorporar para facilitar su rápida consulta y comprensión. En ciertos vocablos la explicación fue ampliada, citándose la fuente en la que se basó.

### **Aditivos:**

Son productos que se añaden en fábrica y que modifican las propiedades de los yesos *conglomerantes*, principalmente dilatando o acortando el tiempo de fraguado. Es decir, son retardantes o acelerantes del mismo. Los primeros son los más utilizados (Gomá, 1979, p.37).

En la actualidad, es habitual que los yesos producidos industrialmente sean aditivados. Además de los indicados, también es común el empleo de espesantes, plastificantes, aireantes, defloculantes (Sanz Aráuz, 2009, p.90). También es común el agregado de cal de construcción (-5%). Otros productos que también se añaden

son cargas, fibras y pigmentos (ATEDY, 2006, p.63).

**Aglomerante:**

Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico. Son materiales aglomerantes el betún, el barro, la cola (Del diccionario de la RAE).

Véase la diferencia con *conglomerante*.

**Aljez:**

También recibe el nombre de *yeso mineral*, *piedra de yeso*, *yeso crudo*, *roca de yeso* o *yeso natural*.

El aljez es una roca de origen sedimentario de precipitación química, constituida por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio. Muy abundante en la naturaleza, se formó por evaporación del agua de mar en las eras secundaria y terciaria. Está constituido principalmente por sulfato de calcio con dos moléculas de agua ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), por lo que se denomina *sulfato de calcio dihidrato* o, simplemente, *dihidrato*. (ATEDY, 2006, pp.5-6; Guillén Viñas, 2005, p.6).

**Anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ):**

En el llamado *ciclo tecnológico del yeso* se obtienen tres fases deshidratadas del sulfato de calcio: *anhidrita III*, *anhidrita II* y *anhidrita I*. En la naturaleza la fase existente es *anhidrita II*.

**Anhidrita I ( $\text{CaSO}_4$ ):**

Fase del sulfato de calcio anhidro que sólo es estable a temperaturas superiores a 1.180 °C. No presenta interés dentro de la industria del yeso (Wirsching, 1996). También se la conoce como *anhidrita de alta temperatura*.

**Anhidrita II ( $\text{CaSO}_4$ ):**

Fase del sulfato de calcio muy estable. También se la conoce como *anhidrita insoluble*. No fragua si no se le agregan catalizadores o acelerantes a la reacción.

Se han descrito tres formas de la misma: AII-s (anhidrita ligeramente soluble); AII-u (anhidrita totalmente insoluble) y AII-E (anhidrita parcialmente disociada).

**Anhidrita III ( $\text{CaSO}_4$ ):**

Es sulfato cálcico anhidro que presenta gran avidez por el agua, pasando rápidamente

a hemihidrato, por lo que se trata de una fase inestable. También se la conoce como *anhidrita soluble*.

Se han descrito tres formas alotrópicas: AIII $\beta$  (anhidrita III beta), AIII' $\beta$  (anhidrita III prima beta) y AIII $\alpha$  (anhidrita III alfa). Desde el punto de vista industrial presenta poco interés (ATEDY, 2006).

**Anhidrita de alta temperatura:**

Nombre con el que también se conoce a la *anhidrita I*.

**Anhidrita insoluble:**

Nombre con el que también se conoce a la *anhidrita II*.

**Anhidrita natural (CaSO<sub>4</sub>):**

Fase deshidratada en que se encuentra el sulfato de calcio en la naturaleza.

Véase *anhidrita II*.

**Anhidrita soluble:**

Nombre con el que también se conoce a la *anhidrita III*.

**Basanita:**

Es sulfato de calcio hemihidratado (CaSO<sub>4</sub> · ½ H<sub>2</sub>O).

Como mineral natural es muy raro hallarlo en la naturaleza. Habitualmente aparece como un producto de la alteración de otros minerales (San Arauz, 2009, p.75).

**Ciclo del sulfato de calcio:**

Proceso de deshidratación-hidratación del yeso, en el que quedan implicados todos los procesos de transformación y cambios de fase del yeso industrial. Es llamado *ciclo tecnológico del yeso* por Sanz Arauz (2009), para diferenciarlo del *ciclo geológico del yeso*.

**Ciclo geológico del yeso:**

Fenómenos geológicos de diagénesis (transformaciones durante la compactación de los sedimentos) e hipergénesis (transformaciones y alteraciones tras la exhumación de las rocas), que relacionan entre sí a las fases minerales *yeso*, *basanita* y *anhidrita*. (Sanz Arauz, 2009, p.44).

**Ciclo tecnológico del yeso:**

Véase *ciclo del sulfato de calcio*.

**Conglomerante:**

Material capaz de unir fragmentos de una o varios materiales y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que originan nuevos compuestos (Diccionario de la RAE).

Los conglomerantes más utilizados son el yeso, la cal y el cemento, y se los aplica como medio de ligazón al combinárselos con agua, formando pastas que endurecen mediante un proceso de fraguado.

Véase la diferencia con *aglomerantes*.

**Deconstruir:**

Proceso de desmantelamiento de una construcción sin provocar daños a las partes, tratando de recuperar con integridad los componentes originales.

**Demoler:**

Proceso mediante el cual se deshace una construcción, dañando o arruinando los componentes originales.

**Desulfoyeso:**

Yeso  *sintético*  obtenido a partir de la desulfuración de gases de combustibles de origen orgánico (antracita, carbón bituminoso, aceites), especialmente de centrales eléctricas. Este subproducto industrial también es conocido como FGD o DGS.

**DGS (Desulphurisation Gypsum):**

Véase *desulfoyeso*.

**Dihidrato:**

Sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

**Doble hidrato:**

Véase *dihidrato*.

**Drywall:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Engrosado:**

Véase *revoque grueso*.

**Enlucido:**

Véase *revoque fino*.

**FeG (Iron Gypsum):**

Yeso  *sintético* obtenido a partir de la producción de pigmentos de óxido de titanio (Varjo et al., 2003).

**FGD (Flue Gas Desulphurisation):**

Véase *desulfoyeso*.

**Fosfoyeso:**

Yeso  *sintético* obtenido a partir de la producción de ácido fosfórico.

**Hemihidrato (Ca.SO<sub>4</sub>. ½H<sub>2</sub>O):**

Yeso que ha perdido 1,5 moléculas de agua por calcinación del sulfato de calcio dihidratado.

**Mortero:**

Mezcla conformada por arena, un  *conglomerante* (yeso, cal, cemento) o combinación de estos, agua y, eventualmente, aditivos y/o adiciones.

**Mortero de yeso:**

Mortero a base de yeso como  *conglomerante*.

**Pasta:**

Producto obtenido al mezclar un  *conglomerante* con agua (ATEDY, 2006, p.66). Las pastas adoptan el nombre del conglomerante (p.ej.  *pasta de yeso*); cuando se mezclan dos o más conglomerantes se denominan “pastas mixtas”.

**Pasta de consistencia normal:**

Pasta de yeso en la cual la sonda de Tejmayer penetra 30 mm +/- 2mm (IRAM 1607:70).

**Pasta de yeso:**

Producto resultante de la mezcla homogénea de yeso cocido y agua, con o sin retardador, que se usa en estado fluido (IRAM 1607:70). En este trabajo se lo debe

interpretar como sinónimo de “*yeso aplicado en condiciones húmedas*”.

**PG (Phosphogypsum):**

Véase *fosfoyeso*.

**Piedra de yeso:** véase *Aljez*.

**Placa de cartón-yeso:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Placa de yeso:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Placa de yeso laminado (PYL):**

Placa prefabricada a base de yeso, habitualmente utilizada como revestimiento.

En este trabajo se debe tomar como sinónimos de PYL a los siguientes productos industriales: *placas de cartón-yeso*, *placas de yeso*, *tableros de yeso*, *drywall*, *wallboard* o *plasterboard* y, por extensión, al concepto “*yeso aplicado en condiciones secas*”, de frecuente empleo dentro del cuerpo de la tesis.

**Plaster:**

Nombre con el que se designa en el mercado de habla inglesa al yeso calcinado en polvo que combinado con agua conforma una pasta apta para revestimiento de paredes y cielorrasos. También se lo conoce como *gypsum plaster* o *plaster of Paris*, para diferenciarlo de otras combinaciones del vocablo, *lime plaster* y *cement plaster*, cuando se refieren a la cal y al cemento, respectivamente.

**Rehidrato:**

Véase *yeso rehidratado*.

**Plasterboard:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Retardador:**

Aditivo que se incorpora al yeso cocido con el fin de postergar la iniciación y/o alargar la duración del proceso de fraguado (IRAM 1607:70).

**Revestimiento:**

Cobertura de protección o acabado de paredes y cielorrasos, elaborada con materiales a base de *conglomerantes* aplicados en condiciones húmedas, o bien con materiales prefabricados aplicados en condiciones secas.

**Revoque fino:**

Revestimiento de acabado de paredes y cielorrasos, realizado habitualmente con *pastas* de yeso, o *morteros* de éste, cemento o cal, o sus combinaciones. También se lo llama *enlucido*.

**Revoque grueso:**

Revestimiento de primera mano aplicado a paredes y cielorrasos, realizado habitualmente con *pastas* de yeso, o *morteros* de éste, cemento o cal, o sus combinaciones. También se lo llama *jaharro* o *engrosado*.

**Roca de yeso:**

Véase *aljez*.

**Semihidrato:**

Véase *hemihidrato*.

**Sistema sulfato cálcico-agua:**

Nombre con que se conoce en la literatura científica al conjunto de compuestos químicos procedentes de la deshidratación del yeso y a todos sus polimorfos (Sanz Arauz, p.66).

**Tablero de yeso:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Wallboard:**

Véase *placa de yeso laminado*.

**Tiempo de fraguado inicial:**

Lapso transcurrido desde que se agrega el yeso al agua hasta el momento que comienza el fraguado de la pasta, en condiciones de ensayo normalizadas.

**Tiempo de fraguado final:**

Lapso transcurrido desde que se agrega el yeso al agua hasta el momento que se

completa el fraguado de la pasta, en condiciones de ensayo normalizadas.

**Yeso:**

Se designa de este modo tanto al mineral en su estado natural, conocido como *yeso natural, piedra de yeso o aljez*, cuya fórmula es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( sulfato de calcio dihidratado), como al producto industrial en polvo (conglomerante) obtenido a partir de él (*yeso cocido o basanita*), cuya fórmula es  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  ( sulfato de calcio hemihidratado). (Rubio Domene, 2006, p.60; ATEDY, 2006, pp.5, 66).

**Yeso agrícola:**

Recibe este nombre el mineral sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) utilizado en agricultura como fertilizante azufrado y corrector de suelos sódicos (Ponce y Torres Duggam, 2005, p.438).

**Yeso aplicado en condiciones húmedas:**

Véase *pasta de yeso*.

**Yeso aplicado en condiciones secas:**

Véase *placa de yeso laminada (PYL)*.

**Yeso blanco:**

Yeso de cocido de construcción especial para enlucidos o acabados, catalogado como tipo A en norma IRAM 1607:70.

**Yeso cocido:**

Constituido principalmente por sulfato de calcio hemihidratado; es obtenido por deshidratación parcial mediante adecuada cocción de la piedra de yeso natural (IRAM 1607:70).

**Yeso calcinado:**

Véase *yeso cocido*.

**Yeso comercial:**

En este trabajo se lo debe entender como yeso en polvo para construcción, comercializado en forma minorista o al menudeo en bolsas o sacos de papel o rafia, de 30-40 kg.

**Yeso crudo:**

Yeso de cantera que aún no ha sido sometido a calcinación para su procesamiento industrial.

Véase *Aljez*.

**Yeso de construcción:**

Producto pulverulento procedente de la cocción de la piedra de yeso o aljez, que una vez mezclado con agua en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en el aire. (ATEDY, 2006, p.6).

**Yeso de referencia:**

Véase *yeso patrón*.

**Yeso desulfo:**

Véase *desulfoyeso*.

**Yeso endurecido:**

Véase *yeso rehidratado*.

**Yeso gris:**

Yeso de cocido de construcción indicado para primera mano o revoques gruesos, catalogado como tipo B en norma IRAM 1607:70. También recibe el nombre de *yeso negro*.

Se lo obtiene de aquellas piedras descartadas para la obtención de yeso blanco, las cuales se trituran junto a las escorias y subproductos de la combustión (Villanueva, 2004, p.5).

**Yeso hemihidratado:**

Véase *hemihidrato*.

**Yeso hidráulico:**

Véase *yeso de pavimento*.

**Yeso industrial:**

Es el producto industrial en polvo, conglomerante, obtenido a partir de la calcinación de la piedra de yeso a partir de protocolos de fabricación controlados. (Villanueva,

2004; Sanz Aráuz, 2009, p.32)

**Yeso mineral:**

Véase *aljez*.

**Yeso natural:**

Véase *aljez*.

**Yeso negro:**

Véase *yeso gris*.

**Yeso patrón:**

Yeso comercial en polvo, blanco de construcción, utilizado como referencia o patrón de comparación.

**Yeso químico:**

Véase *yeso sintético*.

**Yeso rehidratado:**

*Yeso endurecido* luego de haberse rehidratado el *hemihidrato* ( $\text{Ca}\cdot\text{SO}_4\cdot\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ). El sistema sulfato cálcico-agua vuelve a formarse como fase estable. (Sanz Arauz 2009, p.67).

**Yeso residual:**

Residuo de yeso procedente de demoliciones, de procesos deconstructivos o de fábricas de yeso cocido.

Por extensión, en este trabajo también se entiende como residual al yeso sintético obtenido como subproducto de ciertos procesos industriales.

**Yeso sintético:**

Yeso obtenido como subproducto de procesos industriales, entre ellos por desulfuración de gases de plantas de generación de electricidad (FGD).

Véase también *desulfoyeso*, *FGD*, *PG*, *FeG*.

**Yeso subproducto:**

Véase *yeso sintético*.

# B

## PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS

---

El presente Anexo resume los requisitos exigidos por las normas argentinas y chilenas para yesos cocidos, y describe los procedimientos para la realización de los ensayos físicos aplicados en esta tesis.

### **B.1. NORMA IRAM 1607:70. YESO COCIDO PARA CONSTRUCCIÓN: REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS**

Conforme lo establece la Norma IRAM 1607:70, los distintos tipos de yeso cocido para construcción deberán cumplir con los requisitos de finura, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión que se indican en la Tabla II de la misma, así como con los requisitos químicos establecidos en la Tabla III, las cuales se reproducen:

**Tabla II.** Requisitos físicos (IRAM 1607:70)

Requisito		Unidad	Tipo A		Tipo B		Método de ensayo
			mín	máx	mín	máx	
Finura	Material que pasa a través del tamiz IRAM 1,2 mm (N°16)	%	100	-	93	-	IRAM 1608

**Tabla II.** Requisitos físicos (IRAM 1607:70). (Cont.)

Requisito		Unidad	Tipo A		Tipo B		Método de ensayo
			mín	máx	mín	máx	
Finura	Material que pasa a través del tamiz IRAM 590 $\mu$ (N°30)	%	95	-	85	-	IRAM 1608
	Material que pasa a través del tamiz IRAM 149 $\mu$ (N°100)		70	-	45	-	
Tiempo de fraguado	Inicial	minutos	3	-	3	-	
	Final		-	25	-	35	
Resistencia a la compresión		daN/cm <sup>2</sup>	80	-	50	-	

**Tabla III.** Requisitos químicos (IRAM 1607:70)

Requisito	Unidad	Tipo A		Tipo B		Método de ensayo
		mín	máx	mín	máx	
Sulfato de calcio hemihidratado más sulfato de calcio anhidro (CaSO <sub>4</sub> · 0,5H <sub>2</sub> O + CaSO <sub>4</sub> )	%	80	-	60	-	IRAM 1608

**B.2. NORMA NCH 143.OF1999. YESO CALCINADO: REQUISITOS**

La Norma Chilena Oficial NCh 143.Of1999, en la Tabla 1 que se transcribe, determina los requisitos que debe cumplir el yeso calcinado en dicho país:

**Tabla 1.** Requisitos generales para el yeso calcinado (NCh143.Of1999)

Características	Requisito	Método de ensayo
Contenido de yeso calcinado, % (CaSO <sub>4</sub> · 0,5H <sub>2</sub> O)	≥ 73	NCh145
Tamaño de partículas, % (o finura de molido)		NCh144
Bajo tamiz 0,150 mm	≥ 60	
Bajo tamiz 0,425 mm	≥ 96	
Tiempo de colocación o fraguado, min	7 a 35	NCh144
Resistencia a la flexión, kgf/cm <sup>2</sup>	≥ 35	NCh144
Resistencia a la compresión, kgf/cm <sup>2</sup>	≥ 130	NCh144

### **B.3. ENSAYO DE FINURA (NORMA IRAM 1608: 73)**

a) Instrumental:

- Tamices IRAM 1,2 mm (N° 16); IRAM 0,600 mm (N° 30); IRAM 0,150 mm (N° 100), con marcos de diámetro 100 mm ± 10 mm y altura 100 mm ± 10 mm.
- Estufa eléctrica con termorregulador.
- Aspersorio compuesto por una cañería de 20 mm de diámetro interior, con llave de paso en un extremo. En el tramo lleva interpuesta una llave esclusa y un manómetro (70 kPa ± 1 kPa), finalizando con un codo de reducción en el otro extremo. En la salida del codo de reducción lleva acoplada una cañería de 25 mm de diámetro interior, la cual finaliza con una pieza adecuada que sujeta un disco perforado.
- Disco perforado de 25 mm de diámetro útil con 69 agujeros de 0,5 mm de diámetro cada uno. Los agujeros se deben distribuir concéntricamente: 1 en el centro, 4 en la primera circunferencia, 6 en la segunda, 10 en la tercera y 24 en la cuarta y quinta.
- Cronómetro o reloj con segundero.

b) Procedimiento:

1. Se deposita sobre el tamiz N° 16 una muestra de aproximadamente 50 gr, pesada al 0,01 g. Los dos restantes tamices se disponen en torre por debajo del anterior, con tamaño de malla decreciente.
2. Se ubica el extremo con el disco perforado del aspersorio en el interior del conjunto de tamices, próximo al borde superior, y se procede al tamizado húmedo abriendo el paso del agua, regulando con la válvula esclusa su presión a 70 kPa ± 1 kPa. El conjunto de tamices se mueve rotatoriamente a mano durante cinco minutos, a razón de una vuelta por segundo.
3. Finalizado el tiempo de tamizado se retiran cada uno de los tamices, lavándose cuidadosamente las paredes del tejido de cada uno de ellos, para posteriormente llevarlos a estufa (120 °C ± 5 °C) hasta que los residuos puedan ser transferidos a sendos vidrios reloj, previamente tarados. Estos se llevan a estufa (120 °C ± 5 °C) durante 1 hora, se dejan enfriar en desecador y se pesan al 0,1 g.

c) Expresión de los resultados:

Se calcula el material retenido en cada tamiz del siguiente modo:

$$R = (m_1/m) * 100$$

Siendo:

$R$  : el material retenido en cada tamiz (en %).

$m_i$ : la masa del residuo obtenido en cada tamiz (en gramos).

$m$ : la masa original de la muestra (en gramos).

Los requisitos de la Tabla II de la norma IRAM 1607:70 permiten determinar si se trata de un yeso Tipo A ó B.

#### **B.4. CONSISTENCIA NORMAL (NORMA IRAM 1608: 73)**

a) Instrumental:

- Aparato de Vicat modificado compuesto de soporte, varilla móvil de latón (6,5 mm de diámetro y 150 mm de longitud) con sonda de Tetmajer (19 mm de diámetro y 44 mm de longitud) acoplada a su extremo (masa total del conjunto: 50 g), y escala graduada al mm, de 50 mm de longitud.

- Molde troncocónico metálico de 40 mm  $\pm$  1 mm de altura y diámetros internos de 85 mm  $\pm$  3 mm (base mayor) y 75 mm  $\pm$  3 mm (base menor).

- Placa de asiento de vidrio, cuadrada, de 100 mm de lado.

- Cronómetro o reloj con segundero.

b) Procedimiento:

1. Se prepara el molde troncocónico untando la base mayor con vaselina, y luego se apoya ésta en el centro de la placa de vidrio.
2. En un recipiente adecuado se vierte agua a temperatura de 19 °C a 23 °C, en un volumen de 110 cm<sup>3</sup> a 160 cm<sup>3</sup> con 2 g de bórax puro disuelto (retardador de fraguado).
3. En un tiempo de 30 segundos se dejan caer 200 g de yeso (pesados al 0,1 g), pasándolo a través del tamiz IRAM 2,36mm (N° 8).
4. Tras 1 minuto de reposo, se bate la mezcla durante 1 minuto más hasta obtener fluidez uniforme.
5. Se coloca la pasta con cuidado en el molde, evitando la formación de burbujas de aire, y se la enrasa con espátula.
6. Se humedece previamente la sonda y se la hace descender con cuidado hasta que entre en contacto con la pasta, en el centro de la probeta. Se lee en la escala la

lectura inicial y luego se la libera a su propio peso, registrando la penetración al 1 mm.

7. Se repite el procedimiento varias veces, variando el porcentaje de agua en cada caso y empleando siempre una nueva porción de muestra.
8. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando se obtienen en las condiciones de ensayo  $30 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de penetración. Los valores deben reproducirse en dos o tres determinaciones sobre distintas probetas.

c) Expresión de los resultados:

Se indica la cantidad de agua necesaria para obtener la pasta de consistencia normal, expresándola como un porcentaje de la masa de yeso seco.

**B.5. TIEMPO DE FRAGUADO (NORMA: IRAM 1608: 73)**

a) Instrumental:

- Aparato de Vicat compuesto de soporte, varilla reversible ( $300 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ ) de posición ajustable, con barra de penetración en un extremo ( $10 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$  de diámetro; 50 mm de longitud mínima) y aguja intercambiable en el otro ( $1 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$  de diámetro; 50 mm de longitud); escala graduada al mm, fija al soporte; índice ajustable sujeto a la barra y deslizante sobre la escala.
- Molde troncocónico metálico y placa de asiento de vidrio, similares a los indicados para el ensayo de consistencia normal.
- Cronómetro o reloj con segundero.

b) Procedimiento:

1. Se repite el procedimiento indicado en los puntos 1 a 5 para el ensayo de consistencia, guardando las siguientes salvedades: a) emplear la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal; b) no emplear retardador de fraguado; c) registrar la hora en que comenzó el agregado del yeso al agua.
2. Se apoya la aguja sobre la superficie de la pasta y se la deja penetrar suavemente, evitando que se acelere su movimiento.
3. Se repite el procedimiento cada 30 segundos en distintas partes de la superficie hasta que la aguja se detenga a aproximadamente 1 mm del fondo del molde, teniendo la precaución de limpiarla adecuadamente antes de cada prueba. Registrar la hora. El período (en minutos) transcurrido desde que comenzó el

vertido del yeso sobre el agua (primer registro) y éste, es el llamado *tiempo de fraguado inicial*.

4. Cuando la aguja no penetre más de 0,5 mm sobre la cara de la superficie, se considera que ha finalizado el fraguado y el tiempo transcurrido desde el primer registro hasta éste, es llamado *tiempo de fraguado final*.

c) Expresión de los resultados:

Los tiempos de fraguado inicial y final se expresan en minutos.

#### **B.6. PROCEDIMIENTO PARA LA CONFECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE LAS PROBETAS**

Todas las probetas fueron elaboradas con la relación agua/yeso obtenida de la correspondiente determinación de la pasta de consistencia normal de cada mezcla.

Para ello se prepararon, por cada una de las 31 mezclas estudiadas, 2 tandas de 2 kg de yeso cada una, a las que se le agregó el agua correspondiente antes indicada. Con la primera de ellas se confeccionaron 5 probetas cúbicas (para el ensayo a compresión simple, según la norma IRAM 1608:73); con la restante, se elaboraron 3 probetas prismáticas (para el ensayo a flexo-compresión según la norma chilena NCh 144.Of1999), y 6 probetas cilíndricas (3 de ellas para ser ensayadas a compresión simple y las restantes a tracción por compresión diametral).

Las dimensiones de las probetas han sido:

- Cúbicas: 70,7 mm de lado (moldes metálicos).
- Prismáticas: 40x40x160 mm (molde metálico de tres compartimentos).
- Cilíndricas: diámetro 46,2 mm; altura 92,4 mm (moldes de pvc).

El procedimiento empleado, común a todos los tipos de probetas, consistió en los siguientes pasos:

1. Espolvoreo, en el término de 20 segundos, de 2 kg de yeso sobre un volumen de agua igual al necesario para preparar una pasta de consistencia normal para dicha cantidad.
2. Reposo y humedecimiento del yeso durante 60 segundos, tras los cuales se mezcla durante otros 60 segundos a mano, protegida con guantes de caucho, a fin de obtener una masa homogénea y sin grumos.

3. Vuelco de la pasta sobre los moldes, evitando la formación de burbujas de aire mediante la introducción repetida de una varilla de vidrio. Acabado de la superficie mediante enrasado con espátula.
4. Conservación de las probetas en sus moldes durante 2 horas en cámara húmeda; posterior desmolde y permanencia en cámara húmeda durante 72 horas más (temperatura: 15 °C a 38 °C).
5. Retiro de las probetas de la cámara y traslado a horno a 45 °C ±1 °C hasta obtener masa constante (± 0,1%), con registro de la masa final de cada probeta y de sus dimensiones, medidas con un calibre pie de rey.
6. Realización del ensayo físico correspondiente.

#### **B.7. PROBETAS CÚBICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

a) Instrumental:

- Se empleó un pórtico para ensayo triaxial de suelos, adaptado, con registro de carga aplicada mediante dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf (precisión: 0,5 kgf).

b) Procedimiento (Norma IRAM 1608: 73):

1. Confección y conservación de las probetas según los pasos 1 a 5 indicados en la sección B.6.
2. Ensayo a la compresión simple de cada probeta, a una velocidad uniforme de 200 daN/s. Registro de la resistencia individual y del promedio de las cinco (daN/cm<sup>2</sup>).

c) Expresión de los resultados:

Se calcula la resistencia a la compresión de cada probeta del siguiente modo:

$$R_c = P/A$$

Siendo:

$R_c$ : la resistencia a la compresión de la probeta, en daN/cm<sup>2</sup>.

$P$ : la carga aplicada, en daN.

$A$ : la sección de la probeta, en cm<sup>2</sup>.

Se expresa el promedio del conjunto en daN/cm<sup>2</sup>.

Los requisitos de la Tabla II de la norma IRAM 1607:70 permiten determinar su encuadre como yeso Tipo A ó B.

### **B.8. PROBETAS PRISMÁTICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

#### a) Descripción:

Con este ensayo se determina la capacidad de carga máxima a la flexión y el módulo de rotura del yeso, según el procedimiento indicado en la norma chilena NCh144.Of1999.

Puesto que se trata de un ensayo de tres puntos (probeta apoyada sobre dos rodillos distantes 100 mm entre sí, con carga aplicada sobre un tercer rodillo ubicado en el centro de la cara superior del prisma), el registro de la deflexión permite determinar el módulo de Young de modo indirecto.

Los trozos remanentes de la rotura por flexión son utilizados para efectuar el ensayo de compresión, conforme a la citada norma.

Se ensayaron y promediaron los resultados de 3 probetas prismáticas de 40x40x160 mm por cada una de las mezclas, incluyendo al yeso patrón.

Los requisitos de aceptación de resistencias mínimas a la compresión y a la flexión están indicados en la Tabla 1 de la norma NCh143.Of1999.

#### b) Instrumental:

- Pórtico para ensayo triaxial de suelos, adaptado, con registro de carga aplicada mediante dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf (precisión: 0,5 kgf).
- Comparador digital SCHWYZ (1/1000 mm).

#### c) Procedimiento:

1. Confección y conservación de las probetas según los pasos 1 a 5 indicados en la sección B.6.
2. Apoyo de la probeta sobre los dos rodillos distantes 100 mm entre sí, debidamente centrada.
3. Aplicación de la carga sobre la probeta a través del rodillo superior, a una velocidad de carga comprendida entre 10 y 20 kgf/(cm<sup>2</sup>.s).
4. Registro de la resistencia individual y del promedio de las tres.

d) Expresión de los resultados:

Se calcula la resistencia a la flexión (módulo de rotura) de cada probeta del siguiente modo:

$$R_f = 0,234 * P$$

Siendo:

$R_f$ : la resistencia a la flexión de la probeta, en kfg/cm<sup>2</sup>.

$P$ : la carga aplicada, en kgf.

Se expresa el promedio del conjunto en kgf/cm<sup>2</sup>.

**B.9. PROBETAS PRISMÁTICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

a) Instrumental:

- El mismo utilizado para el ensayo de resistencia a la flexión.

b) Procedimiento:

1. El ensayo se realiza sobre cada uno de los dos trozos remanentes de la rotura por flexión de cada probeta, conforme a NCh144.Of1999, ejerciendo el esfuerzo en una sección de 40 x 40 mm sobre las dos caras laterales de la probeta, a una velocidad de carga comprendida entre 10 y 20 kgf/(cm<sup>2</sup>.s).
2. Registro de la resistencia individual y del promedio de ambos trozos.

c) Expresión de los resultados:

Se calcula la resistencia a la compresión de cada trozo del siguiente modo:

$$R_c = P/A$$

Siendo:

$R_c$ : la resistencia a la compresión de la probeta, en kgf/cm<sup>2</sup>.

$P$ : la carga aplicada, en kgf.

$A$ : la sección de la probeta, en cm<sup>2</sup>.

Se expresa la resistencia promedio de los dos trozos en kgf/cm<sup>2</sup>.

**B.10. PROBETAS PRISMÁTICAS: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD**

a) Descripción:

La determinación de esta constante elástica se realizó de modo indirecto a partir de la medición de la deflexión (flecha), al centro de la probeta, en el ensayo de resistencia a la flexión, conforme al procedimiento indicado por Guillén Viñas (2005, p.163).

b) Instrumental:

- Comparador digital SCHWYZ (1/1000 mm)

c) Procedimiento:

Se registra la flecha de la probeta al centro, al momento de la rotura por flexión, con precisión al 0,001 mm.

d) Expresión de los resultados:

Para una viga simplemente apoyada con carga concentrada al centro de la luz, el módulo de Young o de elasticidad es:

$$E = 0,1. P.l^3/(48.f.I)$$

Siendo:

*E*: El módulo de Young, en MPa.

*P*: la carga aplicada, en kgf.

*l*: la luz entre apoyos (*l* = 10 cm).

*I*: el momento de inercia de la sección cuadrada de lado *a* , en cm ( $I = a^4/12 \text{ cm}^4$ ).

El factor 0,1 se aplica para realizar la conversión del resultado a MPa.

#### **B.11. PROBETAS CILÍNDRICAS: ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE**

a) Descripción:

El ensayo a compresión simple sobre probetas cilíndricas no está normalizado en nuestro país para yesos. Para su implementación se siguió un procedimiento interno del laboratorio, similar al aplicado a probetas de hormigón, realizándose sobre tres especímenes de la misma partida o mezcla.

b) Instrumental:

- Pórtico para ensayo triaxial de suelos, adaptado, con registro de carga aplicada mediante dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf (precisión: 0,5 kgf).

c) Procedimiento:

1. Confección y conservación de las probetas según los pasos 1 a 5 indicados en la sección B.6.
2. Disposición centrada de la probeta entre los dos platos de carga.
3. Aplicación continua de la carga, sin choques bruscos, a una velocidad comprendida entre 33 kgf/s y 100 kgf/s, hasta alcanzar la rotura.
4. Registro de la resistencia individual de cada una de las tres probetas y del promedio del conjunto.

d) Expresión de los resultados:

Se calcula la resistencia a compresión de cada probeta del siguiente modo:

$$R_c = P/A$$

Siendo:

$R_c$  : la tensión de rotura a compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>.

$P$ : la carga de rotura, en kgf.

$A$ : la sección de la probeta, en cm<sup>2</sup>.

Se expresa el promedio del conjunto en kgf/cm<sup>2</sup>.

#### **B.12. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL**

a) Descripción:

El ensayo de tracción por compresión diametral, o tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, no está normalizado en nuestro país para yesos. Para su implementación se siguió un procedimiento interno del laboratorio similar al aplicado a probetas de hormigón, sin la inclusión de tablillas de reparto de carga en las dos generatrices. Se realizó el ensayo sobre tres probetas de la misma partida, por cada una de las mezclas.

b) Instrumental empleado:

- Pórtico para ensayo triaxial de suelos, adaptado, con registro de carga aplicada mediante dinamómetro electrónico CIFIC de 10.000 kgf (precisión: 0,5 kgf).

c) Procedimiento aplicado:

1. Confección y conservación de las probetas según los pasos 1 a 5 indicados en la sección B.6.
2. Disposición acostada de la probeta entre los dos platos de carga, de modo que estos hagan contacto en generatrices diametralmente opuestas.
3. Aplicación continua de la carga, sin choques bruscos, a una velocidad comprendida entre 13 kgf/s y 33 kgf/s, hasta alcanzar la rotura
4. Registro de la resistencia individual de cada una de las tres probetas y del promedio del conjunto.

d) Expresión de los resultados:

Se calcula la resistencia a tracción por compresión diametral de cada probeta del siguiente modo:

$$R_T = 2*P/(\pi*D*L)$$

Siendo:

$R_T$ : la tensión de rotura a tracción indirecta, en kgf /cm<sup>2</sup>.

$P$ : la carga de rotura, en kgf.

$D$ : el diámetro, en cm.

$L$ : la longitud de la probeta, en cm.

Se expresa el promedio del conjunto en kgf/cm<sup>2</sup>.

### **B.13. DENSIDAD APARENTE. POROSIDAD.**

Se obtuvo la densidad aparente, seca, de cada probeta como la razón entre su masa desecada y el volumen aparente:

$$D_s = M_s/V_A$$

Siendo:

$D_s$ : la densidad aparente (seca), en g/cm<sup>3</sup>.

$M_s$ : la masa seca de la muestra, g.

$V_A$ : el volumen aparente, en cm<sup>3</sup>.

La porosidad fue valuada como el cociente entre el volumen de poros, determinado a partir de la diferencia entre el peso de la muestra al quitarla de la cámara de curado y su peso en condiciones secas, y el volumen aparente (Borrelli, 1999):

$$P = V_P / V_A ;$$
$$V_P = W_H - W_S$$

Siendo:

$P$ : la porosidad.

$V_P$ : el volumen de poros

$W_H$ : el peso húmedo de la muestra.

$W_S$ : el peso seco de la muestra.

$V_A$ : el volumen aparente.



# C

## PUBLICACIONES

---

### C.1. INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del P.I.D. MAUTNRA 1395, en el cual se insertó la presente tesis, tuvieron lugar las producciones, publicaciones y presentaciones en Congresos y Reuniones Técnicas que se enlistan en este Anexo.

### C.2. REVISTAS INTERNACIONALES

Revistas Internacionales	
Nombre de la revista	Revista de la Construcción/ <i>Journal of Construction</i> (Pontificia Universidad Católica de Chile)
Título del artículo	<i>“Reutilización de Yeso Recuperado de Construcciones: Un Estudio Basado en Requisitos de Aptitud de Normas Argentinas y Chilenas”</i> .
Autor(es)	Begliardo H., Sánchez M., Panigatti M.C., Garrappa S.
Lugar/fecha de publicación	Santiago de Chile; diciembre 2013, vol.12, n.3, pp. 27-35
Con/Sin referato	Con referato. Indexada.
Formato(s)	Online, ISSN 0718-915X

URL	<a href="http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0718-915X2013000300003&amp;lng=en&amp;nrm=iso&amp;tlng=en">http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0718-915X2013000300003&amp;lng=en&amp;nrm=iso&amp;tlng=en</a>
-----	---

### C.3. CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS

Congresos, Reuniones científicas	
Evento	SAM/CONAMET 2013 13° Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales 2013
Institución organizadora	SAM (Sociedad Argentina de Materiales); SOCHIM (Sociedad Chilena de Metalurgia y Materiales); Ots.
Título del trabajo	<i>“Caracterización de mezclas con yeso reciclado”.</i>
Autor(es)	Begliardo H, Sánchez M., Panigatti M., Fornari J., Garrappa S., Delpupo A.
Lugar/fecha	Puerto Iguazú (Argentina), 20-23 agosto/2013.
Con/Sin referato	Con referato.
N° de páginas	10 (diez)
Publicado en	Memorias del Congreso; Disponibles en: <a href="http://www.samconamet2013.misiones.gov.ar">http://www.samconamet2013.misiones.gov.ar</a> (Acceso 16-04-14)
Formato	CD
Forma de participación	Póster

Evento	CINPAR 2012 VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras
Institución organizadora	LEMIT, CIC, UTN FRLP,
Título del trabajo	<i>“Caracterización del Yeso Recuperado de Obras”.</i>
Autor(es)	Begliardo H, Sánchez M., Panigatti M., Stellón O., Garrappa S., Fornari J., Keller S.
Lugar/fecha	La Plata (Argentina), 4-6 junio/2012.
Con/Sin referato	Con referato
N° de páginas	10 (diez)
Publicado en	Memorias del Congreso, Vol 3, pp.1-10; Disponible en: <a href="http://www.cinpar2012.com.ar/cd/vol3/1.pdf">http://www.cinpar2012.com.ar/cd/vol3/1.pdf</a> (Acceso 31-7-13)
Formato	CD, ISBN 978-987-26159-3-2.
Forma de participación	Exposición oral.

Evento	ARGENTINA Y AMBIENTE 2012 1er. Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental; 1er Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y
--------	--

	Tecnología Ambiental
Institución organizadora	Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental.
Título del trabajo	<i>“Reutilización de Residuos de Placas de Yeso”</i> .
Autor(es)	Begliardo H, Sánchez M., Panigatti M., Garrappa S. ,Stellón O., Fornari J., Keller S.
Lugar/fecha	Mar del Plata (Argentina), 28 de mayo-1 junio/2012.
Con/Sin referato	Con referato
N° de páginas	6 (seis)
Publicado en	Memorias del Congreso
Formato	CD – E book, pp.643-648, ISBN 978-987-28123-1-7.
Forma de participación	Póster

Evento	MATTE@R 2012- 2da.Reunión de Materiales Tecnológicos en Argentina
Institución organizadora	PROMAT – Rectorado Universidad Tecnológica Nacional
Título del trabajo	<i>“Reutilización de Residuos de Construcción con Yeso”</i>
Autor(es)	Begliardo H, Sánchez M., Panigatti M., Garrappa S., Stellón O., Fornari J., Keller S.
Lugar/fecha	San Rafael (Argentina), 28-30 de mayo/2012.
Con/Sin referato	Con referato
N° de páginas	2 (dos)
Publicado en	Memorias del Congreso, pp.7-8; Disponible en: <a href="http://sicyt.scyt.rec.utn.edu.ar/scyt/programas/materiales/Actas%20Mattear%202012.pdf">http://sicyt.scyt.rec.utn.edu.ar/scyt/programas/materiales/Actas%20Mattear%202012.pdf</a> (Acceso 02-03-15)
Formato	Online, ISBN 978-950-42-0144-1
Forma de participación	Póster

#### C.4. CONGRESOS Y JORNADAS DE BECARIOS INVESTIGADORES

Evento	JIT 2013 (Jornada de Investigadores Tecnológicos)
Institución organizadora	UTN Facultades Regionales Rafaela, Santa Fe, Reconquista, Venado Tuerto
Título del trabajo	<i>“Reuso de yeso recuperado de construcciones”</i>
Autor(es)	Garrappa S., Delpupo A.
Lugar/fecha	Rafaela (Argentina), 8 de noviembre/2013.
Con/Sin referato	Con referato
N° de páginas	4 (cuatro)
Forma de	

## ANEXO C

participación	Póster
Evento	4° Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil-CONEIC
Institución organizadora	UTN F R. Bahía Blanca
Título del trabajo	<i>“Estudios sobre la Recuperación de Residuos de Construcción con Yeso. Informe de Avance”</i>
Autor(es)	Garrappa S., Stellón O., Begliardo H, Sánchez M., Keller, S., Panigatti M.
Lugar/fecha	Bahía Blanca (Argentina), 6-8 octubre/2011.
Con/Sin referato	Con referato
N° de páginas	11 (once)
Forma de participación	Exposición oral a cargo de S.Garrappa (becaria del PID).

**C.5. OTROS**

<b>Trabajos no editados</b>	
Ámbito de elaboración	Curso Comunicación de la Ciencia 2013.
Institución organizadora	Rectorado de la U.T.N. PROFORVIN (Programa de Formación Virtual de Investigadores)
Título del trabajo	<i>“Yeso, el ave Fénix de los materiales de construcción”</i>
Autor(es)	Begliardo Hugo
Fecha	Diciembre/2013.
N° de páginas	5 (cinco)

# REFERENCIAS<sup>1</sup>

---

Ahmed, A., Ugai, K., y Kamei, T., 2011a. Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), pp. 208-17.

Ahmed, A., Ugai, K., y Kamei, T., 2011b. Laboratory and field evaluation of recycled gypsum as a stabilizer agent embankment construction. *Soil and Foundations*, 51(6), pp. 975-90.

Ahmed, A. y Ugai, K., 2011. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. *Cold Regions Science and Technology*, 66 (2-3), pp.84-92.

Alcorn, W., y Welch, J., 2007. *Scoping study for the use of recycled gypsum in cement manufacture*. [pdf] Banbury, UK: Waste & Resources Action Programme.

Disponible en:

< <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/2011/myb3-2011-ar.pdf>.>

[Acceso 12/02/2014].

Arena P. y Mercante, I., 2008. Contenido energético de los residuos de construcción. En: UTN (Universidad Tecnológica Nacional), *6° Encuentro PROCQMA*. San Nicolás, Argentina, 27-28 Agosto de 2008. San Nicolás: UTN FRSN.

Asociación Española de Normalización y Certificación, 2009. *UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones*. Madrid: AENOR.

Asociación Técnica y Empresarial del Yeso, 2006. *Manual de revestimientos interiores con yeso*. [pdf]. Madrid: ATEDY. Disponible en:

<<http://www.atedy.es/principal.asp>> [Acceso 03/8/2013].

---

<sup>1</sup> En la presente tesis se ha adoptado para las citas y referencias el formato Harvard de la Anglia Ruskin University (Cambridge, U.K.), 5ta. Ed., set 2013. Disponible en: <<http://libweb.anglia.ac.uk> >

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. *NBR 13207:1994 Gesso para construção civil. Especificação*. Río de Janeiro: ABNT.
- Balazik, R., 1997. Gypsum. En USGS, ed.1997. *Mineral Commodity Summaries 1997*. Washington: U. S. Geological Survey. pp.74-75. Disponible en: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gypsum/320397.pdf>> [Acceso 08.8.2013].
- Barbosa, M. y Cabral da Silva, A., 2011. Estudo da viabilidade do aproveitamento gesso como placas para subcobertura. *7º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas CINPAR 2011*. Fortaleza, Brasil, 2-4 Junio 2011.
- Bec, R. y Franco, H., 2002. *Análisis crítico de la nueva Ley de Presupuestos Mínimos de Residuos Industrial N° 25.612*. [online] Disponible en: <<http://adia.org.ar/bec.doc>> [Acceso 26.04.14].
- Begliardo, H., Panigatti, M. C., Sanchez, M., Griffa, C., Boglione, R., Casenave, S., y Cassina, D., 2007. Estudio del reciclado de residuos de construcción con yeso. En: SAM (Asociación Argentina de Materiales), *Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2007*. San Nicolás, Argentina, 4-7 Setiembre 2007. Rosario: SAM.
- Begliardo, H., Sanchez, M., Panigatti, M. C., Garrappa, S., Fornari, J., y Keller, S., 2012a. Reutilización de residuos de placas de yeso. En: *I Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, Argentina y Ambiente 2012*. Mar del Plata, Argentina, 28 Mayo-1 Junio 2012.
- Begliardo, H., Sanchez, M., Panigatti, M. C., Garrappa, S., Fornari, J., y Keller, S., 2012b. Caracterización del yeso recuperado de Obras. En: LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica), *VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, CINPAR 2012.*, La Plata, Argentina, 4-6 Junio 2012. La Plata: LEMIT.
- Begum, R. A., Siwar, C., Pereira, J. J., y Jaafar, A. H., 2007. Implementation of waste management and minimisation in the construction industry of Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(1), pp.190-202.

Boglione, R., Sánchez, M., Panigatti, M. C., Begliardo, H., Griffa, C., Casenave, S., y Cassina, D., 2007. Materiales de construcción derivados del Yeso. Yeso a ser utilizado dentro de la construcción de edificios. En: UTN (Universidad Tecnológica Nacional), 5° *Encuentro PROCQMA*. La Plata, Argentina, 17-18 Mayo 2007. La Plata: UTN FRLP.

Borrelli, E., 1999. Porosity. En: ICCROM Series ed., 1999. *ARC Laboratory Handbook*. Rome: ICCROM, UNESCO, WHC. Vol. 2, pp. 9-32. Disponible en: <[http://www.iccrom.org/pdf/ICCROM\\_14\\_ARCLabHandbook00\\_en.pdf](http://www.iccrom.org/pdf/ICCROM_14_ARCLabHandbook00_en.pdf)> [Acceso 15/5/2013].

Cartwright, P., 2007. *Recycled gypsum as a soil treatment in potato production*. [pdf] Banbury, UK: Waste & Resources Action Programme. Disponible en: <<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/>> [ Acceso 12/02/2014].

Cavalcanti Canut, M. M., 2006. *Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção*. Tesis de maestria. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponible en: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-6X6R77/disserta\\_\\_o\\_final1.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-6X6R77/disserta__o_final1.pdf?sequence=1)> [Acceso: 13/7/2013].

Clamp, F., 2008. *Trials for the use of recycled gypsum in cement manufacture*. [pdf] Banbury, UK: Waste & Resources Action Programme. Disponible en: <<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Using%20recycled%20gypsum%20in%20cement%20manufacture.pdf>> [Acceso 02/02/2014].

Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002. *Resolução n° 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*. [pdf] Brasilia: CONAMA. Disponible en: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> [Acceso 05/07/2013].

Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011. *Resolução n° 431. Altera o art. 3o da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA estabelecendo nova classificação para o gesso*[pdf] Brasilia: CONAMA. Disponible en:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649> > [Acceso 05/07/2013].

Consejo Superior Universitario UTN. (1998). *Resolución 232/98-Criterios que Orientan la Política de Ciencia y Tecnología en la U.T.N.* Buenos Aires: UTN.

Disponible en:

<<http://csu.rec.utn.edu.ar/docs/php/salida.php3?tipo=RES&numero=232&anio=1998&facultad=CSU&pagina=1>> [Acceso 12/01/2014].

Crangle, R. D., 2013. Gypsum. En: USGS, ed. 2013. *Mineral Commodity Summaries 2013*. Washington: U. S. Geological Survey. pp.70-71. Disponible en:

<<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>> [Acceso 08/8/2013].

Degirmenci, N., 2008. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Construction and Building Materials*, 22(6), pp.1220-24.

Eires, R., Camoes, A., y Jalali, S., 2007. Eco-friendly materials using gypsum and industrial waste. Em: L. Braganca, M. Pinhero, S. Jalali, R. Matheus, R. Amoeda y M. Correia Gueda, eds. 2007. *Sustainable construction. Materials and practices. Challenge of the industry for the new millenium*. Minho: Universidade do Minho. pp.943-49.

Enciclopedia Libre Universal en Español, 2010. *Aljez*. [online] Disponible en:

<<http://enciclopedia.us.es/index.php/Aljez>> [Acceso 30/01/2014].

Eurogypsum, 2007. *What is Gypsum?* [online] Disponible en:

<[http://www.eurogypsum.org/\\_Uploads/dbsAttachedFiles/whatisgypsum.pdf](http://www.eurogypsum.org/_Uploads/dbsAttachedFiles/whatisgypsum.pdf)> [Acceso 06/10.2013].

European Commission JRC IPTS, 2008. [pdf] *End of waste criteria-Final report*.

Luxembourg: European Communities. Disponible en:

<<http://susproc.jrc.ec.europa.eu/documents/Endofwastecriteriafinal.pdf>> [Acceso 02/12/2013].

Retrieved from European Committee for Standardization, 2008. *European Standard EN 13279-1:2008 Gypsum binders and gypsum plasters. Part 1: Definitions and requirements*. Brussels: CEN.

Farias Nascimento, F. J., y Pimentel, L. L., 2010,. Reaproveitamento de resíduo de gesso. En: PUC (Pontificia Universidade Catolica), *XV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas*. Campinas, Brasil, 27-28 Octubre 2010. Disponible en: <[http://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/pesquisa/ic/pic2010/resumos/2010924\\_101439\\_502012254\\_resiaL.pdf](http://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/pesquisa/ic/pic2010/resumos/2010924_101439_502012254_resiaL.pdf)>[Acceso 29/08/2013]

Fernández Cánovas, M. 1977. *Patología y terapéutica del hormigón armado*, Madrid: Dossat S.A.

Fernández Casado, S., 2010. Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado. En: CONAMA (Fundación CONAMA), *Congreso Nacional del Medioambiente CONAMA 10*. Madrid, España, 22-26 Noviembre 2010. Madrid: CONAMA.

Fernández Casado, S., 2013. *Reciclaje y cierre del ciclo de vida de las placas de yeso laminado*. [online] Barcelona: Intempresas. Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/?p=201306>> [Acceso 14/02/2014].

Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad, 2000. *COVENIN 3638:2000. Yeso. Construcción y moldeo. Requisitos*. Caracas: FONDONORMA.

Gambaudo, S., 2006. *Calidad del yeso natural para uso agrícola*. [pdf] Rafaela: INTA EEA Rafaela. Disponible en: <[http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/miscelaneas/106/misc106\\_110.pdf](http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/miscelaneas/106/misc106_110.pdf)> [Acceso 20/01/2014]

Giovambattista, A. 2011. *Hormigón: materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005*, San Martín: INTI.

Godinho-Castro, A. P., Testolin, R. C., Janke, L., Corrêa, A. X. R., y Radetski, C. M., 2012. Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a

minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. *Waste Management*, 32(1), pp. 153-57.

Gomá, F. 1979. *El Cemento pórtland y otros aglomerantes. Fundamentos para la interpretación de sus comportamientos en obra*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A.

González Madariaga, F. J., 2005. *Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/10803/6845>> Acceso [12/8/2012].

Guillén Viñas, J. L., 2005. *Nuevas aplicaciones de recursos yesíferos. Desarrollo, caracterización y reciclado*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <<http://oa.upm.es/439/>> [Acceso 12/8/2012].

Gypsum Recycling International, 2013. *Why recycle gypsum waste?*. [online] Disponible en: <[http://gypsumrecycling.biz/6688-1\\_Whyrecycle/](http://gypsumrecycling.biz/6688-1_Whyrecycle/)> [Acceso 23/01/2013].

Hájková, A., Němcová, H., Plachý, T., Padevět, P., y Tesárek, P., 2011. Mechanical properties of hardened gypsum made from recycled gypsum binders. En: *The 4th International conference on Modelling of Mechanical an Mechatronic Systems 2011*. Herl'any, Slovakia, 20-22 Setiembre 2011.. Košice: TUKE. Disponible en: <<http://www.kamam.sk/mmams2011/>> [Acceso 09/05/2014].

Hernández-Olivares, F., Bollati, M. R., del Rio, M., y Parga-Landa, B., 1999. Development of cork–gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp.179-86.

Hua, M., Wang, B., Chen, L., Wang, Y., Quynh, V. M., He, B., y Li, X., 2010. Verification of lime and water glass stabilized FGD gypsum as road sub-base. *Fuel*, 89(8), pp.1812-17.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1970. *IRAM 1607:70 Yeso cocido para revoques. Características*. Buenos Aires: IRAM.

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 1973. *IRAM 1608:73 Yeso cocido. Métodos de ensayo generales*. Buenos Aires: IRAM.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2006. *IRAM 22452:06 Yeso para uso agrícola*. Buenos Aires: IRAM.
- Instituto Nacional de Normalización, 1999a. *NCh143.Of.1999 Yeso calcinado. Requisitos*. Santiago: INN.
- Instituto Nacional de Normalización, 1999b. *NCh144.Of.1999 Yeso calcinado. Ensayos físicos*. Santiago: INN.
- Jang, Y.C., y Townsend, T., 2001. Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. *Advances in Environmental Research*, 5(3), pp.203-17.
- Lund-Nielsen, H., 2010. European long-term trends in recycled gypsum usage. *Global Gypsum Magazine*, [online] Disponible en: <<http://www.globalgypsum.com/pdf/eGGNov2010nonsub.pdf>> [Acceso 23/09/2013].
- Marcos, F., 2002. *Dolor de cabeza para la industria*. [online] Disponible en: <<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=404>> [Acceso 03/12/2012]
- Marcoux, G., y Beshay, A., 1999. *Production of commercially useful materials for waste gypsum boards*. United States Patent No. 5980627.
- Marvin, E., 2000. *Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in the State of Vermont*. [pdf] Vermont: Vermont Agency of Natural Resources. Disponible en: <<http://www.anr.state.vt.us/dec/wastediv/recycling/gypsum.pdf>>. [Acceso 02/07/2012].
- Matos, G. R., y Founie, A., 2005. *Gypsum end-use statistics*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey. Disponible en: <<http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/gypsum-use.pdf>>. [Acceso 02/02/2014].

- Mercante, I., 2005. *Los residuos de construcción en Mendoza. Estudio de caso de obra residencial*. [online] Washington: OPS. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/iswa2005/mendoza.pdf>> [Acceso 12/02/2014].
- Mercante, I., Bovea Edo, M., Arena, P., y Martinengo, P., 2009. Estudio comparativo de los aspectos técnicos entre la legislación de RCD en España y América Latina. En: *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 2009 Barranquilla, Colombia, 24-25 Setiembre 2009. Disponible en: <<http://www.uninorte.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias%20II-SIIR/2b-Mercante-Argentina-003.pdf>> [Acceso: 05/09/2013].
- Mercante, I., Zamorano, J., LLamas, S., y Martinengo, P., 2011. *Situación de la gestión de los residuos de construcción y demolición en Mendoza. Estimación de la generación con objetivos de planificación regional*. [online] Castellón de la Plana: REDISA. Disponible en: <<http://www.redisa.uji.es/simposios.php#>> [Acceso 04/03/2014].
- Mon, R. e Irurtia, C. Recuperación de la productividad de suelos degradados mediante el subsolado con yeso. En: AACS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo), *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19. Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos*. Paraná, Argentina, 22-25 Junio 2004. Paraná: AACS.
- Monier, V., Mudgal, S., Hestin, M., Trarieux, M., y Mimid, S., 2011. *European Commission DG ENV. Service contract on management of construction and demolition waste-SRI. Final Report Task 2*. [pdf] Brussels: European Union , ed. Disponible en: <[http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011\\_CDW\\_Report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf)> [Acceso 02/02/2014]
- Montero, A., Tojo, Y., Matsuo, T., Matsuto, T., Yamada, M., Asakura, H., y Ono, Y., 2009. Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), pp.747-53.

- Moori K., 1999. *Reformas económicas y la inversión en el sector minero argentino*. [online] Santiago de Chile: CEPAL. Disponible en: <<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/2/4572/lc11327e.pdf>> [Acceso 12/02/2014].
- Morales Martínez, L., 2010. *Reutilización de residuos de edificación para el desarrollo de materiales cementantes con características especiales*. Tesis de maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2099.1/12171>> Acceso [12/07/2013].
- Municipalidad de Rafaela, 1999. (Ordenanza N° 3.243, 24/6/1999). Rafaela: C.M.R.
- Municipalidad de Rafaela, 2003a. (Decreto N° 21.270, 12/9/2003). Rafaela: D.E.M.
- Municipalidad de Rafaela, 2003b. (Ordenanza N° 3.618, 20/11/2003). Rafaela: C.M.R.
- Municipalidad de Rosario, 2003. (Ordenanza N° 7.600, 03/10/2003).Rosario: H.C.M.
- Oliveira M., Barbosa N., Torres S., Leal A. y Silva C., 2012. Compósitos á base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(6). pp.684-689 [online]. Disponible en: <[www.agriambi.com.br](http://www.agriambi.com.br)> [Acceso 18/06/2013].
- Olson, D., 2002. Gypsum. En: USGS, ed. 2002. *Mineral Commodity Summaries 2002*. Washington: U. S. Geological Survey. pp.76-77. Disponible en: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2002/mcs2002.pdf>>[Acceso 08/8/2013].
- Olson, D., 2003. Gypsum. En: USGS, ed. 2003. *Mineral Commodity Summaries 2003*. Washington: U. S. Geological Survey. pp.78-79. Disponible en: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2003/mcs2003.pdf>> [Acceso 08/8/2013].
- Pappu, A., Saxena, M., y Asolekar, S. R., 2007. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*, 42(6), pp.2311-20.

- Ponce, M. B., y Torres Duggam, M., 2005. Yeso. En: H. Nielson y R. Sarudiansky eds. 2005. *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*. Buenos Aires: CYTED, UNSaM. pp. 425-515.
- Provincia de Santa Fe, 1999. Ley 11.717, 18/11/1999. *Medioambiente y desarrollo sustentable*. B.O. 11/04/2000. Santa Fe: H.L.
- Provincia de Santa Fe, 2004. Resolución N° 128, 17/9/2004. *Normas técnicas sobre tratamiento y disposición final de los RSU*. Santa Fe: Secretaría de M.A. y D.S.
- Provincia de Santa Fe, 2009. Ley 13.055, 26/11/2009 *Residuos sólidos urbanos. "Basura cero"*. B.O. 13/12/09 Santa Fe: H.L.
- República Argentina, 1992. Ley 24.051, 17/12/1991. *Residuos peligrosos*. B.O. N°27.307, 17/1/1992: H.C.N.
- República Argentina, 1994. Ley 24.430, 14/10/1994. *Constitución de la Nación Argentina*. B.O. N°28.057, 10/1 1995: H.C.N.
- República Argentina, 2002a. Ley 25.675, 06/11/2002. *Política ambiental nacional. Presupuestos mínimos para gestión sustentable*. B.O. N°30.036, 28/11/2002: H.C.N.
- República Argentina, 2002b. Ley 25.612, 03/7/2002. *Gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicios*. B.O. N°29.950, 29/7/1992: H.C.N.
- República Argentina, 2004. Ley N° 25.916, 04/8/2004. *Gestión de residuos domiciliarios. Presupuestos mínimos de protección ambiental*. B.O. N°30.479, 07/9/2004: H.C.N.
- Ribeiro, A. S., 2006. *Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil*. Tesis de maestría. Universidade Federal da Paraíba. Disponible en: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=120434](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=120434)> Acceso [02/05/2013].
- Rodríguez Navarro, C., 2012. Binders in historical buildings: Traditional lime in conservation. En: J. M. Herrero y M. Vendrel, eds., 2012. *Archaeometry and Cultural Heritage: the Contribution of Mineralogy*. Madrid: SEM. Seminarios SEM Vol. 09, pp. 99-112. Disponible en:

<[http://www.ehu.es/sem/seminario\\_pdf/SeminSEMv9p91-112.pdf](http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SeminSEMv9p91-112.pdf)> [Acceso 02/5/2013].

Rodríguez Orejón, A., 2010. *Adición de residuos de yeso laminado tratado, en el yeso de construcción*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <<http://oa.upm.es/5452/>> [Acceso 02/05/2013].

Rodríguez-Jordá, M. P., Garrido, F., y García-González, M. T., 2010a. Assessment of the use of industrial by-products for induced reduction of As, and Se potential leachability in an acid soil. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), pp.328-35.

Rodríguez-Jordá, M. P., Garrido, F., y García-González, M. T., 2010b. Potential use of gypsum and lime rich industrial by-products for induced reduction of Pb, Zn and Ni leachability in an acid soil. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), pp.762-69.

Rubio Domene, R. F., 2006. El material de yeso: comportamiento y conservación. *Cuadernos de Restauración*. [online] Disponible en: <<http://www.alhambra-patronato.es/ria/bitstream/handle/10514/14026/EL%20YESO.pdf?sequence=1>> [Acceso 28/3/2013].

Sánchez, M., Begliardo, H., Casenave, S., Garrappa, S., y Denardi, M., 2011. Componentes de suelo cemento utilizando barros de excavación para pilotes como material de baja resistencia controlada (mbr). En: SAM (Asociación Argentina de Materiales), *11º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales SAM/CONAMET 2011*. Rosario, Argentina, 18-21 Octubre 2011. Rosario: SAM.

Sanz Aráuz, D., 2009. *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <<http://oa.upm.es/1711/>> [Acceso 13/3/2014].

Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, 2005. *Bases para un plan estratégico de mediano plazo en ciencia, tecnología e innovación 2005-2015*. Buenos Aires: Ministerio de Educación Ciencia y Tecnología. Disponible en: <<http://repositorio.educacion.gov.ar:8080/dspace/handle/123456789/94938>> [Acceso 23/1/2013].

Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, 2006. *Plan estratégico nacional de ciencia, tecnología e innovación "Bicentenario" (2006-2010)*. Buenos Aires: Ministerio de Educación Ciencia y Tecnología. Disponible en: <[http://www.mincyt.gov.ar/publicaciones#anc\\_8063](http://www.mincyt.gov.ar/publicaciones#anc_8063)> [Acceso: 23/01/2014].

Secretaría de Minería, 2004. *Plan Minero Nacional*. Buenos Aires: Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios. Disponible en: <[http://www.infoleg.gov.ar/basehome/actos\\_gobierno/actosdegobierno11-5-2009-1.htm](http://www.infoleg.gov.ar/basehome/actos_gobierno/actosdegobierno11-5-2009-1.htm)> [Acceso: 23/01/2014].

Secretaría de Planeamiento y Políticas en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2011. *Argentina Innovadora 2020: Plan nacional de ciencia, tecnología e innovación. Lineamientos estratégicos 2012-2015*. Buenos Aires: Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación Productiva. Disponible en: <[http://www.mincyt.gov.ar/publicaciones#anc\\_8063](http://www.mincyt.gov.ar/publicaciones#anc_8063)> [Acceso: 23/01/2014].

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, (2005). *Estrategia nacional para la gestión integral de residuos sólidos urbanos, ENGIRSU*. Buenos Aires: Ministerio de Salud y Ambiente. Disponible en: <<http://www.ambiente.gov.ar/observatoriosu/grupo.asp?grupo=8078&subgrupo=8235&nota=8235>> [Acceso 01/02/2014].

Serna, Á., Del Río, M., Palomo, J. G., y González, M., 2012. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35(0), pp.633-41.

Servicio Geológico Minero Argentino, 2013. *Oferta minera Argentina. Yeso*. [online]. Disponible en: <[http://www.segemar.gov.ar/P\\_Oferta\\_Regiones/Oferta/index.htm](http://www.segemar.gov.ar/P_Oferta_Regiones/Oferta/index.htm)> [Acceso 19/06/2013].

Singh, M., y Garg, M., 2000. Making of anhydrite cement from waste gypsum. *Cement and Concrete Research*, 30(4), pp.571-77.

Tesárek, P., Hájková, A., y Plachý, T., 2011. Effect of a water-gypsum ratio on mechanical properties of gypsum. En V. Fuis, ed., *Proceedings of 17th International*

*Conference Engineering Mechanics 2011*, 1a. ed., pp. 615-618. Svatka, Czech Republic, 9-11 Mayo 2011. Prague: Institute of Thermomechanics AS CR. Disponible en: <<http://engmech.cz/2011/im/im/proceedings>>[Acceso 05/01/2013].

Tonda, M., Begliardo, H., y Panigatti, M. C., 2008. Hormigón reciclado sin preselección en origen. En: AATH (Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón), *17ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*. Córdoba, Argentina, 28-31 Octubre 2008. Buenos Aires: AATH.

Torres, I., 2004. *The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey. Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/2001/armyb01r.pdf>>[Acceso 08/8/2013].

Torres, I., 2005. *The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey. Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/2004/armyb04.pdf>>[Acceso 08/8/2013].

Torres, I., 2009. *The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey. Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/2006/myb3-2006-ar.pdf>>[Acceso 08/8/2013].

Unión Europea, 1999. *Directiva 1999/31/CE del 26 de abril, relativa al vertido de residuos*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Disponible en: < <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html> > [Acceso 01/12/2013]

Unión Europea, 2003. *Decisión 2003/33/CE del 16 de enero, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Disponible en: < <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html> > [Acceso 01/12/2013].

Unión Europea, 2008. *Directiva 2008/98/CE del 19 de noviembre, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Disponible en: < <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html> > [Acceso 01/12/2013].

United Nations, 1987. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Our Common Future*. [pdf] N.Y.: U.N. Documents. Disponible en: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>> [Acceso 16/02/14].

Varjo, E., Liikanen, A., Salonen, V.-P., y Martikainen, P. J., 2003. A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: (Gypsum treatment to reduce internal loading). *Water Research*, 37(1), pp.1-10.

Velazco, P., 1995. *The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/1994/9502094.pdf>> [Acceso 01/4/2013].

Velazco, P., 1998. *The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey. Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/1998/9502098.pdf>> [Acceso 01/4/2013].

Villanueva Domínguez, L., 2005. Las tres edades de la construcción. *Informes de la Construcción*, 57(498), pp.41-45.

Villanueva, L., 2004. Evolución histórica de la construcción con yeso. *Informes de la Construcción*, 56(493), pp.5-11.

Vrancken, K. C., y Laethem, B., 2000. Recycling options for gypsum from construction and demolition waste. En: G.Woolley, J.Goumans y P. Wainwright, eds. 2000. *Waste Management Series*. Elsevier: Vol. Volume 1, pp. 325-331.

Wacaster, S., 2013. *2011-Minerals Yearbook. Argentina [Advance Release].The mineral industry of Argentina*. [pdf] Washington: U. S. Geological Survey.

Disponible en: <<http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/country/2011/myb3-2011-ar.pdf>> [Acceso 01/3/2014].

Wirsching, F., 1996. *Sulfato de Calcio*. Resumen de la Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th ed., Vol. A4, pp. 55. Traducida del alemán por M. Díaz Reyes. Madrid: ATEDY. Disponible en: <<http://www.atedy.es/principal.asp>> [Acceso 23/03/2013].

Zhou, J., Gao, H., Shu, Z., Wang, Y., y Yan, C., 2012. Utilization of waste phosphogypsum to prepare non-fired bricks by a novel Hydration–Recrystallization process. *Construction and Building Materials*, 34(0), pp. 114-19.