

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Universidad de la República Oriental del Uruguay**

Facultad de Arquitectura

**Caracterización del residuo pétreo de la industria  
minera del oro para la producción de  
Hormigón en Uruguay**

**FERNANDO TOMELO SUÁREZ**

Montevideo – Porto Alegre

2012



FERNANDO TOMELO SUÁREZ

**Caracterización del residuo pétreo de la industria  
minera del oro para la producción de  
Hormigón en Uruguay**

ORIENTADORAS

**Dra. Ángela Borges Masuero**

Por la Universidad Federal de Río Grande del Sur  
Prof. de la Universidad Federal de Río Grande del Sur, CPGEC, Escuela de Ingeniería

**Dra. Gemma Rodríguez de Sensale**

Por la Universidad Federal de Río Grande del Sur  
Prof. de la Universidad de la República Oriental del Uruguay, IC, Facultad de Arquitectura

Montevideo – Porto Alegre  
2012

TOMEIO SUAREZ, Fernando Daniel  
[ftomeo@farq.edu.uy](mailto:ftomeo@farq.edu.uy)

Disertación de Maestría  
Programa de Pós-graduação em engenharia civil

Título  
Caracterización del residuo pétreo de la industria minera del oro para la producción de Hormigón en Uruguay.

Año de publicación – 2014  
Año de defensa – 2012

Orientadores  
Dra. Ángela Borges Masuero  
Dra. Gemma Rodríguez de Sensale

Área de concentración  
Tecnología de los materiales y procesos constructivos

Palabras claves  
Caracterização, resíduos da pedra, produção de Concreto

Resumen  
Caracterização de resíduo de pedra da indústria de mineração de ouro para a sua utilização na produção de concreto substituindo o agregado graúdo convencional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco especialmente a la Facultad de Arquitectura, de la Universidad de la República Oriental del Uruguay, por el esfuerzo realizado para la concreción de esta propuesta de posgrado en el área tecnológica.

Por otra parte debo reconocer el aporte imprescindible realizado por mis tutoras, la Dra. Ángela Borges Masuero y la Dra. Gemma Rodríguez de Sensale, quienes además de brindar toda la capacidad humana y técnica contribuyeron con gran dedicación.

Para la investigación experimental fue necesario el uso de los Laboratorios de Construcción, de Ensayos de Materiales y de Geología, de las Facultades de Arquitectura, Ingeniería y Ciencias respectivamente. Agradezco a los Directores de los mismos por facilitarme el uso del equipamiento para la realización de los ensayos así como también el asesoramiento brindado por el Prof. Pedro Oyhantcabal del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias.



## INDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>21</b>
1.1 Importancia de la investigación. ....	21
1.2 Objetivos de la investigación.....	24
1.3 Estrategia de la investigación.....	25
1.4 Delineamiento de la investigación.....	25
1.5 Estructura del trabajo.....	26
1.6 Limitaciones de la investigación.....	26
<b>2 EL USO DE RESIDUOS Y LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN.....</b>	<b>27</b>
2.1 Uso de residuos en la industria de la construcción.....	27
2.2 Análisis geológico y ambiental en una industria minera emergente.....	33
2.3 El desarrollo de hormigón a partir del uso de residuos sustituyendo los agregados convencionales.....	38
<b>3 INCIDENCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN EL HORMIGÓN.....</b>	<b>55</b>
3.1 Incidencia de los agregados pétreos.....	55
3.1.1 La estructura interna de la mezcla.....	55
3.1.2 La resistencia del hormigón.....	57
3.1.3 La estabilidad dimensional del hormigón.....	58
3.1.4 La durabilidad del hormigón.....	68
3.1.4.1 Permeabilidad del agregado.....	71
3.1.4.2 Desgaste superficial.....	71
3.1.4.3 Ciclo de congelamiento.....	72
3.1.4.4 Fuego. Efecto de la temperatura elevada en el agregado.....	74
<b>4 CARACTERÍSTICAS E IMPORTANCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN.....</b>	<b>79</b>
4.1 Pétreos utilizados en la producción de diferentes tipos de hormigón.....	79
4.2 Clasificación de los pétreos.....	81
4.3 Origen de los pétreos (agregados naturales).....	81
4.4 Características de los pétreos en función de su porosidad, exposición y composición.....	83
4.4.1 Dependientes de su porosidad.....	84
4.4.1.1 Peso específico.....	85

4.4.1.2	Densidad.....	85
4.4.1.3	Absorción – humedad superficial.....	86
4.4.1.4	Resistencia.....	91
4.4.1.5	Solidez.....	98
4.4.2	Dependientes de las condiciones previas de exposición.....	98
4.4.2.1	Tamaño y distribución granulométrica.....	99
4.4.2.2	Forma y textura superficial.....	104
4.4.3	Dependientes de la composición química y mineralógica.....	111
4.4.3.1	Sustancias deletéreas.....	112
4.5	Muestreo de los pétreos.....	115
4.6	Caracterización de los pétreos en función de sus propiedades geológicas, físicas y mecánicas.....	115
4.6.1	Propiedades geológicas.....	116
4.6.1.1	Análisis petrográfico.....	116
4.6.1.2	Partículas minerales reactivas con el cemento.....	119
4.6.2	Propiedades físicas.....	122
4.6.2.1	Granulometría.....	122
4.6.2.2	Análisis de forma.....	123
4.6.2.3	Peso específico y porosidad.....	124
4.6.2.4	Absorción.....	125
4.6.3	Propiedades mecánicas.....	126
4.6.3.1	Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.....	126
4.6.3.2	Resistencia al desgaste o abrasión.....	129

## **5 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL..... 133**

5.1	Muestreo del pétreo.....	133
5.2	Caracterización del pétreo.....	134
5.2.1	Análisis petrográfico.....	134
5.2.2	Análisis de la forma del pétreo.....	135
5.2.3	Determinación de la densidad, densidad aparente y de la absorción de agua.....	135
5.2.4	Determinación de la resistencia a la compresión.....	135
5.2.4.1	Perforando en taller rocas trituradas.....	136
5.2.4.2	Perforando directamente en la roca de la mina.....	137
5.2.4.3	Perforando en roca a pie de la mina.....	139
5.2.5	Medición del modulo de elasticidad.....	143
5.2.6	Determinación de la resistencia al desgaste y la abrasión.....	144

<b>6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>145</b>
6.1 Análisis petrográfico.....	145
6.1.1 Textura.....	145
6.1.2 Mineralogía.....	146
6.1.3 Definición de la roca.....	147
6.1.4 Consideraciones sobre el potencial reactivo.....	147
6.1.5 Consideraciones del análisis petrográfico.....	149
6.2 De la forma del pétreo.....	150
6.3 Densidad, de la densidad aparente y de la absorción.....	151
6.4 Resistencia al desgaste y a la abrasión.....	154
<b>7 CONCLUSIONES.....</b>	<b>157</b>
7.1 Introducción.....	157
7.2 Conclusiones.....	158
7.3 Propuesta para futuros trabajos.....	159
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>161</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>171</b>



## Listado de figuras

Figura 1 – Evolución de la venta de Cemento Pórtland ANCAP.....	22
Figura 2 – Mapa político del Uruguay.....	23
Figura 3 – Minera San Gregorio (Minas de Corrales, Departamento de Rivera):	
(a) Yacimiento.....	24
(b) Residuo pétreo.....	24
Figura 4 – Esquema gráfico que resume la investigación.....	25
Figura 5 – Clasificación de residuos a partir de la actividad económica.....	28
Figura 6 – Tres perspectivas sobre el desarrollo sostenible.....	30
Figura 7 – Nuevo modelo estructural para la evaluación de Fuentes Apropriadas.....	51
Figura 8 – Criterio jerárquico en la Selección del Problema en CMABSs.....	52
Figura 9 – Relación tensión deformación de la pasta de cemento, el hormigón y el agregado.....	60
Figura 10 – Parámetros que influyen en el módulo de elasticidad del hormigón.....	61
Figura 11 – Efecto del agregado en la reducción de la retracción de la pasta pura.....	62
Figura 12 – Retracción por secado ( $a/c = 0,30$ ).....	64
Figura 13 – Retracción por secado ( $a/c = 0,50$ ).....	64
Figura 14 – Causas físicas del deterioro del hormigón.....	69
Figura 15 – Causas químicas del deterioro del hormigón.....	70
Figura 16 – Relación entre la resistencia a la tensión y la variación de temperatura.....	76
Figura 17 – Diagrama incidencia del agregado en el hormigón.....	80
Figura 18 – Condiciones de humedad del agregado.....	87
Figura 19 – Absorción de agua en función del tiempo para cuatro rocas españolas.....	89
Figura 20 – Ilustración de los tipos de forma de los agregados.....	123
Figura 21 – Minera San Gregorio:	
(a) Yacimiento.....	133
(b) Residuo pétreo a pie de la excavación.....	133
Figura 22 – Fotografía de las muestras analizadas:	
(a) Muestra N° 1.....	134
(b) Muestra N° 2.....	134
(c) Muestra N° 3.....	134
Figura 23 – Muestra para ensayo de densidad y absorción.....	135
Figura 24 – Perforaciones del pétreo en el taller.....	136
Figura 25 – Muestras resultantes del proceso de corte con broca:	
(a) testigos fracturados.....	137

(b) testigo fisurado.....	137
Figura 26 – Fisuras internas del pétreo.....	137
Figura 27 – Preparación de la perforación en la mina	
(a) Acondicionamiento del sector elegido para la perforación.....	138
(b) y (c) equipamiento de perforación.....	138
(d) Anclaje del equipo directamente en la roca.....	138
Figura 28 – Extrayendo el testigo directamente de la roca.....	138
Figura 29 – Extracción de testigos de roca extraída a pie de la mina:	
(a) y (b) anclaje del equipo en la roca extraída.....	139
(c) y (d) perforando en la roca extraída.....	139
Figura 30 – Testigos aserrados:	
(a) y (b) testigos preparados para ensayo a la compresión.....	140
Figura 31 – Fisuración en el testigo.....	140
Figura 32 – Fisuración en testigos:	
(a) fisura transversal al cuerpo del testigo.....	141
(b) fisuras transversales sobre la esquina del cuerpo del testigo.....	141
(c) y (d) desprendimientos de sectores fisurados.....	141
Figura 33 – Fisuración en la roca aserrada para la extracción de testigos.....	142
Figura 34 – Muestra N° 1	
(a) Plagioclasa y clinopiroxeno.....	148
(b) Plagioclasa y clinopiroxeno y escaso cuarzo.....	148
Figura 35 – Muestra N° 2	
(a) Plagioclasa y clinopiroxeno, granulita máfica.....	148
(b) Plagioclasa y clinopiroxeno, granulita máfica poco alterada.....	148
Figura 36 – Muestra N° 3	
(a) Plagioclasa y clinopiroxeno, granulita máfica, muy fuertemente alterada....	148
(b) Plagioclasa y clinopiroxeno, granulita máfica, muy fuertemente alterada....	148
Figura 37 – Comparación del pétreo en estudio con rocas de uso en la construcción.....	154

## Listado de tablas

Tabla 1 – Evolución del consumo per cápita del cemento Pórtland en el mundo.....	21
Tabla 2 – Consumo de hormigón, cemento y pétreos en Uruguay.....	24
Tabla 3 – Recomendaciones de los atributos considerado.....	29
Tabla 4 – Residuos y materiales usados en la infraestructura vial de los EE.UU.....	32
Tabla 5 – Gestión de residuos de construcción y demolición en Europa.....	33
Tabla 6 – Tipos de residuos generados durante el procesamiento de los minerales.....	37
Tabla 7 – Dosificaciones. Hormigón convencional y con materiales reciclados.....	41
Tabla 8 – Propiedades de los agregados, normales y reciclados.....	41
Tabla 9 – Propiedades del hormigón a diferentes edades.....	41
Tabla 10 – Resistencia a la compresión ganada a los 28 días.....	42
Tabla 11 – Dosificación y resistencia a la abrasión, hormigón con polvo de mármol.....	43
Tabla 12 – Dosificaciones con diferentes contenidos de polvo de granito rojo.....	44
Tabla 13 – Trabajabilidad de dosificaciones con polvo de granito rojo.....	44
Tabla 14 – Propiedades mecánicas: Comparativa de dosificaciones.....	44
Tabla 15 – Resistencia a la compresión del hormigón a los 7, 28 y 90 días.....	45
Tabla 16 – Algunos residuos sólidos que pueden ser considerados agregados.....	46
Tabla 17 – Valores experimentales del estudio de la Phyllite.....	47
Tabla 18 - Valores experimentales sustituyendo el agregado convencional por Phyllite.....	47
Tabla 19 – Propiedades típicas de los agregados de la basura de las minas de Goa.....	48
Tabla 20 – Dosificaciones y resistencias con agregados de las minas de Goa.....	48
Tabla 21 – Relaciones observadas entre la microestructura, la mineralogía del LWA estudiado y sus propiedades físicas.....	49
Tabla 22 – Hormigón producido con agregado natural y reciclado.....	50
Tabla 23 – Máxima resistencia a la compresión en función de relación agua/aglomerante...	58
Tabla 24 – Deformaciones del hormigón.....	59
Tabla 25 – Propiedades de los agregados.....	63
Tabla 26 – Dosificaciones, Resistencia a la compresión y Modulo de elasticidad.....	63
Tabla 27 – Efecto del tipo de agregado sobre el coeficiente de expansión térmica del Hormigón.....	67
Tabla 28 – Valores de conductividad y difusión térmica para hormigones con diferentes tipos de agregados.....	68
Tabla 29 – Comparación entre la permeabilidad de las rocas y las pastas de cemento.....	71
Tabla 30 – Clasificación de agregados en función del ciclo de congelamiento.....	73
Tabla 31 – Tenor total de aire para hormigón resistente al congelamiento.....	74
Tabla 32 – Comportamiento de discos de roca sometidos a diferentes temperaturas.....	77

Tabla 33 – Coeficiente de dilatación térmica. (Rocas y hormigón).....	78
Tabla 34 – Propiedades mecánicas residuales.....	78
Tabla 35 – Clasificación de las rocas metamórficas a partir de la roca original.....	83
Tabla 36 – Valores típicos de densidad para rocas intactas.....	86
Tabla 37 – Valores para diferentes rocas en la ecuación de PALCHIK y HATZOR.....	89
Tabla 38 – Comparación de la densidad de partícula para varios agregados.....	90
Tabla 39 – Peso específico y absorción en agregado natural y manufacturados.....	91
Tabla 40 – Relación entre porosidad y resistencia de las rocas.....	93
Tabla 41 – Tipos de rocas según su resistencia a la compresión.....	94
Tabla 42 – Rango típico de la resistencia a la compresión de rocas intactas.....	95
Tabla 43 – Valores del parámetro $m_i$ para diferentes rocas.....	97
Tabla 44 – Combinaciones de cuatro fracciones granulares.....	100
Tabla 45 – Distribución granulométrica y resistencia del hormigón.....	100
Tabla 46 – Ensayos de compresión no confinada en tres tipos de hormigón.....	101
Tabla 47 – Asentamiento y resistencia a la compresión a los 28 días.....	102
Tabla 48 – Efecto de la distribución granulométrica del agregado.....	103
Tabla 49 – Efecto del tamaño del agregado.....	103
Tabla 50 – Descripción de las dosificaciones del HAC.....	104
Tabla 51 – Valores promedios de las propiedades mecánicas medidas.....	107
Tabla 52 – Dosificaciones para hormigón de peso normal y liviano.....	109
Tabla 53 – Propiedades básicas del material a los 28 días.....	109
Tabla 54 – Textura superficial de agregados típicos .....	110
Tabla 55 – Forma de la partícula de agregados típicos.....	110
Tabla 56 – Dosificaciones del hormigón.....	112
Tabla 57 – Límites para las sustancias deletéreas en agregados para hormigones en estructuras externas, expuestas a condiciones climáticas moderadas.....	114
Tabla 58 – Impurezas que afectan el hormigón de acuerdo a su estado fresco o endurecido.....	114
Tabla 59 – Especificaciones para agregados gruesos en hormigones hidráulicos según las Organizaciones normalizadoras.....	118
Tabla 60 – Rocas, minerales y constituyentes sintéticos reactivos deletéreos.....	121
Tabla 61 – Clasificación de las formas de los agregados en base a las dimensiones A, B y C.....	123
Tabla 62 – Valores típicos de resistencia para rocas usadas en la construcción.....	127
Tabla 63 – Valores típicos para modulo de elasticidad de rocas intactas.....	128
Tabla 64 – Comparación de los valores obtenidos en el ensayo “Los Ángeles”.....	131
Tabla 65 – Tipo de agregado, resistencia, dureza y abrasión Los Ángeles.....	132

Tabla 66 – Resistencia del hormigón según el tipo de agregado y tiempo de curado.....	132
Tabla 67 – Cantidad de muestras a ser recogidas para ensayos físicos o químicos.....	134
Tabla 68 – Masa mínima de la muestra de ensayo.....	135
Tabla 69 – Fracciones y cantidad de muestra para ensayo “Los Ángeles”.....	144
Tabla 70 – Carga abrasiva para ensayo “Los Ángeles”.....	144
Tabla 71 – Análisis petrográfico – Textura de las muestras.....	145
Tabla 72 – Análisis petrográfico – Mineralogía de las muestras.....	146
Tabla 73 – Valores típicos de densidad. Comparativa con pétreo en estudio.....	151
Tabla 74 – Relación porosidad, absorción y resistencia. Comparativa pétreo en estudio.....	153
Tabla 75 – Resistencia de los agregados a la abrasión y a la compresión. Comparativa.....	155
Tabla 76 – Resultados del MTOP, en ensayo “Los Ángeles”.....	156



## Listado de siglas

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACFP</b>	Asociación de Fabricantes de Cemento Pórtland (Argentina)
<b>ACI</b>	American Concrete Institute
<b>AHP</b>	Analytical Hierarchy Process
<b>ANCAP</b>	Administración Nacional de Combustible, Alcohol y Pórtland (Uruguay)
<b>ASTM</b>	American Society for testing and materials
<b>BSI</b>	British Standards Institution
<b>CANACEM</b>	Cámara Nacional Del Cemento (Mexico)
<b>CEMBUREAU</b>	European Cement Association
<b>CMABS</b>	Concrete Mineral Aggregate Borrow Source
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DINAMA</b>	Dirección Nacional de Medio Ambiente (Uruguay)
<b>DINAMIGE</b>	Dirección Nacional de Minería y Geología (Uruguay)
<b>FICEM</b>	Federación Interamericana del Cemento
<b>GPE</b>	Grupo del Proyecto Europeo del Hormigón Auto compactante
<b>HAC</b>	Hormigón auto compactante
<b>IBRACON</b>	Instituto Brasileiro do Concreto
<b>ICH</b>	Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile
<b>INBEMI</b>	Instituto de Beneficios Minerales
<b>INTN</b>	Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (Paraguay)
<b>IRAM</b>	Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (Normalización y certificación)
<b>ISRM</b>	International Society for Rock Mechanics
<b>LWA</b>	Lightweight aggregates
<b>MERCOSUR</b>	Mercado Común Del Sur
<b>MTOP</b>	Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Uruguay)
<b>RCA</b>	Recycled concrete aggregates
<b>RMR</b>	Rock Mass Rating
<b>SNIC</b>	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Brasil)
<b>TOPSIS</b>	Technique for order Preference by Similarity to ideal Solution
<b>UDELAR</b>	Universidad de la República Oriental del Uruguay
<b>UNI</b>	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
<b>UNIT</b>	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas



## **RESUMEN**

**TOMELO SUÁREZ, Fernando. Estudio sobre la utilización de residuo pétreo de la Industria minera del oro en la producción de Hormigón en Uruguay.**

En el siglo pasado, tanto en Uruguay como en el mundo, se hizo evidente la consolidación de la utilización del hormigón armado, como material fundamental, para la construcción de estructuras de uso en obras arquitectura como de ingeniería civil. Esta realidad exigió la investigación en el área de los materiales como así también de modelos de diseño estructural. Por otra parte, en la última década, este proceso coincide con el fortalecimiento de la industria minera del oro en el noreste del territorio del Uruguay, actividad extractiva, generadora de residuos pétreos en grandes cantidades y con importantes cuestionamientos en cuanto a su agresión ambiental. Este trabajo tuvo como objetivo el estudio de la viabilidad técnica del uso de este residuo pétreo en la producción de hormigón, en sustitución del agregado grueso convencional. La investigación incluyó la caracterización del mismo y la comparación con los agregados de uso tradicional tanto en lo que involucra al desempeño como en lo que se refiere a la cuantificación de generación y uso. En la primera parte, se analizó la importancia del uso de residuos en la industria de la construcción vinculado al desarrollo de una política que atienda la problemática ambiental y se relevó el destino de los residuos, producto de la minería, en países de América Latina y del resto del mundo que poseen una experiencia significativa en esta actividad productiva. A continuación se incluyó en el estudio el análisis contemporáneo sobre los agregados gruesos, visión que considera la participación activa de los mismos en las propiedades fundamentales del hormigón, investigando las particularidades de los pétreos en función de sus características físicas y su composición química. En el final se desarrolló una etapa experimental trabajando sobre el residuo pétreo elegido, una roca máfica producto de un metamorfismo de alto grado, y los valores obtenidos se compararon con los de los pétreos de uso común en la industria de la construcción en Uruguay y en varias regiones del mundo. El análisis de los resultados permite concluir que este residuo pétreo tiene condiciones suficientes desde el punto de vista técnico para ser considerado en la producción de hormigón, como un posible sustituto del agregado grueso convencional.

## **ABSTRACT**

**TOMEIO SUÁREZ, Fernando. Utilization study of stony residue of the mining Industry of the gold in the production of Concrete in Uruguay.**

In last century, both in Uruguay and in the world, there became evident the consolidation of the utilization of the reinforced concrete, as fundamental material, for the construction of structures of use in architecture and civil engineering works. This reality demanded the investigation in the materials area, as this way also of models of structural design. On the other hand, in the last decade, this process coincide with the strengthening of the gold's mining industry in the North-East of the territory of Uruguay, extractive activity, generating of stony residues with big quantities and with important questions as for his environmental aggression. This work took as an aim the study of the technical viability of the use of this stony residue in the production of concrete, in substitution of the conventional coarse aggregate. The investigation included the characterization of the same one and the comparison with the aggregates of traditional use, as much as in what involves to the performance as regarding the quantification of generation and use. In the first part, there was analyzed the importance of the use of residues in the industry of the construction linked to the development of a politics that attends to the environmental problematic and there was relieved the destination of the residues, product of the mining industry, in countries of Latin America and the rest of the world that possess a significant experience in this productive activity. Later the contemporary analysis was included in the study on the coarse aggregates, vision that considers the active participation of the same ones in the fundamental properties of the concrete, investigating the particularities of the stony ones depending on his physical characteristics and his chemical composition. In the end, an experimental stage was developed working on the stony chosen residue, the product of a metamorphism of high degree in a *mafica* rock, and the obtained values were compared with those of the stony ones of common use in the industry of the construction in Uruguay and in several regions. The analysis of the results allows concluding that this stony residue has sufficient conditions from the technical point of view to be considered in the production of concrete, as a possible substitute for conventional coarse aggregate.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las características de la investigación, importancia, objetivos, estrategias, estructura de trabajo se presentan en esta primera parte; al final del capítulo se mencionan las limitaciones que se presentaron durante el desarrollo del mismo.

### 1.1 Importancia de la investigación

En el siglo XX, se consolida a nivel mundial y por supuesto también en Uruguay la utilización del hormigón armado para la construcción de estructuras; las mismas responden a propuestas constructivas tanto de tipo edilicio como de infraestructura vial, urbana, transporte, entre otras.

Un ejemplo representativo de esto son los datos que surgen de las estadísticas de consumo medio mundial de cemento Pórtland por persona, valores que demuestran el progresivo incremento, superando los 200 kg. por habitante al año a fines del pasado siglo, valores que pueden compararse con la venta en Uruguay en el mismo período. En la tabla 1, FICEM (2011), se presenta el consumo de cemento en kilogramos por habitante y por año, donde se verifica el incremento del consumo en los primeros años del siglo XXI. En la actualidad el consumo mundial aproximado de hormigón está calculado en 11 billones de toneladas por año (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

**Tabla 1 - Evolución del consumo per cápita del cemento Pórtland en el mundo. (FICEM<sup>1</sup>, 2011)**

---

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Consumo en kg/hab./año	321	343	363	398	423	424	447

Esta situación que exige un verdadero desarrollo tecnológico, tanto en lo que implica la construcción del conocimiento, la transferencia del mismo y la aplicación en emprendimientos constructivos concretos, generó un proceso lento de investigación desde los materiales involucrados hasta modelos estructurales totalmente innovadores.

---

<sup>1</sup> Las instituciones consultadas por FICEM fueron CEMBUREAU, SNIC, CANACEM, ACFP y ICH.

En la figura 1, se presenta la evolución de la venta de cemento Pórtland de la empresa estatal uruguaya, ANCAP, en la cual la correspondencia de las décadas es la siguiente: Década 1 son los años 30, la 2 los 40, la 3 los 50, la 4 los 60, la 5 los 70, la 6 los 80, la 7 los 90 y la 8 los 2000. La crisis económica que comienza en Uruguay a partir del año 2002 se evidencia en la caída de la venta del cemento, situación que el país rápidamente revierte y emprende el crecimiento nuevamente, alcanzando en el año 2010 un consumo de cemento de 850.000 toneladas, situación ésta que se exhibe en la tabla 2.

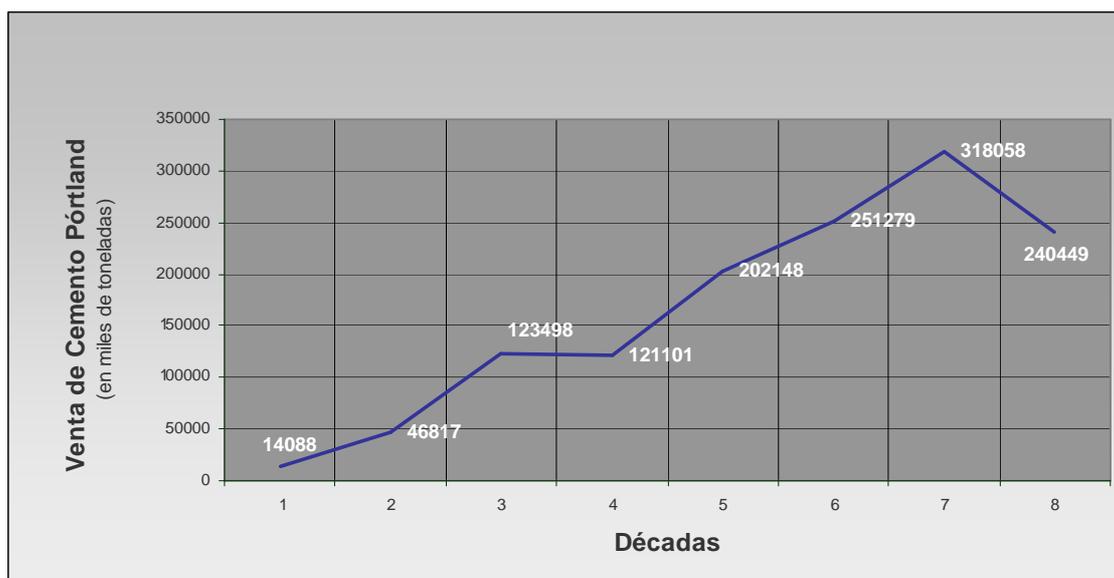


Figura 1 – Evolución de la venta de Cemento Pórtland ANCAP. (ANCAP, 2006)

Con el paso del tiempo se fue consolidando el uso de hormigones de tipo convencional, de baja resistencia mecánica y durabilidad, incidiendo negativamente desde el punto de vista económico, desde la expectativa de vida útil de los edificios y convirtiéndose en una agresión ambiental por el elevado consumo energético y de materiales.

Por otra parte la carencia de extracción minera de hierro sumada a una muy pequeña industria siderurgia en Uruguay, han sido los factores principales por los cuales no se han desarrollado las estructuras metálicas en el país; en la actualidad dependen directamente de la importación de la perfilería.

En función de esta situación se considera relevante para Uruguay comenzar a desarrollar la producción de hormigón con otras características, que atienden los aspectos productivos, económicos y ambientales.

Para esta tarea es importante trabajar en dos direcciones, complementarias y organizadas temporalmente, de la siguiente manera:

- la vinculada a los materiales – verificando la existencia de los materiales necesarios o su posibilidad de desarrollo. La referencia en este sentido es al cemento, los pétreos, las adiciones y los aditivos;
- la gestión de la producción – este tipo de hormigón implica cambios en los procesos de producción y por lo tanto las empresas tienen que prepararse para controles de calidad, ambientales, entre otros, diferentes a los convencionales.

Adjunto a esta realidad, comienza a desarrollarse en Uruguay desde hace aproximadamente una década la extracción minera de oro, la que genera, por un lado, un importante residuo pétreo, producto de la trituración de rocas y por otro, lodos generados en el proceso de extracción del mineral y obtenidos de las piletas de relave. Este residuo pétreo, que por lo emergente de esta actividad productiva, no ha sido estudiado aun en nuestro medio, esta generando un impacto ambiental adverso en el noreste del país, y no tiene un destino definido hasta el momento. En la figura 2, se ubica la Minera San Gregorio, en la localidad de Minas de Corrales en el Departamento de Rivera, espacio productivo en donde se genera el residuo pétreo que se estudia en este trabajo.



Figura 2 – Ubicación de la Minera San Gregorio en la localidad de Minas de Corrales, Departamento de Rivera.

En la figura 3 (a) se muestra uno de los yacimientos de la mina y en la 3 (b) la acumulación de residuo en una de las escombreras.



(a)

(b)

Figura 3 – Minera San Gregorio (Minas de Corrales, Departamento de Rivera): (a) Yacimiento; (b) Residuo pétreo

La recuperación económica del Uruguay y el desarrollo creciente de la industria de la construcción ha provocado un incremento significativo en el consumo de materiales. En la tabla 2 se exhiben el consumo de cemento, de hormigón y de áridos gruesos durante el año 2010, incorporándose el volumen aproximado de residuos pétreos generados por la Minera San Gregorio en ese mismo período.

**Tabla 2 – Consumo de hormigón, cemento y pétreos en Uruguay – Año 2010 (HORMIGONES ARTIGAS y MINERA SAN GREGORIO)**

Año	Consumo de Cemento Pórtland (Toneladas)	Consumo de Hormigón (m <sup>3</sup> )	Consumo de áridos gruesos para producción de Hormigón (m <sup>3</sup> )	Volumen aproximado de residuos pétreos de la mina (m <sup>3</sup> )
2010	850.000	1.715.000	1.370.000	1.500.000

Esta realidad descrita es la motivación principal para investigar las **características de este residuo pétreo y su posible** inclusión en la producción de hormigón.

## 1.2 Objetivo de la investigación

El objetivo general de este trabajo es **caracterizar** el residuo pétreo de la industria minera del oro para la producción de hormigón.

### 1.3 Estrategia de investigación

La investigación propuesta responde a una estrategia experimental, que requiere control sobre los sucesos y atiende una interrogante contemporánea (FORMOSO et al., 1999, apud YIN<sup>2</sup>, 1994).

Por otra parte, se aclara que la generación de conocimiento vinculado a los materiales utilizados en la construcción debería sustentarse en investigación básica de los mismos.

### 1.4 Delineamiento de la investigación

El delineamiento de la investigación puede ser visualizado en la figura 4.

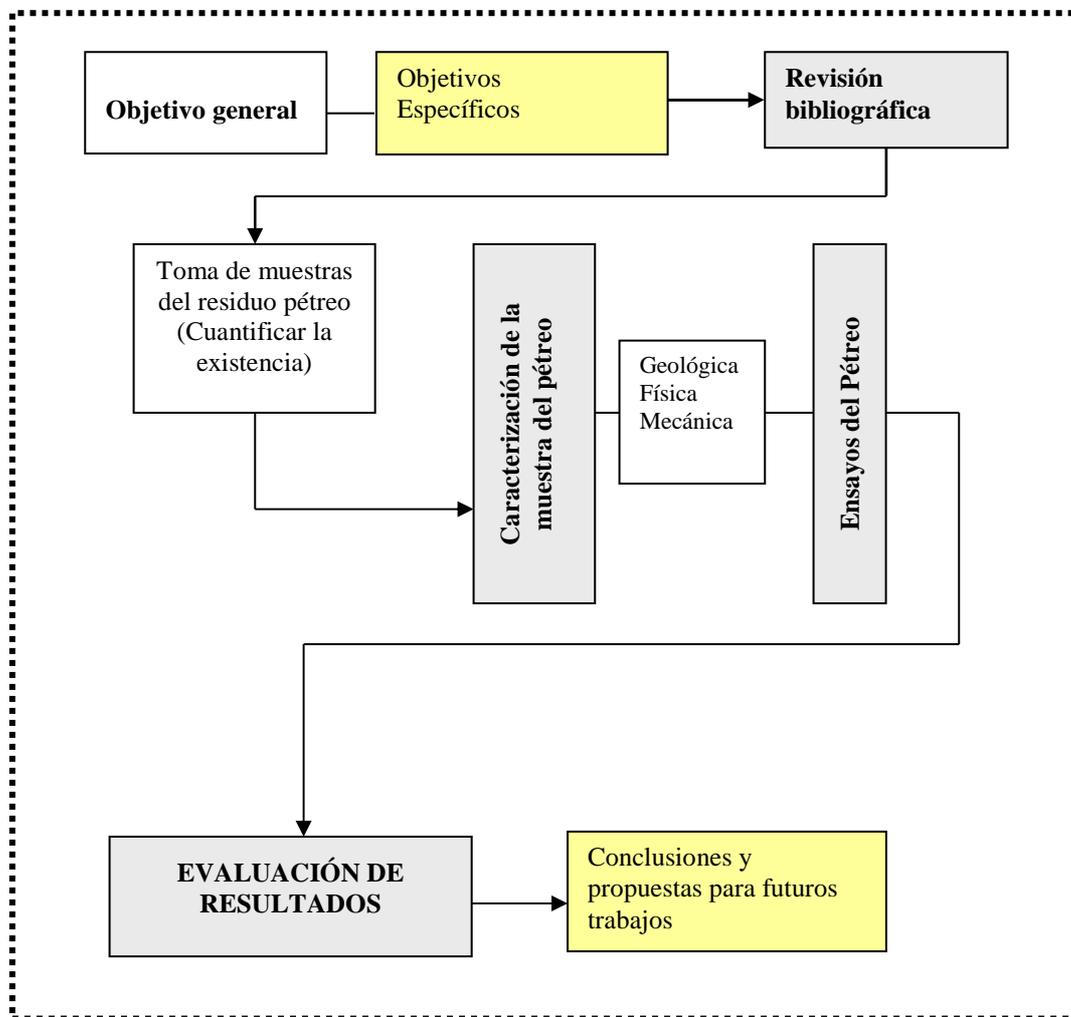


Figura 4 – Esquema gráfico de la investigación.

<sup>2</sup> YIN R. K. Case study research: design and methods. 2<sup>nd</sup> ed. Sage Pubs, Thousand Oaks, 1994.

## **1.5. Estructura del trabajo**

El trabajo está organizado en siete capítulos. En el capítulo uno, se presenta la introducción, en donde se hace referencia a la importancia del tema. Por otra parte se exhiben el objetivo general y los objetivos específicos, así como también la estructura del trabajo y las limitaciones de la investigación.

En el capítulo dos, comienza una revisión bibliográfica que atiende el uso de residuos y la producción del hormigón; en este espacio se consideran especialmente los problemas ambientales y la experiencia de países, de la región del Uruguay o fuera de la misma, con desarrollo minero y tratamiento de residuos.

En el capítulo tres, se presenta la incidencia de los agregados pétreos en el hormigón, considerando la estructura interna de la mezcla, la resistencia, la estabilidad dimensional y la durabilidad de las estructuras.

Las características, en función de su origen, su porosidad, su composición y exposición y la caracterización, en función de sus propiedades geológicas, físicas y mecánicas, de los agregados pétreos, utilizados en la producción de los diferentes tipos de hormigón, se presentan en el capítulo cuatro.

En el capítulo cinco, se presenta el desarrollo de la investigación experimental, en esta sección se exhibe no solamente los ensayos realizados sino también un abordaje desde la dificultad de trabajar experimentalmente con un material natural.

Los resultados de los ensayos y la discusión sobre los mismos se presentan en el capítulo seis, comparando los datos obtenidos con los de los agregados de uso convencional en la producción de hormigón.

Las conclusiones sobre el posible uso del residuo pétreo en la producción de hormigón y las sugerencias para la realización de futuros trabajos se presentan en el capítulo siete.

## **1.6 Limitaciones de la investigación**

En esta investigación la limitante surgió al momento de la extracción de las probetas del pétreo, de acuerdo a las dimensiones exigidas por las normas ASTM C 170 – 90, ASTM D 4543 – 01 y ASTM D 2938 – 95.

## **2 EL USO DE RESIDUOS Y LA PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN**

El espacio de construcción de conocimiento vinculado al tema de la investigación puede dividirse en tres trayectos: el uso de residuos en la industria de la construcción; el análisis geológico en una industria minera emergente y el desarrollo de hormigón a partir del uso de residuos pétreos sustituyendo los agregados convencionales.

### **2.1 Uso de residuos en la industria de la construcción**

Es indudable que el uso de residuos en la industria de la construcción, o en otra cualquiera, está directamente vinculado al consumo racional de los recursos naturales planetarios. Con el avance de la investigación, y el número de trabajos realizados en esta dirección es una clara demostración, los arquitectos e ingenieros comienzan a desarrollar una conciencia especial con respecto a los problemas medioambientales y asumen lentamente que es justamente nuestra industria una gran generadora de residuos. Uno de los aspectos más conocidos del desperdicio en la construcción es específicamente el de los materiales, provenientes de los más diversos orígenes en el proceso constructivo y testigo fiel de la necesidad de profundizar en una gestión moderna y segura de la construcción (VARALLA, 1997).

Según Cavalcante Rocha y John (2003), en cualquier sociedad la cantidad de residuos generados supera la cantidad de bienes consumidos y en definitiva el desarrollo sostenible requiere una reducción del consumo de materias primas naturales no renovables.

En función de esto resulta imprescindible comenzar a estudiar el uso de residuos, de las múltiples cadenas productivas, para el fortalecimiento de la industria de la construcción. Pero esta actividad requiere de investigación y estudio de viabilidad, tanto desde el punto de vista económico-técnico como ambiental (DAL MOLIN, 2009).

Si bien, la mayor parte de las investigaciones realizadas sobre la posibilidad del uso de los residuos se apoyan en la necesidad de aportar a partir de los problemas del medio ambiente, solo se puede garantizar el pleno desarrollo de estas investigaciones si los beneficios sociales se traducen en la generación de empleos, en la reducción del volumen de errores, en el consumo de residuos y no de recursos naturales y en evitar la contaminación y el riesgo de la salud de la población (JOHN y ANGULO, 2003).

El uso de residuos en la industria de la construcción también debe estar dirigido a la producción de viviendas para los sectores de mayor deterioro socio-económico de la población.

Esta búsqueda intencional, no casual, que intenta la promoción de fines sociales relevantes y de una apropiación social de la tecnología (WINNER, 2008), participa activamente en un entorno armónico que desarrolla la economía sin poner en riesgo el futuro ambiental del hábitat. Por otra parte, y apoyándonos en Rocha y Cheriaf (2003), la importancia del aprovechamiento de los residuos en una acción dedicada a la vivienda de interés social se debe básicamente a dos factores:

- la posibilidad de desarrollo de materiales de bajo costo a partir de subproductos industriales, disponibles localmente, a través de la investigación de sus posibilidades;
- la interfase directa del sector de la construcción con la cadena productiva generadora de insumos, minerales, e indirectamente a través del potencial uso de materiales y procesos que causen mínimo impacto en la cadena productiva.

Es indudable que se deben determinar estrategias adecuadas para la utilización de los residuos y es claro en ese sentido que el potencial aprovechamiento de los mismos está directamente vinculado a una precisa caracterización del mismo, que solo se logrará conociendo en profundidad el proceso productivo que lo generó. Esta caracterización, en la medida que constituye un ciclo productivo virtuoso, favorece la futura utilización cuando nuevamente se convierta en un residuo producto de la demolición edilicia.

Para la clasificación de los residuos existen múltiples criterios, pero es justamente el que lo vincula al proceso productivo original el que permite la primera caracterización de este material. En la figura 5, Gascón Cervantes (2007), determina un listado de residuos a partir de los sectores primario (actividades extractivas), secundario (actividades de transformación y terciario (actividades de servicio y consumo), de las actividades económicas de la sociedad.

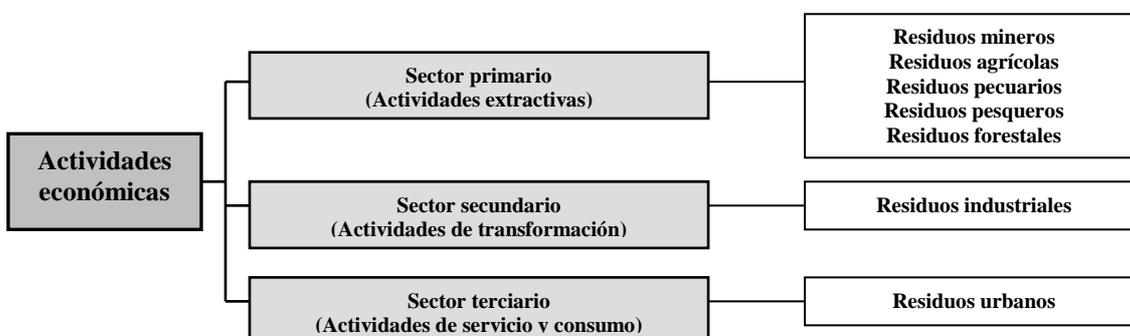


Figura 5 – Clasificación de residuos a partir de la actividad económica (GASCÓN CERVANTES, 2007)

El interés por los residuos en la construcción civil está vinculado a dos motivos principales: en principio, el hecho que al igual que los materiales de construcción la gran mayoría de los residuos tenga una composición química con predominancia de los silicatos, aluminatos y óxidos alcalinos; y por otra parte, el enorme volumen de residuos de la producción, que asegura el suministro para la elaboración de materiales de construcción en las cantidades necesarias (CAVALCANTE ROCHA, CHERIAF, 2003).

Los aspectos a considerar al momento de caracterizar los materiales, residuos, a reutilizar se pueden definir de acuerdo a lo establecido en la tabla 3.

**Tabla 3 - Recomendaciones de los atributos considerados (CAVALCANTE ROCHA y CHERIAF, 2003)**

<b>Características</b>	<b>Residuos/materiales desarrollados</b>
<b>Técnicas</b>	Facilidad de elaboración de proyectos. Facilidad de realización de control. Sistema de transporte, acondicionamiento. Distribución geográfica. Riesgos de contaminación. Equipamientos existentes.
<b>Sociales</b>	Seguridad en el empleo Posibilidad de generación de empleos Reducción de pasivo ambiental
<b>Económicas</b>	Economía de energía Economía de materias primas Economía de costos de producción Inversiones necesarias Costo de transporte

En la tabla 3, Cavalcante Rocha y Cheriaf (2003), sugieren caracterizar a los residuos tomando en cuenta tres aspectos: técnicos, sociales y económicos, y a partir de estas caracterizaciones analizar la viabilidad de introducirlos en la cadena productiva de la construcción. Resulta evidente al analizar esta propuesta que se pueden estudiar materiales que provengan de diferentes ámbitos de la producción e incluso con diversos estados de transformación.

Para Edwards (2009), el grado de reciclaje de los residuos depende en parte del mercado, pero los proyectistas podrían aumentarlo si eligieran materiales con un alto porcentaje de contenido reciclado. Al tener en cuenta lo posibilidad de reciclar debemos considerar los

impactos medioambientales en cada etapa y las consecuencias del ciclo de vida completo en cada una de las opciones de reutilización y reciclaje.

Al igual que Cavalcante Rocha y Cheriaf (2003), Edwards (2009) sugiere considerar las tres perspectivas sobre el desarrollo sostenible al momento de considerar la reutilización de los residuos, lo cual se presenta en la figura 6.

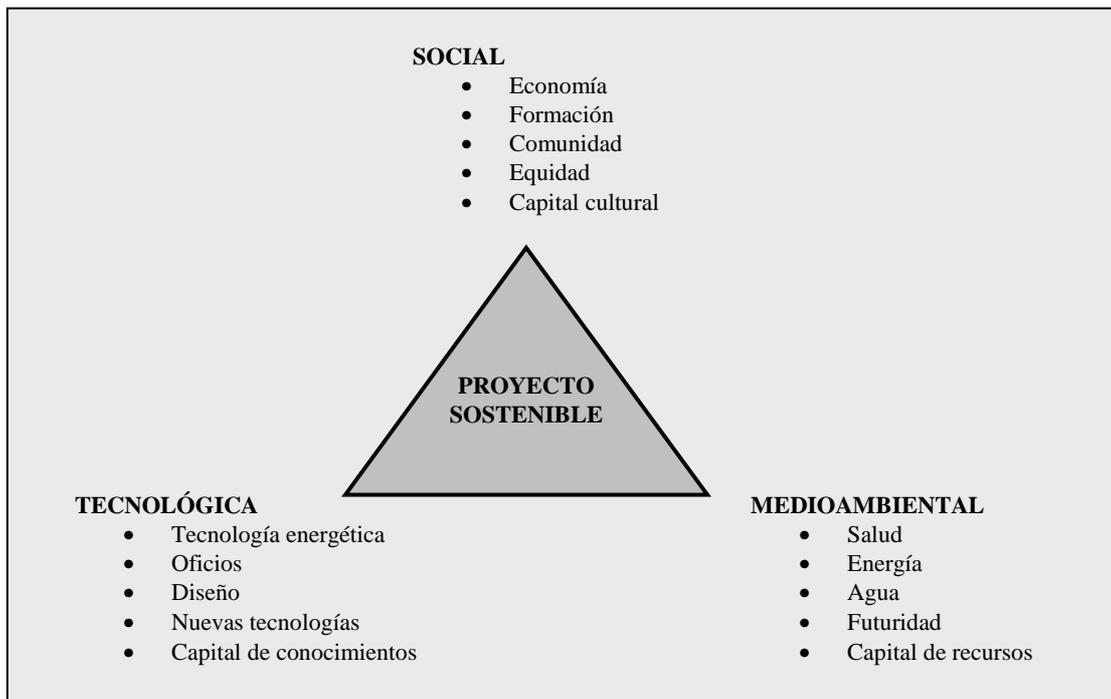


Figura 6 – Tres perspectivas sobre el desarrollo sostenible: social, tecnológico y medioambiental (EDWARDS, 2009)

Independiente de las acciones técnicas, resulta imprescindible la legislación, tanto nacional como de normativa municipal, para la consideración integral de los materiales y los residuos, que atienda los aspectos definidos por Cavalcante Rocha y Cheriaf (2003), y que se exhiben en la tabla 3.

Por otra parte, es importante considerar que el desarrollo del uso de residuos en la industria de la construcción exige la generación de políticas públicas, que sostenidas en el marco legal adecuado generen acciones concretas, involucrando medidas de financiamiento para la producción, de investigación e innovación, de capacitación, entre otros.

En algunos países, como España, los cambios legislativos exigidos para el ingreso a la Unión Europea han conducido a la necesidad de dar respuesta a la gestión de los residuos, y es precisamente en este marco legislativo que empieza a considerarse que no reutilizar estos

desechos no es viable ni ventajoso económicamente para la sociedad, estando en algunos casos obligados a realizarse por ley (CALVO PEREZ et al, 2002).

Precisamente en el sector español, de acuerdo con Morán del Pozo et al., (2011), el sector de la construcción ha crecido en forma exponencial en las últimas décadas, y con él la producción de residuos de construcción y demolición, se estima en 2 kg. de residuos generados por habitante y día en España como media en los últimos años, lo que representa una magnitud de producción escalofriante. Esta situación ha propiciado la aparición de normas legales que regulan la producción y gestión de los residuos y que obliga a la inclusión de un documento de carácter técnico en la fase de redacción del proyecto, con el que se pretende garantizar la aplicación real de la gestión de residuos de construcción y demolición. La finalidad específica de esas normas implica:

- la reducción de la producción de residuos;
- la reutilización de aquellos residuos o elementos que así lo permitan;
- el reciclado de los residuos que no puedan reutilizarse;
- la valorización energética de los residuos que no puedan reciclarse;
- el depósito adecuado en vertedero de todo lo que no pueda valorizarse.

En el caso de los Estados Unidos de América, en muchos de los estados, se están construyendo instalaciones para el tratamiento de residuos de la industria de la construcción, respondiendo a la necesidad de proteger al medio ambiente pero considerando también los requerimientos socio-económicos que demandan el fortalecimiento del empleo. Consideran fundamental el rol de la autoridad para el desarrollo de mercados que demanden los materiales que se pueden recuperar, como ser áridos, hormigón, metal, envases, suelos contaminados, entre otros. Es importante destacar el protagonismo que le asignan a la administración pública en la gestión del proceso y en asegurar la sostenibilidad del proyecto (SPENCER, 2001).

Otra particularidad identificable en Estados Unidos de América, es la inversión en la infraestructura de transporte interno, para lo cual, sumado a los materiales vírgenes, las agencias de transporte han estimulado el uso de residuos y materiales reciclados a lo largo de los años; estos materiales y su producción anual se exhibe en la tabla 4. Recientemente se ha desarrollado una nueva legislación que obliga a la expansión del uso de estos productos (KASSIM et al., 2005).

En el caso de Honk Kong la implantación de un sistema de gestión de residuos de la industria de la construcción no solamente ha impactado favorablemente en la protección del

medio ambiente sino que por otra parte ha disminuido costos, evitando multas a las empresas, mejoramiento a la imagen corporativa, estímulo en la administración pública para el desarrollo de normativas ambientales, incremento de la competitividad, mejora del ambiente de trabajo y las condiciones laborales de los trabajadores, disminución de riesgos, etc. Pero se han encontrado dificultades en la gestión, incremento de costos y por sobre todas las cosas carencia de expertos para una actividad emergente (SHEN y TAM, 2001).

**Tabla 4 – Residuos y materiales derivados, usados en la construcción y reparación de infraestructura vial, y su producción anual en los Estados Unidos de América (KASSIM et al., 2005)**

<b>TIPO</b>	<b>Identificación en bibliografía</b>	<b>Producción anual (reciclado en millones de toneladas)</b>
Partículas de hollín	BHF	5,4 – 7,2
Escoria de alto horno	BFS	14
Polvo de fibra de alfombras		1,2
Cenizas de carbón	BA	53,5
Cenizas volátiles de carbón	FA	45
Suelos contaminados	CS	Sin reporte
Gas desulfurizado del lavado de materiales	FGDSM	21,4
Arena de fundición	FS	9 – 13,6
Polvo de hornos	KD	90
Basura del procesamiento de minerales	MPW	50.000
Ceniza de incineración de basura sólida municipal	MSW	2,5
Escoria no ferrosa	NFS	0,45 – 0,9
Plástico	PL	44,7
Cantera de materiales derivados, subproductos	QBP	3,6
Pavimento de asfalto recuperado	RAP	Sin reporte
Material de hormigón recuperado	RCM	Sin reporte
Techados de chapa, tejas metálicas	RSS	10
Neumáticos de automóviles	ST	280
Cenizas de lodos depurados	SSA	0,45 – 0,9
Escoria de acero	SS	6,9
Residuos de sulfato	SW	900
Residuos de vidrio	WG	9,2

En la tabla 5, Sanchez de Juan (2004), vincula la generación de residuos de la industria de la construcción, entre otras cosas, con el número de plantas de reciclado. Llama especialmente la atención el número de plantas de reciclado de cada país, considerando que las mismas atienden únicamente a los residuos que surgen de la industria de la construcción y la

demolición. Por otra parte, queda en evidencia que la relación entre el volumen de residuos y el número de plantas responden a criterios diferentes para el tratamiento de residuos en los países de Europa.

**Tabla 5 - Gestión de residuos de construcción y demolición en Europa (SANCHEZ DE JUAN, 2004)**

País	Producción de residuos de la construcción (Millones de toneladas)	Promedio (kg/hab)	Numero de plantas de reciclado	Destino del porcentaje		
				Vertido	Reciclado	Otros
Holanda	11,7	718	120	9	90	1
Bélgica	6,7	666	92	17	81	2
Dinamarca	2,6	509	30	16	75	9
Reino Unido	30	509	50-100	55	45	0
Austria	4,7	580	150	59	41	0
Alemania	5,9	720	1000	82	18	0
Francia	23,6	404	50	85	15	0
España	12,8	325	> 10	> 90	< 10	-

## 2.2 Análisis geológico y ambiental en una industria minera emergente

A lo largo de la historia y por razones políticas, tanto nacionales como regionales, el Uruguay ha postergado el desarrollo de una industria minera en todo el territorio nacional. Las cadenas productivas vinculadas a la extracción de minerales se reducen a la explotación, en canteras a cielo abierto, de recursos pétreos que en general son insumos para la producción de cementos tipo Pórtland o para ser utilizados con muy baja transformación en la industria de la construcción.

Desde hace aproximadamente dos décadas y media, la Dirección Nacional de Minería y Geología, DINAMIGE, dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Minería, MIEM, órgano rector de la actividad minera en Uruguay, habilitó la explotación de minas de oro en el Departamento de Rivera al noreste del territorio, en la frontera limítrofe con el Brasil y hace unos pocos años también en el departamento de Flores al sur del país (ésta última de menor porte).

Esta actividad, de emergente desarrollo, si bien proporciona un espacio de fortalecimiento económico local, constituye una cadena productiva de muy baja transformación

del recurso natural y que de mantenerse desvinculada del resto del aparato productivo genera un aporte al fortalecimiento del empleo, directo e indirecto, de bajo impacto. Considerando además que el lingote de material DORÉ (50% plata, 50% oro) se envía al exterior para realizar la separación del oro.

Estas son las principales razones por las cuales se puede afirmar que, vinculado a esta cadena productiva, existen enormes vacíos de conocimiento y que se deberá contar con el apoyo de las empresas involucradas para estudiar un posible uso del residuo generado. Si no hubiera la firme disposición de la dirección de una empresa en desarrollar mercado para sus residuos, difícilmente un proyecto de investigación tendrá suceso completo por varias razones: el suministro del residuo y el conocimiento del proceso interno que define las características del residuo (JOHN y ANGULO, 2003).

Por otra parte, en Uruguay, el control de la gestión de estos residuos es responsabilidad de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), dependiente del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), quien se encarga de fiscalizar el cumplimiento de la Ley N° 17.283 que establece en su artículo 21 la responsabilidad de la gestión de los residuos sólidos. Para este fin la DINAMA elaboró la Propuesta Técnica para la Reglamentación de la gestión integral de residuos sólidos industriales, agroindustriales y de servicios, 2003. El reglamento define las diferentes actividades generadoras de residuos sólidos y en el punto N° 1 especifica: “Explotaciones de minas y canteras a excepción de aquellos que son gestionados en el mismo predio de la explotación y forman parte del proyecto de extracción y/o beneficiamiento de minerales”. En el punto 3 del citado reglamento se establece que todo generador será responsable de contar con un Plan de Gestión de residuos sólidos que deberá ser aprobado por la DINAMA, el cual deberá comprender el manejo interno, reciclado, valorización, transporte, tratamiento y/o disposición final de conformidad con lo previsto en la presente reglamentación y cubrir la totalidad de residuos que genere su actividad. Indica también que el generador del residuo deberá garantizar que la información de la caracterización de los residuos sea la correcta.

En la actualidad, en Uruguay, como consecuencia de presiones ambientales, algunas empresas de minería están procurando alternativas de utilización de residuos (GOSO AGUILAR, 2008).

Pero este análisis no debe circunscribirse a la experiencia nacional sino que por el contrario, resulta imprescindible la incorporación de información vinculada al trabajo minero en

la región, sobre todo considerando que, en líneas generales, los países latinoamericanos cuentan con una estructura minera histórica e importante.

En Perú, país donde la minería ocupa tradicionalmente un lugar importante en la economía, y por lo tanto se generan grandes cantidades de residuos que se almacenan en canchas de desmontes y presas de relaves, se trabaja en una gestión que involucra la extracción química secuencial para evaluar las diferentes formas químicas en que se encuentran los metales en los residuos y la aplicación de modelos matemáticos de movilidad para estimar la proporción en que un elemento puede pasar a una fracción fácilmente disponible y de transporte para estimar como estos contaminantes impactan en el medio ambiente. Ambos modelos constituyen herramientas para una rápida proyección y evaluación del potencial de contaminación (SINCHE GONZÁLEZ, 2007). Pero lo más interesante en este país es el destino que comienza a darse a los residuos a partir de la Ley N° 28.271 del 2 de Julio de 2004, debido a que comienza a trabajarse en el establecimiento de un marco técnico para formular alternativas viables de reutilización de pasivos ambientales mineros como materiales de insumo, dando origen a materia prima en la construcción de pavimentos y bloques (ROMERO et al., 2007).

En Brasil la actividad minera genera gran cantidad de residuos sólidos, de los cuales los más importantes, cuantitativamente hablando en función de su volumen, son los estériles y los desechos. Estos residuos sólidos son clasificados por las normas brasileras según el riesgo a la salud y la agresión medio ambiental. La norma NBR 10004<sup>3</sup> establece tres clases de residuos sólidos: los peligrosos, los no inertes y los inertes. Tradicionalmente los estériles se ubican en escombreras las cuales en algunos casos no tienen la rigidez que impide el desplazamiento de los mismos, generan agresión medioambiental, contaminación de las aguas, entre otros (SANCHEZ, 1995).

El caso de México demuestra especial interés, si bien la actividad minera es parte de su economía desde la colonización europea, en la actualidad representa alrededor del 5 % del producto interno bruto. Pero por otra parte los estudios realizados dejan en evidencia un dato realmente preocupante debido a que esta cadena productiva genera un gran daño ambiental; del 95 al 98 % del material extraído de las minas es depositado en sitios denominados “presas de jales”, denominación local de las arenas finas, que cubren grandes extensiones de terreno y que por sus características químicas, carencia de nitrógeno y fósforo, sumado a un contenido de humedad muy limitado, impiden el desarrollo de una cubierta vegetal (GARCÍA MEZA y DURAN DE BAZÚA, 2007). Por otra parte tienen los técnicos mexicanos cuantificado el

---

<sup>3</sup> La norma NBR 10004 cambió y ahora tiene dos clases: Clase I – Residuos peligrosos; Clase II-a – Residuos no peligrosos y no inertes y la Clase II-b – Residuos no peligrosos e inertes.

porcentaje de los residuos industriales provenientes de la minería, que se corresponde en la actualidad con el 65 % de los residuos industriales del país.

En el caso de Chile, país donde la industria minera industrializada cuenta con 150 años de actividad y hoy se encuentra mayormente en manos de empresas multinacionales, no cuenta con una normativa específica relativa a los residuos mineros, que atienda la preocupación creciente en la ciudadanía. La Ley N° 19.300, “Bases Generales del Medio Ambiente”, no define instrumentos de gestión específicos para la actividad minera, considerando el residuo minero solamente el que surge de los desmontes, escorias y relaves. Algunas otras normas, de jerarquías variables, dejan en evidencia que el legislador y el regulador establecen la diferencia entre residuo minero propiamente dicho y residuo industrial, el que puede constituirse en materia prima o subproducto para otra cadena productiva. En este sentido un referente fundamental para la jurisprudencia chilena han sido algunas acciones del Tribunal Supremo Administrativo de Finlandia en la regulación de la actividad minera, donde se insiste en la necesidad de considerar a los residuos como subproductos o materias primas para otras industrias, atendiendo en la reutilización no solamente las condicionantes técnicas sino el interés económico, rentabilidad, que dicha actividad genere (OLIVARES FUENTES, 2006).

En la Argentina la actividad minera está regulada por la Ley N° 24.585 que incorpora al Código de Fondo el Título complementario “De la protección ambiental para la actividad minera”, que tiene como objetivo homogeneizar en todo el ámbito del país las normas de protección ambiental a exigir a los emprendimientos mineros. De todas maneras, esta actividad que se encuentra diseminada por todo el territorio argentino, no presenta una experiencia destacable en la gestión de los residuos, y es común la presencia de manifestaciones ciudadanas denunciando los perjuicios que en algunas localidades genera esta actividad. Por otra parte en el ámbito académico se identifica la preocupación y la existencia de proyectos de investigación que trabajan en esta dirección. En la Universidad Nacional de Salta, expertos integrantes del Instituto de Beneficios Minerales (INBEMI), trabajan en la posibilidad de crear productos comerciales aptos para la construcción, ladrillos, cerámicas y baldosas, a partir de la cocción del barro que genera la producción del ácido bórico, un mineral que se extrae de los yacimientos de borato. Los especialistas de la Universidad indicaron que la obtención del ácido bórico genera unas 100 mil toneladas de residuos que hasta ahora no han sido aprovechados y sólo yacen en enormes piletones en las puertas de la propia ciudad capital. Existe un área de unas tres manzanas completamente desertizada por este proceso de acopio que viene desde hace 20 años atrás (FLORES, 2006). La Argentina es el tercer productor de boratos del mundo, en cuyos procesos de extracción e industrialización se contaminan grandes extensiones de tierra y de

agua, subterráneas y superficiales, con sales y desechos que superan los límites establecidos en la legislación vigente, (VIANA y ALBARRACIN, 2008).

En el caso de Sudáfrica, donde el sector minero es clave para el desarrollo económico del país, el impacto de largo tiempo causado por esta actividad incrementó las concentraciones de metales pesados y cambios en el PH, tanto en los suelos como en las aguas superficiales. Durante la clausura de una mina, la empresa debe dar certeza que el espacio de la mina y el ambiente que la rodea esta libre de elementos contaminantes y que se recuperan las condiciones originales. En este sentido las investigaciones realizadas exhiben que un correcto tratamiento de los residuos mineros no es costoso y puede convertir a la basura en un recurso valioso (POLLMANN et al., 2010).

En los Estados Unidos de América, de acuerdo con Kassim et al., (2005), los residuos generados durante el procesamiento de los minerales, extracción y obtención de menas y minerales, puede subdividirse en las siguientes categorías: residuos de rocas, relaves, residuos de carbón, lodos de lavado y residuos de extracción del petróleo. Este residuo que surge del procesamiento de los minerales es aproximadamente la mitad de todos los desechos sólidos generados cada año en los Estados Unidos. La descripción de los mismos, en caso de las rocas durante dicho procesamiento, puede observarse en la tabla 6.

**Tabla 6 – Tipos de residuos generados durante el procesamiento de minerales (Adaptada de KASSIM et al., 2005)**

Tipos	Descripción
<b>Residuos de rocas</b>	Gran cantidad de residuos de rocas es producida por las operaciones superficiales de la mina, como la apertura de las fosas para el cobre, el fosfato, el uranio, el hierro y las minas de taconita.
	Pequeñas cantidades son generadas por minas bajo tierra.
	Los residuos de roca consisten generalmente en gruesos, triturados, o bloques de material que cubren un rango de tamaños muy diverso, desde grandes bloques a partículas de arena y polvo.
	Los residuos de roca son típicamente removidos durante las operaciones de la mina, con muy poco o nada de valor mineral.
	Los tipos de roca incluidos son ígneas (granito, rhyolita, quartz), metamórficas (taconita, esquistos) y sedimentarias (dolomita, caliza, arenisca, esquistos de petróleo)
	Se estima que aproximadamente mil millones de toneladas de residuos de roca son generados por año en los Estados Unidos.

### **2.3 El desarrollo de hormigón a partir del uso de residuos, sustituyendo los agregados convencionales**

En este ítem se analiza el desarrollo de hormigón a partir del uso de residuos en sustitución de los agregados convencionales; si bien el concepto de residuo es muy amplio en el sentido que no existe ninguna acción implementada por el hombre que no genere algún tipo de desecho, el análisis se ajusta a los residuos pétreos, producto en su mayoría de las actividades extractivas mineras, a los residuos de otras industrias y a los agregados manufacturados producidos a partir de residuos.

Todos los resultados de la actividad humana producen, en alguna medida, la degradación del medio ambiente, pero es la construcción civil una de las cadenas productivas protagonistas de este deterioro. El reto consiste en minimizar esta degradación a un nivel compatible con el desarrollo sostenible, asegurando un futuro posible para las próximas generaciones. Esta búsqueda implica la integración de los aspectos medioambientales, económicos y sociales. Para los técnicos de la comunidad de la construcción, el concepto de desarrollo sostenible implica el uso de materiales de altas prestaciones producido en un plazo razonable, a bajo costo y con el menor impacto ambiental posible. La manera de reducir esta agresión incluye la reducción en la producción de residuos y de las emisiones de los nocivos gases del efecto invernadero en la atmósfera, una utilización más eficiente de los recursos minerales y metálicos, y un mayor uso de materiales reciclados como agregados (MALHOTRA, 1999).

La acumulación de algunos materiales de desecho ha propiciado que se busquen nuevas aplicaciones en el campo de la construcción. Así, cabe citar algunos trabajos de investigación encaminados a encontrar la forma de reciclar hormigones procedentes de demoliciones como sustitutos de áridos en la dosificación de nuevos hormigones o la sustitución de lodos de depuradoras como adiciones en la fabricación de adoquines prefabricados de hormigón (GONZÁLES et al., 2006).

De acuerdo con Aitcin y Mindess (2011), el hormigón es por lejos el material más usado en la construcción en el mundo, debido a la economía y disponibilidad de sus constituyentes, a su versatilidad, durabilidad y adaptabilidad, pero necesariamente debe ser considerado a la luz del desarrollo del concepto de sostenibilidad. A partir de esto definen los “*Pasos para la sostenibilidad*”, identificando un número de acercamientos para hacer del hormigón un material más sustentable, incluyendo:

- usar hormigones de alta resistencia;
- producir hormigón más durable;
- reemplazar por encima de la mitad del cemento Pórtland utilizado con materiales cementicios suplementarios;
- utilizar filleres;
- fabricar el cemento Pórtland en forma más eficiente;
- usar residuos de materiales como combustible;
- **usar hormigón reciclado y otros residuos industriales como fuente de agregados;**
- encontrar caminos para capturar, depositar y confiscar las emisiones de CO<sub>2</sub>;
- utilizar el polvo del horno de cemento en algunas aplicaciones;
- utilizar menos agua;
- mejorar el diseño estructural y la normativa de edificación.

Obviamente los autores reconocen que algunos de estos puntos son más efectivos que otros.

Es razonable que en los diversos estudios sobre la incorporación de residuos en la elaboración de hormigón se haya priorizado los que surgen de la propia industria. Independiente de la preocupación de los técnicos por una incorrecta gestión, que produce desechos en las obras en gran cantidad, surge a priori una entendible compatibilidad con el hormigón al momento de investigar.

En años recientes, los avances en la tecnología del hormigón se han enfocado en gran medida a desarrollar hormigones que apoyen la sostenibilidad medioambiental. Para lograrlo, una vía ha profundizado en las posibilidades de utilización de una gran gama de subproductos y residuos industriales que pueden contaminar el aire, agua o suelo, tales como la cenizas volantes, el humo de sílice, las escorias de horno alto, arenas de fundición, cenizas de cáscara de arroz, entre muchos otros. Como es de esperar, mas allá de ser depositados o encapsulados en el hormigón, el uso de estos materiales modifica las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido y, en muchos casos, estos subproductos y residuos redundan en una mejora de las prestaciones reológicas, mecánicas y/o durables (VALDEZ et al., 2010).

Es de destacar lo conveniente de una demolición edilicia selectiva, que si bien es más costosa y lenta, nos asegura una clasificación primaria de los residuos que pueden llegar a

reutilizarse en la producción de hormigón. Sería conveniente legislar el proceso de la demolición a partir del análisis de este parámetro de trabajo (Begliardo et al., 2008).

El crecimiento de la preocupación con la preservación de recursos naturales no renovables ha conducido al desarrollo de estudios sobre el empleo de agregados reciclados en la producción de hormigón. Factores como el mantenimiento programado, el costo en función del ciclo de vida, el uso sustentable de los recursos naturales y energéticos ha suscitado el incremento en la atención cuando se dibujan proyectos y se gestionan emprendimientos en la Industria de la Construcción. En la otra mano, esta industria, que es una de las mayores consumidoras de recursos naturales y también responsable por el 30 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el medio ambiente y aproximadamente el 40 % de la basura producida por la acción humana, exhibe un alto potencial para la utilización de residuos. En la industria del hormigón, en particular, ya se usa basura de la producción de silicio, del acero, del papel, plantas termoeléctricas y de la agroindustria. Otro residuo que puede ser potencialmente utilizado para la producción de hormigón, aunque todavía no se ha generalizado su uso, es el residuo de la construcción y demolición (Lovato et al., 2012).

En esta dirección, investigadores como Maier et al., (2012), trabajaron sobre los efectos del uso de materiales reciclados, en diferentes cantidades, en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Los materiales reciclados utilizados en su estudio fueron escoria granulada de alto horno, en sustitución del cemento convencional, agregados de hormigón reciclado y residuos de vidrio en sustitución del agregado grueso y fino respectivamente. Las dosificaciones utilizadas oscilaron entre una sustitución del 25 % hasta un reemplazo del 100 % con materiales reciclados y se compararon los resultados con un hormigón convencional usando cemento ordinario y agregados naturales. Las dosificaciones y resultados figuran en las tablas 7,8 y 9. Las conclusiones a las que arribaron son las siguientes:

- un nivel de reemplazo no mayor de 50 % por materiales reciclados no impacta negativamente en las propiedades del hormigón endurecido, y mejora la resistencia a la compresión;
- el uso de materiales reciclados disminuye la trabajabilidad del hormigón;
- el uso de residuos de vidrio sin la inclusión de cemento de escoria tiene efectos negativos en las propiedades del hormigón endurecido;
- un nivel de reemplazo no mayor de 25 % disminuye ligeramente la resistencia a temprana edad e incrementa la resistencia final. Cuando ese nivel es no mayor de 75 % la resistencia disminuye tanto a temprana edad como al final. Un nivel de reemplazo del 100 % afecta negativamente las propiedades del hormigón.

**Tabla 7 – Dosificaciones. Hormigón convencional y hormigón con materiales reciclados incorporados. (Maier et al., 2012)**

Dosificaciones	Relación agua/material cementicio	Agua (kg./m <sup>3</sup> )	Cemento (kg./m <sup>3</sup> )	Cemento de escoria (kg./m <sup>3</sup> )	Agregado grueso natural (kg./m <sup>3</sup> )	Arena natural (kg./m <sup>3</sup> )	Agregado de hormigón reciclado (kg./m <sup>3</sup> )	Residuo de vidrio (kg./m <sup>3</sup> )	Aditivo incorporador de aire (ml/kg.)	Aditivo reductor de agua (L/kg.)
Hormigón convencional	0,4	146	365	0	977	785	0	0	98	0,3
Hormigón reciclado 1	0,4	146	365	0	0	0	977	676	98	3,7
Hormigón reciclado 2	0,4	146	0	365	0	0	977	654	98	3,7
Hormigón reciclado 3	0,4	146	274	91	712	594	237	186	98	1,7
Hormigón reciclado 4	0,4	146	183	183	475	385	475	361	98	0,3
Hormigón reciclado 5	0,4	146	91	274	237	187	712	526	98	1,7

**Tabla 8 – Propiedades de los agregados, normales y reciclados (Adaptada de Maier et al., 2012)**

Propiedad del agregado	Agregado fino		Agregado grueso	
	Residuo de vidrio	Arena natural	Agregado de hormigón reciclado	Agregado natural
Absorción de agua (%)	0,18	0,70	4,58	0,80
Peso específico	2,47	2,63	2,45	2,61
Modulo de finura	4,08	2,74	-	-
Peso seco unitario	-	-	85,02	103

**Tabla 9 – Propiedades del hormigón, agregados normales y reciclados, a diferentes edades (Adaptada de Maier et al., 2012)**

Dosificaciones	Hormigón fresco			Resistencia a la compresión				
	Asentamiento (cm)	Contenido de aire (%)	Peso unitario (kg./m <sup>3</sup> )	1 día	7 días	28 días	56 días	90 días
Hormigón convencional	4,45	10	2160	18,4	34	40,3	42,5	44,9
Hormigón reciclado 1	1,27	5,2	2230	14,6	22,1	26,6	30	33,6
Hormigón reciclado 2	1,27	4,6	2255	4,67	16,1	23,2	26,4	29,1
Hormigón reciclado 3	21	6,4	2220	16,1	29,1	38,4	40,8	46,1
Hormigón reciclado 4	1,27	7	2255	10,8	36,2	47,8	47,8	48,2
Hormigón reciclado 5	7,62	7,5	2148	6,5	31,4	38,3	39	43,7

Recientemente, de acuerdo con Tayeb et al., (2011), el consumo de agregados en la construcción se ha incrementado rápidamente debido al veloz crecimiento económico de los países. Por esta razón se han desarrollado hormigones que eviten el efecto económico negativo del alto consumo de pétreos, involucrando diferentes tipos de arena y residuos pétreos, como es el caso del polvo de mármol.

Para Hebhouh et al., (2011), trabajando también con el mármol, realizaron un trabajo experimental con una serie de dosificaciones sustituyendo los agregados naturales convencionales por el polvo que surge del procesamiento del mármol. Este residuo llega a ser el 70 % del material involucrado. Trabajando con una relación agua/cemento constante obtuvieron resistencias a la compresión similares y en algunos casos superiores al hormigón producido con agregados naturales. Cabe aclarar que la sustitución del agregado convencional alcanzó el 75 y el 100 %. Los resultados se exhiben en la tabla 10.

**Tabla 10 – Resistencia a la compresión ganada a los 28 días con sustitución de los agregados naturales por residuos del procesamiento del mármol (Hebhouh et al., 2011)**

Formulación de sustitución	Resistencia ganada a los 28 días (%)			
	Relación de sustitución			
	25 (%)	50 (%)	75 (%)	100 (%)
Sustitución de la arena natural (S)	17,2	<b>23,65</b>	16,1	<b>-23,29</b>
Sustitución del agregado natural (G)	21,86	17,56	<b>25,08</b>	5,7
Sustitución de la arena natural y el agregado natural (M)	<b>22,2</b>	16,84	16,84	1,07

La arena natural fue sustituida por arena reciclada en un 25, 50, 75 y 100 %. El hormigón formulado se identifica con la letra (S).

El agregado natural fue sustituido por agregado reciclado en un 25, 50, 75 y 100 %. El hormigón formulado se identifica con la letra (G).

La arena y el agregado natural fueron sustituidos por arena y agregado reciclado en un 25, 50, 75 y 100 %. El hormigón formulado se identifica con la letra (M).

Otros trabajos con el polvo de mármol han tenido como objetivo la producción de hormigón para la fabricación de adoquines de pavimentación, como es el caso de la investigación de Gencil et al., (2012), que reconociendo la dificultad de acopiar este residuo, sobre todo en los países de gran producción de elementos de mármol (Estados Unidos de América, Bélgica, Francia, España, Suecia, Italia, Egipto, Portugal, Grecia y Brasil), y trabajando con varias dosificaciones diferentes, que se exhiben en la tabla 11, lograron valores aceptables desde el punto de vista de la resistencia tanto a la compresión como a la abrasión a los 28 días de fabricados los adoquines. De todas formas aclaran que la demanda de agua aumentó a medida que se incrementaba el polvo de mármol en la dosificación, la densidad disminuyó y los valores alcanzados de resistencia fueron disminuyendo con el incremento de este residuo.

**Tabla 11 – Dosificaciones y resistencia a la abrasión en adoquines de hormigón con incorporación de polvo de mármol (Adaptada de GENCEL et al., 2012)**

Código	Tipo de cemento	a/c	Cemento (kg./m <sup>3</sup> )	Agua (kg./m <sup>3</sup> )	Polvo de mármol (%)	Polvo de mármol (kg./m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg./m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg./m <sup>3</sup> )	Desgaste a los 28 días (cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> )
A0	32,5	0,48	400	192	0	0	907	913	4,54
A1	32,5	0,50	400	200	10	177	806	812	4,30
A2	32,5	0,52	400	208	20	349	708	713	4,22
A3	32,5	0,55	400	220	30	514	608	612	3,65
A4	32,5	0,60	400	240	40	663	505	509	3,59
B0	42,5	0,40	400	160	0	0	954	961	4,22
B1	42,5	0,46	400	184	10	182	830	835	4,05
B2	42,5	0,49	400	196	20	357	724	729	3,69
B3	42,5	0,52	400	208	30	526	622	627	3,45
B4	42,5	0,55	400	220	40	688	524	527	3,37

En la misma línea, Abukersh y Fairfield (2011), plantean que el desarrollo sustentable implica la reducción del consumo de recursos naturales a partir de un apropiado reciclaje, y en este sentido entienden que se debe disminuir la cantidad de residuos que se envían a rellenar terrenos. El trabajo de investigación que realizaron se basó en el reemplazo del 30 % del contenido de cemento, en la producción de hormigón dosificado con agregado grueso reciclado, por polvo de granito rojo que surge de la fractura de las rocas. El hormigón obtenido exhibió buen desempeño en términos de trabajabilidad, dureza y resistencia comparado con un hormigón de cemento y agregados convencionales. Los resultados se presentan en las tablas 12, 13 y 14.

**Tabla 12 – Dosificaciones con diferentes contenidos de polvo de granito rojo reciclado (Abukersh y Fairfield, 2011)**

Contenido de polvo de granito rojo reciclado (%)	Masa (kg. por m <sup>3</sup> de hormigón fresco)				
	Cemento	Polvo de granito rojo reciclado	Agua	Agregado grueso	Agregado fino
0	425	0	170	1280	545
20	372	93	160	1270	545
30	345	145	155	1265	540
40	312	208	150	1250	535
50	280	280	145	1230	525

**Tabla 13 – Trabajabilidad de dosificaciones con polvo de granito reciclado como sustitución parcial del cemento (Abukersh y Fairfield, 2011)**

Polvo de granito rojo reciclado (%)	Reducción de agua (%)	Súper plastificante (%)	Relación agua/cemento	Asentamiento (mm)	Observaciones
0	0	0	0,40	15	Mezcla uniforme
0	16	0,8	0,34	20	Mezcla uniforme
20	16	0,8	0,34	25	Mezcla uniforme
30	16	0,8	0,34	20	Ligeramente cohesivo
40	16	0,8	0,34	25	Poco cohesivo
50	16	0,8	0,34	30	Ligeramente segregado

**Tabla 14 – Propiedades mecánicas: Comparativa dosificaciones con y sin polvo de granito rojo reciclado (Abukersh y Fairfield, 2011)**

Mezcla	Polvo de granito rojo reciclado (%)	Resistencia a la compresión (MPa)			Resistencia a la tensión de fractura (MPa)			Resistencia a la flexión (MPa)	
		28 días	56 días	90 días	28 días	56 días	90 días	28 días	56 días
1	0	69	71	76	4,7	3,8	4,6	8,1	9,8
2	0	52	58	58,5	3,6	4,1	3,6	7,8	7,9
3	0	74	89,5	91,5	5,8	7,2	7,1	11	11
4	0	64	72	73	4,8	4,4	4,9	11	8,2
5	30	64	62	72,5	4,8	3,6	4,7	6,2	6,8
6	30	46	53	53,5	3,5	3,5	3,7	7,5	5,5
7	30	72	76,5	74	4,6	4,5	5,4	7,6	6,7
8	30	53,5	54	54,5	3,5	4,6	5,2	7,3	7,0

Por otra parte, y tomando como ejemplo otra actividad productiva, la industria de las piezas cerámicas sanitarias genera inevitablemente residuos, independiente de las mejoras introducidas en el proceso de fabricación. Actualmente se investiga la reutilización de estos residuos como agregado grueso reciclado en parcial sustitución (15 %, 20 % y 25 %) del agregado grueso natural en la producción de hormigón estructural. Este agregado cerámico reciclado no interfiere negativamente durante el proceso de hidratación. Por otra parte también se observa que la microestructura en la zona de transición entre la pasta de cemento y el agregado cerámico reciclado es más compacta que en el caso del agregado natural y la pasta; el comportamiento mecánico en términos de compresión y tensión son adecuados en comparación con los hormigones convencionales, como se observa en la tabla 15 (MEDINA et al., 2012).

**Tabla 15 – Resistencia a la compresión del hormigón a los 7, 28 y 90 días. Comparativa con hormigones con sustitución del agregado grueso por agregado cerámico reciclado (MEDINA et al, 2012)**

Tipo de hormigón	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	28 días	90 días
Hormigón de referencia	30,81 ± 1,57	35,87 ± 1,49	41,33 ± 1,55
CC – 15	33,81 ± 1,19	37,24 ± 1,58	42,16 ± 1,89
CC – 20	35,38 ± 1,24	38,53 ± 1,16	43,00 ± 1,05
CC - 25	37,32 ± 1,09	39,83 ± 1,99	44,10 ± 1,13

CC – 15, CC – 20 y CC – 25, Hormigones con porcentajes de sustitución en peso de 15 %, 20 % y 25 %, sucesivamente, del agregado grueso natural por agregado cerámico reciclado.

El valor de ± representa una desviación estándar.

En el caso de la industria metalúrgica, concretamente la fundición, se genera un residuo de arena, de color negro, alto contenido de sílice y de finos, que de acuerdo con Singh et al., (2012), puede ser utilizado como sustitución de la arena convencional en la producción de hormigón. Dichos autores elaboraron probetas cúbicas (150 mm de arista), cilíndricas (150 mm de diámetro y 300 mm de altura) para ensayos a la compresión y medición del modulo de elasticidad; y fabricaron probetas prismáticas (65 x 65 x 60 mm) para ensayar la resistencia a la abrasión. Produjeron cinco mezclas y luego de los ensayos concluyeron lo siguiente:

- la sustitución del agregado fino por la arena de fundición mejora las propiedades de resistencia del hormigón en todas las edades;

- la resistencia a la abrasión del hormigón aumenta con el incremento de la arena de fundición en sustitución del fino convencional sin reparar en el tiempo de curado;
- la resistencia a la abrasión está fuertemente vinculada a la resistencia a la compresión, a la resistencia a la tensión y al módulo de elasticidad independiente del contenido de arena de fundición en todas las edades;
- los resultados indican que el hormigón producido con arena de fundición, hasta un 15 % de sustitución, puede ser utilizado para la producción de hormigón estructural y para hormigón solicitado especialmente a la exigencia de la abrasión.

De todas formas, el desarrollo de una metodología adecuada para el manejo de residuos de la construcción es compatible con el uso de desechos que provengan de otras cadenas productivas. Pero el análisis imprescindible en el desarrollo del hormigón, luego de reconocido el interés por la reutilización de residuos, es el que implica la producción propiamente dicha, donde el residuo forma parte de la estructura interna del hormigón como un agregado, sustituyendo el uso del agregado convencional. Algunos de estos residuos son los que figuran en la tabla 16, con referencia a la industria que los genera y a su composición.

En este estudio, el uso de un residuo de la industria minera, nos ubica frente a un agregado pétreo, de origen no convencional o tradicional para la industria de la construcción; industria mas preparada para la obtención de los agregados de explotaciones en cantera específicas para el desarrollo de obras edilicias o de infraestructura.

**Tabla 16 – Algunos residuos sólidos que pueden ser considerados como agregados para la producción del hormigón (AITCIN y MINDESS, 2011)**

Material	Industria	Composición
Residuos minerales	Minería y procesamiento de minerales	Rocas naturales
Escorias de los hornos	Hierro y acero	Silicatos y aluminio silicatos de calcio y magnesio, cristales de silicato
Escombros de la construcción	Demolición	Hormigón, ladrillos, restos de albañilería
Escorias de la metalúrgica	Refinamiento de los metales	Silicatos, aluminio silicatos, cristales
Cenizas de fondo	Generación de electricidad	Cristales de silicato
Residuos municipales	Residuos comerciales y de los hogares familiares	Vidrio, plástico, metales
Residuos de la incineración	Municipal e industrial	Vidrio contenedor, metales y sílice de vidrio
Caucho granulado	Automovilística	Caucho

El vertedero del residuo de roca producto de la operación de una mina de oro contiene gran cantidad de cuarzo, y es una fuente excelente de agregados para hormigón, y también, tiene menor cantidad de esquistos que tienden a fracturarse con partículas pobres en formas. Por otra parte tiene como ventaja que la fractura primaria de la roca se ha producido en la explotación de la mina, por lo cual el material requiere exclusivamente ser procesado o mejorado por trituración y ocasionalmente limpieza. El otro beneficio radica en la reducción de la presión ambiental por el uso de este residuo (ALEXANDER y MINDESS, 2005).

En la industria de la construcción de Ghana, para reducir el consumo de granito triturado, se ha comenzado a utilizar la Phyllite como agregado, roca metamórfica foliada, residuo de la explotación de las minas de oro. La investigación en este sentido nos brinda los primeros datos con respecto al agregado y la resistencia a la compresión y a la flexión en un programa experimental en doce vigas, como se observa en las tablas 17 y 18 respectivamente. Es de destacar que la presencia de Phyllite ya ha sido reportada en España, Venezuela, Alemania, Francia y la región del Himalaya. (ADOM-ASAMOA et al., 2011)

**Tabla 17 – Valores experimentales, estudio de la Phyllite (ADOM-ASAMOA et al., 2011)**

Propiedades físicas	Phyllite
Peso específico	2,72
Absorción de agua (%)	1,80
Agregado impactado (%)	9,80
Agregado triturado (%)	18,64
Índice de delaminación (%)	28
Índice de elongación (%)	25
Abrasión Los Angeles	17,50

**Tabla 18 – Ensayos sustituyendo el granito por Phyllite (ADOM-ASAMOA et al., 2011)**

Viga N°	B x D x L	Resistencia a la compresión a los 28 días, $f_{cu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la flexión a los 28 días, $f_{cu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
B1	110x225x2400	23,25	2,5
B2	110x225x2400	23,75	3,4
B3	110x225x2400	23,65	4
B4	110x225x2000	23,25	2,5
B5	110x225x2000	23,75	3,4
B6	110x225x2000	23,65	4
B7	110x225x1700	23,25	2,5
B8	110x225x1700	23,75	3,4
B9	110x225x1700	23,65	4
B10	110x225x1500	23,25	2,5
B11	110x225x1500	23,75	3,4
B12	110x225x1500	23,65	4

La dosificación utilizada fue 1:1,5:3 (cemento, arena y agregado grueso), la relación a/c = 0,5

El caso de India es similar a lo expresado en otros países, una industria minera importante en lo que respecta al desarrollo económico pero que necesita, para cumplir demandas cada vez mas exigentes desde el punto de vista ambiental, encontrar un destino para la gran cantidad de residuo generado, aproximadamente entre 40 y 50 millones de m<sup>3</sup> por año. En este sentido Yellishetty et al., (2008), presentan un trabajo, para el uso en la construcción de los residuos sólidos de roca, arena y arcilla, de las minas de hierro ubicadas en la zona de Goa (India). Con la arcilla proponen la construcción de ladrillos y con los pétreos proponen el uso sustitutivo de los agregados naturales en la producción de hormigón. Para este estudio fabrican testigos de hormigón cúbicos (15 x 15 x 15 cm.), utilizan como agregados residuos de cuatro minas cuyas características figuran en la tabla 19, modifican las dosificaciones en cuanto al volumen de agregado grueso incorporado pero utilizan relaciones agua/cemento iguales, curan por inmersión a partir de las 24 horas y comparan los resultados con hormigón de agregados naturales. Los resultados figuran en la tabla 20. De acuerdo a los autores los resultados indican que los residuos de la mina son utilizables como agregados en la producción de hormigón.

**Tabla 19 – Propiedades típicas de los agregados de los residuos sólidos de las minas de Goa (Adaptada de Yellishetty et al., 2008)**

Ensayos	Nombre de la muestra (Sigla del nombre de la mina de origen)			
	DMC	TPL	SMI	ILPL
Modulo de finura agregado grueso	7,5	8	7	8
Modulo de finura agregado fino	3,3	3,4	3,2	3,5
Índice de lajas (%)	10	13	14	11
Índice de elongación (%)	11	15	14	11
Valor de impacto (%)	19,09	29	15,75	21,94
Peso específico	2,5	2,3	2,6	2,5
Absorción de agua (%)	11	13,10	5,59	8,13
Valor de trituración (%)	30	30	28,6	29,90
Valor de abrasión (%)	29,42	30	30	29
Angulosidad	3	3	1	7

**Tabla 20 – Dosificaciones y resistencias con agregados de las minas – Comparativa con el agregado granito (Adaptada de Yellishetty et al., 2008)**

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa) (cemento: arena: agregado grueso)				
	1:02:04	1:02:05	1:02:06	1:02:10	Agregado granito (1:02:04)
7	13,21	16,11	6,8	3,3	15,10
14	17,13	18,93	9,87	4,58	17,42
28	21,93	21,28	11,31	5,43	19,91

Los valores de resistencia de la tabla son promedios aritméticos de los valores de tres ensayos.

Investigando otra posibilidad en el uso de los residuos es la producción industrializada de agregados, en España, González Corrochano et al., (2011), presenta un trabajo sobre la microestructura y mineralogía de los agregados livianos producidos con residuos de la minería y la industria, evitando el consumo de recursos naturales y generando con estos desechos mineros un agregado de baja densidad, denso y con una forma aproximadamente esférica. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 21.

**Tabla 21 – Relaciones observadas entre la microestructura, la mineralogía del LWA estudiado y sus propiedades físicas. (González Corrochano et al., 2011)**

Propiedades	Microestructura	Mineralogía
<b>Índice de expansión volumétrica</b>	Ausencia de formación de una capa vitrificada con un incremento de temperatura resulta en una progresiva disminución en el índice de incremento volumétrico. Mayor proporción y tamaño más largo de los poros interiores produce un aumento del índice de incremento volumétrico.	
<b>Densidad de la partícula seca</b>	Más largos y abundantes poros generan valores de densidad de la partícula seca más bajos.	Modificaciones mineralógicas con incremento de temperatura producen valores de densidad de la partícula seca más bajos.
<b>Absorción de agua</b>	Mayor porosidad abierta entre partículas da como resultado valores más altos de absorción de agua a las 24 horas. Presencia de una película vidriosa externa, aunque con una nueva formación de porosidad, resulta en valores más bajos de absorción de agua a las 24 horas. Porosidad cerrada, aunque con una densa carcasa externa, resulta en valores más bajos de absorción de agua a las 24 horas. En la permeabilidad de los LWA, la presencia de poros aislados es un factor tan importante como la presencia de una carcasa externa.	Materiales vitrificados dan como resultado valores de absorción de agua a las 24 horas más bajos.
<b>Resistencia a la compresión</b>	Presencia de una película vidriosa externa promueve valores más altos de resistencia. Material granular y relativamente poco sinterizado da como resultado valores más bajos de resistencia. Poros alargados e interconectados producen los valores más bajos de resistencia. Poros uniformemente distribuidos, relativamente pequeños en tamaño y con una forma regular, cerrados y no fusionados, producen los valores más altos de resistencia. La relación entre el grado de porosidad, número de poros, y los valores de resistencia es menor que la relación entre el tipo de porosidad y los valores de resistencia.	Mayor proporción de silicato vidrioso y silicato cálcico da como resultado una mejora en los valores de resistencia.

En el caso del pétreo estudiado en este trabajo, el análisis conduce a la doble valoración del mismo, por un lado un residuo de la industria minera y por otro un pétreo que por su nula transformación en este procesamiento productivo puede ser considerado un agregado natural. La tabla 22, presenta valores del hormigón producido con agregado de hormigón reciclado y agregado natural similar al residuo pétreo considerado.

**Tabla 22 – Propiedades del hormigón producido con agregado natural y del producido con agregado de hormigón reciclado (DHIR et al., 2004)**

Propiedades	Agregado Natural	Agregado de hormigón reciclado (% de agregado grueso)		
		30	100	100 igual resistencia
Resistencia compresión en probeta 28 días (MPa)	41,5	40,5	37	41,5
Resistencia a la flexión (MPa)	4,9	4,8	4,6	4,9
Módulo de elasticidad (GPa)	27,5	28	25,5	27
Retracción	565	570	630	639
Absorción superficial inicial (ml/m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-2</sup> )	29	31	47	35
Permeabilidad al aire (m <sup>2</sup> x 10 <sup>-17</sup> )	2,7	3,8	14,3	6,6
Profundidad de carbonatación (mm)	13,5	13,5	16,5	12,5
Profundidad de abrasión (mm)	0,61	0,65	1,02	0,72
Factor de durabilidad frente al congelamiento (%)	97	98	96	97
Coefficiente de difusión de cloruros (cm <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-6</sup> )	1,16	1,17	-	1,05

En general las propiedades del agregado afectan no solamente las decisiones a tomar en el momento de dosificar el hormigón sino también el comportamiento del mismo en su estado fresco y endurecido.

Por otra parte, el considerar un agregado con la doble condición, de residuo por un lado, pero también de residuo especial. Esta valoración responde a que este residuo no surge de una industria que genera la basura a partir de una transformación, sino que la actividad extractiva obliga a la eliminación del pétreo que se interpone con el mineral buscado. En este sentido la preocupación por el uso de los recursos naturales, manifiestas en la actualidad en muchos países y compromiso en algunos casos de organizaciones internacionales, ha conducido al estudio, como es el caso del trabajo de Golestanifar et al., (2011), al desarrollo de una metodología que

permita tomar decisiones en cuanto a cual deberían ser las fuentes apropiadas para la obtención de agregados gruesos cuyo destino es la producción de hormigón. Y acá se fortalece el doble criterio: el uso de residuos y la obtención de agregados naturales de fuentes apropiadas. Estos investigadores trabajaron a partir de la metodología desarrollada en el Proceso Jerárquico analítico (AHP)<sup>4</sup> y en la Técnica para el Orden Preferencial por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS)<sup>5</sup>, y desarrollaron el método denominado Fuente Apropriada para el Agregado Mineral del Hormigón (CMABS)<sup>6</sup>, que construye la toma de decisiones a partir de seis escalones que se presentan en la figura 7 y su criterio jerárquico que se exhibe en la figura 8.

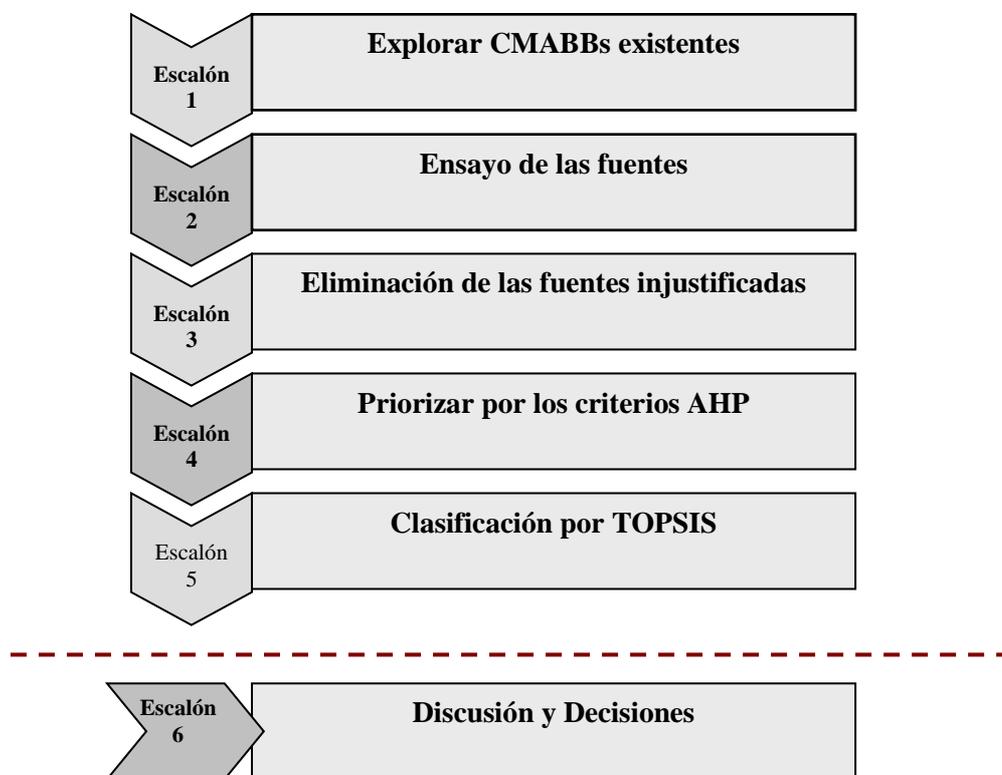


Figura 7 – Nuevo modelo estructural para la evaluación de Fuentes Apropriadas (GOLESTANIFAR et al., 2011)

<sup>4</sup> Analytical Hierarchy Process, AHP, por su sigla en inglés.

<sup>5</sup> Technique for order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), por su sigla en inglés.

<sup>6</sup> Concrete Mineral Aggregate Borrow Source (CMABS), por su sigla en inglés.

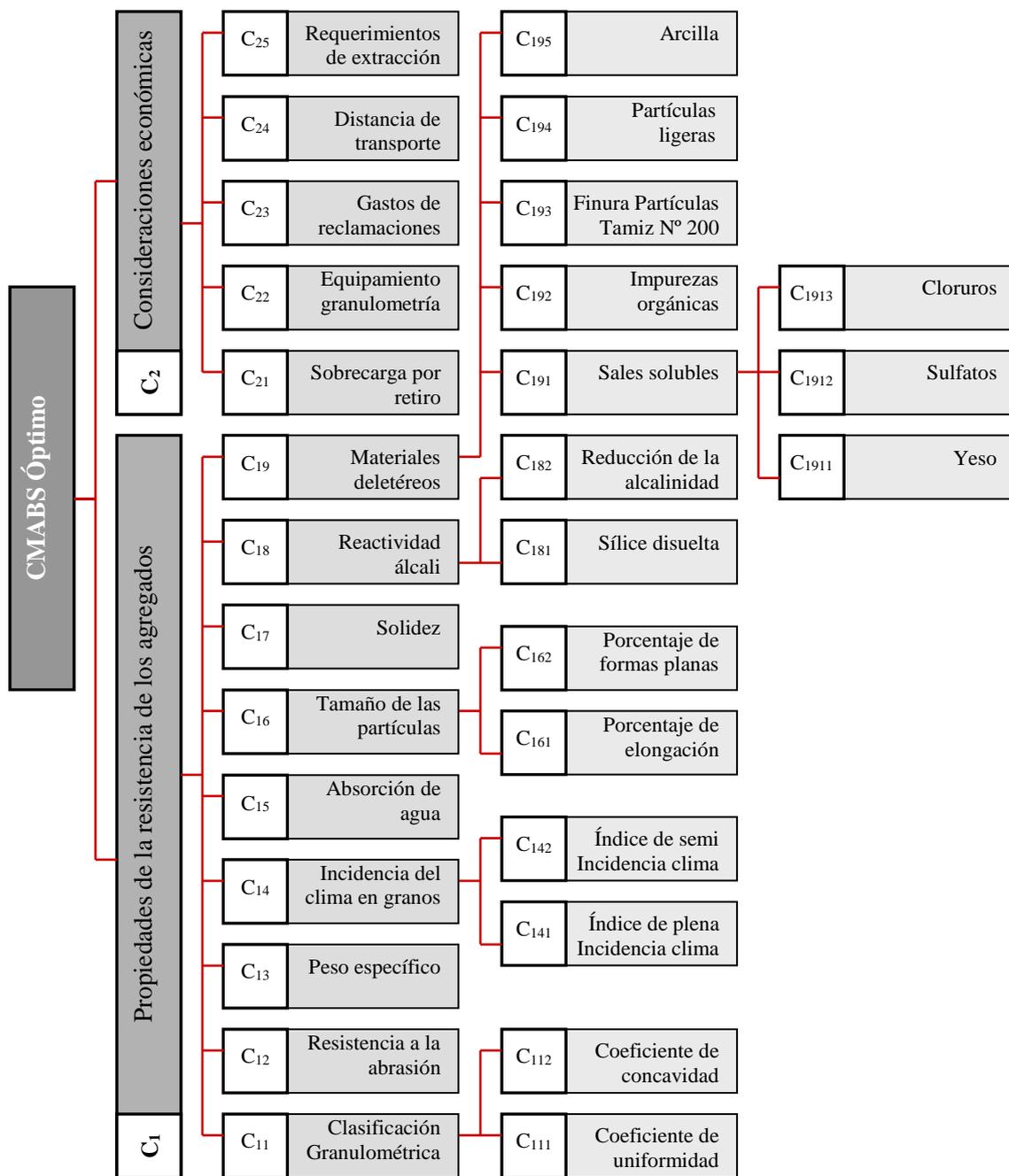


Figura 8 – Criterio jerárquico en la Selección del Problema en CMABSs (GOLESTANIFAR et al, 2011)

Para Golestanifar et al., (2011), la aplicación de una matriz, que involucre múltiples atributos en relación con múltiples objetivos, es una metodología ordenada para quienes toman las decisiones sobre la explotación de los recursos naturales y definen las fuentes apropiadas para la obtención de los agregados.

Tomando en cuenta la totalidad de estos parámetros presentados, el estudio del hormigón desde el aporte del agregado implica el análisis desde dos puntos de vista:

1. la incidencia de los pétreos en el hormigón de acuerdo a las siguientes exigencias:
  - la estructura interna de la mezcla;
  - la resistencia del hormigón;
  - la estabilidad dimensional;
  - la durabilidad.
  
2. las características de los pétreos que utilizamos en la producción de los diferentes tipos de hormigón.



### 3 INCIDENCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN EL HORMIGÓN

Los agregados pétreos ocupan un volumen significativo en la masa del hormigón e inciden por lo tanto en las características del mismo en sus diferentes estados, fresco y endurecido, afectando también la durabilidad del hormigón en el devenir del tiempo.

#### 3.1 Incidencia de los agregados pétreos

La incidencia de los agregados pétreos en el hormigón se analiza de acuerdo a los siguientes parámetros:

- *la estructura interna de la mezcla;*
- *la resistencia del hormigón;*
- *la estabilidad dimensional;*
- *la durabilidad.*

##### 3.1.1 La estructura interna de la mezcla.

A medida que avanza el desarrollo del conocimiento, la visión tradicional del agregado como material inerte en el hormigón con el único fin de conquistar volumen se cuestiona y modifica, reconociendo que varias de las propiedades del hormigón dependen de las características de los agregados. Es así que la porosidad, composición y distribución granulométrica, absorción de agua, forma y textura superficial, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y tipo de sustancias deletéreas constituyen propiedades relevantes que deben ser analizadas. En lo que se refiere a la microestructura de la fase agregado debemos reconocer la directa implicancia en el peso unitario, el módulo de elasticidad y la estabilidad dimensional del hormigón. *Es por esta razón que no se debe tratar al agregado con menos respeto que al cemento.* (MEHTA y MONTEIRO, 2008)

En el mismo sentido, Alexander y Mindess (2005), plantean que los agregados tienen una crucial influencia en las propiedades de este material compuesto, y que esto se desvía de una visión antigua que identificaba a los agregados como simples filleres inertes, apenas un volumen requerido por su masa y economía. La visión científica contemporánea reconoce a los pétreos como un constituyente del hormigón que incide en las propiedades del mismo. Por otra parte el hormigón es usado con fines de ingeniería por contener agregados, esto se debe a que el cemento solo es inapropiado para la mayoría de los usos, excepto para unas pocas y especiales aplicaciones.

De acuerdo con Zongjin Li (2011), los efectos de los agregados en el hormigón se podrían definir de la siguiente manera:

1. *agregados en el hormigón fresco y plástico.* Cuando la mezcla del hormigón está fresca, los agregados están suspendidos en la pasta de cemento-agua-aire. El comportamiento del hormigón fresco, su fluidez, cohesividad, y comportamiento reológico, está largamente influenciado por la cantidad, tipo, textura superficial y tamaño granulométrico del agregado. La selección del agregado debe tomar en cuenta los requerimientos del uso final del hormigón, en definitiva, a modo de ejemplo, que tipo de estructura se construirá.
2. *agregado en el hormigón endurecido.* Aunque existe una pequeña reacción química entre el agregado y la pasta de cemento, el agregado contribuye con muchas cualidades al hormigón endurecido. Además de reducir el costo, el agregado en el hormigón permite disminuir la retracción y el creep de la pasta de cemento. Por otra parte los agregados tienen una gran influencia en la rigidez, en el peso unitario, en la resistencia, en las propiedades térmicas y en la resistencia en el uso del hormigón.

Por otra parte es imprescindible tomar en cuenta que en esta visión, que entiende al agregado como un componente dinámico dentro de la composición de la mezcla del hormigón, la variación de las características de los mismos puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Considerando, que forman la mayor parte del volumen del hormigón, es necesario considerarlos componentes críticos y asumir el efecto significativo en el comportamiento de las estructuras. En este sentido una de las dificultades mayores a las que se enfrentan los técnicos responsables de la producción de hormigón es la escasa verificación de las características de los agregados pétreos que utilizan, lo que favorece con frecuencia resultados diferentes a las expectativas creadas, tanto en su comportamiento en estado fresco como en estado endurecido (CHAN, 2003).

En algunos medios, el desconocimiento y la falta de profundización en el estudio de los pétreos con este fin han inhibido la clasificación y categorización en función de patrones consensuados por los involucrados. Un código exigente para la calidad de los agregados obligaría a los proveedores de los mismos a una explotación diferente de un recurso natural, identificado no solamente por normas vinculadas al cuidado medioambiental sino pautado por el desempeño del hormigón. El trabajo de comités técnicos para el estudio de la calidad de los agregados ha clarificado el relacionamiento entre la calidad de los agregados y el mejor desempeño del hormigón dando como resultado principal la definición de nuevos estándares. En

este sentido resulta destacable la experiencia japonesa, aporte de los comités mediante, que ha logrado disminuir porcentualmente el uso de arena y piedras de ríos aumentando el uso de roca partida y arena de canteras que queda como residuo de la explotación con otros fines; en la otra mano el uso cada vez mayor no solamente del agregado reciclado de la demolición sino de los residuos industriales (KOKUBU et al., 2007).

### **3.1.2 La resistencia del hormigón.**

La resistencia del hormigón depende de un número importante de factores, incluyendo las propiedades y las proporciones de los materiales constituyentes, grado de hidratación, relación de descarga, método de ensayar las probetas. Las propiedades de los materiales utilizados para la producción del hormigón que afectan su resistencia son la calidad del agregado fino y grueso, la pasta de cemento y el vínculo entre la pasta y el agregado en la zona de transición. Esto depende de las características de la macro y la microscópica estructura incluyendo la porosidad total, tamaño, forma y distribución de los poros, morfología de los productos de la hidratación, además del vínculo individual entre los componentes sólidos (CALDARONE, 2009).

Desde el punto de vista de la resistencia el agregado no es considerado generalmente en forma directa, debido a que la resistencia a la compresión de los agregados naturales suele ser mayor que la relevada en las otras fases del hormigón, exceptuando los hormigones especiales de alta resistencia (MINDESS, 2008).

Pero debido a su influencia dentro de la estructura de la masa del material los investigadores, al estudiar la resistencia, suelen referirse a la acción indirecta; en este sentido es pertinente destacar que la utilización de agregados de mayor tamaño tiende a generar una zona de transición en la interfase más frágil debido a un mayor contenido de microfisuras (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

En lo que respecta a la resistencia a la compresión, el agregado grueso tiene una influencia leve en el comportamiento desviatorio del hormigón cuando los niveles de confinamiento varían entre 0 MPa y 65 MPa. La resistencia del hormigón tiene un leve incremento cuando el tamaño del agregado aumenta si se lo observa bajo la incidencia de la compresión no confinada. El tamaño del agregado grueso tiene una significativa influencia en el estado límite de presión cuando el confinamiento es elevado. Cuanto mayor es el tamaño del agregado grueso mas bajo es el promedio del nivel de tensión correspondiente a un hormigón en estado límite de presión. Frente a un nivel muy elevado de confinamiento y niveles muy altos de

tensión desviatoria, la dureza tangencial axial del hormigón se incrementa cuando el tamaño del agregado grueso se reduce (DAUDEVILLE et al., 2011).

Obviamente, la resistencia a la compresión de un hormigón de baja relación agua/aglomerante es más alta que la de un hormigón convencional. Para el caso de los hormigones corrientes la resistencia a la compresión de un hormigón de relación agua/cemento baja se incrementa a medida que la relación agua/aglomerante disminuye. No obstante, la “ley” de la relación agua/aglomerante es válida únicamente hasta que la “resistencia a la trituración” del agregado grueso se convierte en el vínculo débil en el interior del alto desempeño del hormigón. Cuando el agregado grueso no es suficientemente resistente en comparación con la resistencia de la pasta de cemento hidratada, la resistencia a la compresión del hormigón de baja relación agua/cemento no disminuye significativamente a medida que la relación agua/aglomerante decrece. La única forma de aumentarla es utilizando un agregado grueso mas resistente (AITCIN y MINDESS, 2011).

En la tabla 23, Aitcin y Mindess (2011), vinculan la resistencia a la compresión en función de la relación agua/aglomerante.

**Tabla 23 – Máxima resistencia a la compresión en función de la relación agua/aglomerante (AITCIN y MINDESS, 2011)**

Agua/aglomerante	f <sub>c</sub> (MPa)
0,40	50
0,35	75*
0,30	100*
0,25	150*

(\*) El agregado grueso debe ser más resistente que este valor.

### 3.1.3 La estabilidad dimensional del hormigón

Cuando analizamos el hormigón desde el punto de vista de la estabilidad dimensional del mismo reconocemos que presenta dos tipos de deformaciones: las que surgen de la incidencia de las cargas y las que son provocadas por la ocurrencia de cambios en el medio ambiente.

En la tabla 24, Jiménez Montoya et al., (2000), presentan las deformaciones reversibles e irreversibles del hormigón en función de la dependencia de las cargas exteriores que afectan a la estructura.

**Tabla 24 – Deformaciones del hormigón (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000)**

	Dependientes de las cargas exteriores		Independientes de las cargas exteriores
	Instantáneas	Diferidas (fluencia)	
Reversibles	Elásticas Instantáneas	Elásticas diferidas	Térmicas
Irreversibles	Remanentes	Plásticas diferidas	Retracción

Teniendo en cuenta las características reológicas, es decir la evolución de las deformaciones del compuesto, el hormigón puede definirse como un material pseudosólido elasto – visco – plástico, haciendo de esta forma mención a las particularidades de los cuerpos elásticos, viscosos y plásticos. Lo cual no resulta extraño si tomamos en cuenta que en el hormigón coexisten la fase sólida (áridos y cemento Pórtland), la líquida (agua) y la gaseosa (aire ocluido) (JIMENEZ MONTOYA et al., 2000).

Desde el punto de vista del comportamiento elástico el hormigón no presenta un comportamiento lineal, pero necesariamente debemos estimar el modulo de elasticidad, es decir la relación entre la tensión ejercida sobre la pieza de hormigón y la deformación instantánea, de forma de poder trabajar en el calculo estructural.

A pesar de esta consideración la Ley de elasticidad de Hooke es aplicable al hormigón estructural en el rango de deformaciones que usamos comúnmente para el diseño y cálculo de la estructura (CALDARONE, 2009).

El módulo de elasticidad del hormigón está fuertemente influenciado por los materiales que constituyen el hormigón y por la dosificación, proporciones de la mezcla utilizadas. Un incremento de la resistencia a la compresión está acompañado por un incremento en el módulo de elasticidad (NAWY y NASSIF, 2008).

Es claro en este sentido que el módulo de elasticidad es un parámetro mecánico sumamente importante, porque refleja la habilidad del hormigón de deformarse elásticamente. A modo de ejemplo, en estructuras construidas con hormigón pre-tensado, la estimación conservadora de la reducción elástica del hormigón conduce a un incremento del tendón que pre-tensionara la estructura aumentando los residuos y los costos. La mirada inversa sería considerar en exceso el comportamiento elástico y provocar el colapso de la estructura.

Adicionalmente, para el logro del uso eficiente de la resistencia potencial a la compresión, especialmente en las estructuras que usan hormigones de alta resistencia y que tienden a reducir espesores, se requerirá de elevados módulos de elasticidad para mantener la rigidez (BROWN et al., 2005).

A partir de las curvas de tensión-deformación características de cada agregado, pasta de cemento endurecida y el propio hormigón cargado a la compresión uniaxial, se observa que al contrario del agregado y de algunas pastas de cemento, el hormigón no se comporta como un material elástico. La deformación resultante de la acción de una carga instantánea sobre una probeta en laboratorio muestra no ser directamente proporcional a la tensión aplicada y no recuperar totalmente la forma cuando cesa la carga a la cual está sometida (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

En la figura 9, Mehta y Monteiro (2008), presentan la relación tensión-deformación del hormigón comparándola con la del agregado y con la de la pasta de cemento. En este gráfico se identifica que el comportamiento del hormigón no se corresponde con el de un material elástico.

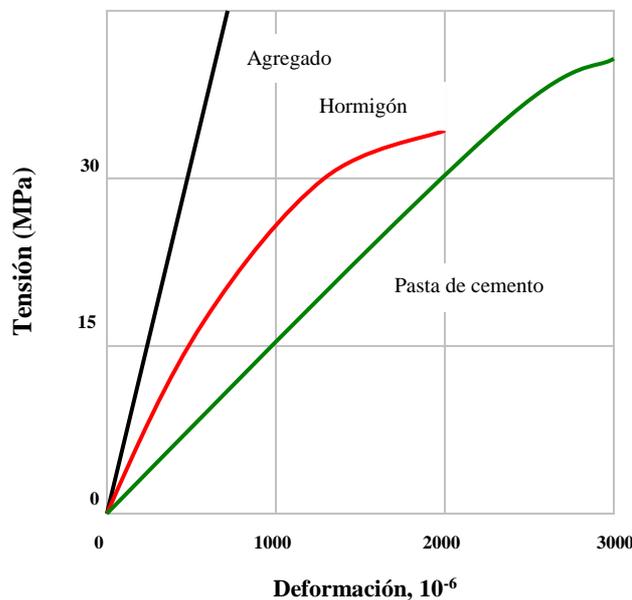


Figura 9 – Relación tensión – deformación de la pasta de cemento, el hormigón y el agregado. Las propiedades del hormigón no son necesariamente iguales a las de sus componentes. La pasta de cemento hidratada y los agregados presentan un comportamiento lineal elástico que difiere del hormigón, (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Los valores del módulo de elasticidad utilizados en el cálculo del proyecto estructural son estimados a partir de resultados empíricos que suponen dependencia directa del módulo de elasticidad sobre la resistencia y la densidad del hormigón. Esto tiene sentido porque el comportamiento tensión – deformación del los tres componentes del hormigón, agregado, pasta de cemento y zona de interfase, sería en realidad determinado por las resistencias individuales que, a su vez, están relacionadas a la resistencia última del hormigón. El módulo de elasticidad del agregado, que controla y restringe las alteraciones volumétricas en la matriz, está directamente relacionado a su porosidad, medir el peso unitario del hormigón es un modo indirecto de estimar la porosidad del agregado (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

El modulo de elasticidad del hormigón es en gran medida gobernado por las propiedades del agregado grueso. Incrementando el tamaño del agregado grueso o usando uno mas compacto con mayor módulo de elasticidad aumentaríamos el modulo de elasticidad del hormigón. Siendo un material compuesto por pasta y agregado, el modulo de elasticidad del hormigón está directamente relacionado con las propiedades mecánicas de la pasta en relación a las de las partículas del agregado. Cuando un agregado es mas compacto, mas denso, mejora el modulo de elasticidad del hormigón, ellos son capaces de introducir una concentración de tensión en la zona de transición con su consecuente micro - fisuración en el vínculo con la interfase, y de este modo reducir la capacidad de resistencia final a la compresión del hormigón (CALDARONE, 2009).

En la figura 10, gráfico adaptado de Mehta y Monteiro (2008), se definen los parámetros que influyen en el módulo de elasticidad del hormigón, se destaca los que dependen directamente del agregado.

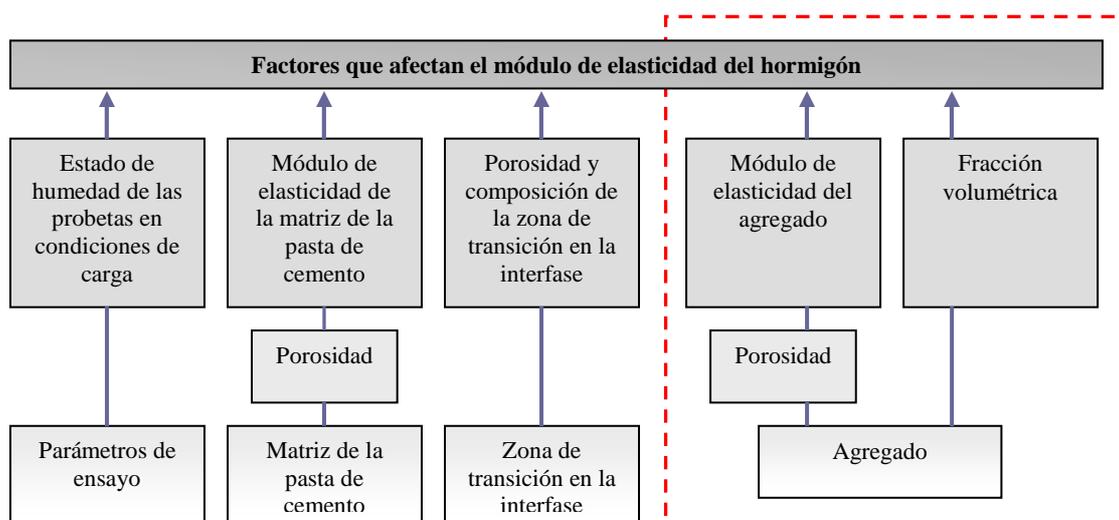


Figura 10 – Parámetros que influyen en el modulo de elasticidad del hormigón. Adaptado de MEHTA y MONTEIRO (2008).

De acuerdo a Mehta y Monteiro (2008), en la retracción por secado del hormigón la mayoría de las expresiones teóricas admiten que el módulo de elasticidad del hormigón puede proporcionar una medida adecuada del grado de restricción contra la deformación, que en una primera aproximación, el módulo de elasticidad del agregado determina el módulo de elasticidad del hormigón. Cuando el módulo de elasticidad del agregado se torna parte de la expresión matemática, es conveniente relacionar la retracción por secado o deformación por fluencia de la fracción del agregado en vez de la fracción de la pasta de cemento.

Los agregados le otorgan al hormigón su necesaria estabilidad volumétrica, incorporándole propiedades vinculadas a la dilatación que a la larga lo hacen compatible con el acero y manejable desde un punto de vista estructural, lo cual no es posible lograr con la pasta pura (ALEXANDER y MINDESS, 2005). En la figura 11 se exhibe la relación entre el porcentaje del volumen de los agregados y la retracción relativa de la pasta pura.

La granulometría, el tamaño máximo del árido, la forma y la textura del agregado, son los factores que inciden en la retracción por secado y la fluencia. El módulo de elasticidad del agregado es el factor más importante, las restantes características del agregado pueden influenciar en forma indirecta, o sea a través del efecto que provoca en la densidad del hormigón el tenor de agregado involucrado (NEVILLE, 2004).

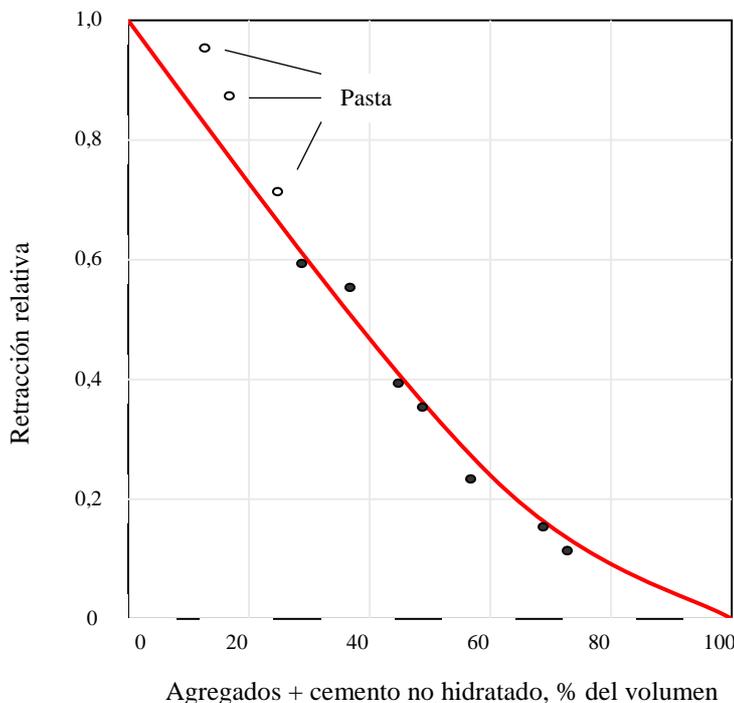


Figura 11 – Efecto del agregado en la reducción de la retracción de la pasta pura. (ALEXANDER, MINDESS, 2005, tomado de ADDIS, OWENS, 2001)

Otros investigadores, como Asamoto et al., (2008), quien tomó como punto de partida para su investigación el trabajo de Goto y Fujiwara (1979), investigó experimentalmente el comportamiento frente a la retracción de diferentes hormigones producidos con diversos agregados gruesos, concluyendo que la retracción propia del agregado incrementa significativamente la retracción del hormigón, la que también se encuentra influenciada por el módulo de elasticidad y la capacidad de absorción de agua del pétreo. Los resultados de su trabajo se exhiben en las tablas 25 y 26 y en las figuras 12 y 13.

**Tabla 25 – Propiedades de los agregados (Asamoto et al., 2008)**

Agregados	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)
Arena (Arenisca triturada)	2,59	1,55
Agregado (Arenisca triturada)	2,66	0,45
Agregado liviano artificial	0,45	27,5

La densidad del agregado artificial es en condiciones de secado al horno. La densidad de los restantes agregados es en condiciones de saturación con superficie seca.

**Tabla 26 – Dosificaciones (kg/m<sup>3</sup>), Resistencia a la compresión (MPa) y Módulo de elasticidad (GPa) (Asamoto et al., 2008)**

Testigos	agua/cemento	Agua (lts)	Cemento (kg)	Arena	Agregado grueso	Super plastificante	Resistencia compresión (MPa 7 días)	Módulo de elasticidad (GPa)
Agregado natural	0,30	160	533	686	1039	3,73	62,8	34,3
Agregado liviano	0,30	160	533	686	176	3,73	18,8	14
Agregado liviano revestido con epoxy	0,30	160	533	686	176	3,73	18,1	15,5
Agregado natural	0,50	201	403	686	1039	-	23,7	23,4
Agregado liviano	0,50	201	403	686	176	-	7,5	9,6
Agregado liviano revestido con epoxy	0,50	201	403	686	176	-	12,9	8,8

Sin embargo, dado que la forma y la densidad de las partículas del acero, del vidrio o del caucho son significativamente diferentes de las de la arena y de los agregados gruesos, no es clara la razón de la aplicación de teorías que derivan de ensayos de hormigones normales a las

de aquellos que contienen estos materiales alternativos. Para un estudio completo de la variación del comportamiento del hormigón frente a la retracción en diferentes tipos de agregado, es esencial clarificar la influencia de las propiedades de cada agregado en la retracción del hormigón e identificar el efecto combinado de todas esas propiedades (ASAMOTO et al., 2008).

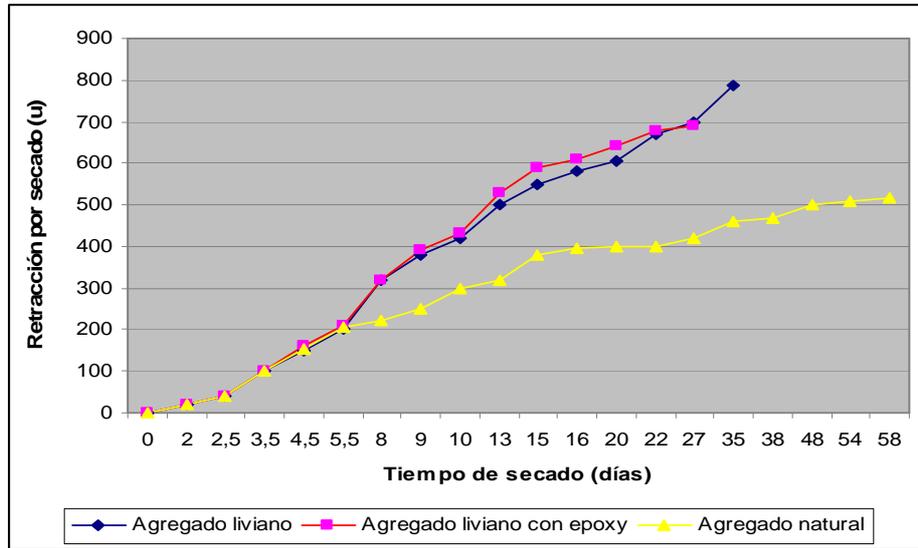


Figura 12 – Retracción por secado (a/c = 0,30) (Asamoto et al., 2008)

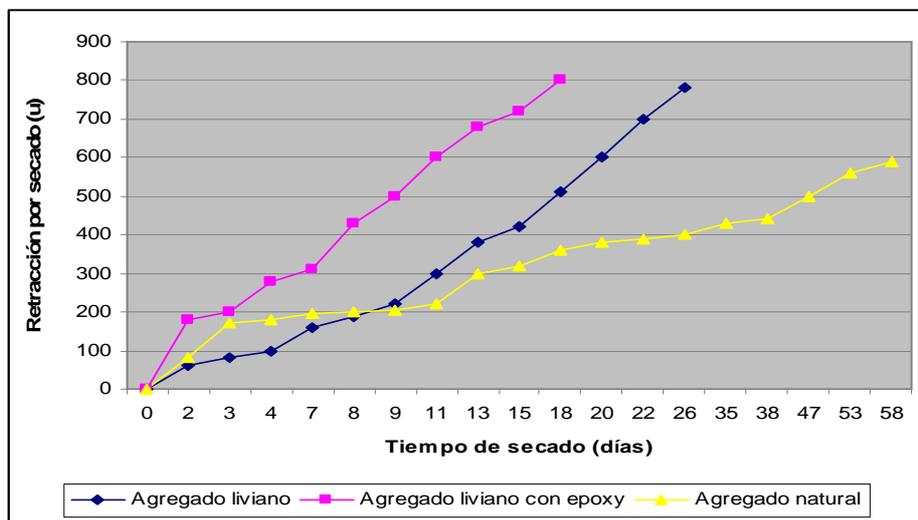


Figura 13 – Retracción por secado (a/c = 0,50) (Asamoto et al., 2008)

Un camino simple pero eficiente para disminuir la variación del volumen aparente, retracción y creep, de un elemento de un tipo de hormigón particular es aumentar el contenido de agregados. Las estimaciones nos conducen a considerar que cuando a una pasta se la mezcla con un agregado que representa el 50 % de su volumen, la retracción disminuye en un factor de tres. Independiente del contenido de agregado, la retracción de la pasta es la misma, la que se

reduce es la retracción del hormigón. De todas formas, la retracción del hormigón es reducida por la presencia de agregados, esto significa que la pasta de cemento por si misma desarrolla una más extensiva pero uniformemente mejor distribuida red de micro fisuras. Desde el punto de vista de la durabilidad y la sustentabilidad una mejor distribuida red de fisuras muy finas es más segura que la presencia de macro fisuras a través de las cuales los agentes agresivos pueden ingresar con facilidad y atacar el acero de refuerzo (AITCIN y MINDESS, 2011).

Para Fujiwara Tadashi (2008), el hormigón es un material compuesto a partir de una pasta de cemento y un agregado, y si consideramos las propiedades de estos dos insumos podemos proponer múltiples formulas teóricas para la retracción del hormigón. Entre dichos planteos toma este investigador el realizado por Pickett's (1956), que en la ecuación 1 formula lo siguiente:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c / \varepsilon_p &= (1 - V_a)\alpha \\ \alpha &= 3(1 - \nu_c) / [1 + \nu_c + 2(1 - \nu_a)E_c / E_a] \end{aligned} \quad \text{(ecuación 1)}$$

$\varepsilon_c$  = retracción del hormigón

$\varepsilon_p$  = retracción de la pasta de cemento

$V_a$  = volumen del agregado

$E_c$  = modulo de elasticidad del hormigón

$E_a$  = modulo de elasticidad del agregado

$\nu_c$  = razón de Poisson del hormigón

$\nu_a$  = razón de Poisson del agregado

Esta ecuación no incluye la retracción del agregado, por lo que Fujiwara recomienda también analizar las ecuaciones de Hansen-Nielsen (1965), ecuaciones 2 y 3, que se plantean de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c / \varepsilon_p &= (1 - m) [n + 1 + (n - 1) V_a^2 - 2nV_a] / (n+1) + m \\ &\text{para } n \geq 1 \\ \varepsilon_c / \varepsilon_p &= (1 - m) [n + 1 - (n - 1) V_a] / [n + 1 + (n - 1) V_a] + m \\ &\text{para } n \leq 1 \end{aligned}$$

(ecuaciones 2 y 3)

$$n = E_a / E_p$$

$$m = \varepsilon_a / \varepsilon_p$$

$E_p$  = modulo de elasticidad de la pasta de cemento

$\varepsilon_a$  = retracción del agregado

Fujiwara (2008), concluye que el cambio de longitud de la mayoría de los agregados parece ser causado por el cambio en la energía superficial debido a la absorción y al secado. En este caso, el área de la superficie interna del agregado está fuertemente relacionada con el valor del cambio de longitud.

Mehta y Monteiro (2008), aclaran que surge de las investigaciones de Troxell la importancia del módulo del agregado en el control de las deformaciones del hormigón y que tanto la retracción por secado como la fluencia del hormigón aumentaron dos veces y media cuando un agregado con alto módulo de elasticidad fue sustituido por uno con bajo módulo de elasticidad.

Los agregados en el hormigón, especialmente los agregados gruesos, restringen físicamente la retracción de la pasta de cemento en hidratación. El contenido de pasta afecta la retracción por secado de los morteros más que la de los hormigones. La retracción por secado también depende del tipo de agregado, los rígidos y duros difícilmente se compriman. Como un ejemplo extremo, si esferas de acero sustituyeran el agregado grueso común, se disminuiría la retracción en un 30 % o más. La retracción por secado se puede reducir evitándose agregados que tienen retracción por secado alta y agregados que contienen alta cantidad de arcilla. Agregados de cuarzo, granito, feldespato, caliza y dolomita generalmente producen hormigones con baja retracción por secado (KOSMATKA et al., 2004).

Para Gilbert y Ranzi (2011), la retracción del hormigón es afectada por el volumen y tipo de agregado, debido a que el mismo restringe la retracción de la pasta de cemento. Por lo tanto un incremento del contenido de agregado reduce la retracción, la cual será aún menor en función de la dureza del agregado, como sucede con pétreos de elevado modulo de elasticidad.

En lo que se refiere a las variaciones dimensionales en función de las modificaciones térmicas, Mehta y Monteiro (2008), definen el coeficiente de expansión térmica como la variación de la unidad de longitud por variación de la unidad de temperatura. La elección de un agregado con bajo coeficiente de expansión térmica, cuando es económicamente viable y tecnológicamente aceptable su uso, puede, bajo ciertas condiciones tornarse un factor crítico.

Esto se da porque la deformación por retracción térmica es determinada por la magnitud de descenso de temperatura y por el coeficiente de expansión térmica lineal del hormigón. Este último es principalmente controlado por el coeficiente de expansión térmica lineal del agregado, principal constituyente del hormigón.

En la tabla 27, se presentan los valores de los coeficientes de expansión del hormigón en función de algunos agregados de uso convencional en la producción del mismo.

**Tabla 27 – Efecto del tipo de agregado sobre el coeficiente de expansión térmica del hormigón (KOSMATKA et al., 2003)**

Tipo de agregado	Coficiente de expansión, millonésimos por °C
Cuarzo	11,9
Arenisca	11,7
Grava	10,8
Granito	9,5
Basalto	8,6
Caliza	6,8

La expansión y la retracción térmica del hormigón varían con factores tales como el tipo de agregado, el contenido de cemento, la relación agua/cemento, la variación de la temperatura, la edad del hormigón y la humedad relativa; de estos el mas importante es el tipo de agregado (KOSMATKA et al., 2004).

El calor específico se define como la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa de un material. El del hormigón de peso normal está muy afectado por el tipo de agregado, temperatura y otros parámetros (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

La conductividad térmica se refiere al flujo de calor transmitido a través de una unidad de área de un material sobre una unidad de gradiente de temperatura unitario.

La difusión térmica se define como:

$$\kappa = K/c\rho$$

$K$  = conductividad  
 $c$  = calor específico  
 $\rho$  = densidad del hormigón

(ecuación 4)

La conductividad térmica del hormigón es influenciada por las características mineralógicas del agregado y por el tenor de humedad, densidad y temperatura del hormigón. El calor se mueve más fácilmente por el hormigón con mayor difusión térmica (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

En la tabla 28, se organizan en orden decreciente los valores de conductividad y difusión térmica de los agregados utilizados en la producción de hormigón convencional.

**Tabla 28 – Valores de conductividad y difusión térmica para hormigones con diferentes tipos de agregados (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1998)**

Tipo de agregado	Conductividad térmica W/m. K	Difusión térmica m <sup>2</sup> /h
Cuarzo	3,5	0,0054
Dolomita	3,2	0,0047
Calcáreo	2,6 – 3,3	0,0046
Granito	2,6 – 2,7	0,0040
Riolito	2,2	0,0033
Basalto	1,9 – 2,2	0,0030

La combinación de factores que son deseables para reducir la ocurrencia de fisuras en el hormigón puede ser descrita por un único término, llamado extensibilidad, digamos que un hormigón tiene un alto grado de extensibilidad cuando puede estar sometido a grandes deformaciones sin fisurar. Muchos factores que reducen la retracción por secado en el hormigón también tienden a reducir la extensibilidad, por ejemplo, un aumento en el tenor del agregado o rigidez del mismo (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

### 3.1.4 La durabilidad del hormigón

Los efectos físicos que influyen negativamente en la durabilidad del hormigón incluyen el desgaste de la superficie, fisuración debida a la cristalización de sales en los poros y exposición a temperaturas extremas, como durante la acción del congelamiento o el fuego. Los efectos químicos deletéreos incluyen la lixiviación de la pasta de cemento por soluciones ácidas y reacciones expansivas incluyendo ataque por sulfato, reacción álcali-agregado y corrosión de las armaduras del hormigón. El agua normalmente está presente en todo tipo de deterioro, y la facilidad con la que penetra en los sólidos porosos es lo que determina la tasa de deterioro (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

La durabilidad está también afectada por la forma y la textura. Mezclas con presencia pobre de formas variadas y agregados angulares incrementan la demanda de agua lo que afecta negativamente la durabilidad del hormigón (FOWLER et al., 2004).

En la figura 14, se presentan las causas físicas del deterioro del hormigón clasificándolas en función de su manifestación en las estructuras, desgaste superficial y fisuración.

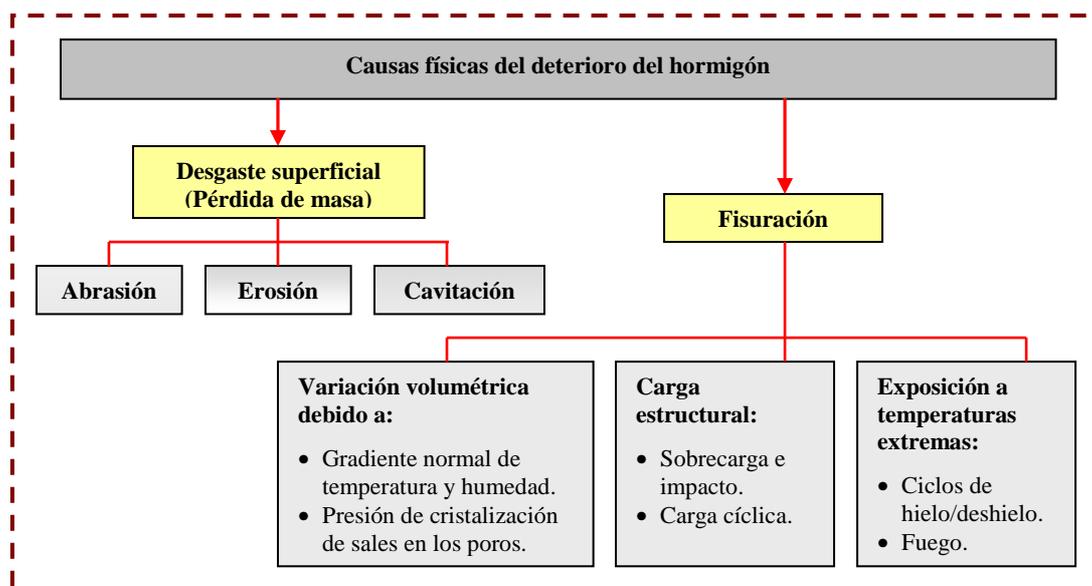


Figura 14 – Causas físicas del deterioro del hormigón (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Dependiendo de las condiciones ambientales y del espesor de la pieza de hormigón, la mayor parte del agua evaporable, el agua capilar y una parte del agua adsorbida, se pierde, dejando los poros vacíos o por lo menos no saturados. Como esta agua evaporable es justamente pasible de congelarse y también libre para movimientos internos, un hormigón no será vulnerable a fenómenos destructivos relacionados con el agua si hubiera poca o ninguna luego del secado y, por otra parte, si luego de la exposición subsiguiente del hormigón, el medio ambiente no causara la re saturación de los poros. Esta nueva saturación depende del coeficiente de permeabilidad (K) (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

En el caso de la figura 15, se muestran las causas químicas del deterioro del hormigón, que se manifiestan debido a reacciones de cambio entre un fluido agresivo y componentes de la pasta de cemento endurecida, a reacciones que incluyen hidrólisis y lixiviación de los componentes de la pasta y a reacciones que incluyen la formación de productos expansivos.

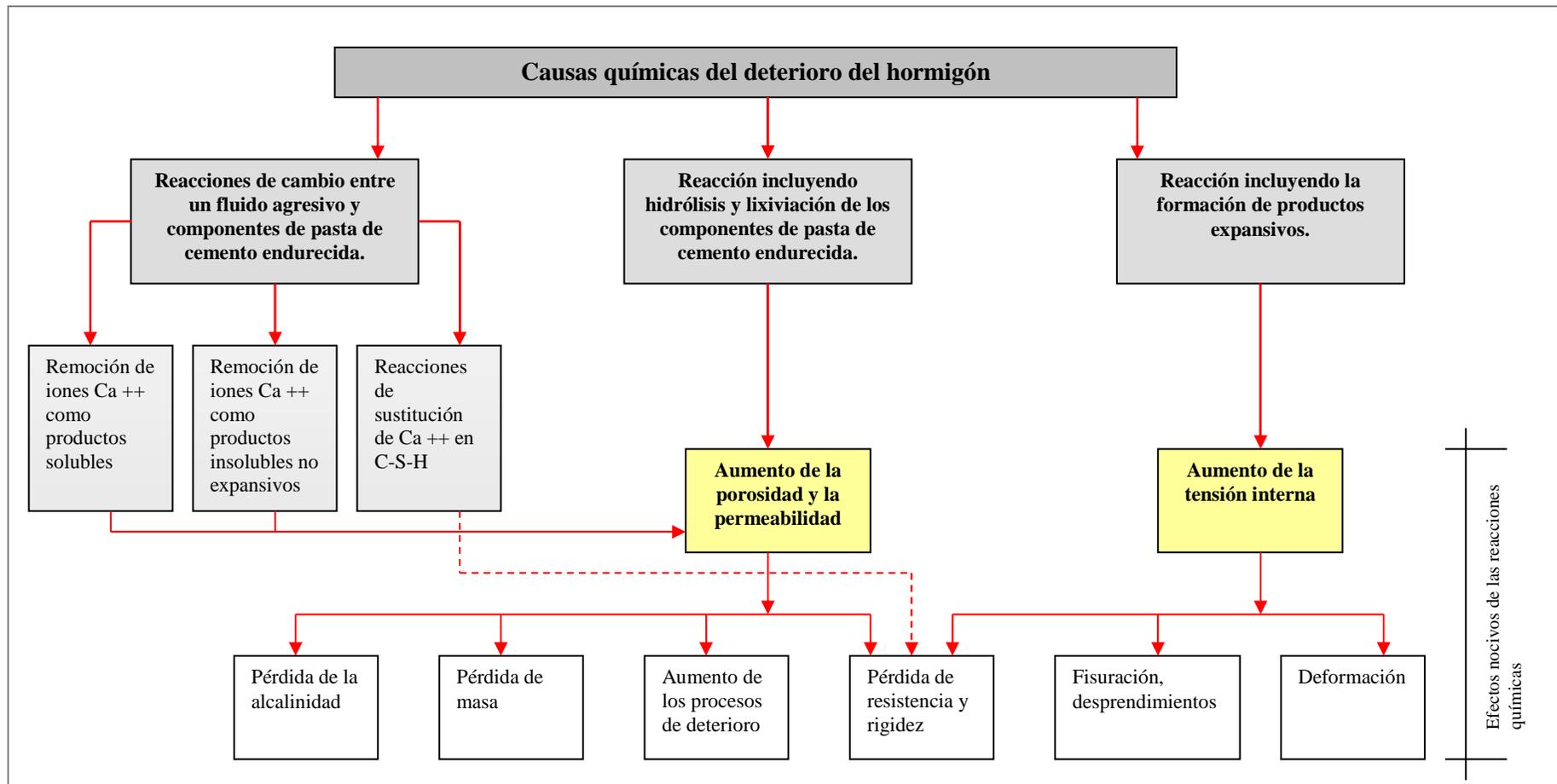


Figura 15 – Causas químicas del deterioro del hormigón. A: ataque del agua al hidróxido de calcio y C-S-H presentes en los cementos Pórtland hidratados; B: (I) solución ácida formando componentes solubles de calcio, como cloruro de calcio, sulfato de calcio, acetato de calcio o bicarbonato de calcio; (II) soluciones de ácido oxálico y sus sales, formando oxalato de calcio; (III) ataque de larga duración de agua de mar disminuyendo el C-S-H por la sustitución de  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$ ; C: ataque por sulfato formando etringita y yeso, reacción álcali – agregado, corrosión de armaduras en el hormigón, hidratación de MgO y CaO cristalinos. (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

### 3.1.4.1 Permeabilidad del agregado

El volumen de poros en la mayoría de los agregados está por debajo del 3 %, muy ocasionalmente excede el 10 %, por lo tanto la permeabilidad del agregado es mucho menor que el de una pasta de cemento convencional. El motivo de que algunos agregados con apenas el 10 % de porosidad presenten permeabilidad mucho mas alta que la pasta de cemento se debe a que el tamaño de los poros capilares en los agregados son de mayor dimensión.

En la tabla 29, se vincula el coeficiente de permeabilidad de rocas utilizadas para la obtención de agregados, utilizados para la producción de hormigón convencional, con la relación agua/cemento necesaria para lograr pastas de cemento de permeabilidad similar. De esta forma se estaría produciendo un hormigón homogéneo desde el punto de vista de la permeabilidad.

**Tabla 29 – Comparación entre la permeabilidad de las rocas y las pastas de cemento (NEVILLE, 2004)**

<b>Tipos de roca</b>	<b>Coficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	<b>Relación agua/cemento de pasta hidratada con el mismo coeficiente de permeabilidad</b>
Basalto denso	$2,47 \times 10^{-12}$	0,38
Cuarzo diosito	$8,24 \times 10^{-12}$	0,42
Mármol	$2,39 \times 10^{-11}$	0,48
Mármol	$5,77 \times 10^{-10}$	0,66
Granito	$5,35 \times 10^{-9}$	0,70
Arena de cantera	$1,23 \times 10^{-8}$	0,71
Granito	$1,56 \times 10^{-8}$	0,71

La distinción entre causas físicas y químicas en el deterioro del hormigón es arbitraria, en la práctica las dos frecuentemente se superponen.

### 3.1.4.2 Desgaste superficial

De acuerdo a lo expresado por Mehta y Monteiro (2008), pérdidas progresivas de masa en la superficie del hormigón pueden ocurrir debido a la abrasión, erosión o cavitación. El término abrasión se refiere generalmente al atrito seco, desgaste en seco; en el caso de la erosión toma en cuenta el desgaste por acción abrasiva de fluidos que contienen partículas sólidas en suspensión y la cavitación es la pérdida de masa por la formación de bolas de vapor de agua. La vida útil del hormigón puede sufrir una reducción producto de ciclos de atrito repetidos,

evitarlo implica lograr pastas de cemento de baja porosidad, altas resistencias mecánicas y agregados que posean resistencia al desgaste.

La resistencia a la abrasión del hormigón depende fundamentalmente de las características de sus dos fases mayoritarias que son la pasta y los agregados, en particular los gruesos, y de la adherencia de aquella con estos. Debido a un problema de resistencia y dureza diferenciales, donde para la mayoría de los hormigones los agregados constituyen la fase mas dura, el deterioro por abrasión comienza por la pasta. Luego la abrasión y el impacto causarán una degradación adicional que está relacionada con la adherencia pasta – agregado, dependiente esencialmente de la forma de las partículas, habitualmente se consiguen los mejores resultados con partículas angulares a sub - angulares (KLARIC, 2001).

La resistencia del agregado a la degradación por abrasión se mide mediante el ensayo en la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131 y C 535). Para la obtención de superficies de hormigón resistentes a la abrasión el ACI Committee 201 recomienda que la resistencia a la compresión del hormigón no debe ser menor a 28 MPa, con baja relación agua/cemento, adecuada granulometría de agregados gruesos y finos y un tamaño máximo del árido limitado a 25 mm. Cuando las condiciones de erosión o abrasión son severas recomienda el uso de agregados de alta dureza, resistencia a la compresión de 41 MPa y por lo menos siete días de curado húmedo.

Para Neville (2004), en atención a los factores que afectan la resistencia a la abrasión, las mezclas ricas no son aconsejables, tomando como máximo contenido de cemento el valor de 350 kg/m<sup>3</sup>, debido a que el agregado grueso debe estar presente justo por debajo de la superficie del hormigón. Recomienda por otra parte el uso de arena de trituración de roca y la utilización de agregado grueso lo más resistente y duro posible, valores que sugiere obtener mediante el ensayo de resistencia a la abrasión en la máquina de Los Ángeles.

#### **3.1.4.3 Ciclo de congelamiento**

El daño más común provocado por el congelamiento es la fisuración o el desprendimiento de lascas producto de la expansión progresiva en el interior de agregados obtenidos a partir de rocas porosas. El comportamiento de una partícula de agregado expuesta a ciclos de congelamiento y deshielo depende principalmente del tamaño, del número y la continuidad de los poros y de la permeabilidad (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

En general se coincide en que mientras los ensayos de durabilidad por congelación y deshielo pueden clasificar los agregados desde excelentes a pobres en aproximadamente un orden correcto, son incapaces de predecir se un agregado marginal tendrá un comportamiento satisfactorio cuando es utilizado con un particular contenido de humedad y están sujetos a ciclos de congelación y deshielo (KLARIC, 2001).

Por otra parte también resulta interesante atender la opinión de algunos autores, como el caso de Richardson (2002), que nos plantean que la relación precisa entre la porosidad del agregado y la resistencia en el ciclo congelamiento – deshielo no esta claramente establecida, porque los poros del agregado también pueden contribuir con un valioso espacio para que se acomode el producto del congelamiento.

En función del daño ocasionado por el congelamiento en los agregados, Mehta y Monteiro (2008), desarrollan el concepto de *tamaño crítico del agregado*, planteando que con una distribución del tamaño de los poros dada, permeabilidad, grado de saturación y velocidad de enfriamiento, las partículas grandes de un agregado pueden causar daños pero las menores no. No hay un tamaño crítico único para cada agregado, porque esto depende de la tasa de congelamiento, del grado de saturación y permeabilidad del agregado. La permeabilidad tiene un papel doble, primero determina el grado de saturación y la velocidad con la que el agua será absorbida en un período de tiempo determinado; y segundo determina al velocidad con la que el agua será expedita en el congelamiento, desarrollando la presión hidráulica. Cuando los agregados son mayores que la dimensión del tamaño crítico, el congelamiento viene acompañado de desprendimientos, el agregado se parte, un sector permanece en el hormigón y el otro cae generalmente adherido a una capa de mortero.

En la tabla 30, Verbeck y Landgre (1960), clasifican a los agregados en tres categorías y definen de acuerdo a la permeabilidad del pétreo el comportamiento frente al ciclo de congelamiento.

**Tabla 30 – Clasificación de agregados en función del ciclo de congelamiento. (VERBECK y LANDGREN, 1960)**

<b>Agregados</b>	<b>Características</b>	<b>Comportamiento frente al congelamiento</b>
<b>Agregado I</b>	Baja permeabilidad y alta resistencia	La deformación elástica de la partícula evita la ruptura
<b>Agregado II</b>	Permeabilidad intermedia. Poros del orden de 500 nm.	El agregado retiene agua y es fácilmente saturado debido a los pequeños poros.
<b>Agregado III</b>	Alta permeabilidad. Muchos poros grandes.	El tamaño de los poros permite la fácil entrada y salida del agua evitando el daño en el agregado pero causando perjuicios en la zona de transición.

Durante la producción del hormigón debemos evitar los daños producto del ciclo de congelamiento. En este sentido Mehta y Monteiro (2008), sugieren incluir fronteras de fuga de la matriz de la pasta de cemento y modificar su estructura de poros. La primera situación puede controlarse mediante la incorporación de aire en el hormigón y lo segundo por medio de la dosificación y el curado. La incorporación de aire no asegura evitar el daño por congelamiento, normalmente el tenor de pasta de cemento está relacionado al tamaño máximo del árido y que hormigones magros con agregados grandes tienen menos pasta que hormigones ricos con agregados pequeños, estos últimos requieren más aire incorporado para un grado equivalente de resistencia al congelamiento.

En la tabla 31, ACI (2011), relaciona el tamaño máximo del árido, con el tenor de aire a incluir de acuerdo a la exposición ambiental de la estructura; considera dos tipos de exposición.

**Tabla 31 – Tenor total de aire para hormigón resistente al congelamiento (ACI, 2011)**

Tamaño máximo del árido (mm)	Tenor de aire (%)	
	Exposición severa	Exposición moderada
9,0	7 <sup>1/2</sup>	6
12,5	7	5 <sup>1/2</sup>
19,0	6	5
25,0	6	4 <sup>1/2</sup>
37,5	5 <sup>1/2</sup>	4 <sup>1/2</sup>
50,0	5	4
76,0	4 <sup>1/2</sup>	3 <sup>1/2</sup>

Un daño típico de deterioro del hormigón vinculado al agregado por congelación y deshielo es el que se conoce como fisuración en *D*. Se presenta como finas grietas en los bordes de las losas y se originan por la acumulación de agua en juntas y bordes, esto lleva al agregado a la saturación crítica. Se produce en pavimentos de rutas y aeropuertos. La falla comienza en el agregado grueso y después se transmite al mortero. Comienza en la parte inferior de las losas y se desarrolla lentamente, a lo largo de 10 a 15 años. Existe una fuerte interacción entre las dos fases mayoritarias del hormigón frente a la acción de la congelación y el deshielo. Finalizada la obra, si los agregados alguna vez alcanzan su saturación crítica será por el agua que proviene de una fuente exterior (KLARIC, 2001).

#### **3.1.4.4 Fuego. Efecto de la temperatura elevada en el agregado**

La porosidad y la mineralogía del agregado parecen ejercer una importante influencia en el comportamiento del hormigón expuesto al fuego. Dependiendo de la velocidad de

calentamiento, la dimensión, permeabilidad y humedad del agregado, los porosos pueden ser susceptibles a la expansión destructiva, con desprendimientos similares a los provocados por el ciclo de congelamiento. Agregados de baja porosidad pueden estar libres de problemas relacionados con el movimiento de la humedad interna (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

El efecto de la temperatura sobre la resistencia a compresión del hormigón depende de los agregados que lo componen y de las condiciones de ensayo, según lo ha demostrado Abrams, eligiendo agregados de comportamiento térmico muy diferente, como ser del tipo carbonático, silíceo y liviano, tanto para el grueso como el fino en cada caso, y cemento Portland normal, simulando exposiciones ambientales como las que se producen durante un incendio de varias horas de duración. Los ensayos fueron realizados a temperaturas comprendidas entre los 70 °C y los 1600 °C (KLARIC, 2001).

Uno de los principales factores que afectan el valor del coeficiente de dilatación del hormigón es el tipo de agregado utilizado. Debido a que el hormigón es predominantemente agregado, la dilatación del mismo determina la dilatación del compuesto. El coeficiente de dilatación térmica de las rocas generalmente aumenta con el incremento del contenido de sílice (SMITH y COLLIS, 2001).

A nivel empírico se verifica que el mejor desempeño logrado con los hormigones que contienen agregados de origen carbonático o agregado liviano, frente a una temperatura mas alta de exposición, puede ser debido a la menor diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica entre la matriz del mortero y el agregado grueso.

La acción de la temperatura da como resultado una pérdida de la resistencia y un deterioro del comportamiento del hormigón frente a la deformación. Las razones principales de esta situación son: el comportamiento térmico diferente del agregado grueso y del mortero de cemento, lo que provoca una deformación distinta y una tensión interna entre ellos que genera la fisuración hasta su límite. El agregado grueso se expande y se fisura en presencia de elevadas temperaturas. Este daño interno en el hormigón se desarrolla y acumula a medida que la temperatura se incrementa (GUO y SHI, 2011).

La resistencia de las rocas, varía de acuerdo a las condiciones físicas en las cuales se encuentran. De acuerdo con Vishal et al., (2011), el comportamiento de las rocas se modifica en función de la temperatura, el tiempo, la presión, la presencia de fluidos, las características de la masa de la roca, y su historia de tensión en el ambiente natural. Para estos autores la temperatura es el parámetro más influyente en la roca en cuanto a su formación, a sus

condiciones de profundidad, entre otras. En su trabajo realizaron ensayos a discos de rocas, ensayo brasilero, de diferentes orígenes, ígneas, sedimentarias y metamórficas, sometiéndolos a cargas de compresión y tensión, y de esta forma verificaron el cambio de resistencia de los pétreos en función de la temperatura. Los resultados obtenidos se exhiben en la figura 16 y en la tabla 32.

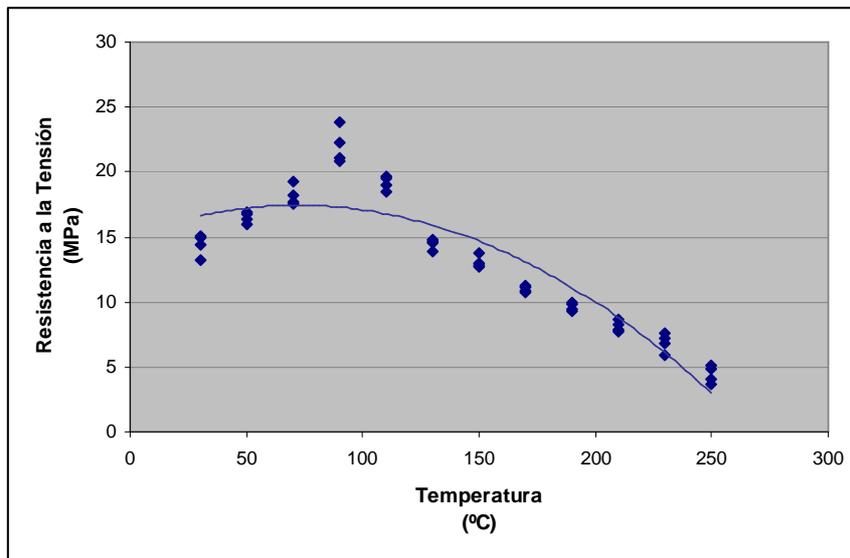


Figura 16 – Relación entre la resistencia a la tensión de las rocas y la variación de temperatura a la que son expuestas (VISHAL et al., 2011).

Para Klaric (2001), el coeficiente de dilatación térmica de la pasta es sustancialmente mayor que el correspondiente a los agregados, y además varía muy significativamente con su contenido de humedad, alcanzando los máximos valores para contenidos entre 50 y 75 %. La composición y la estructura de los agregados constituyen el factor determinante sobre el coeficiente de dilatación térmica del hormigón. Como los agregados ocupan entre el 65 al 80 % del volumen total, el coeficiente de dilatación térmica del hormigón es casi directamente proporcional al del agregado. El principal factor que influye sobre la dilatación térmica de la roca y, consecuentemente del hormigón, es la proporción de cuarzo presente en la misma. Las rocas con alto contenido de cuarzo, tales como la cuarcita y la arenisca, tienen los más altos coeficientes, promediando cerca de  $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , mientras que las rocas que contienen poco o nada de cuarzo, tales como la caliza, tienen los menores coeficientes. Las rocas con mediano contenido de cuarzo, tales como las ígneas, granito, riolita, basalto, poseen valores intermedios.

**Tabla 32 – Comportamiento de discos de rocas sometidos a diferentes temperaturas. (Vishal et al., 2011)**

Nº	Temperatura (C <sup>o</sup> )	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Descarga de rotura (KN)	Resistencia a la tensión (MPa)
1	30	54,36	31,30	39,88	14,93
2	30	55,30	32,23	40,24	14,38
3	30	54,97	33,15	37,96	13,27
4	30	55,38	31,64	41,48	15,08
5	50	55,33	31,56	44,77	16,33
6	50	54,96	32,14	44,43	16,02
7	50	53,68	34,16	48,60	16,88
8	50	55,18	32,91	47,87	16,79
9	70	54,07	31,88	47,39	17,51
10	70	53,96	33,27	49,69	17,63
11	70	55,08	34,24	53,77	18,16
12	70	54,31	34,23	56,18	19,25
13	90	53,71	33,14	58,29	20,86
14	90	53,65	33,75	59,93	21,08
15	90	55,12	32,22	62,20	22,31
16	90	53,65	32,80	65,91	23,86
17	110	55,13	34,82	59,19	19,64
18	110	53,89	33,57	55,44	19,52
19	110	53,91	32,17	51,87	19,05
20	110	53,67	33,10	51,63	18,51
21	130	53,82	31,33	38,75	14,64
22	130	54,71	31,91	37,96	13,85
23	130	53,75	33,93	41,71	14,57
24	130	56,38	32,68	42,92	14,84

Nº	Temperatura (C <sup>o</sup> )	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Descarga de rotura (KN)	Resistencia a la tensión (MPa)
25	150	54,32	31,28	36,87	13,82
26	150	53,75	32,21	35,15	12,93
27	150	54,08	33,13	35,98	12,79
28	150	53,82	31,62	33,88	12,68
29	170	54,09	33,04	30,55	10,89
30	170	54,27	34,01	32,68	11,28
31	170	54,19	34	32,19	11,13
32	170	54,71	32,91	30,19	10,68
33	190	54,33	34,02	27,42	9,45
34	190	54,03	32,62	25,76	9,31
35	190	53,82	33,55	27,90	9,84
36	190	54,16	34,47	29,37	10,02
37	210	53,51	32,96	21,38	7,72
38	210	55,04	34,34	25,73	8,67
39	210	53,76	33,09	23,15	8,29
40	210	54,19	32,06	21,57	7,91
41	230	53,76	34,34	17,19	5,93
42	230	53,81	33,09	18,95	6,78
43	230	54,23	32,06	20,77	7,61
44	230	53,74	33,45	20,49	7,26
45	250	55,05	34,42	15,02	5,05
46	250	54,14	34,41	12,05	4,12
47	250	53,68	33,32	10,42	3,71
48	250	53,75	33,93	13,89	4,85

Beaucour et al., (2011), presentó un estudio de hormigón compuesto por tres tipos de agregados: silíceo calcáreo semi partido, calcáreo partido y silíceo rodado. Para cada tipo utilizaron dos relaciones agua/cemento, 0,6 y 0,3 y sometieron las probetas a temperaturas de 300, 600 y 750 °C. Analizaron el comportamiento del hormigón en función de la evolución de las propiedades mecánicas, térmicas y físicas, y la evolución de las características del agregado con los ciclos de temperatura. El estudio del comportamiento térmico de los agregados exhibió la importancia de la humedad inicial de los pétreos, y en el caso de los agregados silíceos quedó en evidencia el trascendente rol de la cristalización y la micro estructura del cuarzo en la estabilidad térmica de dicho pétreo. El comportamiento térmico residual del hormigón varió dependiendo del agregado y de la influencia de este en función de la composición de la pasta; se verificó la influencia de las características químicas y mineralógicas de los agregados en el comportamiento térmico mecánico del hormigón.

En la tabla 33, Smith y Collis (2001), relacionan de acuerdo a su contenido de sílice el valor de dilatación térmica tanto de la roca, como del hormigón producido con la misma utilizada como agregado. Se puede apreciar como disminuye el valor del coeficiente de dilatación térmica, tanto de la roca como del hormigón, a medida que decae el contenido de sílice del pétreo.

**Tabla 33 – Coeficiente de dilatación térmica de las rocas y el correspondiente hormigón (SMITH y COLLIS, 2001)**

Roca	Contenido de sílice (%)	Coeficiente de dilatación térmica $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
		Roca (valor promedio)	Hormigón (valor promedio)
Chert	94	11,8	13,2
Cuarcita	94	10,3	12,1
Arenisca	84	9,3	11,4
Granito	66	6,8	9,6
Basalto	51	6,4	9,3
Caliza	Rastro	5,5	8,6

Vieira et al., (2011), presentaron un estudio del desempeño mecánico del hormigón con agregado grueso reciclado, reemplazando en un 20 %, 50 % y 100 % el agregado grueso natural, luego de someterlo a temperaturas de 400 °C, 600 °C y 800 °C. Luego del enfriamiento del ambiente se evaluó la resistencia a la compresión, a la tensión y el módulo de elasticidad. Los resultados, que se exhiben en la tabla 34, muestran que no existe una diferencia significativa entre el hormigón compuesto con agregado reciclado y el de agregado convencional.

**Tabla 34 – Propiedades mecánicas residuales (Vieira et al., 2011)**

Propiedades residuales mecánicas	Dosificación	Número de testigos	Exposición a la temperatura			
			T20	T400	T600	T800
Resistencia a la compresión (MPa)	RC	5	67,6	53,7	50,1	41,1
	C20	5	67,7	51,1	51,0	36,1
	C50	5	65,3	51,5	48,5	37,0
	C100	5	63,6	50,8	48,8	42,9
Resistencia a la tensión (MPa)	RC	3	3,2	2,8	2,2	1,3
	C20	3	2,8	2,5	2,1	0,8
	C50	3	3,9	3,0	2,1	1,4
	C100	3	3,4	2,5	2,2	0,8
Módulo de elasticidad (GPa)	RC	3	43,7	13,2	11,1	5,4
	C20	3	36,7	12,1	10,0	3,9
	C50	3	40,4	12,4	10,0	4,6
	C100	3	33,2	11,3	8,7	3,5

RC= agregado natural, C20 – C50 – C100= sustitución del agregado natural por reciclado, 20, 50 y 100 % respectivamente, T20 – T400 – T600 – T800= temperaturas de exposición de 20, 400, 600 y 800 °C.

## **4 CARACTERÍSTICAS E IMPORTANCIA DE LOS AGREGADOS PETREOS EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN**

La incorporación de agregados en el hormigón, en función de la incidencia de estos en el desempeño final de este compuesto, implica el conocimiento de las características de los pétreos que surgen de su origen y que constituyen sus propiedades geológicas, físicas y mecánicas.

### **4.1 Pétreos utilizados en la producción de diferentes tipos de hormigón.**

Desde que en el hormigón, al menos las tres cuartas partes del volumen son ocupadas por los agregados, no resulta sorprendente que la calidad del mismo sea considerada importante. No solamente el agregado puede limitar la resistencia del hormigón, un agregado frágil no puede producir un hormigón fuerte, también las propiedades del agregado inciden considerablemente en la durabilidad y el desempeño del hormigón. Originalmente el agregado fue visto como un material inerte, dispuesto en el interior de la pasta del cemento respondiendo a razones económicas. Es posible, de todas formas, tener una mirada opuesta y mirar al agregado como un material de construcción conectado dentro de una cohesiva unidad con la pasta de cemento, de un modo similar a la albañilería. El hecho es que el agregado no es verdaderamente inerte y sus físicas, térmicas, y en algunos casos químicas propiedades influyen el desempeño del hormigón. El agregado es menos costoso que el cemento y esto provoca que sea más económico introducir en la mezcla la mayor cantidad posible. Pero la economía no es la única razón para el uso del agregado: este confiere considerables ventajas técnicas al hormigón, como ser mayor estabilidad volumétrica y mejor durabilidad que la pasta de cemento sola (NEVILLE, 2004).

Es evidente que las características diversas de los agregados influyen en la producción de diferentes tipos de hormigón, para Kovler y Rousell (2011), que estudiaron la influencia de los diferentes tipos de agregados en la resistencia mecánica y a la abrasión del hormigón, concluyeron que el hormigón con gabbro exhibe una muy alta resistencia a la compresión, a la flexión y a la abrasión, donde la arenisca muestra valores muy descendidos. Agregados con resistencia muy alta a la abrasión generan hormigones con similar característica. Hormigones producidos con basaltos, calizas y areniscas mostraron a los tres meses valores similares de resistencia a la compresión uniaxial que las rocas originales. Mientras que los hormigones producidos con cuarzo y gabbro mostraron valores de resistencia a la compresión uniaxial a los tres meses menores que los de la roca original. Es evidente la incidencia del agregado en las características finales del hormigón.

Todos los agregados formaron parte originalmente de una roca matriz, que fue fragmentada por un proceso climático natural y abrasivo o por la fragmentación artificial. Todas las propiedades del agregado, químicas y composición mineral, descripción petrográfica, peso específico, dureza, resistencia, estabilidad físico-química, estructura de poros, color, entre otras, dependen íntegramente de la roca original. Hay una serie de propiedades que posee el agregado y no la roca original: tamaño y forma de la partícula, textura superficial y absorción. Es común aceptar que con un agregado cuyas características resulten satisfactorias se logrará producir un buen hormigón, pero la situación inversa no es necesariamente verdad, debido a que si bien, alguna de las propiedades del agregado no satisfagan, el pétreo puede tener un buen comportamiento embebido en la pasta de cemento. Esta es una de las razones por las cuales resulta conveniente referirse al hormigón en términos de desempeño (NEVILLE, 2004).

En la figura 17, se presenta un gráfico ilustrando sobre cómo la microestructura y las condiciones previas de exposición a factores relacionados con el proceso de extracción y procesamiento del agregado determinan sus características y afectan, no solamente a la dosificación sino a las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido.

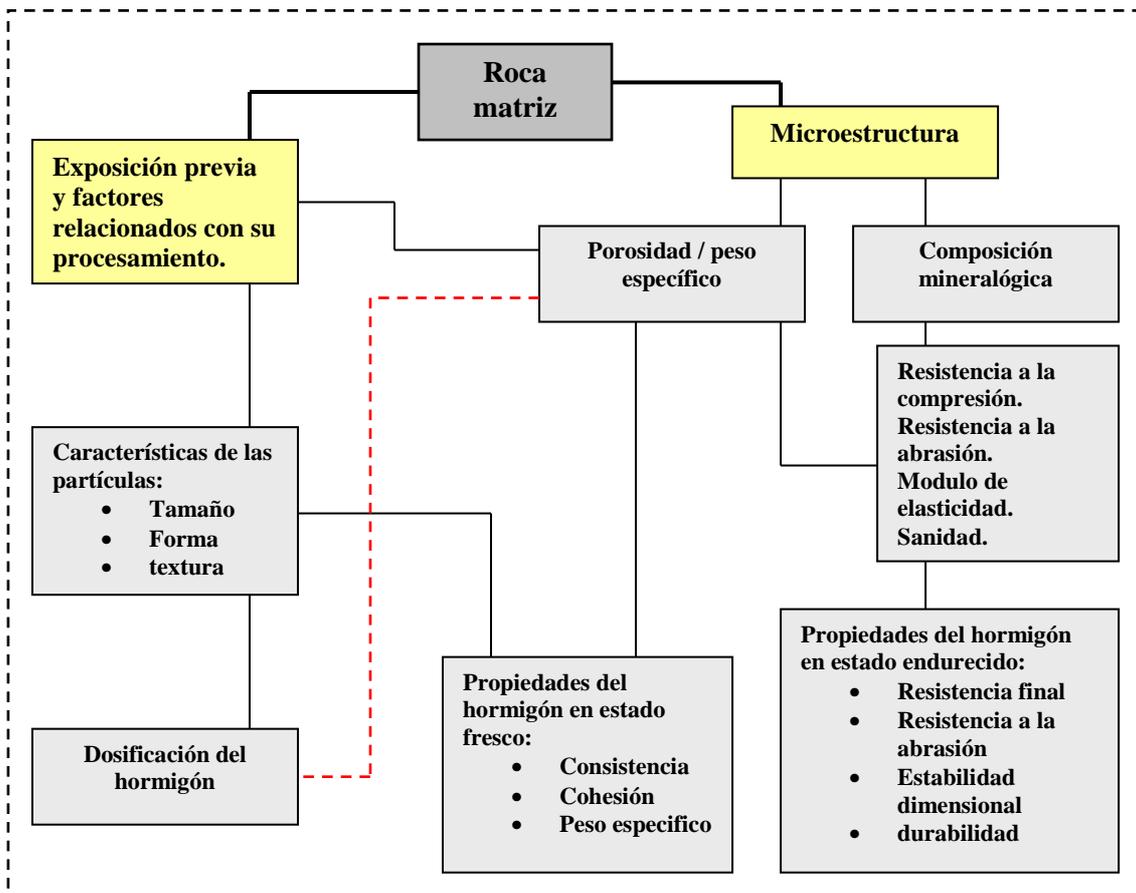


Figura 17 – Incidencia del agregado en el hormigón (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

## 4.2 Clasificación de los pétreos

Según Metha y Monteiro (2008), los agregados utilizados en el hormigón pueden clasificarse de varias maneras:

- *en función de la dimensión de la partícula.* En este caso el término agregado grueso es utilizado para referirse a partículas mayores a 4,75 mm y agregado fino a partículas menores a esta dimensión. La Norma UNIT 1050:2001 establece que se entiende por agregado fino el agregado o fracción del mismo que pasa por el tamiz 4,75 mm y por agregado grueso el que resulta retenido por el tamiz 7,1 mm.
- *de acuerdo al peso específico.* La mayoría de los agregados minerales naturales tienen un peso específico en el entorno de 1520 a 1680 kg/m<sup>3</sup>, con los cuales se obtienen hormigones de densidad normal, aproximadamente 2400 kg/m<sup>3</sup>. Los agregados con peso específico menor a 1120 kg/m<sup>3</sup> son considerados livianos, por encima de los 2080 kg/m<sup>3</sup> son considerados pesados, y con estos agregados se obtienen hormigones livianos y pesados respectivamente.
- *mediante la determinación del origen del agregado.* Los que proceden de canteras naturales, sin transformaciones de segundo orden, son los denominados agregados minerales naturales, los técnicamente procesados son los agregados artificiales. Los residuos industriales, urbanos o los que surgen de las demoliciones de la industria de la construcción son considerados artificiales.

Para otros autores, como Alexander y Mindess (2005), los pétreos también pueden ser clasificados petrográficamente, esto es, en términos del tipo y de la proporción relativa de los minerales presentes en el mismo. Las técnicas de caracterización petrográfica y mineralógica brindan una información relevante con respecto al desempeño del agregado en el hormigón.

## 4.3 Origen de los pétreos (agregados naturales)

Si consideramos los agregados de tipo natural y de acuerdo a lo planteado por Frazao (2002), las rocas que integran la corteza terrestre pertenecen a tres grupos:

*Ígneas.* Son constituidas por la incorporación de minerales originados en la consolidación, por enfriamiento, de material rocoso que se encontraba en estado líquido por efecto de la fusión a elevadas temperaturas. Cuando este líquido emerge en forma de lava da

lugar a la formación de rocas denominadas volcánicas o extrusivas, de enfriamiento veloz y granulación invisible al ojo humano, que puede ser constituida de vidrio amorfo o de microcristales, cuando la granulación se puede ver resulta ser muy fina. Cuando este proceso se origina en niveles profundos estamos en presencia de la formación de rocas intrusivas o magmáticas, que se consolidan lentamente y cuya granulación es gruesa por su lenta cristalización. La textura influye en la resistencia de las rocas, verificándose que en rocas de similar composición mineralógica la resistencia aumenta con la disminución de la granulometría. Estas rocas contienen variados tenores de sílice, lo que le incorpora mayor dureza y durabilidad. Según Mehta y Monteiro (2008), clasificar a las rocas en función de su contenido de sílice es útil, porque la combinación de carácter ácido con la granulación de la roca determina si un agregado será vulnerable al ataque de los álcalis del hormigón.

*Sedimentarias.* Pueden provenir de fragmentos de otras rocas que se depositan en un ambiente dado y se consolidan por presión de sobrecarga de las capas superiores o por la disolución en agua de iones que se combinan y precipitan en forma de sustancias por lo general cristalinas. La variabilidad con la que pueden consolidarse estas rocas provoca la diversidad de formas, texturas, porosidad, resistencia y sanidad. Muchas veces contienen impurezas que comprometen su uso como agregados para el hormigón (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

*Metamórficas.* Se originan a partir de rocas existentes por modificaciones en las asociaciones mineralógicas, en la textura y en la estructura. Este proceso surge cuando una roca es sometida a condiciones físico-químicas sensiblemente diferentes de aquellas que la generaron. Estas modificaciones ocurren en estado sólido y provocan: recristalización de minerales existentes que se estabilizaran de acuerdo a las nuevas condiciones y formación de nuevas texturas y estructuras. Estas rocas son densas pero frecuentemente foliadas.

El origen de las rocas metamórficas son otras rocas, ígneas, sedimentarias o metamórficas. La composición química de este material primario determina la composición química y mineralógica de las rocas metamórficas al igual que se estructura que a menudo es heredada del material precursor y exhibe distintos procesos originales de metamorfismo. La estructura mas típica es el resultado de la combinación de la deformación y de la recristalización, deformación esta que normalmente acompaña los procesos tectónicos de larga escala causantes del metamorfismo. Las rocas pueden sufrir la recristalización continua y nuevos minerales pueden sustituir viejos en una sucesión compleja. El definitiva, el metamorfismo puede continuar esporádicamente (BUCHER y GRAPES, 2011).

En la tabla 35 se presentan algunas rocas metamórficas derivadas de las rocas más comunes.

La gran diversidad de rocas metamórficas responde a la variedad de procesos de metamorfismo y la preexistencia de rocas eventualmente afectadas, de esto se desprende que la utilidad como agregados para la producción de hormigón es también variable (SMITH y COLLIS, 2001).

**Tabla 35 – Clasificación de las rocas metamórficas a partir de la roca original. (SMITH y COLLIS, 2001)**

<b>Metamorfismo ambiental (condiciones de temperatura y presión)</b>			
<b>Características de la roca</b>	<b>Roca original</b>	<b>Grado bajo (enterramiento superficial)</b>	<b>Grado medio y alto (enterramiento profundo)</b>
<b>Roca foliada</b> (efecto primordial de la presión)	Arcilla, esquisto	Esquisto	Phyllite, schist, gneiss
	Arenisca arcillosa	Arenisca greywacke	Cuarzo, mica, schist y gneiss de grano fino
	Caliza arcillosa	Mármol	Schist calcáreo
	Granito, cuarzo	Granito partido, esquisto	Granito, gneiss, cuarzo, mica, schist
	Basalto	Clorita verde, schist	Anfibolita, gneiss
<b>Roca no foliada, roca masiva</b> (efecto primordial del incremento de la temperatura)	Ninguna roca familiar		Hornfels (recristalización) cuarzo que incluye mica
	Arenisca cuarcítica	Arenisca cuarcítica	Cuarcítica, granulito
	Caliza y dolostone	Mármol (calcio y silicatos de magnesio)	

Pero por otra parte, de acuerdo con Pariseau (2007), los sistemas de clasificación de las rocas en función de su origen, genético o geológico, rara vez toman en cuenta las propiedades requeridas por la ingeniería. Algunas rocas sedimentarias presentan valores de resistencia más elevados que rocas ígneas. De todas formas hay variados sistemas de clasificación de las rocas vinculados a los objetivos de la ingeniería que permiten, por ejemplo, estimaciones preliminares de la estabilidad y seguridad de una excavación.

#### **4.4 Características de los pétreos en función de su porosidad, exposición y composición**

Con respecto a las características de los pétreos, Metha y Monteiro (2008), aclaran que estas no solamente inciden en la dosificación del hormigón sino que también en el

comportamiento del mismo tanto en estado fresco como endurecido. En función de esto sugieren dividir el estudio del agregado en tres categorías con base en los factores microestructural y los factores relacionados con su procesamiento:

4.4.1. *Características dependientes de la porosidad.* (Peso específico, densidad, absorción de agua, resistencia, dureza, módulo de elasticidad y solidez);

4.4.2. *Características dependientes de las condiciones previas de exposición y factores relacionados con el proceso de fabricación.* (Tamaño y distribución granulométrica, forma y textura de las partículas);

4.4.3. *Características dependientes de la composición química y mineralógica.* (Resistencia, dureza, módulo de elasticidad y sustancias deletéreas presentes).

#### **4.4.1 Características dependientes de su porosidad**

La porosidad es el resultado de varios procesos, geológicos, físicos y químicos con variaciones significativas para los diferentes tipos de rocas. Su valor cambia incluso para el mismo tipo de roca en función de diferentes factores, como ser, la distribución del tamaño de grano y su forma, incidiendo también la profundidad y la presión. La porosidad generalmente disminuye con el incremento de la profundidad y la presión (ZHANG LIANYANG, 2006).

La porosidad más alta se logra cuando todos los granos tienen el mismo tamaño. La incorporación de granos de diferentes dimensiones disminuye la porosidad y esto, con ciertos límites, es directamente proporcional a la cantidad incorporada. Irregularidades en el tamaño del grano dan como resultado un largo rango posible de porosidad, las formas irregulares pueden, teóricamente, poseer un anclaje superior a las formas esféricas. Asimismo, granos angulares pueden causar un aumento o una disminución en la porosidad (BELL, 2007).

La porosidad de una roca está definida por la relación entre el volumen de los poros y el volumen de la roca en su totalidad. Dos tipos de porosidad pueden ser distinguidas, la *porosidad efectiva* también denominada “porosidad accesible y la *porosidad total*. La primera comprende todos los poros de la roca a los cuales tanto fluidos como gases pueden acceder, la última incluye la totalidad de los poros, incluso los aislados e inaccesibles. La porosidad tiene un directo e indirecto efecto sobre la mayoría de las propiedades físicas de un pétreo y debido a esto es considerado el parámetro más importante a considerar en una roca (SIEGESMUND y SNETHLAGE, 2011).

#### 4.4.1.1 Peso específico

Debido a que generalmente el agregado contiene poros, ambos permeables e impermeables, el significado del término *peso específico* debe ser cuidadosamente definido, y de hecho hay dos tipos de peso específico. Por un lado el *peso específico absoluto*, que se refiere al volumen del material sólido excluyendo los poros, este dato es de escasa utilidad en el trabajo vinculado a la tecnología del hormigón. Por otro lado el *peso específico aparente*, que considera el volumen incluyendo los poros, este dato es que realmente se averigua por ser el utilizado en el cálculo de dosificación al momento de determinar la cantidad de agregado necesario para un volumen de hormigón dado (NEVILLE, 2004).

Generalmente el peso específico aparente no es utilizado como una medida de la calidad del agregado, a pesar que la existencia de poros en los pétreos podría acelerar el deterioro del mismo por congelamiento de agua en su interior (KOSMATKA et al., 2003).

#### 4.4.1.2 Densidad

Es sabido que en el sistema métrico la densidad de un material es numéricamente igual al peso específico, si bien el último es una relación cuando la densidad es expresada en kilogramos por litro, expresión comúnmente utilizada en la práctica del hormigón.; cuando el agregado es acopiado y también comercializado en unidad de volumen, se hace imprescindible conocer el peso del mismo en función del espacio que ocupa. Esto es lo que se conoce como densidad del agregado y es lo que permite convertir cantidades por peso en cantidades por volumen, dato fundamental para el logro de piezas compactas de hormigón, donde debemos ocupar los vacíos con los áridos y el cemento (NEVILLE, 2004).

La densidad de las rocas depende de la composición mineral de la misma, de su porosidad y del material de relleno de los vacíos. Por otra parte, la porosidad disminuye cuando aumenta la profundidad, por lo tanto, la densidad de las rocas aumenta con el incremento de la profundidad (ZHANG LIANYANG, 2006).

En la tabla 36, se presentan valores de densidad para rocas intactas, clasificadas de acuerdo con el origen de las mismas.

**Tabla 36 – Valores típicos de densidad para rocas intactas (ZHANG LIANYANG, 2006)**

Tipo de roca	Roca	Rango de densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
Ígneas	Granito	2516 – 2809	2667
	Granitodiorita	2668 – 2785	2716
	Syenite	2630 – 2899	2757
	Cuarzo diorita	2680 – 2960	2806
	Diorita	2721 – 2960	2839
	Norite	2720 – 3020	2984
	Garbo	2850 – 3120	2976
	Diabase	2804 – 3110	2965
	Peridotite	3152 – 3276	3234
	Dunita	3204 – 3314	3277
	Pyroxenite	3100 – 3318	3231
	Anorthosite	2640 – 2920	2734
Sedimentarias	Arenisca	2170 – 2700	-
	Caliza	2370 – 2750	-
	Dolomita	2750 – 2800	-
	Tiza	2230	-
	Mármol	2750	-
	Esquistos	2060 – 2660	-
	Arena	1920 – 1930	-
Metamórficas	Gneiss	2590 – 3060	2703
	Schist	2700 – 3030	2790
	Slate	2720 – 2840	2810
	Anfibolita	2790 – 3140	2990
	Granulito	2630 – 3100	2830
	Eclogita	3338 - 3452	3392

#### 4.4.1.3 Absorción – Humedad superficial

La presencia de agua tiene un efecto significativo en las propiedades pretóxicas y mecánicas de las rocas. Tanto el espacio entre poros y el sistema de poros relata la capacidad de absorber agua, la capacidad de transportar el agua en el interior del pétreo y la dimensión del área superficial susceptible frente a la acción química (SIEGESMUND y SNETHLAGE, 2011).

De acuerdo a Mehta y Monteiro (2008), y presentado en la figura 18, se define la condición de *saturada superficie seca (SSS)* del agregado cuando todos sus poros permeables están saturados y no existe una película de agua superficial; cuando está saturado pero hay

humedad libre en la superficie el agregado esta en condición *húmeda o saturada*. La condición *seca en estufa* se logra mediante el calentamiento artificial en estufa a 100 °C, toda el agua evaporable es eliminada. La capacidad de absorción es definida como la cantidad total de agua necesaria para llevar un agregado de su condición seca en estufa a condición SSS. La absorción efectiva es la cantidad de agua necesaria para llevar un agregado de condición seca al aire a condición SSS. La presencia de agua en exceso a la necesaria para conseguir la condición SSS es la denominada *humedad superficial*.

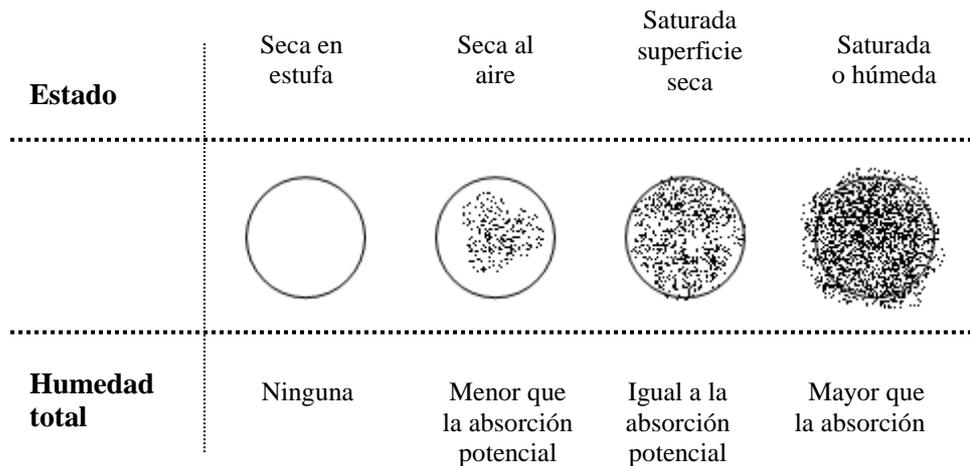


Figura 18 – Condiciones de humedad del agregado (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

El conocimiento de los datos relativos a la capacidad de absorción de los agregados se convierte en un insumo imprescindible al momento de dosificar hormigones y corregir la proporción de agua. Si el contenido de agua de la mezcla de hormigón no se conserva constante y la relación agua – cemento varía lote a lote del agregado estaríamos distorsionando algunas de las propiedades exigidas al hormigón, como ser la resistencia a la compresión, la trabajabilidad, entre otras (KOSMATKA et al., 2003).

De acuerdo con Deshpande et al., (2012), la cantidad de agua absorbida por los agregados durante el proceso de mezclado afecta las propiedades del hormigón fresco y las propiedades a largo plazo. Alta cantidad de absorción de agua por los agregados en los primeros 15 minutos luego de comenzado el mezclado, puede dar como resultado la pérdida de asentamiento y generar problemas de capacidad de bombeo. Exceso de absorción de agua por el agregado, durante el proceso de mezclado tanto como en el proceso de hidratación, provoca el deterioro de las propiedades del hormigón. Es imprescindible, que esta capacidad absorbente sea correctamente cuantificada de forma tal que sea posible el diseño de una dosificación y un

metraje precisos, que permita, por ejemplo, incorporar los agregados en condición de saturados con superficie seca.

Como dato preliminar la capacidad de absorción de un agregado, que se determina con relativa facilidad, puede ser usada como medida aproximada de su porosidad y resistencia. Normalmente, los valores de corrección de la humedad para rocas ígneas intrusivas y para rocas sedimentarias compactas son muy bajos, pero son altos en el caso de rocas sedimentarias porosas, agregados livianos y arenas saturadas (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

De acuerdo con Zhang Lianyang (2006), la porosidad tiene un gran efecto sobre la resistencia de las rocas. Para este autor la resistencia a la compresión de las rocas decrece a medida que la porosidad aumenta, y en su obra, citando a Rshewski y Novik (1978), presenta la siguiente relación:

$$\sigma_c = \alpha(1-\beta n)^2 \quad (\text{ecuación N}^\circ 5)$$

$n$ = porosidad

$\alpha$ = constante obtenida a partir del análisis de resultados de ensayos

$\beta$ = constante obtenida a partir del análisis de resultados de ensayos

En acuerdo con Palchik y Hatzor (2004), Zhang Lianyang (2006) presenta la siguiente relación, ecuación N° 6, entre la resistencia a la compresión y la porosidad, describiéndola como una función exponencial negativa:

$$\sigma_c = a e^{-bn} \quad (\text{ecuación N}^\circ 6)$$

$n$ = porosidad

$a$ = constante obtenida a partir del análisis de resultados de ensayos

$b$ = constante obtenida a partir del análisis de resultados de ensayos

En la tabla 37, se presentan valores de diferentes rocas para ser utilizados en la ecuación de Palchik y Hatzor (2004).

El consumo de agua en relación con el peso seco de la muestra está fundamentalmente influenciado por su porosidad, la distribución de los poros de acuerdo a su tamaño y la

composición mineralógica de la roca. Además el tamaño del poro influye en la totalidad del agua absorbida. Una inmersión corta en el tiempo, a lo largo de horas o días, llena parcialmente los poros. Los poros relativamente pequeños, generalmente encontrados en las areniscas, se llenan completamente luego de un proceso de inmersión en agua prolongado (SIEGESMUND y SNETHLAGE, 2011).

**Tabla 37 – Valores para diferentes rocas en la ecuación de PALCHIK y HATZOR (2004) (Adaptada de ZHANG LIANYANG, 2006)**

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	Tipo de roca	Referente
74,4	0,048	0,79	Arenisca	Palchik (1999)
210,1	0,821	0,67	Arcillas, esquistos, mudstone, siltstone	Lashkaripour (2002)
273,1	0,076	0,87	Tiza	Palchik y Hatzor (2004)
195	0,210	0,79	Arenisca, caliza, basalto y granito	Tugrul (2004)

Para los valores de *a* y *b* listados en la tabla, la Resistencia a la compresión  $\sigma_c$  está en MPa y la porosidad, *n*, está en porcentaje. *r*<sup>2</sup> es el coeficiente determinado.

En la figura 19, se puede apreciar diferencias muy significativas en porosidad, en función del tiempo de inmersión.

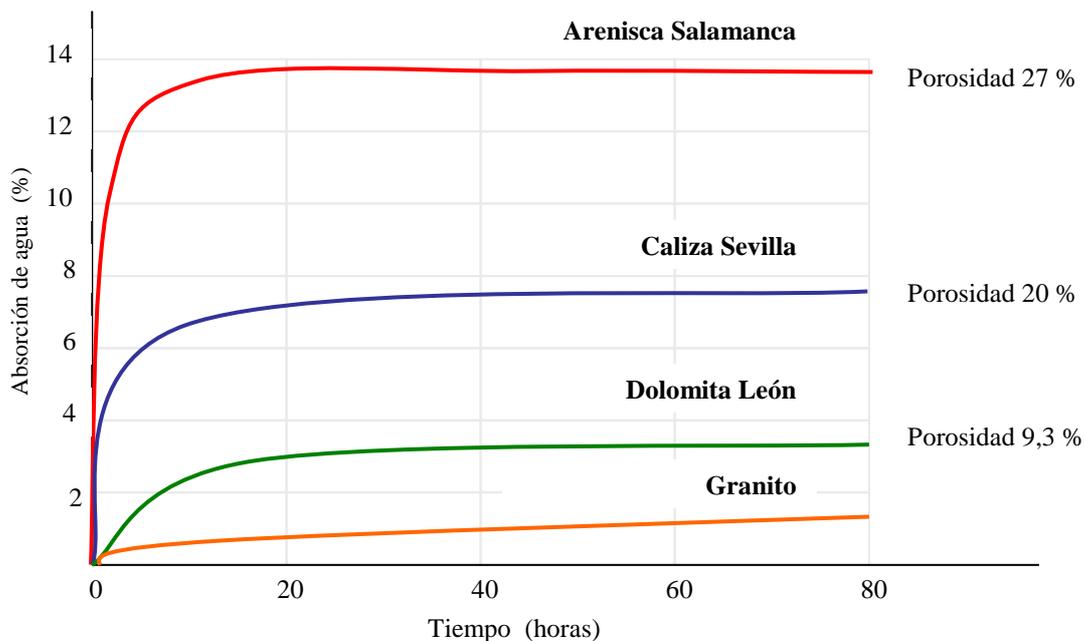


Figura 19 – Absorción de agua en función del tiempo para cuatro rocas españolas. En el esquema de la derecha la distribución del tamaño de los poros. (SIEGESMUND y SNETHLAGE, 2011)

La absorción de agua del agregado es en definitiva una medida indirecta de la permeabilidad, que en cada caso, nos puede relatar otras características físicas del mismo, como ser su resistencia mecánica, contracción, solidez y su potencial durabilidad. Si bien las relaciones entre estas características son imprecisas, en general, los pétreos menos absorbentes tienden a ser más resistentes a las exigencias mecánicas y a la incidencia de los agentes climáticos (SMITH y COLLIS, 2001).

Por otra parte con respecto a la porosidad y su efecto en la retracción del hormigón, Aquino et al., (2010), entienden que el volumen del poro en si mismo no es una propiedad importante para reducir la retracción por secado. La dureza, densidad y modulo de elasticidad del agregado son las propiedades fundamentales para restringir la retracción por secado. En el caso que existan muchos poros en la superficie del agregado, la posibilidad de la retracción es mayor debido a la pasta adherida y su efecto de retracción. Adicionalmente, la cantidad de agua en el agregado puede causar retracción cuando esta se escapa de la roca y el hormigón.

En la tabla 38 se comparan valores de densidad para las tres situaciones de la partícula, seca en horno, saturada con superficie seca y aparente, para diferentes agregados con valores distintos de absorción de agua.

**Tabla 38 – Comparación de la densidad de partícula para varios agregados (SMITH y COLLIS, 2001)**

Referencia al agregado	A	B	C	D	E
Absorción de agua (%)	9,5	3,7	1,6	0,6	0,2
Densidad partícula (kg/m <sup>3</sup> )					
Seca en horno	2030	2360	2670	2680	2730
Saturada superficie seca	2230	2450	2720	2700	2740
Aparente	2520	2590	2790	2730	2750
Diferencia numérica	490	230	120	50	20

En esta misma dirección plantea Neville (2004), que la porosidad del agregado, su permeabilidad y absorción, influyen las propiedades del mismo como enlace con la pasta de cemento, la resistencia del hormigón al congelamiento y deshielo, estabilidad química, resistencia a la abrasión y el peso del mismo en la dosificación. La dimensión de los poros del agregado varía en un amplio rango, siendo incluso en algunos casos microscópicos, pero aún así los menores son más largos que los poros del gel de la pasta de cemento. Alguno de estos poros son completamente interiores a la partícula y si bien otros están abiertos a la superficie, la pasta

de cemento por su viscosidad y por lo largo del poro, no puede ingresar a los mismos, como si puede lograrlo el agua. Se debe considerar que en el contenido de agregado sólido en el hormigón estamos incluyendo estos vacíos.

Por otra parte, y como consecuencia de la construcción de estructuras sustentables, se ha incrementado significativamente el uso de agregados manufacturados, agregados livianos (LWA)<sup>7</sup> y agregados producto del reciclado del hormigón (RCA)<sup>8</sup>. Las características físicas y morfológicas de los mismos son muy diferentes a las presentes en los agregados naturales de uso más común en la producción de hormigón y afectan especialmente, tanto el peso específico como la absorción de agua, el desempeño del hormigón en estado fresco y endurecido; esta situación obliga a caracterizar los agregados manufacturados, que en función del trabajo empírico, demuestran ser mas absorbentes debido a su estructura de poros que los naturales. Los valores obtenidos en los ensayos se exhiben en la tabla 39 (DESHPANDE et al., 2012).

**Tabla 39 – Peso específico y absorción en agregado natural y manufacturados (Adaptada de DESHPANDE et al., 2012)**

Tipo de agregado	ASTIM C 127			
	d	d <sub>a</sub>	d <sub>s</sub>	Absorción (%)
Agregado natural Piedra triturada	2,78 (0,05)	2,71 (0,01)	2,73 (0,08)	0,94 (0,05)
Escoria agregado en RCA	2,46 (0,05)	2,22 (0,62)	2,32 (0,02)	4,76 (0,86)
Caliza agregado en RCA	2,56 (0,02)	2,34 (0,06)	2,42 (0,05)	3,64 (0,86)
Piedra triturada en RCA	2,63 (0,01)	2,45 (0,06)	2,52 (0,08)	2,75 (0,22)
Agregado liviano LWA	1,63 (0,07)	1,40 (0,19)	1,54 (0,13)	10,03 (0,24)

d= densidad del agregado seco (kg/L)

d<sub>a</sub>= densidad aparente (kg/L)

d<sub>s</sub>= densidad del agregado saturado y de superficie seca (kg/L)

Los valores entre paréntesis indican la desviación estándar.

#### 4.4.1.4 Resistencia

La resistencia a la compresión del hormigón no puede exceder significativamente la del agregado, si bien es claro lo dificultoso que resulta definir con precisión la resistencia de las partículas individuales, generalmente se determina la resistencia de los pétreos mediante ensayos indirectos o con muestras preparadas. Si se comparan hormigones construidos con

<sup>7</sup> Por su sigla en inglés LWA (Lightweight aggregates)

<sup>8</sup> Por su sigla en inglés RCA (Recycled concrete aggregates)

diferentes tipos de agregados se puede observar que la influencia del agregado en la resistencia del hormigón es cualitativamente la misma que las proporciones de la mezcla sin tomar en cuenta si el hormigón es ensayado a la compresión o a la tracción. Es posible que el agregado incida en la resistencia del hormigón no solamente en función de su resistencia mecánica sino también en la absorción y en la adherencia. En general la resistencia y la elasticidad del agregado depende de su composición, textura y estructura; una baja resistencia puede deberse a la debilidad del grano constituyente del agregado o a la falta de un vínculo resistente entre los mismos (NEVILLE, 2004).

Para Mehta y Monteiro (2008), la resistencia a la compresión, a la abrasión y el módulo de elasticidad del agregado son propiedades interrelacionadas y muy influenciadas por la porosidad. En este aspecto Neville (2004), presenta un matiz distinto considerando que en muchos pétreos no existe una relación entre la resistencia y el módulo de elasticidad, si bien su estudio se centra en las rocas americanas toma como ejemplo al granito que es una de las de mayor uso en nuestras latitudes.

La resistencia del agregado al congelamiento del agua está vinculada a la porosidad, absorción, permeabilidad y a la estructura de los poros. Una partícula del agregado podría absorber agua hasta llegar a la saturación la que, luego de congelarse, generará una expansión producto de la presión hidráulica que el agregado sin posibilidad de soportar trasladará al hormigón. Generalmente es el agregado grueso el que contiene poros de mayor dimensión y en los cuales es más fácil lograr la saturación y el posterior congelamiento (KOSMATKA et al., 2003).

En el caso de El-Ariss (2005), estudió el efecto de la reducción de los agregados gruesos en la resistencia del hormigón. Para esto realizó un intenso trabajo de laboratorio que involucró 1350 muestras de 30 diferentes dosificaciones, relaciones agua/cemento de 0,4 y 0,5, utilizando tres métodos diferentes de curado. De su trabajo concluye que el agregado grueso puede ser reducido sin reducir significativamente la resistencia a la compresión. El método de curado elegido si tiene un efecto importante en la resistencia a la compresión, y la relación agua cemento no afecta a la resistencia a la compresión de los hormigones con una reducción de las cantidades de agregado grueso, si se mantiene constante para todos los hormigones.

La relación entre la porosidad de la roca y la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de descarga puntual, fue estudiada por Kahraman et al., (2005), mediante a ensayos en 38 muestras de roca tanto ígneas, sedimentarias como metamórficas. Los resultados se exhiben en la tabla 40. Existe una significativa correlación entre la resistencia a la compresión uniaxial y el

índice de descarga puntual con la porosidad, pero cuando las rocas son divididas en dos grupos de acuerdo a los valores de porosidad,  $n < 1\%$  y  $n > 1\%$ , correlaciones más fuertes son obtenidas. La pendiente de la línea de regresión de las rocas que tienen valores de porosidad menores al 1% es mayor de la de aquellas rocas que tienen valores de porosidad más altos que el 1%. Muchas de las rocas ensayadas tienen un alto contenido de agua. Sin embargo, las rocas son parcialmente o completamente saturadas en el predio. El contenido de agua tiene un importante efecto en la resistencia en la resistencia de las rocas y consecuentemente en la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de descarga puntual.

**Tabla 40 – Relación entre porosidad y resistencia en las rocas (Kahraman et al., 2005)**

Tipo de roca	Clasificación de las rocas	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Porosidad (%)	Contenido de agua (%)
Basalto	I	202,9	13,2	5,5	1,49
Andesita	I	150,4	12,2	7,19	1,1
Andesita	Í	164,1	13	1,15	0,45
Andesita	Í	77,5	6,4	5,27	1,48
Granodiorita	Í	109,2	11,3	2,51	0,38
Granito	Í	133,2	13	1,15	0,16
Granito gris	Í	114,5	7,2	0,62	0,09
Granito rosa	Í	84,9	5,7	0,63	0,12
Granito	Í	89,6	4,4	0,98	0,22
Traki andesita	Í	78,2	5,4	10,7	2,46
Bomba Volcanica	Í	50,2	3	3,75	1,12
Mármol	M	69,8	4,3	0,37	0,03
Mármol	M	90,5	5	0,37	0,15
Mármol	M	73,4	5,7	0,06	0,03
Mármol	M	28,5	5,2	0,13	0,03
Mármol	M	26,1	2,9	0,3	0,05
Gneises	M	85,9	4,7	0,79	0,43
Mikasist	M	70,9	4,1	1,95	0,76
Migmatit	M	203,6	13,3	1,33	0,44

Tipo de roca	Clasificación de las rocas	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Porosidad (%)	Contenido de agua (%)
Serpantinit	M	210,6	10,4	0,91	0,24
Caliza	S	128,8	5,4	0,69	0,03
Caliza	S	134,2	6	0,38	0,04
Caliza dolomítica	S	136,7	6,5	0,31	0,09
Caliza	S	79,5	4,9	0,18	0,03
Caliza rosa	S	175	7,1	0,93	0,03
Arenisca	S	120,3	12,8	3,61	1,29
Arenisca	S	168,6	12,9	2,5	0,59
Caliza	S	60,8	7,8	2,6	0,35
Anhydrite	S	48,8	3,7	6,01	2,86
Travertine	S	87,8	4	7,22	0,37
Travertine	S	83,3	5,2	3,12	0,59
Travertine	S	80	4,3	5,93	0,13
Travertine	S	50,3	3	12,5	0,07
Travertine	S	57,6	3,7	2,15	0,03
Travertine	S	112,3	3,9	13,2	0,11
Travertine	S	45,4	4,8	4,08	0,03
Travertine	S	60	1,6	8,74	0,04
Travertine	S	50,3	4,5	4,04	0,03

La resistencia del agregado está íntimamente vinculada a la del hormigón, por lo tanto la elección del agregado en función de su resistencia está condicionada con el tipo de hormigón a producir; se debe considerar que en el de alto desempeño la pasta de cemento hidratada y la

zona de transición son tan resistentes que si el agregado, especialmente el grueso, no tiene la resistencia suficiente se convertirá en el eslabón frágil del hormigón (AÏTCIN, 1998).

En la tabla 41, se presenta la denominación de las rocas, estableciendo cinco categorías, en función de valores de resistencia a la compresión.

**Tabla 41 – Tipos de rocas según su resistencia a la compresión (DEERE y MILLER, 1966, apud PLAZA DIEZ, 2010)**

<b>Rocas en función de su resistencia a la compresión</b>			
<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>MPa</b>
A	Resistencia muy alta	2.250	221
B	Resistencia alta	1.120 – 2.250	110 – 221
C	Resistencia media	560 – 1.120	55 – 110
D	Resistencia baja	280 – 560	27 – 55
E	Resistencia muy baja	280	27

De acuerdo con Zhang Lianyang (2006), estimar la resistencia de la masa de la roca es uno de los mayores problemas. La resistencia de la roca depende no solamente de la naturaleza del material, roca intacta, sino de las discontinuidades que separan los bloques, espacios estos de disminución de la resistencia. Este autor señala que si bien el procedimiento para medir la resistencia a la compresión de las rocas ha sido estandarizado por American Society for testing and Materials (ASTM) y por la International Society for Rocks Mechanics (ISRM) la preparación de testigos bien preparados de rocas es muy difícil, especialmente para rocas frágiles y esquistos. En muchos casos la única forma de determinar la resistencia a la compresión de las rocas es aplicando métodos estimativos o indirectos, utilizando correlaciones empíricas, como ser la descarga puntual, el martillo Schmidt, hendidura de cono y ensayos de velocidad de sonido. En la tabla 42, figuran algunos valores orientadores obtenidos en desarrollos de investigación realizados por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

En este mismo sentido, Alexander y Mindess (2005), plantean que la resistencia de los sólidos es normalmente medida en testigos regulares prismáticos, como ser cilindros, cubos, entre otros, pero que los agregados existen en forma granular y que para la mayoría de ellos el tamaño de la partícula no es apropiado para ensayos de resistencia convencionales. Estos autores entienden que hay varias formas de medir la resistencia y sugieren las siguientes:

- resistencia a la compresión, típicamente medida en centros de roca;
- el valor de rotura y el valor de impacto del agregado, que son medidos en resistencia granular;
- el ensayo de abrasión Los Ángeles, que refleja la resistencia al impacto y a la abrasión de las partículas del agregado;
- la resistencia a la tensión, que es usualmente medida en un ensayo indirecto de tensión.

En la tabla 42, se presentan valores de resistencia a la compresión de rocas intactas, en cinco categorías, estableciendo los de las rocas de mayor utilización en la construcción.

**Tabla 42 – Rango típico de resistencia a la compresión de rocas intactas (AASHTO apud ZHANG LIANYANG, 2006)**

Categoría de la roca	Descripción general	Roca	Resistencia a la compresión (MPa)
A	Rocas carbonadas con buen desarrollo de hendidura de cristales	Dolostone	33 – 110
		Caliza	24 – 290
		Carbonatite	38 – 69
		Mármol	38 – 241
		Skarn táctil	131 – 338
B	Rocas arcillosas	Argilita	29 – 145
		Arcilla	1 – 8
		Marlstone	52 – 193
		Filitas	24 – 241
		Siltstone	10 – 117
		Esquisto	7 – 35
		Pizarra	145 – 207
C	Rocas arenosas con cristales fuertes y de pobre hendidura	Conglomerado	33 – 221
		Arenisca	67 – 172
		Cuarzo	62 – 379
D	Roca ígnea cristalina de grano fino	Andesita	97 – 179
		Diabase	21 – 572
E	Roca metamórfica e ígnea cristalina de grano grueso	Anfibolita	117 – 276
		Gabbro	124 – 310
		Gneiss	24 – 310
		Granito	14 – 338
		Diorita cuarzo	10 – 97
		Monzonita cuarzo	131 – 159
		Schist	10 – 145
		Syenite	179 - 427

Varios investigadores desarrollaron criterios empíricos para determinar la resistencia de las rocas ha ser utilizadas en obras de arquitectura e ingeniería. En esta dirección trabajaron considerando no solamente a la roca intacta, sino también, la roca con discontinuidades y los testigos obtenidos. El criterio más desarrollado y utilizado es el de Hoek y Brown (1997), presentado a continuación en la ecuación N° 7 para roca intacta y ecuación N° 8 para testigo.

- roca intacta

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m_i \sigma'_3 / \sigma_c + 1)^{0.5} \quad (\text{ecuación N° 7})$$

$\sigma_c$  = resistencia a la compresión

$\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  = son respectivamente, el mayor y el menor, valor de tensión

$m_i$  = es una constante material para la roca intacta, depende solamente del tipo de roca (textura y mineralogía), como se presenta en la tabla 43.

- testigo de roca

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m_b \sigma'_3 / \sigma_c + s)^a \quad (\text{ecuación N° 8})$$

$m_b$  = es una constante material para el testigo de roca

$s$  y  $a$  = son constantes que dependen de las características de la roca

En el caso que la calidad de la roca sea pobre debido a que el vínculo entre sus granos está parcialmente roto, por corte o por incidencia de las condiciones medioambientales, la roca no tiene resistencia a la tensión por pérdida de la cohesión y el criterio establece para la  $s$  el valor de cero, como se presenta en la ecuación N° 9.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m_b \sigma'_3 / \sigma_c)^a \quad (\text{ecuación N° 9})$$

Para Zhang Lianyang (2006), es muy difícil establecer cual de todos los criterios que surgen de trabajos empíricos es realmente el más adecuado, si bien reconoce que el más utilizado es el de Hoek y Brown (1997), de creciente aplicación desde 1980, el mismo debe estimar los valores de las constantes de lo materiales, a partir de ensayos triaxiales en rocas

intactas, y suponer condiciones especiales como ser la ausencia de agua y la consideración de la anisotropía de la roca. Los valores se muestran en la tabla 43. Estos investigadores también utilizan para sus estimaciones el sistema geo-mecánico desarrollado por Bieniawski (1976), denominado *Rock Mass Rating (RMR)*.

**Tabla 43 – Valores del parámetro  $m_i$  para diferentes rocas (HOEK y BROWN, 1997, apud ZHANG LIANYANG, 2006)**

Tipo de roca	Clase	Grupo	Textura			
			Grueso	Medio	Fino	Muy fino
Sedimentarias	Clásticas		Conglomerado (21±3) Breccia (19±5)	Arenisca (17±4)	Siltstone (7±2) Greywacke (18±3)	Arcillosa (4±2) Esquisto (6±2) Marl (7±2)
	No clásticas	Carbonatadas	Caliza cristalina (12±3)	Caliza sparitic (10±2)	Caliza micritic (9±2)	Dolomita (9±3)
		Presencia de vapor		Gypsum (8±2)	Anhidrita (12±2)	
		Orgánica				Tiza (7±2)
Meta mórficas	No foliada		Mármol (9±3)			
	Baja foliación		Migmatita (29±3)	Anfibolita (26±6)	Gneiss (28±5)	
	Foliada			Schist (12±3)	Phyllite (7±3)	Pizarra (7±4)
Ígneas	Plutónica	Clara	Granito (32±3) Granitodiorita (29±3)	Diorita (25±5)		
		Oscura	Gabbro (27±3) Norita (20±5)	Dolerita (16±5)		
	Hypabyssal		Porphyrie (20±5)		Diabase (15±5)	Peridotite (25±5)
	Volcánica	Lava		Rhyolite (25±5) Andesite (25±5)	Dacite (25±3) Basalto (25±5)	Obsidian (19±3)
		Pyroclástica	Aglomerado (19±3)	Breccia (19±5)	Tuff (13±5)	

En otro orden de agregados, pero también atendible en función de exigencias ambientales, se desarrollan proyectos que incluyen agregados reciclados para la elaboración de hormigón. Tal es el caso del trabajo de González et al., (2011), que con respecto a la resistencia plantean que debido al mortero adherido al agregado reciclado, el hormigón endurecido presenta

una densidad menor y un coeficiente de absorción mayor que los hormigones convencionales; esto provoca una disminución de la resistencia a la compresión y una disminución en el módulo de elasticidad tanto transversal como longitudinal. La resistencia a la tracción de rotura es levemente afectada por el reemplazo del agregado grueso natural por el agregado grueso reciclado.

#### **4.4.1.5 Solidez**

Un agregado es considerado sólido, estable, firme, cuando las variaciones volumétricas provocadas por intemperismo deterioran al hormigón. La estabilidad del pétreo está directamente vinculada a su estructura de poros, y si bien es real que la alta absorción de agua provoca inestabilidad hay algunos pétreos con gran capacidad de absorción sin modificar su realidad. La inestabilidad del agregado está en función a la distribución de los poros y no necesariamente a la porosidad total; cuando el pétreo absorbe agua pero por la característica del poro no permite el escurrimiento con facilidad se genera la condición para alta presión hidráulica (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Con respecto al daño que esta situación pueda ocasionar al hormigón, Neville (2004), plantea que es un rango amplio que va desde el desprendimiento local, sectores superficiales que se fisuran y caen a la desintegración de profundidad considerable, daños estos que pueden variar desde el deterioro de la apariencia del hormigón hasta situaciones de peligro estructural.

Un matiz un tanto diferente presenta Newman y Seng Choo (2003), que si bien consideran que el congelamiento y la cristalización de sales en el interior de los poros provoca una tensión interna, entienden que no existe una definitiva correlación entre la estabilidad del agregado con el desempeño del hormigón, y que el deterioro del mismo por la acción de los ciclos de congelamiento y deshielo se debe al grado de saturación del hormigón, su madurez, su calidad y la agresividad del ambiente al que está expuesto.

#### **4.4.2 Características dependientes de las condiciones previas de exposición y factores relacionados con el proceso de fabricación**

En esta sección se estudia el tamaño y distribución granulométrica de los agregados en el hormigón así como también la forma y la textura superficial de los mismos. Este análisis se

realiza desde la incidencia que dichas particularidades tienen en la producción del hormigón y que darán como resultado características de desempeño del mismo.

#### **4.4.2.1 Tamaño y distribución granulométrica**

Se define granulometría como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas presentes en un agregado, para Metha y Monteiro (2008), esta distribución, que se expresa en porcentajes, surge de tamizar el agregado utilizando tamices normalizados de diferentes aberturas y mallas cuadradas. Existen varios motivos para especificar los límites granulométricos y el tamaño máximo del agregado, el más importante para estos autores es la influencia sobre la trabajabilidad y costo del hormigón, lo que se logra con agregados de granulometría continua, sin deficiencia ni exceso de ninguna dimensión. El tamaño máximo del agregado, convencionalmente aceptado, es el determinado por la dimensión de la abertura del tamiz donde quedan retenidos el 15 % o más de las partículas.<sup>9</sup>

Las características del agregado, textura, forma y distribución granulométrica juegan un rol mayor en la trabajabilidad del hormigón. La definición de trabajabilidad es un poco nebulosa debido a que significa diferentes cosas para los diferentes investigadores. Asociado al término hay dos conceptos: consistencia y reología. Para la ASTM, *Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates – C 125*, trabajabilidad está definida como la propiedad determinante del esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla fresca de hormigón con mínima pérdida de homogeneidad. Para ACI, trabajabilidad es la propiedad de las mezclas frescas de hormigón o mortero que determina la facilidad y homogeneidad con que se puede mezclar, posicionar, consolidar y terminar. Reología es definida en la misma instancia como la ciencia que trata con el flujo de los materiales, incluyendo estudios de deformación del hormigón endurecido, la manipulación y posicionamiento de las mezclas frescas de hormigón y el comportamiento de la nata y pasta. Consistencia es definida como la relativa movilidad y habilidad de las mezclas frescas de hormigón o de mortero para fluir; las mediciones más usuales son la caída para el hormigón, el flujo para morteros y lechadas y la resistencia a la penetración para pastas de cemento bien dosificadas (FOWLER et al., 2004).

En el mismo sentido, Meddah et al., (2010), trabajaron sobre el efecto del contenido y la distribución granulométrica del agregado grueso en la resistencia a la compresión del hormigón. Para este estudio definieron cuatro fracciones granulares, las cuales fueron combinadas en

---

<sup>9</sup> La Norma UNIT 1050:2001, denomina tamaño máximo de un agregado el que corresponda a la abertura del tamiz límite que retenga un máximo de 10 % en peso del material y siempre que la totalidad de la muestra pase por el tamiz inmediato superior.

diferentes proporciones, para investigar el efecto de la distribución granulométrica en el desempeño del hormigón. Las características de dichas fracciones y los resultados se exhiben en las tablas 44 y 45. Para una granulometría dada la resistencia aumenta en hormigones normales cuando el tamaño máximo del árido se incrementa, contrariamente a lo que sucede con los hormigones de alta resistencia. Por otra parte los que poseen una distribución granulométrica mayor, C4, alcanzan mayores valores de resistencia a la compresión, incidiendo más en los hormigones de alta resistencia que en los normales. Cuando el contenido de agregado grueso aumenta, la resistencia a la compresión en hormigones normales se incrementa, pero en hormigones de alta resistencia existe un contenido óptimo para alcanzar los máximos valores.

**Tabla 44 – Combinaciones de cuatro fracciones granulares (Meddah M. et al, 2010)**

Dosificación	Fracción del agregado grueso (%)			Fracción del agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )			Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )
	3/8	8/15	15/25	3/8	8/15	15/25	
C1	40	60	0	480	720	0	1200
C2	20	0	80	250	0	990	1240
C3	0	50	50	0	585	585	1170
C4	20	40	40	250	495	495	1240

**Tabla 45 – Distribución granulométrica y resistencias del hormigón (Adaptada de Yeddah et al., 2010)**

Dosificación	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Fracción de agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )			Total agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Súper Plastificante (kg/m <sup>3</sup> )	Plastificante (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	w/c	Resistencia a la compresión, 28 días (MPa)	Modulo de elasticidad, 28 días (GPa)
			3/8	8/15	15/25							
C11	335	618	480	720	0	1200	0	0	194	0,58	36,7	28,5
C12	335	618	480	720	0	1200	0	1,6	166	0,49	47,4	32,4
C13	335	618	480	720	0	1200	1,22	0	172	0,51	48	32,6
C14	335	618	480	720	0	1200	2,45	0	147	0,44	62,1	37
C21	335	605	248	0	992	1240	0	0	194	0,58	40	29,7
C22	335	605	248	0	992	1240	0	1,11	155	0,46	44	31,2
C23	335	605	248	0	992	1240	1,18	0	161	0,48	51,3	33,7
C24	335	605	248	0	992	1240	2,35	0	135	0,40	61	36,7
C31	335	675	0	585	585	1170	0	0	194	0,58	37,1	28,6
C32	335	675	0	585	585	1170	0	1,11	155	0,46	43,4	31
C33	335	675	0	585	585	1170	1,18	0	172	0,51	49	32,9
C34	335	675	0	585	585	1170	2,35	0	141	0,42	58,3	35,9
C41	335	605	249	498	498	1240	0	0	194	0,58	41,5	30,3
C42	335	605	249	498	498	1240	0	1,11	158	0,47	45,3	31,6
C43	335	605	249	498	498	1240	1,18	0	164	0,49	51,6	33,8
C44	335	605	249	498	498	1240	2,35	0	132	0,40	54	34,5

Para Kosmatka et al., (2003), la granulometría y el tamaño máximo del árido inciden en la relación agua/cemento, en la trabajabilidad, en la capacidad del hormigón de ser bombeado, en la economía, en la porosidad, en la resistencia y en la durabilidad del hormigón.

Como las partículas grandes tienden a producir mas microfisuras en la zona de transición de la interfase entre la pasta y el agregado, para dosificaciones de hormigones de alta resistencia se limita el uso de agregados a aquellos cuyo tamaño máximo sea 19 mm. La composición granulométrica también tiene un efecto considerable en la necesidad de pasta en una mezcla de hormigón. (MEHTA, MONTEIRO, 2008)

En el caso de VU et al., (2011), trabajaron en el efecto del tamaño del agregado grueso y el volumen de la pasta en el comportamiento del hormigón bajo alta descarga de compresión triaxial. Definieron un hormigón de referencia, y trabajaron con dos tamaños máximos de áridos (99% cuarzo y derivados de depósitos naturales) y dos volúmenes diferentes de pasta. Los resultados se muestran en la tabla 46. El tamaño del agregado grueso tiene una ligera influencia en el comportamiento del hormigón cuando los niveles de confinamiento varían de 0 MPa a 650 MPa., en este caso la resistencia aumenta tenuemente cuando el tamaño del agregado grueso aumenta. En los niveles de confinamiento muy alto y en los niveles de tensión elevados, la rigidez tangencial axial del hormigón aumenta a medida que el tamaño del agregado grueso se reduce. El volumen de la pasta incide en el comportamiento del hormigón a bajo confinamiento, aumentando la resistencia representativamente cuando aumenta dicho volumen. Cuando aumenta el nivel de confinamiento, el volumen de la pasta reduce su efecto en la resistencia del hormigón.

**Tabla 46 – Ensayos de compresión no confinada en tres tipos de hormigón (VU et al., 2011)**

Hormigón	$d_{min}$	R30A7 (*)	$D_{max}$	Hormigón	$V_{pi}$	R30A7 (*)	$V_{ps}$
Tamaño máximo del agregado (mm)	3,15	8	20	Pasta de cemento ( $m^3/m^3$ hormigón)	0,25	0,29	0,33
Tensión final (MPa)	41	42	48	Tensión final (MPa)	21	42	51
Modulo de elasticidad (GPa)	21,6	24	26,7	Modulo de elasticidad (GPa)	15,1	24	28,5
Cemento (kg)	263	263	263	Cemento (kg)	221	263	304
Agua (Its)	169	169	169	Agua (Its)	138	169	196
Porosidad (%)	11,5	12,6	10,7	Porosidad (%)	15,2	12,6	11,7

(\*) R30A7 – Hormigón de referencia, 30 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días y asentamiento de 7 cm.

Desde el punto de vista de aplicación, los resultados presentados muestran que la resistencia del hormigón, cuando se somete a cargas dinámicas extremas, es poco influenciada por el tamaño del agregado grueso o por el volumen de pasta de cemento para los niveles de tensión media por debajo de 950 MPa (VU et al., 2012).

Con respecto a este punto sostiene Neville (2004), que la resistencia de hormigón totalmente compacto, con una relación agua/cemento dada es independiente de la granulometría del agregado, la cual solo incide en principio en la trabajabilidad del hormigón. Pero la única manera de lograr esa compactación con un máximo de densidad es con una mezcla trabajable. Por otra parte, trabajar con partículas de diferentes dimensiones permite que las más pequeñas ocupen los vacíos que deja el agregado grueso, disminuyendo el consumo de pasta de cemento y evitando la segregación del hormigón. De todas formas la cantidad de pasta de cemento en la masa del hormigón debe garantizar que toda la superficie de las partículas del agregado quede cubierta.

De acuerdo a Mehta y Monteiro (2008), mediante un procedimiento de carácter empírico se puede definir el modulo de finura del agregado, sumando los porcentajes acumulados de agregado fino retenido en una serie de tamices y dividiendo entre 100.

En esta misma dirección, y analizando el agregado desde su tamaño y distribución granulométrica, Basheer et al., (2005), estudiaron la influencia del agregado grueso en la permeabilidad, durabilidad y las características micro estructurales del hormigón ordinario. Para este estudio se fabricaron testigos de hormigón con arena natural y agregado grueso de basalto triturado, relación agua/cemento de 0,6 en todos los casos, dos diferentes relaciones entre agregados finos y gruesos. Los resultados se exhiben en las tablas 47, 48 y 49.

**Tabla 47 – Asentamiento y resistencia a la compresión a los 28 días (Basheer et al., 2005)**

Nº	Distribución granulométrica del agregado grueso	Agregado fino/Agregado grueso	Asentamiento (mm)	Resistencia (MPa)
1	10 mm	0,5	35	46,9
2	10/20= 2	0,5	56	44,1
3	10/20=0,5	0,5	79	44,2
4	20 mm	0,5	103	42,9
5	10 mm	0,7	18	50,1
6	10/20= 2	0,7	28	45,2
7	10/20= 2	0,7	23	45,4
8	20 mm	0,7	61	44,9

**Tabla 48 – Efecto de la distribución granulométrica del agregado (Basheer et al., 2005)**

Granulometría del agregado grueso	Agregado fino/agregado grueso	Índice de Permeabilidad al aire (lts/min)	Delaminación acumulativa (g)	Profundidad de carbonatación (mm)
10/20 2	0,5	0,114	148,6	12,7
10/20 0,5	0,5	0,139	406,9	13,1
20 mm	0,5	0,181	642,3	13,7
10/20 2	0,7	0,06	67,02	12,8
10/20 0,5	0,7	0,105	53,05	11,3
20 mm	0,7	0,115	86,05	12,4

**Tabla 49 – Efecto del tamaño del agregado (Basheer et al., 2005)**

Tamaño del agregado grueso (mm)	Agregado fino/agregado grueso	Índice de Permeabilidad al aire (lts/min)	Delaminación acumulativa (g)	Profundidad de carbonatación (mm)
10	0,5	0,11	46,2	11,1
20	0,5	0,181	642,3	13,7
10	0,7	0,076	78,05	11,2
20	0,7	0,115	86,05	12,4

Los resultados del trabajo de Basheer et al., (2005), se pueden resumir de la siguiente forma:

- cuando el tamaño del agregado grueso y la proporción de tamaño de agregado grueso más largo se incrementa en una mezcla, esto está asociado con un incremento de la permeabilidad del aire;
- cuando el contenido de agregado fino aumenta la permeabilidad del aire disminuye;
- la resistencia a la delaminación por presencia de sal sigue una tendencia similar a la planteada en los puntos anteriores. El efecto de la distribución granulométrica y la relación agregado fino/agregado grueso en la profundidad de carbonatación fue insignificante. A pesar de eso, el incremento en el tamaño del agregado tiende a provocar aumento en la profundidad de carbonatación;
- el análisis micro estructural de la zona de transición indica claramente que el aumento del agregado grueso implica mayor porosidad, y esto está en línea con los resultados dados por los estudios de permeabilidad y durabilidad;
- en orden de diseñar hormigones más durables es preferible el uso de agregados más pequeños y un bajo promedio del tamaño del agregado para la combinación entre el fino y el grueso.

Para los hormigones especiales, como es el caso del hormigón auto compactante, también se han desarrollado estudios con respecto a la incidencia del tamaño y la granulometría del agregado grueso. En este caso, Khaleel et al., (2011), trabajaron en el efecto del agregado grueso en las propiedades del HAC en estado fresco y endurecido. La discusión para estos autores se centra en cual es el tipo de agregado adecuado para este tipo de hormigones que poseen una elevada fluidez y una gran estabilidad. Para este estudio producen doce dosificaciones diferentes, descritas en la tabla 50, y concluyen luego de ensayar estas mezclas que la fluidez del HAC disminuye con el incremento del tamaño máximo del agregado grueso y cuando se usa el pétreo triturado. El HAC producido con agregado calizo triturado logra resistencia y elasticidad más elevada que aquel en que se utilizó el pétreo convencional triturado. Las propiedades mecánicas del HAC que contiene un tamaño máximo del árido grueso de 10 mm son superiores que las de aquel que contiene un tamaño máximo de 20 mm.

**Tabla 50 – Descripción de las dosificaciones de HAC (Khaleel et al., 2011)**

Dosificaciones	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Súper plastificante (% del peso del cemento)	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Tipo de agregado grueso	Tamaño máximo del agregado grueso
1	500	170	0,85	865	885	No triturado	10
2	500	170	0,80	865	885	No triturado	20
3	500	172	0,95	865	885	Triturado	10
4	500	172	0,90	865	885	Triturado	20
5	500	172	1,00	865	885	Caliza	10
6	500	172	0,95	865	885	Caliza	20
7	450	175	1,70	865	885	No triturado	10
8	450	175	1,65	865	885	No triturado	20
9	450	175	1,85	865	885	Triturado	10
10	450	175	1,80	865	885	Triturado	20
11	450	173	1,80	865	885	Caliza	10
12	450	173	1,75	865	885	Caliza	20

#### 4.4.2.2 Forma y textura superficial

La forma de la partícula se define en términos de compactibilidad, es decir, medir la capacidad de la partícula de compactarse por su forma, donde formas esféricas o cúbicas se oponen a convertirse en un plano (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2007).

La forma y la textura superficial de las partículas del agregado tienen mayor influencia sobre las propiedades del hormigón fresco que sobre el endurecido. Comparadas con las partículas lisas y redondeadas, las partículas de textura áspera, angulosas y alargadas necesitan más pasta de cemento para producir mezclas de hormigón trabajables y al mismo costo (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

La forma y la textura del agregado afectan su movilidad, esto es, la facilidad con la que las partículas del agregado se mueven de una a la otra cuando son manipuladas. La movilidad del agregado incide en la energía requerida para la compactación tanto del hormigón como del agregado del hormigón cuando se realiza un ensayo estandarizado para conocer la densidad del agregado acopiado (YZENAS, 2006).

Con respecto a la forma tridimensional de un cuerpo, sostiene Neville (2004), que es muy difícil describirlo, por lo cual es conveniente definir características geométricas certeras sobre estos cuerpos. La referencia a una forma redondeada surge de la ausencia de vértices, aristas, y en un pétreo esta forma surge en gran medida de la resistencia a la abrasión y al desgaste de la roca original. En el caso de la roca partida la forma de la partícula depende de la naturaleza del material de la roca original, del método utilizado para la fractura y de la relación del tamaño del material ingresado al dispositivo y del esperado como producto final.

Tomando en cuenta lo que plantea Neville (2004), en cuanto a la dificultad de describir la forma de un agregado partiendo de la geometría Euclidiana, algunos autores como Arasan et al., (2011), estudiaron la relación entre la dimensión fractal y las propiedades de las partículas por su forma. De esta forma describen geoméricamente la irregularidad de la forma del agregado indicando que existen relaciones exponenciales entre las formas definidas de los pétreos (esféricas, angulares, entre otras) y la dimensión fractal. Si bien esta metodología es aún emergente, conceptualmente intentan estos autores describir de una nueva manera la forma de los pétreos al momento de dosificar el hormigón.

En otra dirección, los investigadores Hu y Wang (2011), trabajaron sobre el efecto de la combinación de las características del agregado grueso y la dosificación en las propiedades reológicas del hormigón; los resultados experimentales indicaron que un contenido más alto de agregado grueso y fino normalmente da como resultado parámetros reológicos del hormigón más elevados, tensión interna y viscosidad. Para una cantidad y tamaño dado de mortero, la tensión interna y la viscosidad generalmente se incrementan con el contenido de vacíos, producto de la falta de compactación, y el ángulo de fricción, pero decrecen con el tamaño del agregado grueso. Un agregado grueso de buena graduación generalmente tiene menor contenido

de vacíos, produciendo un hormigón con una considerable reducción de la tensión interna y la viscosidad.

Otro término ocasionalmente utilizado para describir la forma del agregado grueso es el área específica volumétrica, definida como la relación entre el área superficial y el volumen, partículas esféricas, redondeadas, presentan baja área específica volumétrica, las alargadas o laminares presentan elevada área específica (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Según Kosmatka et al., (2003), el vínculo entre la pasta de cemento y un agregado dado se incrementa cuando se cambian las partículas lisas y redondeadas por una áspera y angulosa; este incremento debe ser considerado al momento de la elección del agregado para concretos a los cuales se les exige resistencia a la flexión o alta resistencia a la compresión. Para Mehta y Monteiro (2008), este requerimiento solo debe ser atendido para las primeras edades del hormigón porque luego la adherencia química entre la pasta de cemento y el agregado es superior al logrado por este tipo de vínculo.

Para Mindess (2008), la piedra partida tiende a tener una superficie más rugosa y una forma más angulosa, pero como resultado de esta característica física requiere mayor cantidad de pasta de cemento para lograr la trabajabilidad.

De acuerdo con Rocco et al., (2009), se asume en forma primaria que la resistencia del hormigón depende de dos factores: la relación agua/cemento y el grado de compactación. Es por esto que la forma de los agregados tiene una gran influencia en la resistencia del compuesto. Para estudiar el efecto de la forma del agregado en las propiedades mecánicas de un hormigón simple, produjeron ocho dosificaciones usando la misma matriz de mortero, dos tipos de interfaces matriz-agregado (fuerte y débil), dos formas de agregados (redondeado y angular) y una relación agua/cemento de 0,42 (evitando valores menores debido a que en esos casos el agregado triturado genera resistencias muy superiores al natural). Los resultados se exhiben en la tabla 51, y se resumen de la siguiente forma:

- para la interfase matriz-agregado fuerte, el hormigón producido con agregado triturado logra valores de módulo de elasticidad mas elevados que cuando se utiliza un agregado esférico. El módulo disminuye con el tamaño del agregado en cualquiera de los dos casos;
- la resistencia a la tensión muestra que no siempre depende de la forma ni del tamaño del agregado;

- para la interfase matriz-agregado débil el módulo de elasticidad es mas bajo y aparentemente no hay ningún efecto producto de la forma del agregado;
- la resistencia a la tensión es mas baja que la de la matriz y aparentemente no depende de la forma del agregado;
- para interfase matriz-agregado fuerte, el hormigón producido con agregado triturado presenta valores ligeramente más elevados de energía de fractura que el hormigón producido con agregado esférico, y la energía de fractura se incrementa con el tamaño del agregado en cualquiera de los casos;
- para interfase matriz-agregado débil, la energía de fractura es mayor para agregados triturados que esféricos.

**Tabla 51 – Valores promedios de las propiedades mecánicas medidas (Adaptada de Rocco et al., 2009)**

Agregado	Interfase	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Energía de fractura (J/m <sup>2</sup> )
Agregado grueso esférico (diámetro 3 mm)	No tratada	3,25	24,5	40
Agregado grueso esférico (diámetro 9 mm)	No tratada	3	23,4	43,3
Agregado grueso esférico (diámetro 14 mm)	No tratada	3,10	22,9	48,3
Agregado grueso triturado (tamaño 3 mm)	No tratada	3,32	26,5	41,1
Agregado grueso triturado (tamaño 6 mm)	No tratada	3,35	27,9	44,4
Agregado grueso triturado (tamaño 9 mm)	No tratada	3,19	24,1	48,3
Agregado grueso esférico (diámetro 9 mm)	Tratada	2,19	20,3	41,2
Agregado grueso triturado (tamaño 6 mm)	Tratada	2,10	21,4	59,7
Matriz		3,26	27	34
Agregado		2,80	6	60

La interfase tratada hace referencia a que los agregados son embadurnados con un producto liberador que construye un vínculo débil, mientras que en el caso de la interfase no tratada los agregados integran la matriz en forma natural.

En lo que respecta a la textura superficial, Fowler et al., (2004), y apoyándose en el trabajo de un número importante de investigadores, entiende que aunque la rugosidad incrementa el vínculo con la pasta de cemento, existen otros aspectos mas importantes respecto a las propiedades superficiales como son la porosidad, la absorción y la permeabilidad de la zona inmediatamente subyacente a la superficie. La penetración al agregado de la nata de cemento, en estado muy líquido, conduce a un buen vínculo, pero la porosidad implicada en esta muy alta permeabilidad involucra también un descenso en la resistencia a la tensión y al corte del agregado, con la correspondiente pérdida de resistencia del hormigón.

Con un estudio granulométrico satisfactorio, un mismo tenor de cemento y utilizando una partícula fracturada en forma natural o artificial de una misma roca, se obtendrá esencialmente una resistencia similar, pero con la salvedad que utilizando agregados angulares o curvas granulométricas pobres será muy dificultoso bombear el hormigón (KOSMATKA et al., 2003).

En la misma dirección, Medici et al., (2012), trabajaron sobre el efecto en la resistencia del hormigón que provoca la acción de mezclar agregados granulares de diferentes orígenes. Resaltan que los aspectos físicos más importantes de los agregados que afectan la resistencia del hormigón se encuentran la textura superficial de los granos, la dureza o resistencia a la abrasión, el factor de forma, la relación de elongación como la de lisura, y su curva granulométrica. La medición del área superficial por unidad de masa depende de la forma y del origen de los granos, es decir, si el tamaño de los granos es el resultado de la degradación natural o fue obtenido por la trituración. Los resultados del trabajo de este autor demuestran que la densidad de compactación de diferentes dosificaciones con agregados naturales y triturados disminuye a medida que se incrementa el contenido de triturados. Por otro lado el área superficial se incrementa en función del factor de forma, y este es mayor para las partículas más lejos de la forma esférica. En este sentido, sugiere la caracterización del comportamiento de la densidad de compactación y el área superficial en mezclas de diferentes agregados, como instrumento de predicción del desempeño del hormigón bajo compresión.

El efecto de las características de los pétreos, textura superficial, rugosidad y porosidad, en la responsabilidad del hormigón frente a la fisuración micro estructural, es estudiada por Erdem et al., (2011), que producen para este estudio hormigones con diferentes tipos de agregado grueso, ceniza volante y un agregado natural no triturado. Las dosificaciones y los resultados se exhiben en las tablas 52 y 53 respectivamente. Del estudio surge que el hormigón preparado con el agregado liviano es más fuerte desde el punto de vista de la compresión que el hormigón de agregado convencional, debido a que por su porosidad ese agregado trabaja como una reserva de agua, provocando el curado interno y aumentando la cantidad de cemento hidratado. Por otra parte el vínculo entre el agregado liviano y la pasta es más resistente que el del agregado convencional. En el caso de la flexión y el modulo de elasticidad el hormigón liviano es un 20 % y un 40 % menor que el hormigón convencional respectivamente. Bajo una carga de impacto el hormigón convencional falla en la zona de transición y en el hormigón liviano a través de los agregados.

**Tabla 52 – Dosificaciones para hormigón de peso normal y liviano (Erdem et al., 2011)**

Materiales (kg/m <sup>3</sup> )	Hormigón de peso normal	Hormigón de peso liviano
Cemento	330	330
Agua	198	198
Arena	678	678
Agregado grueso	1115	0
Ceniza volante	0	566

**Tabla 53 – Propiedades básicas del material a los 28 días (Erdem et al., 2011)**

Hormigón	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Convencional	2325	25,4	4	41
Liviano	1895	28,7	3,15	23,7

Para Dobrowolski (2000), hormigones satisfactorios son los que contienen agregados con una gran variedad de características superficiales, dentro de un rango que va desde muy liso, muy rugoso a la superficie tipo panal. Lo mismo entiende para la forma, sugiriendo una amplia granulometría para lograr una relación de vacíos correcta y un hormigón con condiciones de trabajabilidad adecuadas.

En el caso de la producción de hormigón de alto desempeño, sugiere Aitcin (1998), utilizar como agregado grueso piedras partidas y densas, como calizas, dolomita y rocas ígneas. Con respecto a la forma del agregado, este investigador, recomienda analizarla desde un punto de vista reológico, entendiendo que durante el proceso de partición de la roca se generan aproximadamente partículas equidimensionales, denominadas partículas cúbicas, más que planas y alargadas. Estas últimas son mas frágiles, muchas veces pueden partirse con la presión de los dedos y tienden a generar mezclas ásperas que requieren agua adicional o súper plastificantes para lograr la trabajabilidad requerida.

La tabla 54, elaborada por BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1990), presenta una clasificación de diferentes texturas superficiales y las características, dependientes de la generación de las mismas, que presentan los pétreos con dichas terminaciones. En este trabajo la institución británica responsable divide a los pétreos en seis categorías, expresadas en función de la textura superficial.

**Tabla 54 – Textura superficial de agregados típicos. (BSI, BS 812 Part. 102 apud ALEXANDER y MINDESS, 2005)**

G.	Textura superficial	Características	Ejemplos
1	Liso vidriado	Fractura concoidea	Materiales lisos o vidriados como una escoria o ciertas volcánicas.
2	Liso	Erosionado por la acción del agua o liso por fractura de roca laminada o de grano fino	Aluvial, glacial o gravas y arenas volátiles; rocas partidas de granos finos como el cuarzo, la dolomita, etc.
3	Granular	Fractura exhibiendo mayor o menor uniformidad de granos redondeados	Areniscas, rocas de granos gruesos como ciertos granitos.
4	Rugoso	Fractura rugosa de roca con grano fino o medio con componentes cristalinos no fácilmente visibles	Andesita, basalto, dolerita, felsita y greywacke
5	Cristalino	Contiene componentes cristalinos fácilmente visibles	Granito, gabbro y gneiss
6	Poroso tipo panal	Con poros y cavidades visibles.	Piedra pómez, escoria, clincker, arcillas expansivas.

En el caso del hormigón auto compactante (HAC), la granulometría y la forma de los áridos gruesos influyen directamente en la fluidez, la capacidad de paso del hormigón y en la demanda de la pasta. Cuanto más esféricos sean los áridos menores serán los bloqueos y mayor la fluidez puesto que se reduce el rozamiento interno. En este tipo de hormigón un alto contenido de pasta ayuda a reducir las fricciones internas entre las partículas de arena aunque una buena distribución del tamaño de las partículas es muy importante. Los métodos de diseño de mezcla de HAC usan arenas para alcanzar una curva de áridos óptima y esto ayuda a reducir el contenido de pasta. Algunos productores prefieren arenas con curva granulométrica discontinua. (GPE, 2005)

En la tabla 55, se definen seis categorías en cuanto a la forma de los pétreos y se presentan las características identificadas para la clasificación propuesta, según la BSI (1990).

**Tabla 55 – Forma de la partícula de agregados típicos. (BSI, BS 812 Part 102, 1990)**

G.	Forma de la partícula	Características
1	Redondeado	Completamente gastado por la erosión o la acción del agua.
2	Irregular	Naturalmente irregular, parcialmente deformado por el desgaste con ángulos redondeados
3	Angular	Posee ángulos bien definidos formados por la intersección de caras planas rugosas.
4	Escamoso	Tiene una dimensión significativamente menor que las otras dos.
5	Alargado	Tiene una dimensión significativamente mas larga que las otras dos.
6	Escamoso y alargado	Tiene tres dimensiones significativamente diferentes.

#### **4.4.3 Características dependientes de la composición química y mineralógica**

Los agregados inciden desde el punto de vista mineralógico en las características del hormigón del cual forman una parte importante, entre el 75 al 80 % de su volumen, y es en este sentido que Al-Oraimi et al., (2006), estudian el efecto mineralógico del agregado grueso en las propiedades mecánicas del hormigón, considerando para este estudio el hormigón producido para grandes resistencias. Si bien consideran que el agregado triturado tiene un mejor vínculo con la pasta cuando se requieren resistencias altas, vínculo físico, las características mineralógicas constituyen el vínculo químico. Trabajando con agregados de diferentes procedencias y litologías distintas, concluyen que para resistencias muy altas, con relaciones agua/aglomerante muy bajas, 0,20 a 0,30, los minerales tienen que ser muy resistentes y de granos finos.

En esta misma dirección, Gonilho Pereira et al., (2009), consideran que al momento de elegir un agregado las características finales del hormigón son definitivas, como la densidad, la resistencia a la compresión y a la abrasión, y son precisamente las propiedades físicas y mecánicas del agregado que aportan en este sentido. Pero para evaluar la influencia de los agregados de diferente procedencia y características mineralógicas, incorporan entre las exigencias de producción del hormigón la durabilidad del mismo, trabajan con agregados ígneos, sedimentarios y metamórficos, y concluyen que la durabilidad del hormigón no se ve afectada por la mineralogía de los pétreos pero indudablemente, y significativamente, por el tamaño del agregado y su absorción de agua.

En el caso de Girardi et al., (2011), estudiaron el efecto del tipo de agregado en función de la resistencia de las mezclas de hormigón que integraron, sometidas a severas condiciones. Para este trabajo colocaron inmersos en soluciones de sulfatos y ácido sulfúrico, testigos de hormigón durante tres años, midiendo sistemáticamente la expansión y la pérdida de masa, en un estudio que se consideró de deterioro acelerado. Las dosificaciones utilizadas se exhiben en la tabla 56. Los resultados muestran que el comportamiento del hormigón depende tanto de los cementos como de los tipos de agregado y que los materiales cementicios suplementarios no aportan a la resistencia frente a la agresión. Ante el ataque de los sulfatos los agregados naturales pierden menos masa debido a su mayor contenido de carbonato de calcio, pero también, dicho contenido, es una fuente de iones de calcio que forman yeso, cuya precipitación induce a la expansión. Frente al ácido sulfúrico los agregados calizos pierden masa más lentamente que los agregados naturales.

**Tabla 56 – Dosificaciones del Hormigón (Girardi et al., 2011)**

Dosificación	Agregado Caliza (Dolomita)			Agregado Silicato (agregado natural y arena)		
	Cemento Pórtland calizo	Cemento con escoria de alto horno	Cemento puzolánico resistente a sulfatos + humo de sílice	Cemento Pórtland calizo	Cemento con escoria de alto horno	Cemento puzolánico resistente a sulfatos + humo de sílice
Fino 0/2 Mm. (kg/m <sup>3</sup> )	722	722	720	460	460	460
Fino 0/4 Mm. (kg/m <sup>3</sup> )	412	412	410	460	460	460
Grueso 3/8 mm (kg/m <sup>3</sup> )	621	621	620	400	400	400
Grueso 3/8 mm (kg/m <sup>3</sup> )	205	205	205	680	680	680
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	355	355	340	400	400	400
Humo de sílice (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	30
Súper plastificante acrílico (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	2,8
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	140	140	133	155	155	155
Agua/cemento	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Densidad de la masa por volumen (kg/dm <sup>3</sup> )	2,501	2,532	2,516	2,303	2,309	2,349

#### 4.4.3.1 Sustancias deletéreas

Sustancias deletéreas son aquellas que aparecen como componentes minoritarios tanto en el agregado grueso como fino, pero que pueden afectar adversamente la trabajabilidad, la adherencia, el endurecimiento y las características de durabilidad del hormigón. (MEHTA y MONTEIRO, 2008)

Según Neville (2004), hay tres grandes categorías de sustancias deletéreas que pueden encontrarse en el agregado: las impurezas, que interfieren en el proceso de hidratación del cemento; las que crean una capa superficial sobre la superficie del agregado impidiendo el desarrollo de un buen vínculo con la pasta de cemento; y algunas partículas individuales que son frágiles o defectuosas en sí mismas. Por otra parte considera que existe la posibilidad que la totalidad o parte del agregado pueda ser perjudicial al hormigón como consecuencia del desarrollo de reacciones químicas con la pasta del cemento.

Para Newman y Seng Choo (2003), algunos agregados presentan rastros de estas sustancias que en realidad no pertenecen al agregado y puedan causar situaciones no

beneficiosas para el hormigón. Señalan estos autores al cloro y a los sulfatos como las que hay que considerar con mayor cuidado.

Cuando un terrón de arcilla sobrevive el procesamiento del agregado e incluso el mezclado y la puesta en obra del hormigón, está propenso a quebrarse durante el ciclo de humedecimiento y secado, congelamiento y deshielo en el hormigón endurecido. Esta situación tiene como resultado la aparición de desprendimientos cercanos a la superficie del hormigón. Las partículas blandas o que se disgregan con facilidad pueden partirse en partículas aún menores y crear finos adicionales en la mezcla del hormigón. Si el deterioro de estas frágiles partículas continuara una vez que el hormigón fue puesto en obra, estaríamos en presencia de un riesgo con respecto al ciclo congelamiento-deshielo. Si partículas blandas estuvieran presentes en porcentajes suficientes, estaríamos en presencia de un descenso de la resistencia y de la durabilidad. Cuando este tipo de partículas, blandas o que se disgregan, están expuestas en la superficie del hormigón tendremos con certeza una caída en la resistencia a la abrasión y un deterioro superficial, producto de la acción medioambiental, que generará huecos en la superficie de la pieza de hormigón (FORSTER STEPHEN, 2006).

Para evitar el deterioro del hormigón por la presencia de sílice lo mejor sería poder disponer de agregados no reactivos, pero ello puede no ser lo más práctico ni económico. En ocasiones es posible atenuar la reacción álcalis – sílice con solo mezclar, en proporciones convenientes, diferentes agregados y granulometrías. Una de las características distintivas de la reacción álcalis – sílice es que la expansión del hormigón varía al aumentar el tamaño del agregado grueso usado. En general, a mayor tamaño máximo, mayor es la expansión que produce (BATIC y SOTA, 2001).

Por otra parte, en lo que respecta a la composición química y mineralógica del pétreo, es importante considerar que la resistencia y la permanencia del vínculo entre el cemento y el agregado están en función no solamente de la textura superficial, sino también de las características químicas del agregado. La integridad del vínculo puede perderse si reacciones químicas, como la del álcali del cemento y los agregados reactivos, posteriormente toma lugar. En la otra mano, algunos tipos de interacciones químicas superficiales entre el agregado y la pasta de cemento pueden ser beneficiosas en el logro de una unión más íntima y resistente (FOWLER et al., 2004).

En la tabla 57, la ASTM nos presenta los límites para las sustancias deletéreas en agregados para hormigones en estructuras expuestas a condiciones medio ambientales, en este caso de tipo moderado.

**Tabla 57 – Límites para las sustancias deletéreas en agregados para hormigones en estructuras externas, expuestas a condiciones climáticas moderadas. (ASTM C 33 – 03, 2003)**

Sustancia	Posibles efectos deletéreos en el hormigón	Tenor máximo permitido (% en masa)	
		Agregado fino	Agregado grueso
Material pasante en el tamiz de abertura 75 µm (Nº 200)	Afecta la trabajabilidad, aumenta la demanda de agua	3 (hormigón sometido a la abrasión)	1 (hormigón sometido a la abrasión)
		5 (todos los otros hormigones)	
Terrones de arcilla	Afectan la trabajabilidad y la resistencia a la abrasión	3	5
Carbón mineral y lignita	Afectan la durabilidad, causan manchas	0,5 (hormigón visto, aparente)	0,5 (hormigón visto, aparente)
		1 (todos los otros hormigones)	
Chert (peso específico menor que 2400 kg/m³)	Afecta la durabilidad		5

En la tabla 58, se presentan las impurezas que afectan al hormigón. En este caso se verifica como la misma impureza afecta en forma diferente al hormigón de acuerdo a su estado, fresco o endurecido, provocando patologías diversas en las estructuras.

**Tabla 58 – Impurezas que afectan el hormigón de acuerdo a su estado fresco o endurecido. (NEWMAN y SENG CHOO, 2003)**

Impureza	Efecto en el hormigón fresco	Efecto en el hormigón endurecido
Material ácido soluble en la arena	Ninguno	Reduce la resistencia al deslizamiento en los pavimentos de hormigón
Sílice reactiva con álcalis	Ninguno	Riesgo de reacción álcali-agregado
Arcilla hinchada	Aumento de la demanda de agua	Reduce la resistencia
Pyritas de hierro reactivas	Posible reducción del rendimiento	Manchas superficiales
Mica	Aumento de la demanda de agua	Reduce la resistencia
Materia orgánica	Posible retraso	Posible reducción de la resistencia
Carbón y lignita	Posible retraso	Manchas superficiales, desprendimientos
Plomo soluble o zinc	Posible retraso	Posible reducción de la resistencia

#### **4.5 Muestreo de los pétreos**

Los ensayos realizados a los agregados, para el estudio de las propiedades del mismo, se realizan sobre muestras del material; en función de esto los resultados de lo mismos, estrictamente hablando, serían aplicados exclusivamente a estas muestras. A pesar de esto, es importante aclarar que la validez del ensayo surge de tomar las muestras en el volumen del agregado que se utilizará como insumo para la producción de hormigón, por lo tanto estamos frente a la certeza que las propiedades identificadas en la muestra son típicas del agregado.

Es de destacar que la toma de muestras en trabajo de campo debe ser muy controlada, debido a que las condiciones pueden variar cada vez, la precaución debe centrarse en asegurarse que cada muestra es representativa del agregado considerado (NEVILLE, 2004).

#### **4.6 Caracterización del pétreo en función de sus propiedades geológicas, físicas y mecánicas**

La caracterización del pétreo es en definitiva el desarrollo del conocimiento del mismo a partir de la aplicación de variadas técnicas, generalmente normalizadas, que nos permiten determinar si este material rocoso es apto para la utilización en la construcción.

Estos procedimientos son utilizados también para definir otros usos del pétreo, como ser barreras de contención en puertos, subrasantes para caminería, vías férreas, etc. El vínculo íntimo que se genera cuando el mismo es utilizado para la producción de hormigón nos obliga a tomar otras precauciones en la elección del mineral.

En este sentido las características que los agregados deben poseer para poder desempeñarse adecuadamente como material constituyente del hormigón son las siguientes:

- distribución granulométrica que permita una buena compacidad del hormigón, logrando el menor índice de vacíos posible;
- la forma de las partículas debe tender a la igualdad dimensional de forma tal de lograr una buena trabajabilidad;
- adecuada resistencia mecánica;
- apropiada composición mineralógica que satisfaga las exigencias químicas;
- ausencia de impurezas;
- condiciones térmicas ajustadas a las condiciones del hormigón.

En función de esto se puede decir que las propiedades tecnológicas que inciden en la producción de hormigón pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- *Propiedades geológicas.* Son las propiedades químico – mineralógico – petrográfico, que están estrechamente vinculada a la naturaleza de la roca, la cual se refleja en la composición mineral, textura, estructura, alteración mineralógica, y otras propiedades consecuencia de estas como ser la solubilidad, cristalinidad, alterabilidad, forma de las partículas en la fragmentación, entre otras.
- *Propiedades físicas.* En este caso se hace referencia a la granulometría, análisis de forma, densidad, peso específico, porosidad, capacidad de absorción de agua, dureza, calor específico, conductividad térmica, expansibilidad, entre otras propiedades.
- *Propiedades mecánicas.* Se resumen en la resistencia a la compresión, a la tracción, al cizallamiento, al impacto, a la deformación, a la fractura, a la abrasión, entre otras.

Estas propiedades se determinan en trabajos de laboratorio o de campo, con técnicas apropiadas y trabajando con procedimientos bajo las normas establecidas (FRAZAO, 2002).

En la tabla 59, se presentan las especificaciones para agregados gruesos, en hormigones hidráulicos, definidas en las normas de Estados Unidos, Brasil y Alemania. Es de destacar que, con respecto a alguna de las características de estudio de los agregados gruesos, no todas las Organizaciones Normalizadoras establecen especificaciones.

#### **4.6.1 Propiedades geológicas**

Desde el punto de vista geológico, las propiedades de los pétreos ha ser consideradas para la producción de hormigón, son las siguientes:

##### **4.6.1.1 Análisis petrográfico**

Este análisis nos permite conocer las características petrográficas y mineralógicas de las rocas por medio de técnicas que permiten identificar su composición (minerales esenciales, accesorios, secundarios y sus cantidades), su textura (forma y arreglo del mineral), estado de alteración de los minerales (en caso de existir cual es el tipo de alteración que tienen), estructura (arreglo macroscópico), tanto como grano o tipo de microfisuración (intercristalina o intracristalina, tipo de fisuras). También se debe tener especial atención a la presencia de

minerales que puedan reaccionar con los factores climáticos o con sustancias presentes en el medio donde el pétreo será utilizado, minerales nocivos, perjudiciales o deletéreos.

El análisis petrográfico se puede ejecutar en forma directa, observaciones de tipo macroscópico, donde no se requiere equipamiento especial, de lo contrario se puede realizar análisis microscópico, utilizando para tal fin secciones delgadas obtenidas de la roca que se denominan láminas petrográficas. Algunos minerales poseen características que impiden su observación por vía óptica y el trabajo debe ser complementado con la utilización de rayos tipo X, análisis térmico diferencial, análisis químico y ensayos de coloración mineral selectiva (FRAZAO, 2002).

De acuerdo con Alexander y Mindess (2005), la petrografía es una parte indispensable de la ciencia y la tecnología moderna del hormigón, es un campo especializado que tiene los siguientes objetivos con respecto a los agregados del hormigón:

1. describir los constituyentes del agregado y determinar sus relativas cantidades, de este modo permitir su clasificación;
2. determinar sus características físicas y químicas, que pueden guardar relación con el desempeño de los agregados en la masa del hormigón, incluyendo la detección de constituyentes potencialmente deletéreos;
3. procurar establecer el desempeño probable de agregados de nuevas o no probadas fuentes, comparando sus características con agregados de desempeño conocido;
4. proveer de datos promedio para interpretar los resultados de otros ensayos estandarizados de los agregados y seleccionar ensayos adicionales para determinar el desempeño probable de un pétreo.

**Tabla 59 – Especificaciones para agregados gruesos en hormigones hidráulicos según las Organizaciones normalizadoras de Estados Unidos, Brasil y Alemania. (FRAZAO, 2002)**

Propiedades	Normas			
	AASHTO M 80 (1)	ASTM C 33 (2)	ABNT NBR 7211 (2)	DIN 4226 (3)
Requisitos generales	Piedras partidas, guijarros y escorias partidas; duros, resistentes y durables.	Piedra partida, guijarros partidos	Agregados duros, compactos y limpios	Agregados duros, durables y limpios
Absorción de agua	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Peso unitario	> 1121 kg/m <sup>3</sup> p/ escorias	1121 kg/m <sup>3</sup> p/ escorias	No especificado	No especificado
Materia orgánica	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Terrones de arcilla	< 0,25 % (sin tolerancia)	< 5 %	< 1 % para hormigón visto	No especificado
Partículas blandas y fríasbles	< 2 % (tolerancia: 5 %)	< 5 % p/ hormigón sometido a desgaste	< 2 % p/ otros hormigones	No especificado
Materiales pulvulentos	< 0,5 % (tolerancia: 1 %)	< 1 %	< 1 %	No especificado
Partículas livianas	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Materiales carbonosos	No especificado	< 0,5 % p/ hormigón visto < 1 % p/ otros hormigones	< 0,5 % p/ hormigón visto < 1 % p/ otros hormigones	No especificado
Forma	No especificado	No especificado	m.<3 largo/espesor	>50 % de <3 largo/espesor
Abrasión “Los Ángeles”	< 40 %	< 50 %	< 50 %	No especificado
Aplastamiento	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
10 % de finos	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Compresión uniaxial	No especificado	No especificado	No especificado	> 100 MPa
Alteración con Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	< 12 % a 5 ciclos	<8 % para escorias < 12 % para piedra partida a 5 ciclos	No especificado	No especificado

Para el uso en hormigón las principales características petrográficas y mineralógicas de los pétreos son:

- *Estado de alteración.* Influye en la durabilidad y en las propiedades físicas y químicas del pétreo.
- *Presencia de minerales deletéreos o nocivos.* Esta presencia puede provocar:
  - Reacciones con las sustancias presentes en el cemento Pórtland.
  - Reacciones con sustancias presentes en la atmósfera cuando el hormigón está en contacto directo con el medio ambiente. (“hormigón visto o aparente”)

En líneas generales, las diferentes procedencias de los pétreos utilizados para la fabricación de hormigón, múltiples rocas y sedimentos, es lo que nos conduce a verificar la presencia de impurezas que pueden afectar el desempeño del hormigón de dos maneras:

- Interferir en el desempeño del hormigón químicamente:
  - partículas minerales reactivas con el cemento;
  - materia orgánica;
  - sales solubles.
- Interferir en el desempeño del hormigón físicamente:
  - partículas de dimensiones iguales o menores que las del cemento que interfieren en la estructura del material hidratado;
  - partículas de baja resistencia;
  - partículas que presentan variación volumétrica por saturación o secado.

#### **4.6.1.2 Partículas minerales reactivas con el cemento**

La reactividad es la propiedad que tienen ciertos minerales, que forman parte del pétreo, de reaccionar con otras sustancias que forman parte del medio en el que se encuentran. Algunas de estas reacciones resultan benéficas, como ser las que se dan entre los pétreos originados de rocas calcáreas, los cuales presentan afinidades cristal químicas, con ciertos componentes del cemento. De estas reacciones surge un aumento de la adherencia del agregado con la pasta, mejorando la homogeneidad e incrementando la resistencia (FRAZAO, 2002).

Las reacciones deletéreas son de varios tipos y se las denomina comúnmente “reacciones álcali-agregado”. Las más identificadas son: *álcali-sílice*, es la más común e incluye la reacción entre los álcalis e hidróxidos presentes en la pasta del cemento con ciertas formas de sílice de los agregados; *álcali-silicato*, es una reacción más lenta y compleja y por sobre todas las cosas muy difícil de caracterizar, pero puede ser muy expansiva; *álcali-carbonato*, esta reacción aparece cuando se utilizan agregados con altas cantidades de dolomita (SMITH y COLLIS, 2001).

En la tabla 60, se presenta un listado de rocas, minerales y constituyentes reactivos deletéreos, así como también las rocas álcali-reativas que contienen cantidades excesivas de las sustancias listadas. Por otra parte se incorpora también las características físicas de las rocas reactivas.

***Álcali-sílice.*** Cuando un agregado conteniendo sílice mal cristalizada entra en contacto con un cemento portador de un tenor en álcalis mayor que el 0,6 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  puede ocurrir una reacción con una gran expansión por la formación de silicatos alcalinos con un volumen molecular mayor que el de los componentes que entraron en reacción. La sílice es potencialmente reactiva y su manifestación depende del grado de cristalización en el que se encuentre. Los mecanismos de reacción no están bien determinados y esa es la razón por la cual existen varias hipótesis sobre este proceso. Una de las teorías sugiere que la reacción se inicia por el ataque entre la sílice del agregado y los hidróxidos alcalinos del cemento para formar silicatos alcalinos en los bordes de la partícula del agregado. Los iones de estos silicatos se asocian con los iones complejos que no consiguen difundirse en la pasta del cemento, formando una especie de membrana parcialmente impermeable que permite el pasaje solamente de las moléculas de agua y de iones de las moléculas de hidróxidos alcalinos. Esto crea una presión osmótica, debido a que los silicatos e iones complejos de los productos que se van formando ocupan un volumen cada vez mayor, al no poder penetrar en la pasta generan tensiones capaces de romper la estructura del hormigón. Otra hipótesis sugiere que la formación de silicato alcalino se produce por la reacción de la sílice en estado sólido con la solución acuosa, alcalinizada por hidróxidos liberados por la hidratación del cemento, para generar ácido salicílico. Esto dará origen a metasilicatos de sodio y de potasio que en su formación ocupan volúmenes mayores y tensionarán la estructura del hormigón (FRAZAO, 2002).

**Tabla 60 – Rocas, minerales y constituyentes sintéticos reactivos deletéreos. (MEHTA y MONTEIRO, 2008)**

Constituyentes reactivos	Composición química	Características físicas
Opala	SiO <sub>2</sub> nH <sub>2</sub> O	Amorfa
Calcedonia	SiO <sub>2</sub>	Microcristalina a criptocristalina; normalmente fibrosa.
Ciertas formas de cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Microcristalina a criptocristalina; cristalina, mas intensamente fracturada, deformada o hinchada con inclusiones.
Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	Cristalina
Tridimita	SiO <sub>2</sub>	Cristalina
Vidrio, presente en rollitos, dacitos, latitos o andesitos, o productos de divitrificación criptocristalinos.	Silicosos, con proporciones menores de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alcalinos, y alcalinos ferrosos.	Vidrio o material criptocristalino como la matriz de las rocas volcánicas, o fragmentos en grupos.
Vidrios silicosos sintéticos	Silicosos, con proporciones menores de álcalis, alumina, y otras sustancias.	Vidrio

**Listado de rocas álcali-reativas deletéreas. Contienen cantidades excesivas de una o mas sustancias de las indicadas anteriormente.**

Chert opalino	Dacitos
Chert calcedónico	Andesitas
Chert cuarzoso	Folielos silicosos
Calcáreos silicosos	Filitos
Dolomitos silicosos	Concreciones de opala
Riolitos	Cuarcitos y cuarzos fracturados, tensados e hinchados por inclusiones.

Para Kodjo et al., (2011), la reacción álcali-sílice causa la expansión y la fisuración de numerosas estructuras de hormigón a lo largo del mundo. Esta expansión surge por la formación de productos de reacciones químicas continuas, el gel de sílice, cuyo desarrollo se da con humedades relativas superiores al 85 %. Este gel expansivo crea tensiones internas y lidera la formación en cadena de micro fisuras a través del hormigón, cuando la resistencia a la tensión del material es alcanzada. De todas formas el gel tiene un comportamiento viscoso, bajo internas o externas tensiones, se mueve lentamente en el espacio creado por el poro y las fisuras. El

comportamiento viscoso del gel es conservado a lo largo del tiempo, incluso si se cristalizara parcialmente.

Es de destacar que esta reacción, que surge justamente de las características de los agregados, provoca una patología muy peligrosa para las estructuras de hormigón y de difícil acción correctiva, debido a que genera expansión y micro fisuras internas y superficiales en la estructura, conduciendo a la pérdida de resistencia de la estructura por la desagregación del hormigón. Por otra parte el aumento de volumen de los elementos estructurales de hormigón afecta los restantes subsistemas del edificio (HELENE y PEREIRA, 2003).

## **4.6.2 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas de los pétreos, de interés para este estudio, pueden definirse de la siguiente forma:

### **4.6.2.1 Granulometría**

En la producción de hormigón armado se utilizan las rocas en forma granular y se estudia la granulometría del agregado para conocer su compacidad, relación entre la parte sólida y el sector vacío, porque en definitiva influirá en la compacidad del hormigón y en la economía del cemento. La distribución granulométrica se expresa por la proporción relativa, en porcentajes, de los diferentes tamaños de los fragmentos que constituyen el total del material. La técnica utilizada para la determinación de la distribución granulométrica es la denominada de análisis granulométrico, ejecutado por tamizado normalizado. (FRAZAO, 2002)

El tamaño máximo del árido grueso es el correspondiente a la abertura de la malla del tamiz en el cual queda retenido el 5 %<sup>10</sup> o el valor inmediatamente inferior. Podría suceder que el tamaño máximo del árido se corresponda con el de un tamiz intermedio. El módulo de finura es el número correspondiente a la suma del porcentaje retenido acumulado dividido entre 100. Independiente de las diferentes distribuciones granulométricas se podría obtener un mismo valor de módulo de finura, este es un parámetro útil en la evaluación de la distribución granulométrica de los fragmentos. Los agregados gruesos son generalmente clasificados por sus dimensiones nominales, considerando la dimensión nominal la dada por un diámetro máximo y un diámetro mínimo, siendo este relativo a la abertura del tamiz al cual corresponde un porcentaje retenido igual o inmediatamente superior al 95 % (FRAZAO, 2002).

---

<sup>10</sup> Como ya se ha señalado en el desarrollo del trabajo, los diferentes autores hacen referencia a distintas normas, por lo cual el porcentaje del pétreo retenido es diferente según el autor citado.

#### 4.6.2.2 Análisis de forma

Cuando una roca es sometida a la rotura por procesos mecánicos, el producto estará constituido por fragmentos con forma y dimensiones diversas. Los tipos de forma que surgen de la roca partida reciben diferentes designaciones: cúbica o esférica, laminar o achatada, alargada o prismática y alargada laminar.

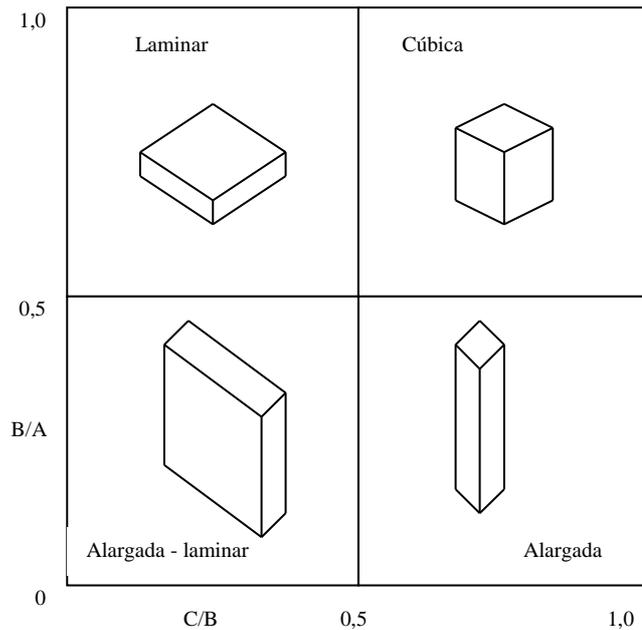


Figura 20 – Ilustración de los tipos de forma de los agregados (FRAZAO, 2002).

**Tabla 61 – Clasificación de las formas de los agregados en base a las dimensiones A (largo), B (ancho) y C (espesor). (NBR 7809:2008)**

Relación entre las dimensiones		Clasificación de forma
B/A	C/B	-
> 0,5	> 0,5	Cúbica
< 0,5	> 0,5	Alargada
> 0,5	< 0,5	Laminar
< 0,5	< 0,5	Alargada laminar

La forma de los fragmentos es una propiedad importante de los agregados, los que tienen predominancia de la forma cúbica tienen resistencias más elevadas, favorecen la trabajabilidad en el hormigón, generan menor índice de vacíos aumentando la compacidad (FRAZAO, 2002).

En la figura 20, se presenta una clasificación de los tipos de forma de los agregados tomando en cuenta la dimensión predominante en el pétreo. La relación entre las dimensiones, largo, ancho y espesor se exhibe en la tabla 61, a partir de la misma se definen cuatro tipos de forma, cúbica, alargada, laminar y alargada laminar, que presentarán diferentes comportamientos en la masa del hormigón, es por esta razón que es imprescindible la determinación del coeficiente de forma del agregado.

La norma utilizada para la determinación del coeficiente de forma del agregado es la Norma UNIT 1029:99, para cuya elaboración el Comité Especializado tuvo en cuenta fundamentalmente la Norma UNI 8520-18.

De acuerdo con la normativa citada el coeficiente de forma está dado por la relación entre el volumen de los granos representativos del agregado y el volumen de la esfera en la que éstos se circunscriben.

El cálculo del coeficiente de forma,  $\alpha$ , del agregado en estudio se realiza mediante la siguiente expresión:

$\alpha = \sum v_i / \pi \sum d_i^3 / 6$	(ecuación N° 10)
--	------------------

que se corresponde con:

$\alpha = \sum \text{volumen de cada grano} / \sum \text{volumen de cada una de las esferas circunscritas}$	(ecuación N° 11)
---	------------------

$v_i$  = es el volumen de cada uno de los granos ( $\text{cm}^3$ ).

$d_i$  = es el diámetro máximo del grano (cm).

#### 4.6.2.3 Peso específico y porosidad

De acuerdo con Frazao (2002), una roca en su estado natural se presenta como un conjunto de minerales ligados entre si, ocupando un determinado volumen que se constituye con un sector sólido y con un determinado índice de vacíos. Para considerar esta situación se define peso específico aparente de la siguiente forma:

$\rho_a = M/V_a$	<p><math>M</math> – peso de las partículas sólidas (g).</p> <p><math>V_a</math> – volumen aparente de la roca (<math>\text{cm}^3</math>).</p>	(ecuación N° 12)
------------------	---	------------------

De esta forma el volumen de la roca comprende la parte sólida y los vacíos. Rocas con diferentes grados de compacidad presentarán diferentes grados de porosidad. En función de esto se define porosidad aparente de la siguiente forma:

$\eta_a = V_v/V_a$	$V_v$ – volumen de las partículas sólidas (cm <sup>3</sup> ).	(ecuación N° 13)
	$V_a$ – volumen aparente de la roca (cm <sup>3</sup> ).	

Cuanto mayor es la porosidad menor es el peso específico aparente.

#### 4.6.2.4 Absorción

Se define absorción como la capacidad de las rocas de retener agua en sus poros. La capacidad de absorción se expresa en porcentaje y de la siguiente forma:

$\alpha_{Ap} = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100$	capacidad de absorción en peso
$\alpha_{Av} = [(M_2 - M_1)/V] \times 100$	capacidad de absorción en volumen

$M_2$  – peso de la roca saturada (ecuaciones N° 14 y N° 15)

$M_1$  – peso de la roca seca

La absorción siempre será menor que las porosidades absoluta y aparente, porque el agua, u otro líquido, no penetrarán en todos los poros, pues muchos de ellos son inaccesibles. La absorción estará siempre determinada para un estado de saturación completo de los poros, por lo tanto, es el máximo tenor de humedad que la roca puede alcanzar (FRAZAO, 2002).

De acuerdo con Kett (2000), estos ensayos se realizan bajo la norma ASTM C 127 y C 128, y debemos determinar el peso específico para tres muestras tanto de agregado grueso como fino, con diferencias en los resultados que no excedan el 2 % entre ellos. Es imprescindible al momento de dosificar el hormigón utilizar el correcto peso específico del agregado.

La masa del agua absorbida en los poros del agregado se incrementa, generalmente, con el tiempo de inmersión del agregado inicialmente seco en el agua. Durante la fase inicial de la absorción la introducción del agua en los poros del agregado comprime el aire que originalmente ocupaba el espacio del poro, forzando las burbujas de aire a salir de los canales

largos del poro. Este proceso ocurre rápidamente, y la proporción de la absorción inicial es alta. Eventualmente el aire atrapado, en la profundidad del interior de las partículas del agregado, solamente puede ser desplazado si es disuelto en el agua de los poros y transportado fuera del agregado por una lenta difusión a través de dicha agua (YZENAS, 2006).

### **4.6.3 Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los pétreos, que inciden cuando los mismos son incorporados como agregados en el hormigón, son las siguientes:

#### **4.6.3.1 Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad**

Los pétreos utilizados en la construcción son sometidos a carga de *compresión* hasta llegar a la ruptura, este valor de tensión es denominado tensión última (ASTM D 2938). Este valor de tensión es importante porque permite compatibilizar los esfuerzos de las estructuras con la resistencia de la roca (FRAZAO, 2002).

La probeta extraída para realizar este ensayo debe ser de una geometría regular, con caras planas, de forma tal de poder someterlo al esfuerzo en la prensa y no obtener, por problemas de geometría, resultados inducidos. Evidentemente también influye la estructura de la roca en caso de no ser homogénea.

Según Alexander y Mindess (2005), los agregados existen en forma granular y consecuentemente, es más útil medir la resistencia del agregado granular valorando el desempeño del mismo incluido en hormigón. En muchos casos no es posible obtener testigos del agregado de forma prismática en la dimensión suficiente como para determinar la resistencia, por lo tanto una forma indirecta de medir su resistencia es incorporándolo en hormigón y comparando la resistencia con una dosificación de cuyo agregado conocemos el desempeño.

Con respecto a la humedad se debe tener en cuenta que un pétreo en estado saturado presentará resistencias menores que en estado seco, el agua transmite la energía aplicada en el ensayo.

Por otra parte la dimensión del grano incide en la resistencia de la roca, cuando los granos son menores la resistencia a la compresión aumenta. Se sugiere que la dimensión de la probeta sea diez veces mayor que el mayor grano del pétreo (FRAZAO, 2002).

**Tabla 62 – Valores típicos de resistencia para rocas usadas en la construcción. (SMITH, 1999)**

ROCAS		Resistencia			
		Compresión (Mpa)	Flexión (Mpa)	Torsión (Mpa)	Tensión (Mpa)
Ígneas	Granito	96 – 310		9 – 38	7 – 25
	Syenites	186 – 434	10 – 20	16 – 22	
	Gabbros	124 – 303	10 – 20	14 - 55	15 – 30
	Diorita				15 – 30
	Dolerita	151 – 185	8 – 14		15 – 35
	Basalto	110 – 338		14 - 55	10 – 30
	Pórfidos		10 – 20		
Sedimentarias	Calizas	14 – 255		3 - 36	5 – 25
	Areniscas	34 – 248		5 – 16	4 -25
			4 – 15		
Metamórficas	Gneises	152 – 248	10 - 20	8 – 21	5 – 20
	Cuarzo	207 – 627		8 – 31	10 – 30
	Mármoles	69 – 241		4 – 27	7 – 20
	Pizarras	138 - 206		34 - 110	7 - 20

En cuanto a la elasticidad de la roca, la misma está caracterizada por el *módulo de elasticidad*, vincula el incremento de la deformación alcanzada por el pétreo en relación al incremento de la tensión aplicada, como se exhibe en la ecuación N° 16.

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

$\sigma$  = tensión aplicada (ecuación N° 16)

$\varepsilon$  = deformación

De acuerdo a lo expresado por Frazao (2002), quien se apoya en el trabajo de Houpert (1974), los pétreos no son materiales totalmente elásticos, para cargas elevadas siempre encontramos una deformación residual, para luego con el aumento de la carga dar lugar a una fractura instantánea. Este comportamiento es definido como frágil, de esto surge que podemos considerar a los pétreos como materiales de comportamiento elasto – frágil.

En la tabla 63, se presentan valores de modulo de elasticidad de diferentes rocas intactas, en el listado se pueden identificar las rocas de uso predominante en la producción de hormigón armado para obras de arquitectura e ingeniería civil.

**Tabla 63– Valores típicos para modulo de elasticidad de rocas intactas. (AASHTO apud ZHANG LIANYANG, 2006)**

Tipo de roca	Número de valores	Número de tipos de rocas	Modulo de elasticidad (GPa)			Desviación estándar
			Máximo	Mínimo	Promedio	
Granito	26	26	100	6,41	52,7	24,5
Diorita	3	3	112	17,1	51,4	42,7
Garbo	3	3	84,1	67,6	75,8	6,69
Diabase	7	7	104	69	88,3	12,3
Basalto	12	12	84,1	29	56,1	17,9
Cuarzo	7	7	88,3	36,5	66,1	16
Mármol	14	13	73,8	4	42,6	17,2
Gneiss	13	13	82,1	28,5	61,1	15,9
Pizarra	11	2	26,1	2,41	9,58	6,62
Schist	13	12	69	5,93	34,3	21,9
Phyllite	3	3	17,3	8,62	11,8	3,93
Arenisca	27	19	39,2	0,62	14,7	8,21
Siltstone	5	5	32,8	2,62	16,5	11,4
Esquisto	30	14	38,6	0,007	9,79	10
Caliza	30	30	89,6	4,48	39,3	25,7
Dolostone	17	16	78,6	5,72	29,1	23,7

Para los investigadores Siegesmund y Snethlage (2011), si comparamos con la resistencia a la compresión, los factores que tienen influencia en el módulo de elasticidad son las propiedades mecánicas de los minerales y el tamaño de los granos.

La influencia del agregado en el módulo de elasticidad del hormigón está normalmente determinada por la verificación del módulo de elasticidad en testigos de hormigón con diversas dosificaciones y agregados. Desde el punto de vista teórico se desarrollo un trabajo importante en la determinación de ecuaciones que permitan predecir el modulo de elasticidad del hormigón, como material compuesto, a partir del conocimiento de las propiedades elásticas del agregado o de la matriz. A nivel de trabajo de laboratorio se ha podido identificar una relación lineal directa entre la resistencia a la compresión de la roca y su modulo de elasticidad (MEININGER y RICHARD, 2006).

#### 4.6.3.2 Resistencia al desgaste o abrasión

Un pétreo será tanto mas propenso al desgaste o a la abrasión cuanto menor sea su dureza.

Para Meininger (2006), la dureza es la característica más importante que los procedimientos de control de los agregados usan. Si bien el término dureza se utiliza generalmente para describir las propiedades deseables de los agregados, mediante ensayos medimos una característica del pétreo que debe ser especificada para la producción de hormigón.

La dureza de un pétreo es el resultado de la dureza de sus minerales constituyentes y del grado de compacidad de la roca, y es definida como la propiedad de una roca de oponerse a la penetración de un cuerpo extraño más duro o de ser rayado por el. Los minerales que integran la roca también son de dureza variable, por lo tanto cuando verificamos la dureza de un pétreo podemos encontrar diversidad de valores de acuerdo al punto donde realizamos la experiencia (FRAZAO, 2002).

Para Smith y Collis (2001), las características petrográficas más importantes ha ser consideradas son: el grado de dureza y proporción de los minerales duros, la proporción, orientación y distribución de los minerales hendidados, el tamaño del grano, la naturaleza del vínculo intergranular y el grado de responsabilidad en la alteración química del mineral contenido.

Por lo tanto el desgaste es la propiedad del pétreo de resistir la remoción progresiva de sus constituyentes, lo cual puede ser medido por la disminución del volumen del pétreo o por la pérdida de masa.

Para la determinación de la resistencia al desgaste se realiza el ensayo a la abrasión “Los Ángeles”, ASTM C 131, la máquina está compuesta por un tambor giratorio de acero de alta dureza, en el cual se introduce la muestra con determinada granulometría y peso específico junto a una carga abrasiva, esferas en cantidades establecidas para la granulometría adoptada. Luego de un número de revoluciones del tambor acordado, el desgaste se calcula por el porcentaje de peso perdido de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Abrasión Los \u00c1ngeles} = (M_1 - M_2 / M_1) \cdot 100$$

(ecuaci\u00f3n N\u00b0 17)

Cuanto mayor es el valor de esta relaci\u00f3n mas desgastable es el p\u00e9treo.

Este ensayo solicita al agregado por acciones de desgaste entre los fragmentos de la roca, los fragmentos con la pared del tambor y los fragmentos con las esferas de acero; por otra parte tambi\u00e9n solicitamos al p\u00e9treo al impacto de las esferas de acero y a su vez entre los propios fragmentos (FRAZAO, 2002).

El agregado para este ensayo no debe ser menor a 37,5 mm, las esferas de acero son de 47,6 mm de di\u00e1metro y entre 390 y 445 gramos de peso. El tambor rota a una velocidad de 30 rpm durante 500 vueltas, al finalizar los agregados se pasan por el tamiz de 17 mm de abertura y se pesa el material retenido para aplicar el c\u00e1lculo matem\u00e1tico (KETT, 2000).

En un intento de vincular la dureza de un p\u00e9treo con otras propiedades mec\u00e1nicas, Siegesmund y Snethlage (2011), plantean que una investigaci\u00f3n de su inter\u00e9s era vincular la dureza con la resistencia a la compresi\u00f3n. En este sentido aclaran que materiales con valores altos de dureza presentan tambi\u00e9n valores altos de resistencia a la compresi\u00f3n.

Para Neville (2004), el uso intensivo del ensayo en la m\u00e1quina de Los \u00c1ngeles responde a que exhibe la buena correlaci\u00f3n que existe, no solamente con el uso del agregado incluido en hormig\u00f3n para pavimentos, sino tambi\u00e9n con la resistencia a la compresi\u00f3n y a la flexi\u00f3n del hormig\u00f3n producido con el agregado dado.

En este sentido, Ugur et al., (2010), evaluaron la correlaci\u00f3n entre los valores que surgen del ensayo de Los \u00c1ngeles a la abrasi\u00f3n y al impacto (LAAI), con las propiedades f\u00edsicas que abarca la densidad, resistencia de rebote Schmidt, la dureza, la velocidad de las ondas y las propiedades mec\u00e1nicas como la resistencia a la compresi\u00f3n uniaxial, el \u00edndice de carga puntual, y la fuerza de tracci\u00f3n indirecta de las rocas. Para este trabajo utilizaron cuatro calizas, cuatro travertinos, tres m\u00e1rmoles cristalinos y una andesita. En la tabla 64 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos. Mediante el an\u00e1lisis de estos datos identifican que los valores obtenidos en el ensayo Los \u00c1ngeles son menores para aquellas rocas con mayor densidad, resistencia a la compresi\u00f3n y a la tensi\u00f3n, dureza, \u00edndice de carga puntual y velocidad de onda.

**Tabla 64 – Comparación de los valores obtenidos en el ensayo de Los Ángeles con los restantes obtenidos en otros ensayos físicos (Adaptada de UGUR et al., 2010)**

Nombre de la roca	Tipo de roca	Clasificación	Ensayo Los Ángeles		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad efectiva (%)	Velocidad de onda (m/s)	Resistencia Rebote Schmidt	Dureza	Resistencia compresión uniaxial (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)
			K <sub>100</sub>	K <sub>500</sub>								
Tundra grey	Caliza	Sedimentaria	4,6	25,8	2,635	1,842	5900	45	48500	91	5,73	3,10
La Perla	Caliza	Sedimentaria	7,8	34,3	2,382	8,982	4295	32	29800	73	3,90	3,50
Gold E	Travertine	Sedimentaria	5,8	24,5	2,521	4,580	5075	44	51300	84	6,41	4,16
Crema Zelve	Mármol	Metamórfica	7,2	33,6	2,690	0,386	6218	52	62900	126	8,23	4,11
Classic Light	Travertine	Sedimentaria	5,6	26	2,458	2,139	4984	34	37000	68	5,78	4,48
Afyon Sugar	Mármol	Metamórfica	6,3	26,7	2,702	0,257	5424	46	49350	98	6,89	3,89
Imparta Andesita	Andesite	Magmática	4,8	20,2	2,280	7,765	4745	47	69750	82	11,42	7,79
Konya travertine	Travertine	Sedimentaria	10	40,9	2,124	6,591	3730	27	37400	20	2,52	1,60
Bucak travertine	Travertine	Sedimentaria	9	37,8	2,400	2,612	4056	35	38050	36	3,36	2,79
Burdur Beige	Caliza	Sedimentaria	7,3	23,5	2,675	0,575	5803	47	58550	100	8,01	5,57
Burdur Brown	Caliza	Sedimentaria	5,8	23,9	2,689	0,342	6022	49	64900	119	7	4,87
Salome	Mármol	Metamórfica	7,1	30,7	2,707	0,363	5589	46	52700	70	8,18	4,06

K<sub>100</sub> y K<sub>500</sub>, pérdida por abrasión luego de 100 y 500 revoluciones respectivamente.

Por otro lado, trabajo como el de Kilic et al., (2008), estudiaron la influencia del tipo de agregado en la resistencia y la resistencia a la abrasión en hormigones de alta resistencia con humo de sílice. Utilizaron cinco tipos diferentes de agregados (gabbro, basalto, cuarzo, caliza y arenisca), la relación de reemplazo del cemento por humo de sílice fue del 15% sobre la masa, la relación agua/aglomerante del 0,35, la cantidad de hiperplastificante fue del 4% del contenido del aglomerante por masa. Los valores obtenidos figuran en las tablas 65 y 66. Los resultados de esta investigación muestran que la resistencia del agregado y su textura influenciaron la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y al desgaste por abrasión del hormigón. La resistencia a la compresión del basalto, la caliza y la arenisca limita la resistencia a la compresión del hormigón producido con el correspondiente agregado. La textura del cuarzo limita la resistencia a la compresión y a la flexión del hormigón. La resistencia de la pasta y el mortero limita la resistencia a la compresión del hormigón producido con gabbro. Existe una buena relación entre la resistencia a la compresión del agregado con el resultado del mismo en el ensayo de Los Ángeles, así como también entre la resistencia a la compresión del agregado y la resistencia del hormigón tanto a la compresión como a la tracción.

**Tabla 65 – Tipo de agregado, resistencia, dureza y abrasión Los Ángeles. (Kilic et al., 2008)**

Tipo de agregado	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Abrasión Los Ángeles 500 (%) (*)	Dureza	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción de agua (%)	Porosidad (%)
Gabbro	247	11,06	79	2,846	0,14	0,4
Basalto	132	23,66	67	2,739	2,29	4,21
Cuarzo	160	16,20	60	2,781	0,18	0,44
Caliza	110	24,14	47	2,674	0,42	1,13
Arenisca	32	96,18	34	2,664	2,63	5,63

(\*) Abrasión Los Ángeles 500 = pérdida de masa luego de 500 revoluciones.

**Tabla 66 – Resistencia del hormigón, compresión y flexión, según el tipo de agregado y el tiempo de curado. (Adaptada de Kilic et al., 2008)**

Tipo de agregado en el hormigón	Resistencia a la compresión (MPa) de acuerdo al tiempo de curado (días)				Resistencia a la flexión (MPa) de acuerdo al tiempo de curado (días)			
	3	7	28	90	3	7	28	90
Gabbro	63,8	79,9	119,4	136,4	12,6	16,1	17,3	18,4
Basalto	76,2	90,5	121,2	134,6	11,4	15,4	16,7	17,9
Cuarzo	58,1	63,5	97,4	103	12,9	14,9	16,2	16,9
Caliza	57,4	64,2	96,3	107,7	7,9	12,5	12,8	13,9
Arenisca	43,4	44,4	50,3	53	3,2	4,5	5,2	5,6

## 5 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

El programa experimental se desarrolló a partir de ensayos realizados a la muestra de pétreos obtenida en la Minera San Gregorio en la localidad de Minas de Corrales, Departamento de Rivera en Uruguay. Dado que en la misma mina hay varios yacimientos, y que pueden presentar residuos diferentes, se trabajó siempre en uno de ellos, en forma exclusiva, el denominado por la Empresa como “Ombú”. De esta forma se garantizaba la caracterización del pétreo al realizar ensayos de las rocas obtenidas del mismo yacimiento.

### 5.1 Muestreo del pétreo

Se realizó el muestreo del pétreo de acuerdo a los ensayos definidos previamente para el trabajo.

Las normas utilizadas para esta tarea fue la NM 26:2009.

Para la reducción de la muestra de campo para ensayo de laboratorio, se tuvo en cuenta la norma NM 27:2000.

De acuerdo a lo establecido en las normas, la muestra de campo, porción representativa de un lote de agregados, se formó reuniendo varias muestras parciales en cantidad suficiente para los ensayos de laboratorio definidos. Finalmente se realizó una inspección visual completa del yacimiento minero, pero dado que el mismo tiene una extensión muy grande, 200 hectáreas, en relación a la cantidad de material necesario para la investigación, se eligió y se marcó el sector para la extracción del pétreo.



(a)



(b)

Figura 21 – Minera San Gregorio: (a) Yacimiento; (b) Residuo pétreo a pie de la excavación.

El pétreo elegido surge de la trituración de la roca por medio del uso de explosivos y las muestras se tomaron directamente junto a la roca triturada, por lo cual los tamaños nominales del agregado son variables. Independiente se trabajo con la tabla 67 de la Norma.

La muestra se trasladó aproximadamente 650 km, desde la Mina ubicada en el Departamento de Rivera hasta el laboratorio del Instituto de la Construcción (LabIC), Facultad de Arquitectura, y el Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, ubicados en el Departamento de Montevideo. Se trasladaron aproximadamente 700 kg de de pétreos, utilizando para este movimiento tanques de plástico, herméticos, limpios y que no habían sido usados hasta el momento para el traslado de ningún tipo de material, a los efectos de evitar contaminación de la muestra.

**Tabla 67 – Cantidad de muestras a ser recogidas para ensayos físicos o químicos (Norma NM 26:2009)**

Tamaño nominal del agregado	Número mínimo de muestras parciales	Cantidad total de muestra de campo (mínimo)	
		En masa (kg)	En volumen (dm <sup>3</sup> )
≤ 9,5 mm	3	25	40
> 9,5 mm ≤ 19 mm		25	40
> 19 mm ≤ 37,5 mm		50	75
> 37,5 mm ≤ 75 mm		100	150
> 75 mm ≤ 125 mm		150	225

## 5.2 Caracterización del pétreo

Para la caracterización del pétreo en estudio se realizó un análisis petrográfico, análisis de la forma, determinación de la densidad, densidad aparente y absorción de agua así como también el estudio para la resistencia al desgaste y a la abrasión.

### 5.2.1 Análisis petrográfico

El análisis petrográfico se realizó a partir de la descripción de tres muestras, que se exhiben en la figura 22, y en el mismo se puso énfasis en la aptitud para el uso como agregado grueso en hormigones. El estudio se realizó en el laboratorio de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República (UDELAR) y para la realización de este ensayo se utilizaron las normas: NM 54:1998 y la norma IRAM 1649.

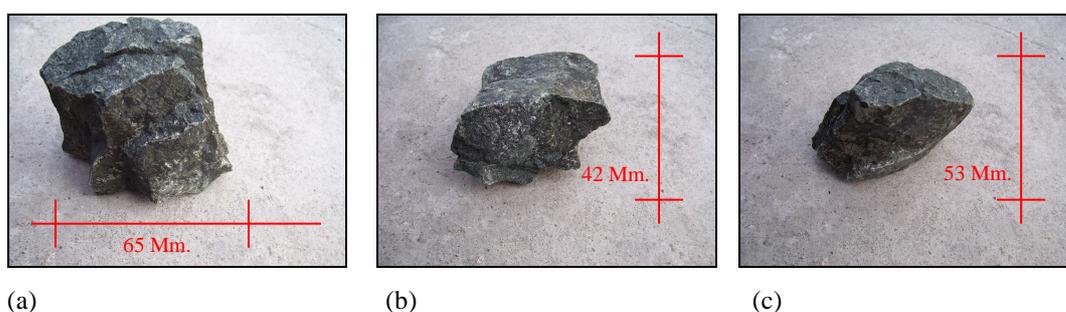


Figura 22 – Fotografía de las muestras analizadas: Muestra N° 1 (a), Muestra N° 2 (b), Muestra N° 3 (c)

### 5.2.2 Análisis de la forma del pétreo

Para la realización de este ensayo se utilizó la norma: UNIT 1029:99, aplicándose para el cálculo la ecuación N° 18.

$$\alpha = \frac{\sum v_i}{\pi \sum d_i^3 / 6}$$

$v_i$  = es el volumen de cada uno de los granos ( $\text{cm}^3$ )

$d_i$  = es el diámetro máximo del grano (cm) (ecuación N° 18)

Para el cálculo del volumen simplificado de cada una de las esferas circunscritas en cada grano se utilizó el calibre definido en la norma y constituido por una serie de aberturas de dimensiones crecientes que se confrontaron con la mayor dimensión de cada grano.

### 5.2.3 Determinación de la densidad, de la densidad aparente y de la absorción de agua

Para la realización de este ensayo se utilizó la norma técnica: UNIT – NM 53:2002.

El ensayo se realizó con una muestra del pétreo que paso el tamiz de 50 mm y quedó retenido en el de 37,5 mm como se indica en la tabla 68, presentándose en la figura 23, foto de la muestra de ensayo utilizada.

**Tabla 68 – Masa mínima de la muestra de ensayo (UNIT – NM 53:2002)**

Dimensión máxima característica (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
12,5	2
19	3
25	4
<b>37,5</b>	<b>5</b>
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125



Figura 23 – Muestra para ensayo de densidad y absorción

### 5.2.4 Determinación de la resistencia a la compresión

Para la extracción de muestras y realización de este ensayo se utilizaron las normas: ASTM D 4543-01, ASTM D 2938-95 y la norma ASTM C 170 – 90.

En el desarrollo del campo de aplicación de la norma utilizada, ASTM D 4543 – 01, se aclara que la roca es un material natural, sus características responden a los procesos geológicos, litología, la tensión histórica a la que estuvo sometida, condiciones ambientales, entre otras, situaciones que pueden generar variabilidad entre las probetas, por esto la situación de mayor complejidad para la realización de este ensayo es la preparación de las probetas. Y de acuerdo a los criterios de la norma la tarea en la que se debe invertir el mayor esfuerzo.

Por otra parte, la citada norma, establece que las probetas del pétreo deben tener una relación longitud-diámetro (L/D) de 2 a 2,5 y el diámetro no debe ser menor a 47 mm. Las bases del cilindro deben ser paralelas y perpendiculares al eje longitudinal del mismo. Para la obtención de las probetas se trabajo con diferentes criterios que se presentan en los ítems a continuación.

#### **5.2.4.1 Perforando en taller rocas trituradas, tomadas en el lugar de la extracción en la Mina**

Para la obtención de las probetas se trasladaron, desde la mina hasta el taller, rocas trituradas, cuya dimensión permitiera la extracción de los mencionados testigos que se ensayarían a la compresión. Tanto la roca como el equipo fueron anclados al pavimento del taller y se perforó utilizando una broca de 60 mm de diámetro, como se exhibe en la figura 24.

Al intentar sacar los testigos del interior de la broca, los mismos se fracturaban en múltiples direcciones, sin lograr la altura exigida en la norma, esta situación se muestra en la figura 25 a. En algunos casos se logró obtener testigos de las dimensiones requeridas, pero al observar su superficie se identificaban múltiples fisuras, exhibidas en la figura 25 b, lo que hacía imposible ensayarlos. Por otra parte al inspeccionar el interior del hueco generado en la perforación se pudo comprobar la fisuración del interior de la roca, lo que se muestra en la figura 26, y que resultaba inapreciable previo a esta intervención.



Figura 24 – Perforaciones del pétreo en taller.



(a)



(b)

Figura 25 – Muestras resultantes del proceso de corte con broca: (a) testigos fracturados; (b) testigo fisurado.



Figura 26 – Fisuras internas del pétreo.

#### 5.2.4.2 Perforando directamente en la roca de la mina

La imposibilidad de lograr testigos de la piedra en el taller, presentado en 5.2.4.1, obligó a extraer directamente las muestras de la roca en la mina. Este trabajo se realizó siempre sobre mantos rocosos que, durante el proceso extractivo de la mina, fueron fracturados mediante mallas de explosivos de 9 m<sup>2</sup> de superficie. En figuras 27 y 28 se presentan diferentes aspectos del procedimiento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27 – Preparación de la perforación en la mina: (a) acondicionamiento del sector elegido para la perforación; (b) y (c) equipamiento de perforación; (d) anclaje del equipo directamente en la roca.



Figura 28 – Extrayendo el testigo directamente de la roca.

Luego de realizar varios intentos en diferentes sectores de la roca, el resultado fue el mismo que en el caso anterior, los testigos se fisuraban sin alcanzar las dimensiones longitudinales requeridas por norma. En todo momento se trabajó directamente sobre el perfil lateral construido por la empresa minera durante el proceso de profundización del yacimiento.

#### 5.2.4.3 Perforando en roca a pie de la mina

Debido a las dificultades para obtener los testigos directamente del perfil lateral del yacimiento, se opta por extraer una roca de grandes dimensiones y realizar el procedimiento de extracción a pie de la mina.

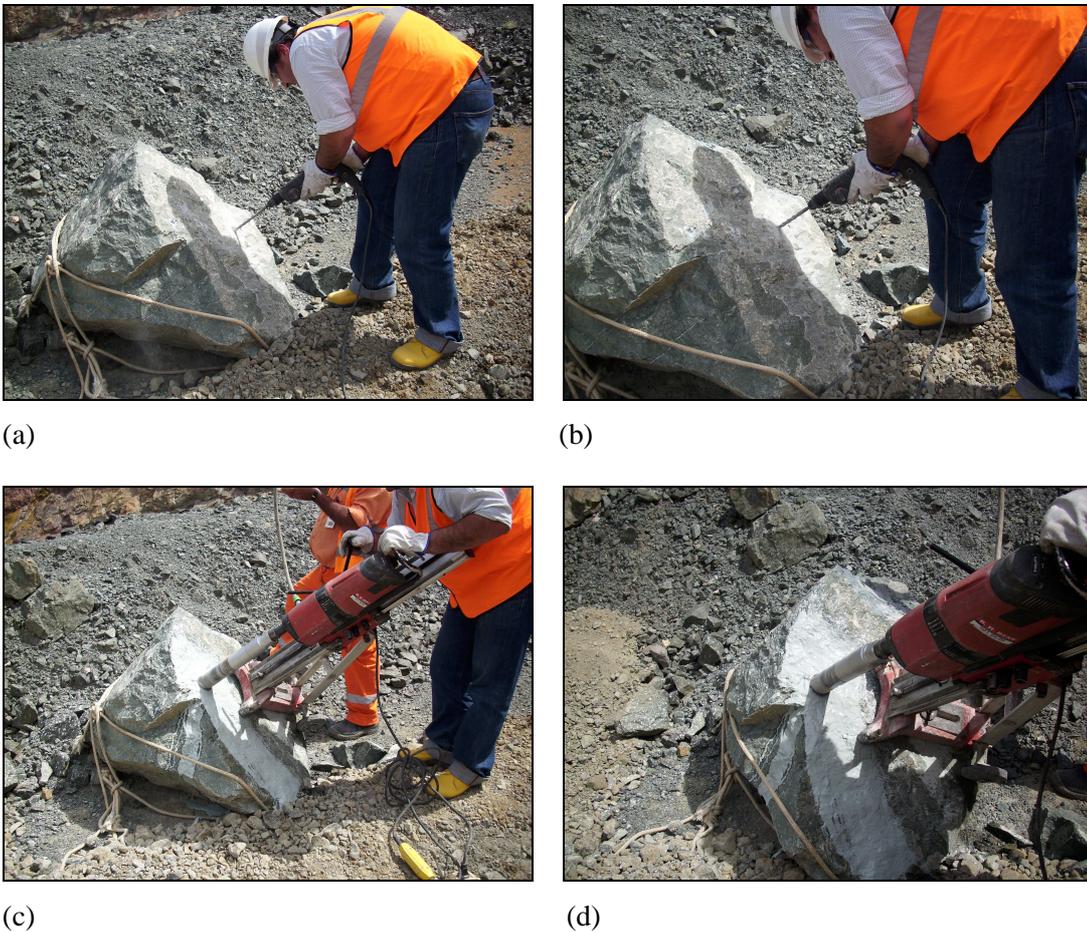
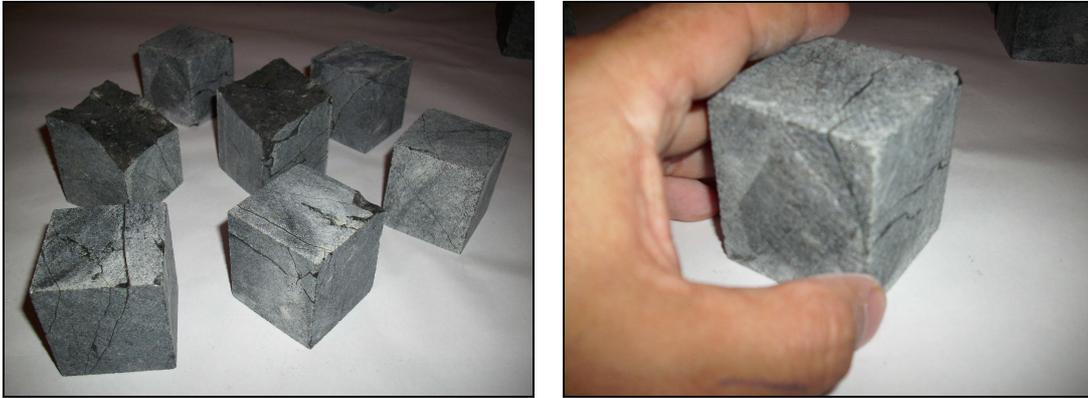


Figura 29 – Extracción de testigos de roca extraída a pie de la mina: (a) y (b) anclaje del equipo en la roca extraída; (b) y (c) perforando en la roca extraída.

Luego de varias perforaciones el resultado obtenido fue similar, las probetas se fisuran. Las sucesivas etapas del procedimiento de trabajo se exhiben en la figura 29.

Debido a estas dificultades se resuelve trasladar pétreos, de mayores dimensiones a las exigidas para las probetas en la norma, a un aserradero de rocas para cortar testigos. La

norma utilizada en este caso es la ASTM C 170 – 90, que establece que los testigos ha utilizar pueden ser cubos o prismas de base cuadrada, cuya dimensión lateral no puede ser menor a 50,8 mm, y la relación entre la altura y la dimensión lateral no puede ser menor a 1:1.



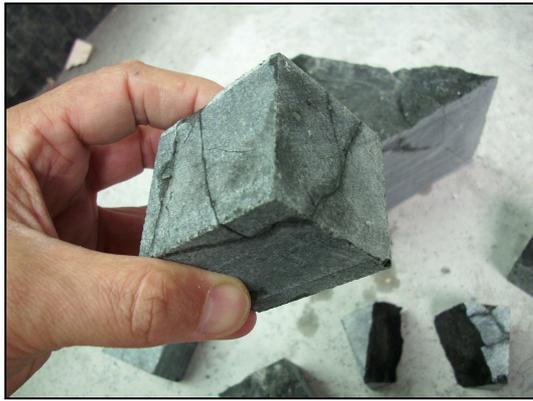
(a)

(b)

Figura 30 – Testigos aserrados: (a) y (b) testigos preparados para ensayo a la compresión



Figura 31 – Fisuración en el testigo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 32 – Fisuración en testigos: (a) fisura transversal al cuerpo del testigo; (b) fisuras transversales sobre la esquina del cuerpo del testigo; (c) y (d) desprendimientos de sectores fisurados.

La presencia de las fisuras en las rocas trasladadas al aserradero, provocaba los desprendimientos de algunos sectores de los testigos durante la operación del aserrado, e incluso, luego de finalizada esta tarea, simplemente con la manipulación de los mismos en el Laboratorio, como se exhibe en la figura 32. En la figura 33 se aprecia la fisuración en la roca aserrada luego del corte de los testigos.

Debido a esta situación, preparación de los testigos, que algunos autores como Zhang Lianyang (2006), describen como la de mayor complejidad al momento de estudiar pétreos, es que se resuelve no ensayarlos a la compresión en la prensa, sino medir cualitativamente la resistencia de los mismos en forma indirecta. Para esta tarea se tomaron en cuenta los resultados de otros ensayos, en principio el valor bajo de absorción de agua, 0,4 %, que de acuerdo con Smith y Collis (2001), se corresponde con una baja porosidad y permeabilidad y relata una mayor resistencia mecánica. En la misma dirección, Kahraman et al., (2005), luego de ensayar rocas tanto ígneas, sedimentarias como metamórficas, nos plantea que existe una significativa

correlación entre la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de descarga puntual con la porosidad de la roca, relación ésta inversamente proporcional.



Figura 33 – Fisuración en la roca aserrada para la extracción de testigos. Cataclasis de la roca.

Para otros autores, como es el caso de Alexander y Mindess (2005), que también reconocen la dificultad de trabajar en los pétreos con testigos regulares prismáticos, vinculan la resistencia mecánica de los mismos con la resistencia al impacto y a la abrasión medido en el ensayo con la máquina “Los Ángeles”, posición ésta que es compartida por Siegesmund y Snethlage (2011) que entienden que pétreos con valores altos de dureza presentan también valores altos de resistencia a la compresión. Para Neville (2004), el uso intensivo del ensayo a la abrasión responde justamente a la buena correlación que existe con la resistencia a la compresión y a la flexión.

El pétreo en estudio presentó un valor bajo de pérdida de masa por abrasión, 20,211 %, si se toma en cuenta el trabajo de Ugur et al., (2010) y de Kilic et al., (2008), que analizaron y compararon para pétreos de diferentes orígenes los valores del ensayo en la máquina “Los Ángeles” con la resistencia a la compresión, es posible vincular la baja pérdida de masa con la elevada resistencia a la compresión uniaxial.

Este agregado, residuo de la industria minera, surge como consecuencia de la trituración mediante explosivos de la roca y no de la descomposición natural de la misma, como buena parte de los agregados gruesos utilizados para la producción de hormigón en Uruguay.

De todas formas se considera que en trabajos futuros una estrategia válida, para avanzar en el conocimiento de este residuo minero, sería ensayarlo pero ya formando parte de probetas de hormigón y evitar la dificultad práctica de la preparación de testigos.

### **5.2.5 Medición del módulo de elasticidad**

En este caso, las mismas discontinuidades presentes en el agregado, impidieron obtener los testigos de las dimensiones exigidas en las normas para la realización del ensayo de medición del módulo de elasticidad.

En este sentido, y al igual que con la medición de la resistencia a la compresión del pétreo, se tomaron los resultados obtenidos en otros ensayos para determinar en forma indirecta las características del agregado estudiado con respecto a la elasticidad. Tomando como referencia a Mehta y Monteiro (2008), el módulo de elasticidad del agregado, que restringe y controla las alteraciones volumétricas en la matriz está directamente relacionado a su porosidad, concepto que comparte Caldarone (2009), quien aclara que un agregado grueso más compacto posee un mayor módulo de elasticidad. El pétreo estudiado tiene un valor bajo de absorción de agua, 0,4 %, debido justamente a su escasa porosidad.

De acuerdo con Frazao (2002), los pétreos son materiales de comportamiento elasto-frágil, y en esta misma dirección Meininger y Richard (2006), identificaron en su trabajo una relación lineal directa entre la resistencia a la compresión de la roca y su módulo de elasticidad. Para Gilbert y Ranzi (2011), los pétreos con elevado módulo de elasticidad presentan una mayor dureza e inciden directamente, en función de su volumen, en la retracción por secado del hormigón. El pétreo estudiado tiene un valor de dureza elevado medido en función de su baja pérdida de masa, 20,211 %, en el ensayo en la máquina “Los Ángeles”.

Debido a que el modulo de elasticidad del pétreo incide directamente en el modulo de elasticidad del hormigón, como afirma Mehta y Monteiro (2008), y Neville (2004) plantean que el módulo de elasticidad del agregado es el factor más relevante en el desempeño final del hormigón, eventualmente, se puede determinar el valor del pétreo estudiado midiendo el modulo de elasticidad del hormigón en probetas que lo incluyan.

## 5.2.6 Determinación de la resistencia al desgaste y a la abrasión

Para la realización de este ensayo se utilizó la norma: UNIT – NM 51:2002. En la tabla 69 y 70 se presentan algunas características de las muestras y cargas abrasivas a emplear según la citada norma.

**Tabla 69 – Fracciones y cantidad de muestra para ensayo “Los Ángeles”**

Tamices (Aberturas en mm)		Muestra – masa parcial (g)						
		Graduación						
Pasa	Retenido	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500 ± 50		
63	50					2500 ± 50		
<b>50</b>	<b>37,5</b>					<b>5000 ± 50</b>	5000 ± 50	
37,5	25	1250 ± 25					5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25						5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10					
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10					
9,5	6,3			2500 ± 10				
6,3	4,75			2500 ± 10				
4,75	2,36				5000 ± 10			
<b>Masas totales (g)</b>		<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>10000 ± 100</b>	<b>10000 ± 75</b>	<b>10000 ± 50</b>
<b>Número de rotaciones del tambor</b>		<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>

La muestra utilizada pasa el tamiz 50 y queda retenido en 37,5, corresponde utilizar una masa total de 10.000 g ± 100 y 1000 rotaciones del tambor.

**Tabla 70 – Carga abrasiva para ensayo “Los Ángeles”**

Graduación	Número de esferas	Masa de las esferas
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
<b>E</b>	<b>12</b>	<b>5000 ± 25</b>
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

La carga abrasiva la constituyen esferas de fundición de hierro o acero, 48 mm de diámetro aproximadamente, y con una masa entre 390 y 445 g. Para este trabajo, y de acuerdo con los tamices utilizados, se utilizó la graduación E y por lo tanto 12 esferas.

La muestra se lavó y secó a estufa, 107 ± 2,5 °C, hasta obtener masa constante, y luego se siguió el procedimiento establecido en la norma correspondiente al ensayo “Los Ángeles”.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la investigación experimental presentada en el capítulo 5.

### 6.1 Análisis petrográfico

Desde el punto de vista petrográfico las muestras fueron analizadas en cuanto a sus texturas y su mineralogía. Este estudio fue realizado a tres muestras según exige la norma IRAM 1649.

#### 6.1.1 Textura

De acuerdo al estudio petrográfico las muestras exhiben texturas similares, con pequeñas diferencias en cuanto a dimensiones y cantidades de materiales que las componen. Los resultados se presentan en la tabla 71.

**Tabla 71 – Análisis petrográfico – Texturas de las muestras**

Características	Textura
Muestra N° 1	Granoblástica, cristales subhedrales de plagioclasa y clinopiroxeno, de aproximadamente 0,2 – 0,3 mm. Fracturillas rellenas con clorita y carbonato cortan la roca. Ocasionalmente se observan uniones triples a ca. 120°, que indican recristalización metamórfica en condiciones de alto grado (facies granulita)
Muestra N° 2	Granoblástica, cristales subhedrales de plagioclasa y clinopiroxeno, de aproximadamente 0,3 – 0,5 mm. Con frecuencia se observan uniones triples a ca. 120°, que indican recristalización metamórfica en condiciones de alto grado (facies granulita). Ocasionales fracturillas rellenas con clorita y carbonato cortan la roca.
Muestra N° 3	Granoblástica, cristales subhedrales de aproximadamente 0,3 – 0,5 mm totalmente transformados en carbonato. Las características texturales sugieren que se trata de una roca similar a la de las muestras 1 y 2, pero muy fuertemente afectada por alteración hidrotermal.

## 6.1.2 Mineralogía

La mineralogía de la roca, a partir del análisis petrográfico de las muestras, se exhibe en la tabla 72. La muestra N° 1 y N° 2 presentan características muy similares, la muestra N° 3, que está muy fuertemente afectada por alteración hidrotermal presenta algunas variaciones pero que no son significativas al momento de verificar la reactividad álcali-sílice, como se presentará en el punto 6.1.4 de la página 147.

**Tabla 72 – Análisis petrográfico – Mineralogía de las muestras**

Minerales	Muestras		
	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3
<b>Plagioclasa (35-40 %)</b>	Cristales subhedrales, de ca. 0,2 – 0,4 mm. Composición aproximada andesina-labrador.	Cristales subhedrales, de ca. 0,3 – 0,5 mm. Composición aproximada andesina-labrador.	Cristales subhedrales, de ca. 0,3 – 0,5 mm, muy fuertemente carbonatizados, aunque sobreviven relictos de plagioclasa.
<b>Clinopiroxeno (30-35 %)</b>	Cristales subhedrales, de ca. 0,2 – 0,3 mm. Ángulo de extinción $Z^c = 45^\circ$ , Birrefringencia media ca. 0,025	Cristales subhedrales, de 0,3 – 0,5 mm. Ángulo de extinción $Z^c = 45^\circ$ , Birrefringencia media ca. 0,025.	Totalmente alterado. Son pseudomorfos de piroxeno, compuestos de filosilicatos de color amarillo – marrón claro.
<b>Cuarzo (5-10 %)</b>	Cristales anhedrales diseminados, de 0,3 – 0,4 mm.	Cristales anhedrales diseminados, ecuanes (ca. 0,2 mm) a alargados (tipo ribbons, de 0,2 x 1 mm) que parecen definir una foliación.	Cristales anhedrales diseminados, ecuanes (ca. 0,2 mm).
<b>Anfibol uralítico (3-5 %)</b>	Ocasionales cristales de clinoanfibol con pleocroísmo en tonos de verde, producto de alteración retrometamórfica de piroxeno.	Cristales relativamente frecuentes de clinoanfibol con pleocroísmo en tonos de verde, producto de alteración retrometamórfica de piroxeno.	
<b>Clorita (5-10 %)</b>	Agregado de finas laminillas de pleocroísmo verde pálido y baja birrefringencia, polariza en tonos de gris. Ocurre como relleno de fracturillas y en pseudomorfos correspondientes a piroxeno alterado	Agregados de finas laminillas de pleocroísmo verde pálido y baja birrefringencia, polariza en tonos de gris. Ocurre como relleno de fracturillas y en pseudomorfos correspondientes a piroxeno alterado	Clorita (2-5 %) Agregados de finas laminillas de pleocroísmo verde pálido y baja birrefringencia, polariza en tonos de gris. Ocurre como relleno de fracturillas y en pseudomorfos correspondientes a piroxeno alterado.
<b>Apatito (ca. 1 %)</b>	Pequeños cristales euhedrales diseminados de ca. 0,05 mm.	Pequeños cristales euhedrales diseminados de ca. 0,05 mm.	Pequeños cristales euhedrales diseminados de ca. 0,05 mm.
<b>Carbonato (3-5 %)</b>	Finos cristales de 0,05 – 0,1 mm, formando parte del relleno de las fracturillas y diseminado en la roca.	Finos cristales de 0,05 – 0,1 mm, formando parte del relleno de las fracturillas y diseminado en la roca.	Carbonato (40-50 % incluye el carbonato que aparece como feldespato alterado) Finos cristales de 0,05 – 0,1 mm, formando parte del relleno de las fracturillas y

			diseminado en la roca.
<b>Opacos (2-3 %)</b>	Cristales subhedrales de 0,1 – 0,2 mm, diseminados.	Cristales subhedrales de 0,1 – 0,2 mm, diseminados.	Cristales subhedrales de 0,1 – 0,2 mm, diseminados.
<b>Filosilicatos (20-30 % incluye los filosilicatos que aparece como piroxeno alterado)</b>			De color amarillo – marrón claro.

### 6.1.3 Definición de la roca

Con base en el análisis petrográfico realizado a las muestras obtenidas en la Mina, se puede decir que estamos en presencia de una roca Granulita, producto de metamorfismo de alto grado de una roca máfica. La plagioclasa y clinopiroxeno con textura granoblástica corresponden al metamorfismo de alto grado.

Las dos primeras muestras presentan a la roca afectada o escasamente afectada por procesos de alteración hidrotermal-retrometamórfica, a los que se asocian la clorita, el anfíbol y el carbonato. En el caso de la tercera muestra, si bien se está en presencia de la misma roca, esta se encuentra fuertemente afectada por procesos de alteración hidrotermal (fundamentalmente carbonatación)

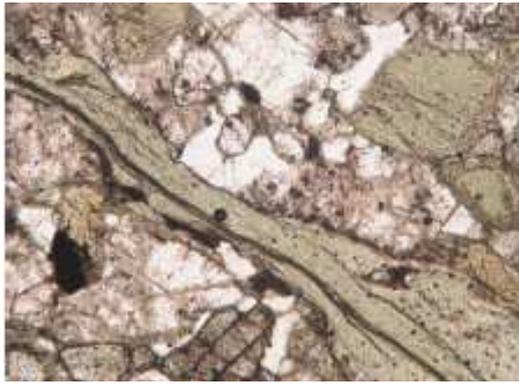
### 6.1.4 Consideraciones sobre el potencial reactivo: Reacción Álcali – Sílice

En la tres muestras no se detecta cuarzo fuertemente deformado ni microfracturado o microcristalino, ni ftanita (o chert), calcedonia, ópalo o arcillas esmectíticas.

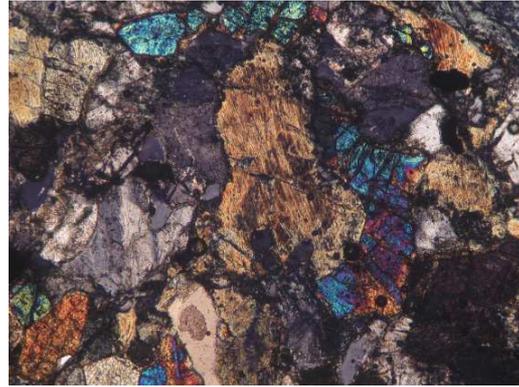
Tampoco se detectan tridimita, cristobalita o vidrio volcánico, los que además quedan descartados por no tratarse de una roca volcánica. De lo anterior se desprende que esta roca presenta características que potencialmente evitarían el riesgo de reacción álcali – sílice, por lo que si bien cumple con la norma IRAM 1649, es recomendable profundizar, mediante otros ensayos, para descartar toda posibilidad de reactividad.

La ausencia, o casi total ausencia de foliación sugiere que no se presentarán problemas de achatamiento frente a la trituración. Debería evaluarse la incidencia de las discontinuidades (fracturillas con clorita) como posibles planos de debilidad en los fragmentos del agregado, así como también en la tercera muestra la incidencia de la alteración hidrotermal en la disminución de la resistencia mecánica de los fragmentos del agregado.

Las figuras N° 34 a la N° 36 exhiben las imágenes obtenidas durante el análisis petrográfico de las muestras de la roca estudiada.



(a)

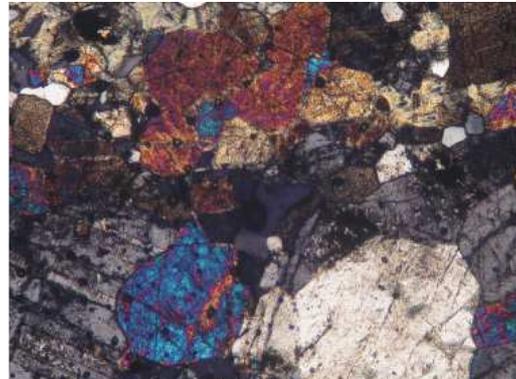


(b)

Figura 34 – Muestra N° 1: (a) Plagioclasa y clinopiroxeno. Fracturilla rellena con clorita. Luz polarizada plana. Ancho de la imagen 1,8 mm. (b) Plagioclasa y clinopiroxeno y escaso cuarzo. Polarizadores cruzados. Ancho de la imagen 1,8 mm.

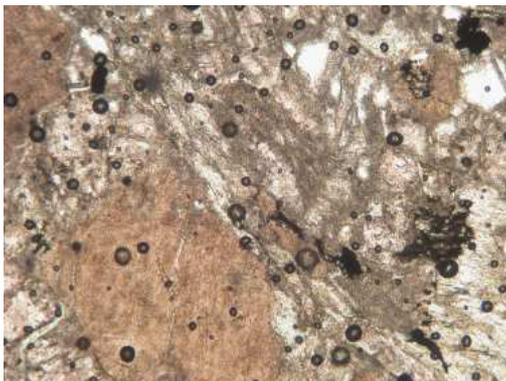


(a)



(b)

Figura 35 – Muestra N° 2: (a) Plagioclasa y clinopiroxeno en granulita máfica poco alterada. Luz polarizada plana. Ancho de la imagen 1,8 mm. (b) Plagioclasa y clinopiroxeno en granulita máfica poco alterada. Polarizadores cruzados. Ancho de la imagen 1,8 mm.



(a)



(b)

Figura 36 – Muestra N° 3: (a) Plagioclasa y clinopiroxeno muy fuertemente alterados en granulita máfica. Luz polarizada plana. Ancho de la imagen 1,8 mm. (b) Plagioclasa y clinopiroxeno muy fuertemente alterados en granulita máfica. Polarizadores cruzados. Ancho de la imagen 1,8 mm.

### 6.1.5 Consideraciones del análisis petrográfico

El pétreo estudiado es producto de un metamorfismo de alto grado de una roca máfica, proceso este que ha provocado un aumento de la recristalización de los minerales dando lugar a una roca masiva, no foliada. Esta situación está anunciando un agregado resistente y que no presentará dificultades de achatamiento, por ausencia de foliación, en caso de una eventual trituración.

De acuerdo con Oyhantcabal (2011), se pueden identificar, desde el punto de vista geológico, tres eventos a lo largo del tiempo, el primero que da lugar a la generación de la roca máfica original, con alto contenido de minerales oscuros, en definitiva la diorita en estudio. Luego se produce un segundo evento, hace aproximadamente 2.000 millones de años, metamorfismo de alto grado que genera esta nueva roca que podríamos definir como una “metadiorita” y finalmente un tercer evento, hace aproximadamente 600 millones de años, Orogenesis brasiliano, que produce la cataclasis de la roca, fisurándola y partiéndola en fragmentos más pequeños. La presencia de clorita en la superficie de piedras, color verdoso, tomadas a pie de la mina eliminan la teoría que dichas fisuras fueran provocadas por el uso de explosivos en el proceso extractivo sino que responden al metamorfismo natural.

Para Smith y Collis (2001), el metamorfismo más intenso provoca un aumento generalizado de la recristalización de los minerales y, en condiciones extremas, muchos de los constituyentes de la roca se funden y se introducen como un cuerpo ígneo. Estas rocas son comúnmente masivas y granulares y producen agregados de buena calidad. Es posible decir que la original, arcillosa o foliada roca, puede haber sido sujeto de un metamorfismo extremo y de alto grado y se haya recristalizado, volviéndose potencialmente utilizable como agregado; la roca metamórfica masiva cuarcítica provee probablemente la mejor fuente prospectiva de agregados, aunque puede ser también muy dura y costosa su producción frente a la demanda.

Dada la cantidad de residuo generado en la mina, justamente por la trituración mediante el uso de explosivos, es poco probable la necesidad de incorporar una segunda trituración que tenga como objetivo lograr un espectro granulométrico más amplio para la producción de hormigón. Justamente las escombreras de la mina son una gran reserva de pétreos de diferentes dimensiones. No obstante es de destacar que la ausencia de foliación es un indicador de resistencia de la piedra.

Por otra parte el análisis petrográfico está indicando que las características de este residuo pétreo no presentan riesgo de reacción álcali – sílice, lo cual es una particularidad de este pétreo muy beneficiosa, porque se estaría evitando en su uso una patología compleja en el hormigón armado, generadora de micro fisuras internas, fisuras en la superficie del hormigón y pérdida de resistencia debido a la desagregación.

## 6.2 De la forma del pétreo

El análisis de la forma del material pétreo, surge de la determinación del coeficiente de forma de los agregados gruesos, aplicando la ecuación N° 19, de la norma UNIT 1029:99.

$$\alpha = \Sigma v_i / \pi \Sigma d_i^3 / 6$$

(ecuación N° 19)

$\alpha = \Sigma$  volumen de cada grano /  $\Sigma$  volumen de cada una de las esferas circunscritas

Donde:

$\alpha$  = es el coeficiente de forma

$v_i$  = es el volumen de cada uno de los granos ( $\text{cm}^3$ ).

$d_i$  = es el diámetro máximo del grano (cm).

$$\alpha = 845,5 / 853,5395 = \mathbf{0,99}$$

Cuando el valor del coeficiente de forma tiende a 1, se está frente a un agregado grueso con formas aproximadamente esféricas. A medida que ese valor disminuye, los agregados gruesos presentan formas que tienden a ser laminares y aciculares, dificultando extraordinariamente la obtención de buenas resistencias, presentando sedimentación de los áridos, pérdida de homogeneidad de la mezcla y dificultades para la puesta en obra del hormigón. Esta situación también obliga, al momento de dosificar, incrementar el tenor de cemento Pórtland. Por esta razón la norma de Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado, UNIT 1050:2001, determina que el valor del coeficiente de forma no debe ser inferior a 0,20.

Las formas esféricas o cúbicas, como es el caso del agregado estudiado, tienen mayor capacidad de compactarse, se oponen a convertirse en un plano, como plantea el ACI (2007), favorecen la trabajabilidad, generan menor índice de vacíos y por lo tanto se logran hormigones de resistencias más elevadas. La forma del agregado estudiado permite, como define Neville (2004), lograr un hormigón compacto con un máximo de densidad.

De todas formas se debe considerar que este agregado es partido durante el proceso extractivo, pero que por la fisuración propia de las características geológicas de la roca, se fractura sin producir formas achatadas o extremadamente angulosas.

Por otra parte agregados de este tipo pueden ser utilizados para la producción de HAC, debido a que la forma esférica favorece la fluidez, porque se reduce el rozamiento interno, y facilita el bombeo del hormigón.

En el caso del pétreo en estudio, el resultado obtenido en el ensayo está por encima de lo exigido en la norma UNIT 1050:2001, presentando un coeficiente de forma adecuado para la producción de hormigón en masa o armado.

### 6.3 Densidad, de la densidad aparente y de la absorción de agua

Conforme a lo descrito en el Capítulo 5 y trabajando bajo la norma NM 53:2002, el valor de densidad del agregado seco ( $d_s$ ) es 2,549, en cuanto el valor de densidad del agregado saturado y de superficie seca ( $d_s$ ) es de 2,533 y el de densidad aparente es ( $d_a$ ) es 2,522.

Los valores de densidad y absorción de un pétreo están directamente vinculados a su porosidad, e influyen directamente en la resistencia y la durabilidad del agregado, lo cual, obviamente, incide en la resistencia y la durabilidad del hormigón.

Los valores de densidad obtenidos para el pétreo en estudio, comparados con otras rocas metamórficas, son bajos, pero si se los compara con los valores de densidad del granito, son valores cercanos, como se observa en la tabla 73.

**Tabla 73 – Valores típicos de densidad para rocas intactas. Comparativa con pétreo en estudio (Adaptada de ZHANG LIANYANG, 2006)**

Tipo de roca	Roca	Rango de densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
Ígneas	Granito	2516 – 2809	2667
	Granitodiorita	2668 – 2785	2716
	Syenite	2630 – 2899	2757
	Cuarzo diorita	2680 – 2960	2806
	Diorita	2721 – 2960	2839
	Norite	2720 – 3020	2984
	Garbo	2850 – 3120	2976
	Diabase	2804 – 3110	2965
	Peridotite	3152 – 3276	3234
	Dunita	3204 – 3314	3277
	Pyroxenite	3100 – 3318	3231
	Anorthosite	2640 – 2920	2734
Sedimentarias	Arenisca	2170 – 2700	-
	Caliza	2370 – 2750	-
	Dolomita	2750 – 2800	-
	Tiza	2230	-
	Mármol	2750	-
	Esquisto	2060 – 2660	-
	Arena	1920 – 1930	-
Metamórficas	<b>Pétreo en estudio</b>	<b>2549</b>	<b>-</b>
	Gneiss	2590 – 3060	2703
	Schist	2700 – 3030	2790
	Slate	2720 – 2840	2810
	Anfibolita	2790 – 3140	2990
	Granulito	2630 – 3100	2830
	Eclogita	3338 - 3452	3392

Este valor de densidad obtenido en el ensayo,  $2549 \text{ kg/m}^3$ , de acuerdo con la clasificación de los agregados propuesta por Mehta y Monteiro (2008), lo ubicaría en el rango de los agregados considerados pesados, característica esta que permite obtener hormigones de elevado peso, es decir por encima de los  $2400 \text{ kg/m}^3$  que es el valor de los hormigones de densidad normal.

En lo que respecta a la absorción de agua, el valor obtenido del pétreo es  $0,4 \%$ , lo que se considera muy bajo comparado con las rocas metamórficas y sedimentarias y comparado con las rocas ígneas es más bajo que la mayoría; este valor se encuentra entre el granito y el gabbro, como se observa en la figura 37. Esto nos indica un agregado con muy baja porosidad.

La baja porosidad del agregado no solamente es un indicador de resistencia del pétreo sino que también permite al momento de dosificar el hormigón trabajar con relaciones agua/cemento más bajas. Algunos autores, como Kosmatka et al., (2003), nos indica que en pétreos de baja porosidad, como el estudiado, no se corre el riesgo de pérdida durante el proceso de hidratación. Este tipo de agregados compactos, de baja porosidad, alcanzan valores mas elevados de modulo de elasticidad, aumentando indirectamente el modulo de elasticidad del hormigón, disminuyendo también la retracción por secado.

Los valores bajos de absorción de agua implican valores bajos de porosidad, como se observa en la figura 19; de ese trabajo de Siegesmund y Snethlage (2011), se desprende que valores bajos de porosidad se corresponden con bajas diferencias entre los valores de densidad del agregado, densidad del agregado saturado con superficie seca y densidad aparente del mismo. En el agregado en estudio estos valores son muy cercanos, como puede ser visto en el Anexo 2.

Del trabajo de Asamoto et al., (2008), surgen dos elementos a considerar: que la retracción del agregado incrementa significativamente la retracción del hormigón, incidiendo en la estabilidad dimensional del mismo, y que la retracción del agregado depende de su modulo de elasticidad y de su capacidad de absorción de agua. El agregado estudiado presenta muy baja absorción de agua y es un agregado natural, los cuales retraen menos que los agregados livianos independiente de la relación agua/cemento utilizada en la producción del hormigón, como se exhibe en las figuras 12 y 13. En este sentido cabe destacar, de acuerdo con Fujiwara (2008), que los cambios de longitud del agregado dependen de su capacidad de absorción de agua y de secado y que este ciclo incide directamente en la estabilidad dimensional del hormigón.

En la tabla 74 se presenta el valor de absorción de agua del pétreo estudiado en una comparativa con otros pétreos incluyendo en el análisis datos de resistencia a la compresión

uniaxial y a la porosidad. Se clasifica en función del origen de los pétreos y en forma decreciente en cuanto al valor de absorción de agua.

**Tabla 74 – Relación entre porosidad, absorción de agua y resistencia en las rocas. Comparativa con pétreo en estudio. (Adaptada Kahraman et al., 2005)**

Tipo de roca	Clasificación de las rocas	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Porosidad (%)	Absorción de agua (%)
Traki – andesita	Ígneas	78,2	5,4	10,74	2,46
Basalto	Ígneas	202,9	13,2	5,5	1,49
Andesita	Ígneas	77,5	6,4	5,27	1,48
Bomba Volcánica	Ígneas	50,2	3	3,75	1,12
Andesita	Ígneas	150,4	12,2	7,19	1,1
Andesita	Ígneas	164,1	13	1,15	0,45
Granodiorita	Ígneas	109,2	11,3	2,51	0,38
Granito	Ígneas	89,6	4,4	0,98	0,22
Granito	Ígneas	133,2	13	1,15	0,16
Granito rosa	Ígneas	84,9	5,7	0,63	0,12
Granito gris	Ígneas	114,5	7,2	0,62	0,09
Mikasist	Metamórfica	70,9	4,1	1,95	0,76
Migmatit	Metamórfica	203,6	13,3	1,33	0,44
Gneises	Metamórfica	85,9	4,7	0,79	0,43
<b>Pétreo en estudio</b>	<b>Metamórfica</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,4</b>
Serpantinit	Metamórfica	210,6	10,4	0,91	0,24
Mármol	Metamórfica	90,5	5	0,37	0,15
Mármol	Metamórfica	26,1	2,9	0,3	0,05
Mármol	Metamórfica	69,8	4,3	0,37	0,03
Mármol	Metamórfica	73,4	5,7	0,06	0,03
Mármol	Metamórfica	28,5	5,2	0,13	0,03
Anhydrite	Sedimentaria	48,8	3,7	6,01	2,86
Arenisca	Sedimentaria	120,3	12,8	3,61	1,29
Arenisca	Sedimentaria	168,6	12,9	2,5	0,59
Travertine	Sedimentaria	83,3	5,2	3,12	0,59
Travertine	Sedimentaria	87,8	4	7,22	0,37
Caliza	Sedimentaria	60,8	7,8	2,6	0,35
Travertine	Sedimentaria	80	4,3	5,93	0,13
Travertine	Sedimentaria	112,3	3,9	13,27	0,11
Caliza dolomítica	Sedimentaria	136,7	6,5	0,31	0,09
Travertine	Sedimentaria	50,3	3	12,57	0,07
Caliza	Sedimentaria	134,2	6	0,38	0,04
Travertine	Sedimentaria	60	1,6	8,74	0,04
Caliza	Sedimentaria	128,8	5,4	0,69	0,03
Caliza	Sedimentaria	79,5	4,9	0,18	0,03
Caliza rosa	Sedimentaria	175	7,1	0,93	0,03
Travertine	Sedimentaria	57,6	3,7	2,15	0,03
Travertine	Sedimentaria	45,4	4,8	4,08	0,03
Travertine	Sedimentaria	50,3	4,5	4,04	0,03

Por otra parte las condiciones de durabilidad están directamente vinculadas a la porosidad, en el pétreo en estudio esta característica implica que se disminuye la capacidad de retener agua evitando el deterioro producto de los ciclos de hielo y deshielo; además este tipo de agregado, poco poroso, es menos vulnerable a la expansión destructiva producto de la exposición al fuego.

De acuerdo con Mehta y Monteiro (2008), este tipo de agregado poco poroso puede estar libre de problemas relacionados con el movimiento de la humedad interna.

En lo que respecta al proceso productivo del hormigón, el agregado estudiado por su baja capacidad de absorber agua, no genera riesgos en cuanto a retener agua durante el proceso de mezclado, lo que afectaría no solamente las propiedades del hormigón fresco sino también las propiedades a largo plazo. Esto evita, como plantea Deshpande et al., (2012), la pérdida de asentamiento y los problemas de bombeo del hormigón.

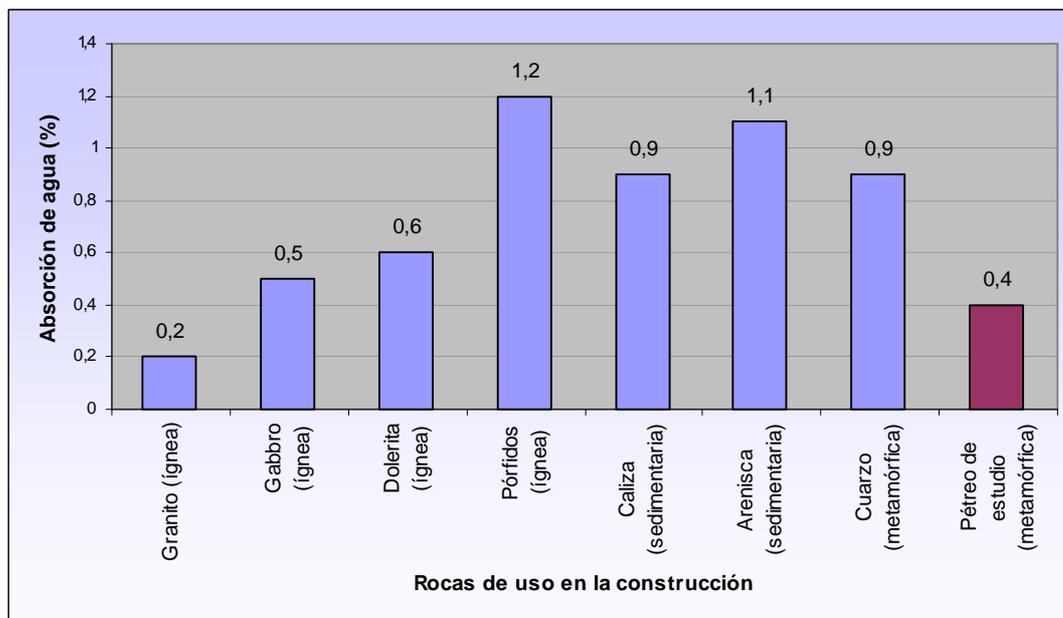


Figura 37 – Absorción de agua del pétreo estudiado y diferentes rocas de uso en la construcción. Adaptado de SMITH (1999)

#### 6.4 Resistencia al desgaste y la abrasión

Mediante el ensayo de abrasión “Los Ángeles”, NM 51:2002, se midió la resistencia a la abrasión del residuo minero pétreo, cuantificando la pérdida en masa del pétreo. Los valores correspondientes al ensayo se exhiben en el Anexo 3.

Con este ensayo se midió la dureza y el grado de compacidad del pétreo, características que en forma indirecta permiten evaluar la resistencia a la compresión del

agregado. El resultado obtenido de pérdida por abrasión fue de 20,211 % de la masa del agregado.

En la tabla 75 se presenta una comparativa de los valores de desgaste a la abrasión de pétreos de uso convencional en la construcción, ordenados en forma creciente, y se intercala el valor del pétreo en estudio. Notoriamente la roca ensayada presenta un valor porcentual de pérdida de masa bajo en comparación con las restantes. Por otra parte si se vinculan los valores de desgaste a la abrasión con los de resistencia a la compresión uniaxial se verifica la tendencia que a mayor desgaste menor resistencia a la compresión. Este dato es por demás significativo debido a que un hormigón de resistencia elevada exige un pétreo de condiciones similares.

**Tabla 75 – Resistencia de los agregados a la abrasión y a la compresión uniaxial – Comparativa con el pétreo estudiado (Adaptado de Kilic et al., 2008 y de UGUR et al., 2010)**

Tipo de roca	Clasificación	Desgaste a la abrasión (%)	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)
		K <sub>500</sub>	
Gabbro	Ígnea	11,06	247
Cuarzo	Metamórfica	16,20	160
Andesita	Ígnea	20,2	82
<b>Pétreo en estudio</b>	<b>Metamórfica</b>	<b>20,211</b>	<b>-</b>
Caliza	Sedimentaria	23,5	100
Basalto	Ígnea	23,66	132
Caliza	Sedimentaria	23,9	119
Caliza	Sedimentaria	24,14	110
Travertine	Sedimentaria	24,5	84
Caliza	Sedimentaria	25,8	91
Travertine	Sedimentaria	26	68
Mármol	Metamórfica	26,7	98
Mármol	Metamórfica	30,7	70
Arenisca	Sedimentaria	32	96,18
Mármol	Metamórfica	33,6	126
Caliza	Sedimentaria	34,3	73
Travertine	Sedimentaria	37,8	36
Travertine	Sedimentaria	40,9	20

Desde el punto de vista metodológico se realiza también la comparación con los resultados obtenidos por el Laboratorio de Ensayos de Materiales del MTOP, los cuales se corresponden exclusivamente con pétreos obtenidos en el territorio del Uruguay. La base de

datos proporcionada por el MTOP incluye ensayos a partir del año 1954 pero los informes están digitalizados a partir del año 1998.

La tabla 76 presenta los resultados de los 554 ensayos proporcionados por el citado Laboratorio, desde el año 1998 hasta el 2009, y están ordenados de acuerdo al rango de desgaste. En la figura 38 se grafica en función del mencionado rango de desgaste.

**Tabla 76 – Resultados del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, MTOP, en ensayo “Los Ángeles”. (MTOP)**

Año	Rango de desgaste					Total
	0 a 10 %	11 a 20%	21 a 30 %	31 a 40 %	40 % o más	
1998	1	31	26	14	6	78
1999	0	16	41	31	3	91
2000	0	2	12	15	1	30
2001	0	10	21	18	1	50
2002	2	13	28	19	5	67
2003	0	10	33	21	2	66
2004	0	2	40	19	2	63
2005	0	10	19	7	1	37
2006	0	22	3	2	0	27
2007	0	12	2	1	0	15
2008	0	3	14	2	0	19
2009	0	0	5	4	2	11
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>131</b>	<b>244</b>	<b>153</b>	<b>23</b>	<b>554</b>
<b>%</b>	<b>0,5</b>	<b>23,7</b>	<b>44</b>	<b>27,6</b>	<b>4,2</b>	<b>100</b>

El 75,8 % de los pétreos ensayados en este período por el MTOP de Uruguay, que surgen de perforaciones en todo el territorio del país, presenta una pérdida de masa por abrasión e impacto en el ensayo de la máquina “Los Ángeles” mayor que el obtenido con el pétreo en estudio.

## 7 CONCLUSIONES

En este capítulo se analizan las conclusiones del trabajo y se estudia prospectivamente los futuros emprendimientos a realizar.

### 7.1 Introducción

Con el objetivo, de evaluar la viabilidad técnica de la utilización del residuo pétreo de la industria minera del oro para la producción de hormigón, se trabajó en la caracterización de un residuo obtenido en la Minera San Gregorio, de la Localidad de Minas de Corrales en el Departamento de Rivera, República Oriental del Uruguay.

Esta industria minera a la que se hace referencia, es un espacio de desarrollo emergente, generadora de cantidades importantes de residuos pétreos, que si bien no son un recurso escaso, su sola explotación requiere grandes consumos energéticos de combustibles derivados del petróleo.

También debe considerarse que el crecimiento económico del Uruguay, al igual que sucede en los países que dinamizan su sector productivo, implica necesariamente avanzar sobre la explotación de sus recursos naturales y aumentar considerablemente el consumo energético. Esta situación conduce a los involucrados en la industria de la construcción a reflexionar e investigar sobre la potencialidad de reciclar o reutilizar los residuos generados en dicha industria así como también en otras cadenas productivas.

Por otra parte, en el desarrollo de este trabajo, los criterios para el estudio de este residuo pétreo con el fin de ser utilizado en el hormigón fueron los siguientes:

1. Una mirada que disiente con la tradicional y no considera al pétreo en el hormigón como un material inerte, razón por lo cual es imprescindible avanzar sobre el conocimiento del agregado y su incidencia en el compuesto final.
2. Con el aumento del uso de hormigones de mayores resistencias o desempeño adquiere mayor relevancia el estudio de pétreos que se adapten a estos hormigones y su tecnología.

## 7.2 Conclusiones

A partir de la investigación experimental desarrollada en este trabajo se pueden arribar a las siguientes conclusiones:

- a. el pétreo estudiado surge de una roca que ha sufrido un metamorfismo de alto grado, presión y temperatura, no está foliada, es resistente y de acuerdo con el ensayo petrográfico no presenta riesgo en cuanto a su reactividad. Es claro que estas son exigencias básicas para la utilización de un pétreo como agregado grueso en el hormigón, por lo tanto, se puede concluir en función del estudio petrográfico, que este residuo está en condiciones de ser usado para la producción de hormigón estructural, si bien se deberían realizar otros ensayos para descartar en forma definitiva la potencial reactividad del mismo;
- b. el muestreo del pétreo realizado para la investigación se hizo siempre en la propia mina, en el lugar donde fue fracturado por los explosivos, y no se realizaron trituraciones posteriores. El estudio de la forma del pétreo se efectuó con ese muestreo y presentó un coeficiente de forma adecuado, 0,99, lo que permite concluir que el mismo no presenta riesgo de segregación al momento de ser utilizado como agregado en el hormigón;
- c. si se considera la resistencia del hormigón no solamente como una característica de su capacidad mecánica de soportar la incidencia de las cargas sino también, como su capacidad de resistir la acción de agentes patológicos, ambientales naturales o artificiales, se requiere de agregados capaces de aportar en las dos direcciones. En este caso los estudios de densidad y de absorción, ambos vinculados a la porosidad del pétreo, muestran un agregado resistente y durable, con valores de densidad de  $2549 \text{ kg/m}^3$  y de 0,4 % de absorción de agua. Por lo tanto se puede concluir que el pétreo estudiado aportará resistencia propia, permitirá trabajar con relaciones agua/cemento bajas y no incidirá negativamente en la durabilidad del hormigón;
- d. en cuanto a la resistencia mecánica a la compresión y estudio del módulo de elasticidad del pétreo, las características del mismo no permitieron realizar los ensayos de acuerdo a lo establecido en las normas. Esto no invalida el definir condiciones de resistencia y análisis en cuanto a la deformación del pétreo, sobre todo considerando que no es producto de la descomposición natural sino de la

trituration artificial, pero conduce a concluir en la necesidad de ensayar piezas de hormigón producidas con este agregado;

- e. la posibilidad de contar con los valores de un amplio espectro de pétreos, de diferentes lugares del Uruguay, admitió comparar la resistencia a la abrasión del pétreo estudiado. El valor elevado obtenido de resistencia a la abrasión, con una pérdida de masa del 20,211 %, permite concluir que las características de este agregado en cuanto a dureza, compacidad y resistencia son los adecuados para utilizarlo en mezclas de hormigón estructural, para obras de arquitectura e ingeniería civil pero también para obras de ingeniería vial y caminos.

El análisis de los resultados permite concluir que este residuo pétreo tiene condiciones suficientes desde el punto de vista técnico para ser considerado y evaluado en la producción de hormigón, como un potencial sustituto del agregado grueso convencional.

### **7.3 Propuesta para futuros trabajos**

Durante el proceso de desarrollo de este trabajo la industria minera en Uruguay ha continuado su crecimiento y varias de las empresas establecidas en el país, casi todas multinacionales, continúan en sus trabajos de prospección en diferentes puntos del territorio. Esta situación, que agita la discusión social entre quienes apoyan estos emprendimientos y quienes los rechazan, camina al ritmo vertiginoso del crecimiento económico y adelanta un “futuro minero” para el Uruguay.

Esta realidad permite suponer, con meridiana certeza, dos situaciones futuras:

- el volumen de residuos pétreos se incrementará;
- la acumulación de residuos se distribuirá en el territorio.

En este trabajo, el objetivo general se definía desde el interés de estudiar la viabilidad técnica de la utilización del residuo pétreo, de la industria minera del oro, para la producción de hormigón y comenzaba, como es razonable, caracterizando dicho pétreo. Por otro lado, a partir de esta nueva realidad, que amplía el impacto territorial de la minería, se entiende que hay **tres** líneas claras de trabajo ha desarrollar además:

- a. Estudiar el desempeño del hormigón incorporando este residuo pétreo como agregado grueso;

- b. Estudiar y caracterizar los residuos pétreos que surjan como consecuencia de la explotación minera en otras localidades del territorio;
- c. Estudiar la gestión de uso de estos residuos.

En lo que se refiere al estudio del hormigón incorporando este residuo, si bien es un agregado pétreo de condiciones similares a los pétreos naturales, los ensayos deberían realizarse a partir de diferentes dosificaciones que incluyan porcentajes de sustitución diferentes.

En relación a estudiar y caracterizar residuos pétreos de otras localidades, un antecedente importante para estudios de esta característica fue el aportado por el Laboratorio del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, debido a que dicha base de datos se construyó a partir del ensayo de pétreos en todo el territorio. Surge del análisis de ese trabajo que los pétreos presentan características diversas y que su posterior uso, en la industria de la construcción o en otra actividad productiva, dependerá de la identificación de esas particularidades. Una investigación de estas características podría dar como resultado un mapeo de los residuos mineros en Uruguay.

En cuanto a estudiar la gestión de uso de estos residuos y superada la etapa del estudio físico-químico-ambiental del mismo, es imprescindible el análisis de uso de este pétreo. En este sentido se debe incluir en investigaciones futuras la mirada desde las siguientes dimensiones:

- a. *Estudio económico*, el análisis cuantitativo, el impacto económico en la sustitución de un material actualmente suministrado desde otra cadena productiva, la incorporación de un costo diferente de transporte, y demás visiones económicas que puedan incorporarse;
- b. *Estudio productivo*, el transporte desde las minas que generalmente están lejos de los centros urbanos o si se quiere de los espacios de mayor demanda de la industria de la construcción, la existencia de infraestructura que permita el movimiento de estos pétreos, la incorporación de otra actividad productiva en un espacio dedicado exclusivamente a la obtención de un mineral, la necesidad de legislar y establecer normativa concreta con respecto a los residuos pétreos de la minería, entre otras actividades;
- c. *Estudio social*, el impacto en las localidades cercanas a las canteras que actualmente suministran los pétreos, la sustitución de un espacio laboral de incidencia territorial, entre otros estudios sociales posibles.

## Referencia bibliográfica

1. ABUKERSH S., FAIRFIELD C. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials Journal* 25, Elsevier, United Kingdom, 2011.
  2. ADOM-ASAMOAH M., OWUSU AFRIFA R. Investigation on the flexural behavior of reinforced concrete beams using phyllite aggregates from mining waste. *Materials and Design* 32, Journal, Elsevier, Ghana, 2011.
  3. AİTCIN P. C. *High performance Concrete*, E & FN SPON – London, 1998.
  4. AİTCIN P. C., MEHTA K. Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete. *ACI Materials journal*, 87 (2), Marzo-abril, 103-7, 1990.
  5. AİTCIN P. C., MINDESS S. *Sustainability of concrete. Modern Concrete Technology*. Spon Press, London 2011.
  6. ALEXANDER M., MINDESS S. *Aggregates in concrete. Modern Concrete Technology*. Taylor & Francis, 2005.
  7. AL-ORAIMI S., TAHA R., HASSAN H. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and building materials* 20, journal, Elsevier, Oman, 2006.
  8. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *AASHTO M 80 – 87: Standard specifications for coarse aggregate for Portland cement concrete*. Washington, 2003.
  9. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Aggregates for Concrete*. Developed by ACI Committee E – 701. *ACI Education Bulletin E1 – 07*, 2007.
  10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Developed by ACI Committee 318, 2011.
  11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM C 33 - 03: Standard specifications for Concrete Aggregates*. West Conshohocken, 2003.
- \_\_\_\_\_. *ASTM C 117 – 03: Standard test method for Materials finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. West Conshohocken, 2003.
- \_\_\_\_\_. *ASTM C 127 – 01: Standard test method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of coarse aggregate*. West Conshohocken, 2001.
- \_\_\_\_\_. *ASTM C 128 – 01: Standard test method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of fine aggregate*. West Conshohocken, 2001.
- \_\_\_\_\_. *ASTM C 136 – 01: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate*. West Conshohocken, 2001.

\_\_\_\_\_. ASTM C 170 – 90: Standard test method for compressive strength of dimension stone. West Conshohocken, 1990.

\_\_\_\_\_. ASTM C 535 – 03: Standard test method for resistance to degradation of large size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, 2003.

\_\_\_\_\_. ASTM D 2938 – 95: Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. West Conshohocken, 1995.

\_\_\_\_\_. ASTM D 4543 – 01: Standard practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. West Conshohocken, 2001.

12. ANCAP. Lo que nos mueve es todo un país. Montevideo 2006.

13. AQUINO C., MASUMI I., HIROAKI M., MAKI M., TAKAHISA O. The effect of limestone aggregate on concrete properties. Construction and building materials journal 24, Elsevier, Japan, 2010.

14. ARASAN S., AKBULUT S., SAMET HASILOGLU A. The relationship between the Fractal Dimension and shape properties of particles. Journal of civil engineering, 15, Korean Society of Civil Engineers, Springer, Turkey, 2011.

15. ASAMOTO S., ISHIDA T. y MAEKAWA K. Investigations into volumetric stability of aggregates and shrinkage of concrete as a composite. Journal of advanced Concrete Technology, Vol. 6, Japan Concrete Institute, 2008.

16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. NBR 7211: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

17. BARATA, M. S. Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém a través do emprego de adições de sílica ativa e meta caulim. Dissertação de mestrado. Programa de pós graduação de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

18. BASHEER L., BASHEER P., LONG A. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. Construction and Building Materials 19, Journal, Elsevier, United Kingdom, 2005.

19. BATIC O., SOTA J. Reacciones deletéreas internas. Durabilidad del hormigón estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001.

20. BEAUCOUR A., XING Z., HEBERT R., NOUMOWE A., LEDESERT B. - Influence of the nature of aggregates on the behavior of concrete subjected to elevated temperature. Cement and Concrete Research journal 41, Elsevier, Francia, 2011.

21. BEGLIARDO H., et al. Una propuesta de reciclado de hormigón para Rafaela. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rafaela. (Argentina) Departamento de Ingeniería, Laboratorio, 2008.

22. BELL, F. G. Engineering geology. Elsevier, 2007
23. BROWN D., TIA M., LIU Y. Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete. Final Report. Department of Civil & Coastal Engineering. University of Florida, 2005.
24. BUCHER K., GRAPES R. Petrogenesis of metamorphic rocks. Germany – Korea, Springer, 2011.
25. CALDARONE M. High strength concrete. A practical guide. Taylor & Francis, 2009.
26. CALVO PÉREZ, et al. Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química. Publicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
27. CAVALCANTE ROCHA J., CHERIAF M. Aproveitamento de resíduos na construção. Coleção HABITARE, Volume quatro. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, 2003.
28. CAVALCANTE ROCHA J., JOHN V. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Introdução. Coleção HABITARE, Volume quatro. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, 2003.
29. CHAN, J. L. et al. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. Ingeniería 7-2, 2003.
30. COLETANEA HABITARE. Volume quatro. Utilização de resíduos na Construção habitacional. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC 2003.
31. COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. NM 28/94: Agregados – Verificación de la reactividad potencial mediante método químico. Montevideo, 1995.
- \_\_\_\_. NM 54/98: Agregados para hormigones – Exámen petrográfico. Montevideo, 1996.
- \_\_\_\_. NM 64/98: Agregado grueso – Determinación de absorción de água. Montevideo, 1996.
- \_\_\_\_. NM 27/2000: Agregados – Reducción de la muestra de campo para ensayo de Laboratorio. Montevideo, 2000.
- \_\_\_\_. NM 51/2002: Agregado grueso – Ensayo de abrasión “Los Ángeles”. Montevideo, 2004.
- \_\_\_\_. NM 45/2006: Agregados – Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. Montevideo, 2006.
- \_\_\_\_. NM 26/2009: Agregados – Muestreo. Montevideo, 2009.
- \_\_\_\_. NM 53/2009: Agregado grueso – Determinación de la densidad, de la densidad aparente y de la absorción de água. Montevideo, 2009.
32. DAUDEVILLE L., VU HONG X., MALECOT Y. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. Construction and Building Materials journal 25, Elsevier, Francia, 2011.
33. DELFIN ALCALÁ, DURÁN DE BAZÚA. La Microbiótica presente en un desecho minero, como opción de restauración de jales, Re. AIDIS 3(2), 2008.

34. DESHPANDE Y., HILLER J. Pore characterization of manufactured aggregates: recycled concrete aggregates and lightweight aggregates. *Materials and Structures* 45, Journal RILEM, United States of America, 2012.
35. DHIR R., PAINE K., DYER T., TANG A. Value-added recycling of domestic, industrial and construction waste arising as concrete aggregate. *Concrete Engineering International*, vol. 8, Nº 1, 2004.
36. DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG (DIN) DIN 4226: Gesteinskornungen fur Beton und Mortel. Berlin, 2004
37. DOBROWOLSKI J. *Concrete construction handbook*. Fourth Edition. McGraw Hill, 2000.
38. EDWARDS B. *Guía básica de la sostenibilidad*. Segunda edición. Gustavo Gili, 2009.
39. EL-ARISS B. Effect of reducing coarse aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials* 20, Journal, Elsevier, United Arab Emirates, 2006.
40. ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE (UNI). UNI 8520 – 18: *Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione dei coefficienti di forma e di appiattimento*. Milano, 1984.
41. ERDEM S., DAWSON A., HOWARD N. Impact load-induced micro-structural damage and micro-structure associated mechanical response of concrete made with different surface roughness and porosity aggregates. *Cement and Concrete Research*, Journal, Elsevier, United Kingdom, 2011.
42. FICEM (Federación Interamericana del Cemento). *Informe Estadístico*, 2011.
43. FOWLER D., QUIROGA P. The effects of aggregate characteristics on the performance of Portland cement concrete. *International Center for Aggregates research*. University of Texas, 2004.
44. FORMOSO C., DOS SANTOS A., POWELL J. *Evaluation of current use of production management principles in construction practice*. University of California, Berkeley, CA, USA, 1999.
45. FORSTER, S. Soundness, deleterious substances, and coatings. *Significance of tests and properties of concrete & Concrete – Making materials*. ASTM International – USA, 2006.
46. FRAZAO, E. B. *Tecnologia de rochas na construção civil*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – São Paulo, 2002.
47. FUENTES OLIVARES, F. *Residuos mineros en la legislación chilena*. Facultad de ciencias jurídicas, Universidad de Atacama. <http://www.derecho.uda.cl/Documentos>, Chile, 2006.
48. FUJIWARA T. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete. *Journal of advanced concrete technology*, Vol. 6, Japan concrete institute, 2007.

49. GASCÓN CERVANTES, M. Condicionantes medioambientales, sociales y económicos de la reutilización y reciclado de residuos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
50. GENCEL O., OZEL C., KOKSAL F., ERDOGMUS E., MARTINEZ G., BROSTOW W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Cleaner production* 21, Journal, Elsevier, 2012.
51. GILBERT R.I., RANZI G. Time-dependent behavior of concrete structures. Spon Press, London 2011.
52. GIRARDI F., DI MAGGIO R. Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: Effect of the type of aggregate. *Cement & Concrete Composites* 33, Journal, Elsevier, Italia, 2011.
53. GOLESTANIFAR M., AHANGARI K. Decision on Coarse Aggregates Borrow Sources of Concrete. *Journal of Civil Engineering* 15, Korean Society of Civil Engineers, Springer, Iran, 2011.
54. GONILHO PEREIRA C., CASTRO GOMEZ J., PEREIRA DE OLIVEIRA L. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. *Construction and Building Materials* 23, Journal, Elsevier, Portugal, 2009.
55. GONZÁLEZ B., MARTINEZ F., EIRAS J., SEARA S. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures journal* DOI 10.1617/s11527-011-9736-7, RILEM, 2011.
56. GONZÁLEZ CORROCHANO B., ALONSO AZCARATE J., RODAS M., BARRENECHEA J.F., LUQUE F.J. Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates manufactured from mining and industrial wastes. *Construction and Building Materials* 25, Journal, Elsevier, España, 2011.
57. GONZÁLEZ, LLAMAS, JUAN, GUERRA. Ensayos de hormigones fabricados con polvo de corcho. *Materiales de Construcción* Vol. 57, 286, 83-90 – Instituto Eduardo Torroja, 2007.
58. GOSO AGUILAR, C. Manejo de residuos sólidos en minería. Curso de Geología Ambiental. Facultad de Ciencias, Universidad de la República Oriental del Uruguay. Montevideo, 2008.
59. GRUPO DE PROYECTO EUROPEO PARA EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (GPE). Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para Hormigón y Mortero – ANFAH. Directrices europeas para el hormigón autocompactante, 2005.
60. GUO Z., SHI X. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures. Elsevier inc. United States, 2011.
61. HEBHOUB H., AOUN H., BELACHIA M., HOUARI H., GHORBEL E. Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and building materials journal* 25, Elsevier, France, 2011.

62. HELENE P., PEREIRA F. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección. Red Rehabilitar. CYTED Sub programa XV, 2003.
63. HU J., WANG K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. Construction and Building Materials journal 25, Elsevier, United States, 2011.
64. INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES (IRAM). IRAM 1649: Exámen petrográfico de agregados para hormigón. Buenos Aires, 2008.
65. INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (UNIT). UNIT 1029/99: Agregados gruesos – Determinación del coeficiente de forma. Montevideo, 1999.
- \_\_\_\_\_. UNIT 1050/2001: Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado. Montevideo, 2001.
66. JIMENEZ MONTOYA, GARCÍA MESSEGUER, MORÁN CABRÉ. Hormigón Armado. 14ª. Edición basada en la EHE, ajustada al código modelo y al eurocódigo, 2000.
67. JOHN V., ANGULO S. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. Coleção HABITARE, Volume quatro. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, 2003.
68. KAHRAMAN S., GUNAYDIN O., FENER M. The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. Rock mechanics and mining Sciences 42, Science direct journal, Turquía, 2005.
69. KASSIM T.A., SIMONEIT B., WILLIAMSON K. Recycling solid wastes as road construction materials: an environmentally sustainable approach. Springer, United States, 2005.
70. KETT, I. Engineered concrete. Mix Designa and Test Methods. CRC Press – Florida, 2000.
71. KHALEEL O., AL-MISHHADANI S., RAZAK H. The effect of coarse aggregate on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete (SCC). Procedia Engineering 14. Science Direct, Journal, Elsevier, Malaysia, 2011.
72. KILIC A., ATIS C., TEYMEN A., KARAHAN O., OZCAN F., BILIM C., OZDEMIR M. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. Cement & Concrete Composites 30, Science Direct journal, Turquía, 2008.
73. KLARIC M. Fisuración y ataques físicos al hormigón. Universidad de Buenos Aires (UBA). Durabilidad del hormigón estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001.
74. KODJO A., RIVARD P., COHEN F., GALLIAS J. Impact of the alkali-silica reaction products on slow dynamics behavior of concrete. Cement and concrete research journal 41, Elsevier, Canada-France, 2011.
75. KOKUBU, K. et al. Committee Report: JCI-TC054A. Technical Committee on Aggregate Qualities and Effective use of poor Quality Aggregates.

76. KOSMATKA S., KERKHOFF B., PANARESE W. Design and Control of Concrete Mixtures. Fourteenth Edition. Portland Cement Association - Skokie, 2003.
77. KOSMATKA S., KERKHOFF B., PANARESE W., TANESI J. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Primera edición. Portland Cement Association – Edición mexicana, 2004.
78. KOVLER K., ROUSELL N. Properties of fresh and hardened concrete. Cement and concrete research journal, 41, Elsevier, Israel-France, 2011.
79. Ley N° 17.283 – De conformidad con lo establecido en el Artículo N° 47 de la Constitución de la República, que refiere a la protección del medio ambiente, Poder Legislativo, República Oriental del Uruguay, 28 de Noviembre de 2000.
80. LIMA SOUZA, P. S. Verificação de influencia do uso de meta caulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. Tese de doutorado. Programa de pos graduação de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
81. LOVATO P., POSSAN E., COITINHO DAL MOLIN D., MASUERO A. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. Construction and Building Materials 26, Journal, Elsevier, Brasil, 2012.
82. MAIER P., DURHAM S. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. Construction and Building Materials 29, Journal, Elsevier, United States of America, 2012.
83. MALHOTRA V.M. Making concrete greener with fly ash. Concrete international journal, vol. 21, number 5, 1999.
84. MEDDA S., ZITOUNI S., BELAABES S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. Construction and Building Materials 24, Journal Elsevier, Japon, 2010.
85. MEDINA C., SANCHES DE ROJAS M., FRÍAS M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. Cement & Concrete Composites 34, Journal, Elsevier, España, 2012.
86. MEDICI M.E., BENEGAS O.A., UÑAC R.O., VIDALES A.M. The effect of blending granular aggregates of different origin on the strength of concrete. Physica A journal, Elsevier, Argentina, 2012.
87. MEHTA K., MONTEIRO P. Concreto: microestrutura, propiedades e materiais, IBRACON – Sao Paulo, 2008.
88. MEININGER R. Degradation resistance, strength, and related properties of aggregates. Significance of tests and properties of concrete & Concrete – Making materials. ASTM International – USA, 2006.
89. MINDESS S. Concrete construction engineering Handbook. Concrete constituent materials, 2008.
90. MONY LEVY S. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. Tese de doutorado. Programa de pos graduação de engenharia civil. Universidade de São Paulo, 2001.

91. MORALES M., OYHANTCABAL, STEIN K., SIEGESMUND S. Black dimensional stone: geology, technical properties and deposit characterization of the dolerites from Uruguay. Open access at Springerlink.com, 2010.
92. MORÁN DEL POZO J.M., VALDÉS J., AGUADO P., GUERRA M., MEDINA C. Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. Informes de la Construcción Vol. 63, Instituto Eduardo Torroja, España, 2011.
93. NAWY E., NASSIF H. Long term effects and serviceability. Concrete construction engineering Handbook, 2008.
94. NEVILLE A. Properties of concrete. Fourth and final edition. Standards updated to 2002. Longman Scientific & Technical, 2004.
95. NEWMAN J., SENG CHOO B. Advanced Concrete Technology. Constituent Materials. ELSEVIER Butterworth Heinemann, 2003.
96. OYHANTCABAL, P. Descripción petrográfica de tres muestras, en énfasis en su aptitud para uso como agregado grueso en hormigones, Facultad de Ciencias, Universidad de la República Oriental del Uruguay, 2010.
97. PARISEAU, W. Design analysis in rocks mechanics. Taylor & Francis, United States of America, 2007.
98. PENG S., ZHANG J. Engineering geology for underground rocks. Springer – Berlin, 2007.
99. PEREIRA GONÇALVEZ, J. Utilização do resíduo de corte de granito como adição para produção de concretos. Dissertação de mestrado. Programa de pos graduação de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
100. PLAZA DIEZ, O. Geología aplicada a la Ingeniería civil. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de obras públicas, 2010.
101. POLLMANN O., MEYER S., BLUMENSTEIN O., VAN RENSBURG L. Mine tailings: Waste or valuable resource? Waste Biomass Valor, Journal, Springer, South Africa, 2010.
102. Propuesta técnica para la reglamentación de la gestión integral de residuos sólidos industriales, agroindustriales y de servicios. Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), 2003.
103. RICHARDSON M. Fundamentals of durable reinforced concrete. Spon Press – London, 2002.
104. ROCCO C., ELICES M. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. Engineering Fracture Mechanics 76, Journal, Elsevier, Argentina - España, 2009.
105. ROMERO A., MEDINA R., PUENTE L. (et al). Los residuos sólidos mineros del proceso de flotación de minerales en la cuenca del río Santa – Áncash, 2007.
106. SANCHEZ, L. E. Manejo de residuos sólidos en minería, Sao Paulo, 1995.

107. SANCHEZ DE JUAN, M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2004.
108. SHEN L.Y., TAM W. Y. Implementation of environmental management in the Honk Kong Construction industry, *International journal of Project Management*, 20 (7), 2002.
109. SIEGESMUND S., SNETHLAGE R. *Stone in Architecture. Properties, Durability*. 4<sup>th</sup> Edition. – Berlín, 2011.
110. SILVEIRA LOVATO, P. Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. Dissertação de mestrado. Programa de pos graduação de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
111. SINCHE GONZÁLEZ, M. Evaluación del comportamiento ambiental de los contaminantes en residuos sólidos mineros metalúrgicos por el método de extracciones secuenciales y aplicación de modelos de movilidad y transporte. *Revista del Instituto de Investigación Vol. 10 N° 19*, Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalúrgica y Ciencias Geográficas, Perú, 2007.
112. SINGH G., SIDDIQUE R. Abrasión resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand. *Construction and building materials* 28, Journal, Elsevier, India, 2012.
113. SMITH M., COLLIS L. *Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. Geological Society – London, 2001.
114. SMITH M. *Stone: building stone, rock fill and armourstone in construction*. Geological Society – London, 1999.
115. SPENCER R. *Opportunities for recycling C&D Debris*, 2001.
116. TAYEB B., ABDEKBAKI B., MADANI B., MOHAMED L. Effect of Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Sand Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal*, Argelia, 2011.
117. TOKYAY M. Effects of Aggregate Type on the Mechanical properties of high strength concrete. *Teknik Dergi Vol. 9, N°2*, 1998.
118. TUBINO G., REJANE M. Estudio sobre a potencialidade de uso das escorias de aciaria como adição ao concreto. Tese de doutorado. Programa de pos graduação de engenharia de minas, metalúrgica e materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
119. UGUR I., DEMIRDAG S., YAVUZ H. Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. *Materials characterization* 61, Science Direct journal, Turquía, 2010.
120. VALDEZ P., BARRAGAN B., GIRBES I., SHUTTLEWORTH, COCKBURN A. - Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes. *Materiales de Construcción* .Vol. 61. Instituto Eduardo Torroja - Madrid, 2011.

121. VANDERLEY J., SERGIO CIRELLI. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. Coleção HABITARE, Volume quatro. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC, 2003.
122. VARALLA, R. No hagamos escombros – Intentemos la calidad. Editorial Saga & Asociados Ltda. Montevideo, 1997.
123. VIANA, A. Tolerancia experimental de las especies vegetales al boro en Argentina, Instituto de Ecología y Ambiente Humano, CIUNSA, Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2008.
124. VIEIRA J., CORREIA J., DE BRITO J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. Cement and Concrete Research Journal 41, Elsevier, Portugal, 2011.
125. VISHAL V., PRADHAN S., SINGH T. Tensile strength of rock under elevated temperatures. Geotechnical and Geological Engineering 29, Journal, Springer, India, 2011.
126. VU X. H., DAUDEVILLE L., MALECOT Y. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. Construction and building materials 25 journal, Elsevier, France, 2012.
127. WINNER, L. La ballena y el reactor. Editorial Gedisa, Barcelona, 2008.
128. YELLISHETTY M., KARPE V., REDDY E., SUBHASH K., RANJITH P. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. Resources, Conservation and Recycling 52, Journal, Elsevier, India y Australia, 2008.
129. YZENAS, J. Bulk density, relative density, pore structure, absorption and surface moisture. Significance of tests and properties of concrete & Concrete – Making materials. ASTM International – USA, 2006.
130. ZHANG, L. Engineering properties of rocks. Elsevier Geo-engineering book series Editor: John A. Hudson. Volume 4, 2006.
131. ZONGJIN, L. – Advanced concrete technology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

---

## **ANEXO 1**

---

En este anexo se incorporan las tablas con los valores obtenidos en la realización del ensayo de abrasión, Los Ángeles, en el Laboratorio de ensayo de materiales del MTOP, en pétreos obtenidos en todo el territorio del Uruguay, en el período transcurrido entre el año 1998 y el año 2009.

Año 1998	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
Jun.	Pedregullo lavado y clasificado	134	B	40
Jun.	Piedra triturada	136	A	17,7
Jun.	Piedra triturada, 5 a 14 mm	140	C	27
Jun.	Agregado pétreo 4 o 5	141	B	41,9
Jun.	Agregado pétreo 4 o 5 (2da.muestra)	154	B	28,6
Jun.	Agregado pétreo - grueso	142	B	40,4
Jun.	Agregado pétreo - intermedio	143	A	39,4
Jul.	Gravilla para hormigón	149	B	40,6
Jul.	Piedra granítica de La Paz	156	B	33,5
Jul.	Agregado intermedio	170	C	36,8
Jul.	Agregado grueso	171	B	28,7
Jul.	Arena - Punta Chaparro	177		
Jul.	Arena -	178		
Jul.	Piedra triturada -	172	C	30,2
Jul.	Gravilla -	179	B	33,3
Jul.	Gravilla -	180	B	17
Jul.	Gravilla -	181	B	26,8
Jul.	Piedra triturada -	173	C	30,2
Jul.	Gravilla -	182	B	33,3
Jul.	Gravilla -	183	B	17
Jul.	Arena -	184		
Jul.	Arena -	178		
Ago.	Balasto de vía - Km 146	198	F	17,6
Ago.	Balasto de vía - Km 155	199	F	17,4
Ago.	Balasto de vía - Km 166	200	F	11,3
Ago.	Balasto de vía - Km 167	201	F	13,6
Ago.	Balasto de vía - Km 188	202	F	11,0
Ago.	Balasto de vía - Km 196	203	F	12,2
Ago.	Balasto de vía - Km 206	204	F	18,0
Ago.	Balasto de vía - Km 216	205	F	14,8
Ago.	Balasto de vía - Km 226	206	F	11,6
set.	Agregado pétreo - 5 a 20 mm	220	B	23
set.	Agregado pétreo - 14 a 20 mm	221		
set.	Agregado pétreo - 5 a 14 mm	222		
set.	Agregado pétreo - 5 a 10 mm	223	C	28

Año 1998	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
set.	Balasto de vía - km 324 P2	249	F	15,9
set.	Balasto de vía - km 231 P1	250	F	10,6
set.	Balasto de vía - km 242 P2	251	F	12
set.	Balasto de vía - km 253 P3	252	F	9,9
set.	Balasto de vía - km 264 P4	253	F	10,6
set.	Balasto de vía - km 274 P4	254	F	
set.	Balasto de vía - km 297 P7	255	F	12,5
set.	Balasto de vía - km 285 P5	256	F	11,9
set.	Balasto de vía - km 308 P8	257	F	11,5
set.	Balasto de vía - km 319 P9	258	F	13
set.	Agregado pétreo tipo 4 ó 5 mm	288	B	32,9
set.	Agregado pétreo tipo 4 ó 5 mm	289	B	23,2
set.	Agregado pétreo tipo 4 ó 5 mm	290	B-C	20,5
set.	Agregado pétreo tipo 4 ó 5 mm		B-C	26,1
set.	Agregado fino	315	C	25,7
set.	Agregado intermedio -	316	D	44,2
set.	Piedra triturada - granito gris	329	F	18,7
set.	Piedra triturada - granito rosado, gris	330 a	F	24,8
set.	Piedra triturada - granito rosado, gris	330 b	F	25,1
set.	Piedra triturada - granito rosado, gris	330 c	F	20,3
oct.	Piedra basáltica - Ruta 30	340 a	A	18
oct.	Piedra basáltica - Ruta 30	340 b	A	21,5
oct.	Agregado grueso - Ruta 108	342	B	41,2
oct.	Agregado pétreo - intermedio	343	C	23,0
oct.	Muestra nº 2 - granito triturado	357	C	34,0
oct.	Muestra nº 1 - granito triturado	358		
oct.	Muestra nº 3 - granito triturado	359		
oct.	Muestra nº 4 - granito triturado	360		
oct.	Muestra nº 5 - granito triturado	361		
oct.	Muestra nº 6 - arena de río	362		
oct.	Granito triturado	412		
nov.	Granito triturado - intermedio	366 a	B-C	23
nov.	Granito triturado - grueso	366 b	B	20,2
nov.	Agregado pétreo triturado, 4 a 5 mm	367	B-C	23
nov.	Agregado pétreo, 10 a 20 mm	378	B	27,8

Año 1998	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
nov.	Agregado pétreo, 10 a 20 mm	382	C	23,7
nov.	Agregado pétreo, 10 a 20 mm	384	B	22,8
nov.	Agregado pétreo, 10 a 20 mm	386	B	25,7
dic.	Granito triturado	412	C	35,5
dic.	Granito rosado, 4 a 5 mm	435	B	29,5
dic.	Granito gris triturado, 5 a 15 mm	436	B	26,8
dic.	Piedra gris -	433	B	31,6
dic.	Agregado pétreo, triturado grueso	474	B	28,9
dic.	Agregado pétreo, triturado intermedio	475	C	32
dic.	Agregado pétreo -	483	C	27,8
dic.	Petreo triturado, 1/4" a 5/8"	496	B	31,7
dic.	Petreo triturado, 5/8" a 7/8"	497	B	30,8
Ago	Balasto de vía - Rivera km 146		F	17,6
Ago	Km 155 -	199	F	17,4
Ago	Km 166 -	200	F	11,3
Ago	Km 167 -	201	F	13,6
Ago	Km 188 -	202	F	11
Ago	Km 196 -	203	F	12,2
Ago	Km 206 -	204	F	18
Ago	Km 216 -	205	F	14,8
Ago	Km 226 -	206	F	11,6

Año 1999	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
Ene	Agregado pétreo -	2	B	36,9
Feb	Agregado pétreo	10	D	28
Mar	Granito triturado	22	B-C	25,4
Mar	Polvo de trituración	23		
Mar	Agregado pétreo, 5 a 10 mm	24	C	22,8
Mar	Agregado pétreo, 5 a 14 mm	25	B	29,8
Feb	Agregado pétreo intermedio	28	B	31,9
Feb	Agregado pétreo grueso	29	B	32,3
Feb	Piedra basáltica	32	B	17,2
Mar	Agregado pétreo - 10 a 20 mm	37	B	24,4
Mar	Agregado pétreo	38	B	28,8
Mar	Agregado pétreo	39		
Mar	Agregado pétreo	40	B	23,5
Mar	Gravillín 5 a 10 mm -	48	D	31
Mar	Triturado grueso	52	B	31,6
Mar	Triturado intermedio	53	C	35,58
Mar	Agregado grueso	54	B	16,2
Feb	Agr. Grueso - basalto triturado	58	B	14,2
abr.	Agregado pétreo, 6 a 14 mm	64	A	19,1
abr.	Agregado pétreo, 14 a 20 mm	66	A	19,1
Mar	Piedra triturada	94	B	30,5
Abr.	Agregado pétreo -	100	B	37,8
Abr.	Agregado pétreo	101	B	28,1
Abr.	Agregado pétreo - 5 a 14 mm	109	B	29,8
Abr.	Agregado pétreo - 5 a 10 mm	110	C	22,8
Abr.	Piedra granítica triturada	114	G	12,6
Abr.	Piedra partida - Cantera R7 km 175	117	B	28,1
May	Yacimiento Cerro Pelado	134	C	29,8
May	Piedra triturada -	124	C	33,0
May	Agregado pétreo - 5 a 10 mm	138	C	22,8
May	gravilla Paso de los Hornos	126	B	32,6
May	Granito triturado -	125	B-C	19,1
May	Gravilla gruesa	126	B	32,6
abr.	Gravilla	126	B	32,6
abr.	Granito triturado -	125	B-C	19,1
abr.	Granito triturado, 5 a 14 mm	103	B	29,8

Año 1999	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
abr.	Granito triturado, 5 a 14 mm	104	C	22,8
abr.	Agregado pétreo	133	B	35,5
abr.	Yacimiento Cerro Pelado	134	C	29,8
abr.	Piedra triturada -	124	C	33
abr.	Piedra triturada 5 a 10 mm	139	C	22,8
abr.	piedra triturada 5 a 14 mm	140	B	29,8
abr.	gravilla Paso de los Hornos	126	B	32,6
jun.	agregado triturado grueso	151		29
jul.	Canteras Montevideo - 14 a 20 mm	175	B	26
jul.	Canteras Montevideo - 10 a 20 mm	180	B	24
jul.	Agregado - tamaño 14 a 20 mm	176	B	19
jul.	Agregado - tamaño 14 a 30 mm	177		
jul.	Agregado pétreo	178	A-B	21
jul.	Piedra tipo 2 - 3	179	A-B	44,25
set.	Piedra triturada 5 a 14 mm -	272	C	32,2
set.	Gravilla tipo 4 - 5 Cantera R1 km 166	275	B	34,1
set.	Granito triturado 5 a 10 mm	276	C	34,3
set.	Granito triturado 5 a 10 mm -	278	C	37,8
set.	Piedra triturada 5 a 15 mm -	279	B	28,2
set.	Gravilla tipo 4 o 5 -	280	B	39,5
oct.	Gravilla natural -	301	D	28,6
oct.	Piedra triturada - 5 a 10 mm	303	C	30,2
oct.	Piedra triturada - 5 a 10 mm	312	C	30,2
oct.	Agregado pétreo	316	B	32,0
dic.	Agregado pétreo - 1/4" a 1/2"	404	C	28,9
dic.	Agregado pétreo - 1/2" a 1 1/2"	405	C	28,0
dic.	Agregado pétreo - 1/2" a 1"	406	B	26,0
dic.	Agregado pétreo - 5 a 14 mm	407	C	23,0
dic.	Piedra lavada -	360	A	59,2
dic.	Agregado pétreo -	372	B	21,5
dic.	Agregado pétreo	389	B	21,1
dic.	Piedra triturada, 6 a 20 mm	424	B	29,5
dic.	Agregado pétreo	207	C	28
dic.	Agregado pétreo	204	A	19,6
dic.	Agregado pétreo	205	B	22
dic.	Agregado pétreo	206	C	26,7

Año 1999	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
dic.	Agregado pétreo	210	A	19,8
dic.	Agregado pétreo	207	C	28
dic.	Agregado pétreo	211		14,5
dic.	Agregado pétreo	213		15,9
dic.	Agregado pétreo	214		16
dic.	Agregado pétreo	215		18,4
dic.	Agregado pétreo	239	B	19,6
dic.	Agregado pétreo	240	C	28,2
dic.	Agregado pétreo	241	D	25
dic.	Agregado Triturado grueso > 10mm	244	A	31,1
dic.	Agregado Triturado medio 5-10mm	245	C	30,1
dic.	Agregado Triturado fino 0-5mm	246	D	33,7
dic.	Agregado pétreo	265	A	26,4
dic.	Agregado pétreo	266	B	34,4
dic.	Agregado fino, canto rodado	293	C	33,8
dic.	Agre. intermedio, canto rodado tritur.	295	B	28
dic.	Agregado grueso	322	B	40
dic.	Agregado intermedio	323	C	38,6
dic.	Agregado pétreo	355	B	22,3
dic.	Agregado pétreo	356	B	24,2
oct.	Granito triaturado, 5 a 10 mm	303	C	31,5
oct.	Gravilla tipo, 4 a 5 mm	320	C	30,2

Año 2000	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
set.	Agregado fino para tratamiento	308	B	14,1
jun.	Triturado grueso	196	A	16,7
oct.	Piedra triturada - granito gris	368	C	24,5
Feb	Agregado pétreo	20	C	26,7
Feb	Agregado pétreo		A	27,5
Mar	Agregado pétreo - 5 a 10 mm	86	C	27,9
Mar	Agregado pétreo - 5 a 10 mm	88	C	27,9
Feb	Granito triturado 6-20 mm	59	B	28,5
Mar	Granito Triturado 14 -20mm.	102	B	28,7
Mar	Piedra triturada	65	B	28,8
Mar	Granito Triturado 5-14mm.	101	B	29,2
Mar	Granito Triturado 10 - 20 mm-	27	B	29,9
Mar	Agregado pétreo - 10 a 20 mm	87	B	29,9
Mar	Agregado pétreo - 10 a 20 mm	89	B	29,9
jun.	Triturado 14 a 20 mm	245	B	30,4
Ene	Agregado grueso	14		30,6
Mar.	Granito Triturado 5 - 10 mm-	26	C	31,8
Feb	Granito Triturado 5 - 14 mm-	29	B	32
Oct.	Gravillín lavado - granito colorado	369	D	33,3
Ene	Agregado intermedio - id.	15		33,9
Feb	Agregado pétreo, tipo 4 o 5	49	B	34,8
Mar	Agregado grueso, Cant. R 26	57	A	35,3
Feb	Granito triturado 6-20 mm	47	B	36,3
Feb	Granito Triturado 5-14mm.	50	C	37,9
Feb	Granito Triturado 14 -20mm.	51	B	38,6
May	Material de trituración -	137	C	39,1
Mar	Agregado Intermedio	56	C	39,5
Feb	Agregado intermedio	53	C	39,8
Mar	Agregado intermedio, Cant. R 26	58	C	39,9
Feb	Agregado grueso	52	B	41,5

Año 2001	Material	Nº muestra	Desgaste	
			Gradación	% pérdida
Ene	Piedra granítica triturada	17	A	28
Ene	Piedra granítica triturada	18	B	32
Mar	Basáltico	52	A	24,5
Abr.	Piedra basáltica triturada	93	B	12,4
jul.	Piedra triturada basáltica	242	E	13,4
jul.	Agregado grueso	270	B	25,3
jul.	Piedra triturada - granito gris	275	C	32,2
jul.	Granito colorado -	276	C	35,8
Ago	Agregado pétreo granítico	358	C	37,8
set.	Agregado pétreo. Piedra caliza gris.	364	A	61,1
set.	Agregado pétreo basáltico, triturado.	373	C	18,5
oct.	Granito gris triturado.	447	C	34,1
oct.	Granito gris triturado.	449	B	30,4
oct.	Basalto triturado	450	B	13,7
oct.	Granito gris triturado	451	C	32,7
Nov	Granito triturado, 5 a 20 mm	499	B	29,8
Nov	Granito colorado, 5 a 20 mm	500	B	39,1
dic.	Piedra triturada	528	C	38,8
jul.	Agregado pétreo	181	A	17,9
jul.	Agregado pétreo, Cant. Ruta 12	182	B	27,6
set.	Agregado pétreo, Cant. Ruta 8	423	A	28,9
oct.	Agregado pétreo	434	A	32,6
Ago	Basalto triturado grueso	349	B	23,6
Ago	Basalto triturado intermedio	350	C	26,0
Mar	Agregado grueso	28	B	37,3
Mar	Agregado grueso	53	B	36,0
Mar	Agregado grueso	80	B	34,4
Mar	Agregado pétreo	35	B	22,8
Mar	Gravilla 5-10 mm	50	C	28,7
Mar	Gravilla Basáltica	74	B	11,6
Mar	Triturado grueso para carpeta	42	B	13,3
Mar	Triturado intermedio para carpeta	43	C	17,7
Mar	Triturado grueso para base negra	45	B	17,7
Mar	Triturado intermedio para base negra	46	C	22,4
mar	Triturado para base estabilizada	48	A	22,2
abr.	Agregado petreo	114	F	24





