



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA

Evaluación del mecanismo de expansión de rocas dolomíticas de la zona de Valcheta (provincia de Río Negro, Argentina) empleadas como agregado en morteros y hormigones de cemento pórtland

Mg. Ing. Carlos Alberto Milanesi

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2018

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería durante el período comprendido entre el 01/04/14 y el 03/09/18, bajo la dirección de la Dra. Silvina Andrea Marfil (Director) y el Ing. Luis Pascual Traversa (2^{do} Director).

Mg. Ing. Carlos A. Milanesi



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el 23/04/2019, mereciendo la calificación de 10 (diez), Sobresaliente.

A mi vieja, la Martuchi

Contenido

Resumen,	IX
Abstract,	X
Agradecimientos,	XI
Introducción,	XII
• Importancia del tema,	XII
• Alcance del estudio y metodología,	XIV
• Objetivos generales y específicos,	XV
• Contenido de la tesis,	XV
Definiciones y nomenclatura,	XVIII
• Definiciones,	XVIII
• Nomenclatura,	XX
Índice de figuras,	XXIII
Índice de tablas,	XXXIII
Índice de anexos,	XXXVI

CAPÍTULO 1

Mecanismos de expansión del hormigón,	1
----------------------------------------------	---

CAPÍTULO 2

Expansión del hormigón debida a la RAS,	5
2.1. Generalidades,	5
2.2. Síntomas de la reacción expansiva,	6
2.2.1. Manifestaciones externas,	6
2.2.2. Manifestaciones internas,	9
2.3. Factores que influyen en la expansión del hormigón,	10
2.3.1. Contenido de álcalis del hormigón,	10
2.3.2. Efecto “pessimum”,	13
2.3.3. Grado de reactividad del agregado,	17
2.3.4. Humedad y temperatura de curado,	18
2.3.5. Influencia del tamaño de la partícula del agregado,	22
2.3.6. Empleo de inhibidores,	24
2.3.6.1. Uso de adiciones minerales activas,	24

2.3.6.2. Uso de aditivos químicos a base de litio,	26
2.3.7. Otros factores que influyen sobre la RAS o sus efectos,	27
2.4. Minerales potencialmente reactivos frente a la RAS,	29
2.5. Química de la reacción y mecanismos de expansión,	31
2.5.1. Química de la reacción,	31
2.5.2. Mecanismos de expansión,	34
2.5.3. El rol del calcio en la RAS,	37
2.6. Métodos disponibles para identificar los agregados reactivos,	38
2.6.1. Generalidades sobre los métodos de ensayo,	38
2.6.2. Ensayos sobre muestras de roca,	40
2.6.2.1. Examen petrográfico,	40
2.6.2.2. Método químico (IRAM 1650),	41
2.6.2.3. Método de la celda osmótica,	43
2.6.3. Ensayos sobre mortero,	45
2.6.3.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637),	46
2.6.3.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674),	48
2.6.3.3. Método de evaluación RILEM (AAR-2),	51
2.6.4. Ensayos sobre hormigón,	52
2.6.4.1. Método del prisma de hormigón,	52
2.6.4.2. Método acelerado del prisma de hormigón,	56
2.6.4.3. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec,	58
2.7. Métodos de inhibición de la RAS,	60

CAPÍTULO 3

Expansión del hormigón debida a la RAC,	62
3.1. Generalidades,	62
3.2. Síntomas de la reacción expansiva,	63
3.2.1. Fisuras,	63
3.2.2. Bordes de reacción,	66
3.2.3. Aureolas de carbonatación,	69
3.3. Factores que influyen en la expansión del hormigón,	70
3.3.1. Contenido de álcalis del hormigón,	70
3.3.2. Grado de reactividad de la roca,	73
3.3.3. Humedad y temperatura de curado,	73
3.3.4. Tamaño máximo del agregado grueso,	74
3.3.5. Empleo de inhibidores,	76

3.4. Características de los carbonatos potencialmente reactivos,	78
3.5. Química de la reacción,	82
3.6. Mecanismos de expansión,	84
3.6.1. Las primeras hipótesis,	85
3.6.1.1. Hipótesis de Hadley,	85
3.6.1.2. Hipótesis de Swenson y Guillott,	86
3.6.2. Hipótesis de Tang, Liu y Han,	87
3.6.3. Hipótesis de Katayama,	90
3.7. Métodos disponibles para identificar los agregados reactivos,	92
3.7.1. Ensayos sobre muestras de roca,	92
3.7.1.1. Examen petrográfico,	92
3.7.1.2. Método químico canadiense,	93
3.7.1.3. Método de expansión del cilindro de roca (ASTM C586),	95
3.7.2. Ensayos sobre mortero,	97
3.7.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637),	97
3.7.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674),	99
3.7.2.3. Método de evaluación RILEM (AAR-2 vs. AAR-5),	99
3.7.3. Ensayos sobre hormigón,	101
3.7.3.1. Método del prisma de hormigón,	101
3.7.3.2. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec,	102
3.8. Consideraciones acerca de los métodos de control de la RAC,	102

CAPÍTULO 4

Expansión del agregado debida a otros factores,	104
4.1. Agregados constituidos por arcillas expansivas,	104
4.2. Expansión debida a la presencia de óxidos,	107
4.3. Expansión debida a la presencia de sulfatos,	107
4.4. Expansión debida a la presencia de sulfuros,	108

CAPÍTULO 5

Estudios previos realizados sobre la dolomía de Valcheta,	112
5.1. Antecedentes consultados,	112
5.2. Evaluación de la reactividad alcalina potencial del agregado,	113
5.2.1. Ensayos sobre muestras de roca,	113

5.2.1.1. Examen petrográfico,	113
5.2.1.2. Método químico canadiense,	114
5.2.1.3. Método de expansión del cilindro de roca (ASTM C586),	116
5.2.1.4. Método de la celda osmótica,	121
5.2.1.5. Ensayo de inmersión en etilenglicol,	124
5.2.1.6. Medición de la expansión de la roca en agua y en etilenglicol,	124
5.2.2. Ensayos sobre mortero,	126
5.2.2.1. Método de la barra de mortero (IRAM 1637),	126
5.2.2.2. Método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674),	129
5.2.2.3. Método de evaluación RILEM (AAR-2 vs. AAR-5),	130
5.2.3. Ensayos sobre hormigón,	132
5.2.3.1. Ensayo acelerado de Larbi-Hudec,	132
5.2.3.2. Método del prisma de hormigón,	139
5.3. Análisis de la influencia de algunos factores sobre la expansión del mortero u hormigón,	141
5.3.1. Contenido de álcalis del hormigón,	141
5.3.2. Temperatura de curado,	141
5.3.3. Tamaño máximo del agregado grueso,	143
5.3.4. Uso de adiciones minerales activas,	144
5.3.5. Uso de aditivos químicos,	146
5.4. Conclusiones que surgen del análisis de los estudios previos,	151

CAPÍTULO 6

Materiales y métodos,	155
6.1. Materiales,	155
6.1.1. Cemento pórtland,	155
6.1.2. Agregados dolomíticos,	155
6.1.3. Agregado fino,	156
6.1.4. Aditivo químico,	156
6.1.5. Agua destilada,	156
6.2. Métodos de ensayo implementados,	156
6.2.1. Examen petrográfico de la roca,	156
6.2.2. Ensayos de expansión de testigos de roca,	157
6.2.3. Ensayo de expansión de prismas de hormigón,	159
6.2.4. Estudio de la relación “expansión vs. reacción”,	160
6.2.4.1. Difractometría de rayos X (DRX),	160

6.2.4.2. Análisis químicos,	160
6.2.4.3. Porosimetría de mercurio,	161
6.2.5. Estudio de las manifestaciones de reacción en el hormigón,	161

CAPÍTULO 7

Resultados y discusión,	162
7.1. Características físicas y mineralógicas de las muestras de roca,	162
7.2. Ensayos de expansión de testigos de roca,	166
7.2.1. Análisis de algunos factores que afectan la expansión,	166
7.2.2. Cambios en la porosidad de la roca por el ataque alcalino	179
7.3. Ensayos de expansión de prismas de hormigón,	181
7.4. Relación entre “expansión” y “dedolomitización”,	197
7.4.1. Evaluación del avance de la RAC mediante DRX,	198
7.4.2. Análisis de la composición química de la solución de contacto,	200
7.5. Análisis de las posibles causas de expansión de la roca,	207

CAPÍTULO 8

Mecanismo de expansión de la dolomía de Valcheta,	211
8.1. Mecanismo osmótico en el hormigón,	211
8.1.1. Proceso osmótico: Generalidades,	211
8.1.2. La RAC y el fenómeno osmótico como mecanismo de expansión,	213
8.1.2.1. Mecanismo osmótico aplicado al ensayo ASTM C586,	213
8.1.2.2. Mecanismo osmótico aplicado al mortero u hormigón,	217

CAPÍTULO 9

Consideraciones finales,	218
9.1. ¿Por qué expande la dolomía de Valcheta?,	218
9.1.1. Causas de la expansión,	218
9.1.2. El modelo osmótico como mecanismo de expansión,	220
9.2. El modelo osmótico frente a los interrogantes clásicos de la RAC,	223
9.2.1. ¿Es necesaria la dedolomitización para que exista expansión?,	223
9.2.2. ¿Por qué la dedolomitización no siempre produce expansión?,	224
9.2.3. ¿Es necesario que el agregado posea una textura “característica” determinada para que sea potencialmente expansivo debido a la RAC?,	224
9.2.4. ¿Por qué la expansión aumenta con el tamaño del agregado?,	225

9.2.5. ¿Por qué las AMA no resultan efectivas para inhibir la RAC?,	225
9.2.6. ¿Cuál es el papel del hidróxido de calcio en la RAC?,	227
9.2.7. ¿Por qué es más común observar fisuras en la pasta que en el agregado dolomítico?,	227
9.2.8. ¿Por qué expanden la magnesita y la calcita?,	230
9.2.9. ¿Por qué expande la roca dolomítica de Kingston (Canadá)?,	230
9.2.10. ¿Existe alguna forma de inhibir la RAC?,	231
9.3. Propuestas para investigaciones futuras,	231

CAPÍTULO 10

Referencias,	233
Anexo A: Resultados de los ensayos de DRX,	266
Anexo B: Carta de Chris A. Rogers	293

Resumen

La reacción álcali-carbonato (RAC) es una reacción química inusual que afecta la durabilidad del hormigón y constituye un tema de debate actual. En la zona de Valcheta (Río Negro) se ha identificado una dolomía arcillosa, de grano fino, que reacciona con los álcalis del hormigón, mediante un mecanismo expansivo muy similar al de la RAC. Como resultado del ataque alcalino, esta roca experimenta una clara reacción química de dedolomitización (formación de calcita y brucita) en la que el gel silíceo se observa sólo de manera esporádica y en muy pequeñas cantidades, lo que hace difícil relacionar las expansiones observadas con la reacción álcali-sílice (RAS). Una de las características más interesantes de esta roca es que las adiciones minerales activas clásicas y los aditivos químicos a base de litio no son capaces de mitigar la expansión del hormigón. A fin de profundizar el conocimiento sobre el comportamiento tan singular de esta dolomía, se realizaron diversos estudios (basados en el método ASTM C586) para analizar la influencia de distintos factores (tipo de catión, porosidad de la roca, etc.) sobre la respuesta expansiva y los cambios mineralógicos experimentados por la roca, cuando ésta es sumergida en distintas soluciones alcalinas. En base a los resultados de estas experiencias y la información disponible de los estudios realizados por el autor durante la década del 90, se analizan las causas más probables de la expansión de la dolomía de Valcheta y se propone un modelo teórico, basado en el fenómeno osmótico, para explicar el comportamiento expansivo de esta roca. El modelo planteado describe de manera adecuada el efecto de los principales factores que intervienen en el proceso de expansión del hormigón y permite dar respuesta a los interrogantes clásicos de la RAC: ¿por qué la dedolomitización no siempre produce expansión?, ¿por qué es tan difícil inhibir la RAC?, ¿por qué la expansión del hormigón aumenta con el tamaño máximo del agregado?, entre otros.

Abstract

Alkali-carbonate reaction (ACR) is an unusual reaction that affects concrete durability and constitutes an issue of much controversy between researchers and concrete technologists. In Valcheta (Río Negro, Argentine), there is an argillaceous fine-grained dolostone that reacts expansively with concrete alkalis following a mechanism similar to ACR. Because of the alkali attack, this rock shows a conspicuous chemical reaction (dedolomitization), producing calcite and brucite, with almost no siliceous gel, making difficult to explain how the expansions could be related to alkali-silica reaction (ASR). One of the most interesting characteristic of this rock is that supplementary cementing materials and lithium-based compounds were not capable to mitigate the concrete expansion. A study (based on the ASTM C586 method) was conducted to evaluate the influence of various factors (the nature of the alkali cation of the solution, rock porosity, etc.) on the expansive behavior of the rock and its mineralogical changes, when it is immersed in different alkali solutions. Based on this study and the available information obtained by the author during the 90's, the most probable causes of the expansion of Valcheta dolostone are analysed and a theoretical model based on the osmotic phenomenon is proposed to explain the expansive behaviour of this rock. The proposed model adequately describes the effect of the main factors affecting the concrete expansion and allows answering the classic questions related to ACR: Why does dedolomitization not always produce expansion? Why is it so difficult to inhibit the expansion caused by ACR?, Why does concrete expansion increase with the maximum size of the aggregate?, and so on.