



Universidade de Brasília  
Instituto de Geociências

*Estudo da Reação Álcali-Agregado em  
Rochas Carbonáticas*

Dissertação de Mestrado n° 209

**Ana Livia Zeitune de Paula Silveira**

ORIENTADORA: **Dr<sup>a</sup>. Edi Mendes Guimarães (UnB)**

CO-ORIENTADORA: **Dr<sup>a</sup>. Sara Lais Rahal Lenharo (UnB)**

EXAMINADORES: **Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira (UnB)**

**Dr<sup>a</sup>. Nicole Pagan Hasparyk (FURNAS)**

BRASÍLIA,  
JULHO, 2006

---

## Índice

Índice Geral	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	XII
Agradecimentos	XIV
Resumo	XVI
Abstract	XVII

### Índice Geral

I - Introdução	01
1.1. – Objetivos e Justificativas	04
II – Revisão Bibliográfica	05
2.1 – Reação Álcali-Agregado (RAA)	07
2.2 – Casos Mencionados na História	11
2.3 – Reação Álcali-Carbonato	13
III – Materiais	18
3.1 – Agregados – Rochas Carbonáticas	18
3.2 – Testemunhos de Concreto da Barragem	20
3.3 – Compósitos de Cimento	21
3.3.1 – Barras de Argamassa e Prismas de Concreto	22
IV – Métodos	25
4.1 – Análise Petrográfica	28
4.2 – Análise por Difração de Raios-X	29
4.3 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura	31
4.4 – Ensaio de Reatividade – Método Acelerado (ASTM C 1260/01)	33
4.5 – Método dos Prismas de Concreto – Avaliação da Reação Álcali-Carbonato (ASTM C 1105/95)	35
4.6 – Reatividade Potencial – Rochas Carbonáticas – NBR 10340/88 e ASTM C – 586/92 (Método do Cilindro de Rocha)	38
4.7 – Verificação da Variação de Comprimento (Expansão Residual)	39

---

4.8 – Ensaio Químico Canadense – AAR 23.26-A	41
4.9 – Resistência à Compressão e Módulo de Deformação	42
4.10 – Compressão Uniaxial	44
V.I – Resultados	46
5.1 – Petrografia	46
5.1.1 – Agregados – Rochas Carbonáticas	50
5.1.2 – Concreto da Barragem	59
5.1.3 – Barras de Argamassa (ASTM C 1260)	66
5.1.4 – Prismas de Concreto	71
5.2 – Difração de Raios-X	85
5.2.1 – Agregados – Rochas Carbonáticas	85
5.2.2 – Compósitos de Cimento	87
5.3 – Análise Química	91
5.3.1 – Agregados – Rochas Carbonáticas	91
5.3.2 – Concreto da Barragem	93
5.3.3 – Prismas de Concreto	93
5.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura	94
5.4.1 – Produtos da Reação Álcali-Carbonato	101
5.5 – Ensaio de Expansão	106
5.5.1 – Reatividade Potencial – Método Acelerado (ASTMC 1260/01)	106
5.5.2 – Reatividade Potencial – Rochas Carbonáticas (Método do Cilindro de Rocha (ASTMC 586, NBR 10340/88))	107
5.5.3 – Método dos Prismas de Concreto - (ASTM C 1105/95)	109
5.5.4 – Verificação da Variação de Comprimento (Expansão Residual)	111
5.5.5 – Método Químico Canadense (AAR 23.26-A)	112
5.6 – Propriedades Mecânicas e Elásticas dos Concretos	113
5.7 – Resistência à Compressão Uniaxial	118
VI - Discussão dos Resultados	119
VII – Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas	138
VIII – Referências Bibliográficas	143

**Anexo I – Difratoogramas das rochas *in natura***

---

**Anexo II – Comparação entre os difratogramas dos minitestemunhos de rocha, após ensaio de reatividade com os das rochas *in natura* (amostra total)**

**Anexo III – Difratogramas dos testemunhos de concreto da barragem estudada**

**Anexo IV – Difratogramas dos prismas de concreto após ensaio de reatividade**

**Anexo V – Difratograma do produto neoformado encontrado no contato agregado/argamassa do prisma de concreto 289P, após ensaio de reatividade**

## **Índice de Figuras**

<b>Figura 2.1. Vista lateral do pilar do vertedouro - sentido montante à jusante - Barragem de Furnas</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2.2. Detalhe do topo de um dos pilares do vertedouro com fissuração tipo mapa e deslocamento nas bordas. Barragem de Porto Colômbia</b>	<b>11</b>
<b>Figura 3.1. Gráfico de reatividade potencial – Método Acelerado (ASTM C 1260/01) da areia lavada utilizada para confecção dos prismas</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4.1. Organograma dos ensaios e análises realizados nas rochas <i>in natura</i></b>	<b>26</b>
<b>Figura 4.2. Organograma dos ensaios e análises realizados nos compósitos de cimento</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4.3. Foto do conjunto de tanques onde ficam estocadas as barras de argamassa</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4.4. Foto da vista Interna do Tanque onde ficam estocadas as barras de argamassa</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4.5. Foto do momento da retirada da barra de argamassa para ser medida</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4.6. Foto do equipamento de leitura da variação de comprimento das barras. Detalhe do relógio digital</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4.7. Foto dos agregados carbonáticos 285, 286, 290 e 291, para ilustrar a coloração diferenciada</b>	<b>36</b>
<b>Figura 4.8. Foto da montagem dos extensômetros nas formas prismáticas</b>	<b>37</b>

---

Figura 4.9. Foto do posicionamento dos extensômetros à meia altura da forma com concreto	37
Figura 4.10. Foto da moldagem e proteção dos corpos-de-prova com plástico até o transporte para a câmara úmida	37
Figura 4.11. Momento da leitura nos extensômetros dos prismas de concreto moldados	38
Figura 4.12. Momento da leitura (de referência, nos CPs imersos em água) nos extensômetros dos prismas de concreto moldados	38
Figura 4.13. Ponte de Leitura (nos extensômetros) - Kyowa modelo SMD- 10A	38
Figura 4.14. Momento da leitura (nos CPs estocados em câmara úmida) nos extensômetros das vigas moldadas com a amostra 284	38
Figura 4.15. Foto do minitestemunho extraído da rocha carbonática e com suas extremidades torneadas para serem medidas pelo relógio digital	39
Figura 4.16. Foto das amostras imersas em recipiente com NaOH a 1 N	39
Figura 4.17. Foto do momento da retirada da amostra do recipiente para a medição/leitura	39
Figura 4.18. Foto do equipamento de leitura e detalhe do relógio digital, com a amostra	39
Figura 4.19. Foto dos testemunhos de concreto e dispositivo de medição com barra Invar	40
Figura 4.20. Foto do relógio digital utilizado nas medições de variação de comprimento	40
Figura 4.21. Foto do momento da medição do comprimento de referência	40
Figura 4.22. Foto ilustrando o ponto de referência (alinhamento do pino fixado no CP) das leituras	40
Figura 4.23. Foto do pino de aço inoxidável fixado do topo e base dos testemunhos	41
Figura 4.24. Foto do momento da medição do comprimento de referência	41
Figura 4.25. Foto dos corpos-de-prova estocados imersos em água à temperatura de 40°C	41
Figura 4.26. Foto do momento da leitura no (corpo-de-prova estocado imerso em água à temperatura de 40°C)	41
Figura 4.27 – Gráfico referente a razão CaO/MgO versus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> utilizado pela norma AAR 23.26-A	42

---

<b>Figura 4.28 – Ensaio de módulo de elasticidade com extensômetro elétrico</b>	<b>44</b>
<b>Figura 4.29 – Ensaio de módulo de elasticidade com extensômetro mecânico</b>	<b>44</b>
<b>Figura 4.30 – Foto do sistema Servo-Controlado para ensaios de compressão</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4.31 – Foto em detalhe da montagem do corpo-de-prova</b>	<b>45</b>
<b>Figuras 5.1 A e B. Testemunhos da amostra 284, observando-se a coloração cinza, lâminas mais escuras intercaladas com camadas cinza médio; planos milimétricos correspondem a microfraturas preenchidas por carbonato</b>	<b>47</b>
<b>Figuras 5.2 A e B. Testemunhos da amostra 285, observando-se a coloração cinza, com zonas mais escuras (mosqueadas), fraturas milimétricas, preenchidas por carbonato, cortando a rocha em várias direções</b>	<b>47</b>
<b>Figuras 5.3 A e B. Testemunhos da amostra 286, observando-se a coloração cinza clara, estilólitos (E) cortam a laminação incipiente</b>	<b>48</b>
<b>Figuras 5.4 A e B. Testemunhos da amostra 289. observando-se a coloração cinza claro a escuro, lâminas mais escuras intercaladas com camadas cinza claro; fraturas milimétricas preenchidas por nódulos de chert e/ou carbonato</b>	<b>48</b>
<b>Figuras 5.5 A e B. Testemunhos da amostra 290. observando-se a coloração rosa claro a vermelha, acamamento centimétrico a decimétrico com níveis microfossilíferos com 1cm de espessura; nódulos milimétricos a centimétricos, de material silicoso (chert/cacedônia); fraturas submilimétricas preenchidas por carbonatos</b>	<b>49</b>
<b>Figuras 5.6 A e B. Testemunhos da amostra 291, observando-se a coloração esbranquiçada, nódulos de sílica e fraturas submilimétricas</b>	<b>49</b>
<b>Figura 5.7. Fotomicrografia da rocha 284. Nota-se o alinhamento dos cristais segundo uma direção preferencial na rocha. No campo superior da foto, nota-se fratura preenchida com material opaco. Imagem por microscopia ótica. A) nX (nicóis cruzados); B) n// (nicóis paralelos); C) nX, detalhe da fotomicrografia A; e D) n//, detalhe da fotomicrografia B</b>	<b>53</b>
<b>Figura 5.8. Fotomicrografia da rocha 285. Nota-se mosaicos de calcita juntamente com cristais poiquilíticos maiores, substituem o material escuro (restos da rocha original). Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da fotomicrografia A; e D) n//, detalhe da fotomicrografia B</b>	<b>54</b>
<b>Figura 5.9. Fotomicrografia da rocha 286. Notam-se cristais muito finos de calcita, estilólitos e uma fratura semipreenchida por calcita. Imagem por</b>	

- 
- microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da fotomicrografia A; e D) n//, detalhe da fotomicrografia B ————— 55
- Figura 5.10.** Fotomicrografia da rocha 289. Porção com cristais muito finos de calcita bordejando agregados de mosaicos de cristais maiores do mesmo mineral, opacos disseminados e veio de calcita que corta a lâmina. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da porção mais fina; e D) n//, detalhe da porção mais fina ————— 57
- Figura 5.11.** Fotomicrografia da rocha 290. Rocha de granulação muito fina e restos de concha. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da A; e D) n//, detalhe da B ————— 58
- Figura 5.12.** Fotomicrografia da rocha 291. Rocha de granulação muito fina, opacos disseminados, veio de material opaco que corta a lâmina e restos de conchas preenchidas por calcita e chert. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da porção mais fina; e D) n//, detalhe da porção mais fina ————— 59
- Figura 5.13.** Fotomicrografia da amostra 335D, mostra que na maioria a aderência do contato agregado/argamassa é boa. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n//. ————— 61
- Figura 5.14.** Fotomicrografia da amostra 335A, mostra a pouca aderência e perda de material do contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n// ————— 62
- Figura 5.15.** Fotomicrografia da amostra 335A, presença de película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n// ————— 62
- Figura 5.16.** Fotografia do testemunho de concreto 335A. Nota-se microfissuras que cortam o agregado e a argamassa. O agregado graúdo é semelhante à rocha 286, notam-se os estilólitos e a granulação muito fina ————— 63
- Figura 5.17.** Fotomicrografia da amostra 335D, presença de película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX e D) n// ————— 64
- Figura 5.18.** Fotografia do testemunho de concreto 335A. Notam-se microfissuras que cortam o agregado e a argamassa. O agregado graúdo é semelhante à rocha 286, notam-se os estilólitos e a granulação muito fina ————— 64

- 
- Figura 5.19.** Fotografia do testemunho de concreto 340A. Nota-se microfissuras (F) que cortam o agregado e a argamassa, película (P) branca no contato agregado/argamassa. Observam-se estilólitos (E) e a granulação muito fina ————— 65
- Figura 5.20.** Fotomicrografia da amostra 340 A, película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX e D) n// ————— 66
- Figura 5.21.** Fotografia das barras de argamassa, após ensaio de reatividade. A) Barra de argamassa 285B e B) Barra de argamassa 286B, notam-se bordas de coloração mais escura em volta dos poros ————— 67
- Figura 5.22.** Fotografia da barras de argamassa 291B, após ensaio de reatividade. Detalhe das fissuras na barra de argamassa ————— 67
- Figura 5.23.** Fotografias da barra de argamassa 286B, após ensaio de reatividade. Notam-se material vítreo amarelado (1) e dos poros preenchidos pelo material branco (2). Imagem por lupa. A) aumento 6,4x; B) aumento 16x ————— 68
- Figura 5.24.** Fotomicrografia da amostra 285 B, presença de produtos de hidratação no poro e boa adesão no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n// ————— 68
- Figura 5.25.** Fotomicrografia da amostra 289 B, nota-se borda (B) de reação (diferença na coloração), pouca adesão e perda de material no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n// ————— 69
- Figura 5.26.** Fotomicrografia das amostras 290 B e 291 B, nota-se fissuras e poros preenchidos. Imagem por microscopia ótica. A) Amostra 290 B, nX; B) Amostra 290 B, n//; C) Amostra 291 B, nX; D) Amostra 291 B, n// ————— 70
- Figura 5.27.** Fotomicrografia da amostra 284 P, nota-se fragmentos da rocha 284 (1), agregado miúdo (2) poros e boa aderência no contato fissuras e poros parcialmente preenchidos (3). Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//. C) Fotografia do prisma de concreto 285 P, vista da faixa de material depositado no contato agregado e argamassa, provável carbonato. Imagem por lupa. Aumento de 6,4x ————— 72
- Figura 5.28.** Fotomicrografia da amostra 284 P, nota-se poros parcialmente preenchidos e raras fissuras. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n// ————— 72

- 
- Figura 5.29.** Fotomicrografias da amostra 286 P: notam-se fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa; em algumas dessas fissuras encontram-se películas. Notam-se mudança na coloração dos estilólitos (E), em relação da rocha *in natura*. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX; D) n//; E) nX; F) n//; G) nX; H) n//; I) nX; J) n// ————— 74
- Figura 5.30.** Fotografias do prisma de concreto 289 P, após ensaio de reatividade. Vista do material depositado tanto no contato agregado/argamassa, como na argamassa ou cortando o agregado. O material transparente a translúcido e cristalino é composto por carbonatos (C). Fase de aspecto pulverulento, cor branca e translúcido (A), provavelmente, argilomineral. Imagem por lupa. A) aumento 16x; B) aumento 6,4x; C) aumento de 6,4x; D) e F) aumento 16x; G) aumento 6,4x; H) e I) aumento 16x; J) aumento 6,4x; L) e M) aumento 16x ————— 77
- Figura 5.31.** Fotomicrografias da amostra 289 P, notam-se fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa, em algumas dessas fissuras encontram-se películas ou filmes. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n// ————— 78
- Figura 5.32.** Fotografias do prisma de concreto 290 P, após ensaio de reatividade. Vista dos bolsões provável carbonatos (C), além de bordas de reação (B). Imagem por lupa. A) aumento 6,4x; B) aumento 16x; C) a F) aumento de 6,4x ————— 79
- Figura 5.33.** Fotomicrografias da amostra 290 P, notam-se fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa, em algumas dessas fissuras encontram-se películas ou filmes. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX; e D) n// ————— 80
- Figura 5.34.** Fotomicrografias da amostra 290 P, nota-se fissura que corta o agregado e propaga para a argamassa, nessas fissuras encontram-se películas ou filmes. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n// ————— 81
- Figura 5.35.** Fotografias do prisma de concreto 291 P, após ensaio de reatividade. Material cristalino esbranquiçado, possível carbonato (C), bordas de reação (B) e poros preenchidos (P). Imagem por lupa. A) e B) aumento 6,4x; C) aumento 16x; D) e E) aumento de 6,4x; F) aumento 16x ————— 82
- Figura 5.36.** Fotomicrografias da amostra 291 P, fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa, nessas fissuras encontram-se películas ou filmes, poros preenchidos (P), bordas (B) de reação, principalmente no agregado,

---

evidenciadas através da diferença de coloração. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//	84
Figura 5.37. Gráficos a partir dos elementos químicos que constituem as fases minerais das amostras. A) MgO versus CaO; B) SiO <sub>2</sub> versus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; C) SiO <sub>2</sub> versus MgO; e D) CaO+MgO versus PF	92
Figura 5.38. Micrografia da amostra 291B. Contato agregado (Ag) / argamassa (Arg) pouco aderido e fissuras. Imagem por MEV	94
Figura 5.39. Micrografia da amostra 290B. Produtos de hidratação (CH, C-S-H) na pasta de cimento. Imagem por MEV	94
Figura 5.40. Micrografia da amostra 291B. Poro com gel maciço, gretado e no centro, textura botroidal. Imagem por MEV	94
Figura 5.41. Microanálise, realizada no ponto indicado com X, do gel da Figura 5.40, constituído de sílica, cálcio e sódio	94
Figura 5.42. Micrografia da amostra 290B. Gel maciço ao longo da pasta de cimento. Imagem por MEV	94
Figura 5.43. Micrografia da amostra 290B. Poro com produto neoformado de cristais entrelaçados. Imagem por MEV	94
Figura 5.44. Micrografia da amostra 290B. Poro com produto neoformado de forma de acículas. Imagem por MEV	97
Figura 5.45. Micrografia da amostra 291B. Poro com produto neoformado de rendado. Imagem por MEV	97
Figura 5.46. Micrografia da amostra 290B. Gel maciço no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV	97
Figura 5.47. Micrografia da amostra 285B. Cristais hexagonais de CH no poro. Imagem por MEV	97
Figura 5.48. Micrografia da amostra 286P. Boa aderência no contato agregado (Ag)/Argamassa (Arg). Imagem por MEV	98
Figura 5.49. Micrografia da amostra 286P. Produtos de hidratação do cimento CH e C-S-H. Imagem por MEV	98
Figura 5.50. Micrografia da amostra 290P. Falta de aderência no contato agregado (Ag)/argamassa (Arg). Imagem por MEV	98
Figura 5.51. Micrografia da amostra 291P. Etringita na argamassa. Imagem por MEV	99

---

Figura 5.52. Microanálise da etringita (ponto marcado com X) referente à Figura 5.51	99
Figura 5.53. Micrografia da amostra 340A. Falta de aderência no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV	99
Figura 5.54. Micrografia da amostra 340A. Argamassa coesa. Imagem por MEV	99
Figura 5.55. Micrografia da amostra 335A. Gel maciço nos poros. Imagem por MEV	100
Figura 5.56. Micrografia da amostra 340A. Produtos de hidratação do cimento CH e C-S-H. Imagem por MEV	100
Figura 5.57. Micrografia da amostra 335A. Etringita na argamassa. Imagem por MEV	100
Figura 5.58. Microanálise da etringita (ponto marcado com X) referente à Figura 5.57	100
Figura 5.59. Micrografia da amostra 335A. Etringita na argamassa. Imagem por MEV	101
Figura 5.60. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas sobre o agregado. Imagem por MEV	101
Figura 5.61. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas na argamassa. Imagem por MEV	101
Figura 5.62. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas em forma de rosáceas, na argamassa. Imagem por MEV	101
Figura 5.63. Micrografia da amostra 289 P. Filme de material acicular (S), seguido de material maciço (C), entre a argamassa (Ar) e o agregado (Ag). Imagem por MEV	102
Figura 5.64. Ampliação da Figura 5.63	102
Figura 5.65. Micrografia da amostra 289 P. Detalhe do material acicular (S). Imagem por MEV	103
Figura 5.66. Microanálise realizada nas acículas da Figura 5.65	103
Figura 5.67. Micrografia da amostra 289 P. Material maciço (C), com clivagens e cristalina. Imagem por MEV	103
Figura 5.68. Microanálise realizada na faixa maciça da Figura 5.67	103
Figura 5.69. Micrografia da amostra 289 P. Vista geral do material neoformado depositado sobre a argamassa. Imagem por MEV	104

---

Figura 5.70. Micrografia da amostra 289 P. Ampliação da Figura 5.69. Imagem por MEV	104
Figura 5.71. Micrografia da amostra 289 P. Nota-se os nódulos (N) de composição cálcica e as acículas (A) sílica/magnesianas. Imagem por MEV	104
Figura 5.72. Micrografia da amostra 289 P. Vista geral do material neoformado depositado sobre a argamassa. Imagem por MEV	104
Figura 5.73. Micrografia da amostra 289 P. Material neoformado depositado no contato do agregado. Imagem por MEV	104
Figura 5.74. Micrografia da amostra 289 P. Material acicular sobre a argamassa. Imagem por MEV	104
Figura 5.75. Micrografia da amostra 289 P. Material maciço no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV	105
Figura 5.76. Micrografia da amostra 289 P. Ampliação material maciço, nota-se a deposição do material acicular na sua borda. Imagem por MEV	105
Figura 5.77. Micrografia da amostra 291 P. Material maciço (C), calcita, no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV	105
Figura 5.78. Micrografia da amostra 291 P. Ampliação da Figura 5.76. Imagem por MEV	105
Figura 5.79. Micrografia da amostra 291 P. Ampliação da faixa de calcita. Imagem por MEV	106
Figura 5.80. Microanálise realizada na faixa maciça da Figura 5.79	106
Figura 5.81. Gráfico de reatividade potencial – Método ASTM C 1260/01	107
Figura 5.82. Gráfico de reatividade potencial para rochas carbonáticas – Método do cilindro de rocha	108
Figura 5.83. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 284 (Dolarenito muito fino)	110
Figura 5.84. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 285 (Calcário Recristalizado)	110
Figura 5.85. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 286 (Calcilutito)	110
Figura 5.86. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 289 (Calcilutito)	110

---

Figura 5.87. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 290 (Bio-calculutito dolomítico)	110
Figura 5.88. Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 291 (Bio-calculutito dolomítico )	110
Figura 5.89. Gráfico de expansão do testemunho 335B	112
Figura 5.90. Gráfico de expansão do testemunho 335C	112
Figura 5.91. Gráfico de expansão dos testemunhos 340 B e C, da ombreira esquerda	112
Figura 5.92. Gráfico referente a razão CaO:MgO versus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> utilizado pela norma AAR 23 26 A, com os resultados das análises químicas, das rochas <i>in natura</i> , inseridos	113
Figura 5.93. Gráfico referente ao ensaio de resistência à compressão dos prismas de concreto	114
Figura 5.94. Gráfico referente ao ensaio de módulo de elasticidade dos prismas de concreto	115
Figura 5.95. Gráfico do comparativo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de concreto e com dos testemunhos de concreto da barragem	116
Figura 5.96. Gráfico do comparativo dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos prismas de concreto com dos testemunhos de concreto da barragem	117

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Proveniência, classificação litológica (segundo Folk, 1962; Tucker, 1982) e unidade litoestratigráfica das amostras	18
Tabela 3.2. Registros dos testemunhos de concreto, ensaios e análises	20
Tabela 3.3. Caracterização dos cimentos utilizados para confecção de barras e prismas	21
Tabela 3.4. Registros dos materiais cimentícios, ensaios e análises realizadas	23
Tabela 3.5. Caracterização dos agregados miúdo (areia) e graúdo (rochas carbonáticas)	23
Tabela 3.6. Estudo de dosagem para a moldagem dos prismas de concreto	24
Tabela 4.1. Ensaios e análises utilizados nas rochas	25

---

<b>Tabela 4.2. Ensaio e análises realizados nos cimentos</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 4.3. Ensaio de deformabilidade e resistência realizados nos concretos</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 5.1. Materiais e as respectivas análises e ensaios</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 5.2. Classificação e descrição macroscópica das rochas carbonáticas</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 5.3. Descrição macroscópica dos testemunhos da barragem</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 5.4. Constituintes maiores, menores e traços das rochas carbonáticas estudadas</b>	<b>86</b>
<b>Tabela 5.5. Constituintes dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto da barragem</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 5.6. Constituintes das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto da barragem</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 5.7. Constituintes dos agregados extraídos dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade potencial</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 5.8. Constituintes das argamassas (amostra total) extraídas dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade potencial</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 5.9. Análise química das rochas carbonáticas estudadas</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 5.10. Análise química dos testemunhos de concreto</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 5.11. Resultados das análises química dos prismas de concreto</b>	<b>94</b>
<b>Tabela 5.12. Resultados dos ensaios de reatividade (ASTMC 1260/01 e ASTM C-586, NBR 10340/88), juntamente com o tipo litológico das rochas estudadas</b>	<b>109</b>
<b>Tabela 5.13. Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade realizados nos prismas de concretos moldados</b>	<b>114</b>
<b>Tabela 5.14. Apresentação dos resultados de resistência e módulo de elasticidade dos testemunhos de concretos extraídos da barragem</b>	<b>116</b>
<b>Tabela 5.15. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial</b>	<b>118</b>
<b>Tabela 6.1. Tabela conclusiva sobre os ensaios de RAA realizados</b>	<b>136</b>

---

*Aos meus queridos pais, Wilson de Paula Silveira e Maria Salima Z. Silveira.  
Com todo meu amor, respeito e gratidão.*

---

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada aconteceria. Aos meus queridos pais que me deram a base de tudo e tanto me orgulho das suas histórias de vida. Ao meu querido avô Jamilo, que foi um grande exemplo de homem. Aos meus irmãos, sobrinhos e sogros que me incentivaram e acreditaram no meu potencial. Ao meu querido William que esteve ao meu lado, me apoiando com carinho e paciência, nos meus momentos de carência, e também, tanto contribuiu tecnicamente nas análises químicas, pois é um profissional extraordinário. Aos meus queridos amigos e companheiros, que tanto me incentivaram e apoiaram para a realização desse mestrado, diretamente e indiretamente, em especial aos geólogos Heloisa Helena, Celene, Livia Fernanda, Camila e Tunico, aos técnicos Fernanda, Renato Batista, Tizzo, Aristides e Welton, aos engenheiros Sérgio Fleury, Renato Cabral, Wanderson, Elysio, Armelin, Taylor, Francesca, Luciana, Nicole, Marco Aurélio e Alexandre dos Santos. Agradeço em especial ao Elcio Antônio Guerra que teve uma atuação importantíssima na coordenação dos estudos com concreto.

Agradeço ao engenheiro Walton Pacelli que é um exemplo de profissional e sempre incentivou e cobrou de seus técnicos a serem sempre os melhores.

Agradeço o apoio das minhas orientadoras Edi e Sara, sempre que possível, presentes e contribuindo com seus vastos conhecimentos e experiências, além de desprender seus preciosos finais de semana para trabalharmos nessa pesquisa.

O presente trabalho faz parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Viabilização do Uso de Agregados Carbonáticos em Obras de Barragens”, coordenado e gerenciado pelo Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., aprovado para o ciclo 2001/2002 pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Por tanto, agradeço a essas duas empresas pela oportunidade e apoio.

Agradeço a FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A por ter acreditado em mim para gerenciar e coordenar esse projeto, nos nomes de Rubens Machado Bittencourt, Newton Goulart e Emídio Neto.

E se esqueci de alguém, me desculpe, mas sintá-se agradecido.

Meus sinceros agradecimentos e respeito,

Ana Livia

## *I - Introdução*

A Reação Álcali-Agregado (RAA) tem sido uma preocupação crescente nas obras de engenharia, uma vez que pode comprometer o desempenho e durabilidade das estruturas de concreto, principalmente em barragens. Este fenômeno começou a ser estudado e entendido a partir da década de 30 (Stanton, 1940).

A RAA é um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos proveniente, principalmente, pelo cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação são formados produtos que na presença de umidade são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto (Hasparyk, 1999).

Como as estruturas de concreto de obras hidráulicas são as que com frequência experimentam maiores variações de temperatura e umidade, são as mais susceptíveis de apresentarem este tipo de reação (Hasparyk *et al.* 1998).

As condições em que ocorre a RAA são ainda pouco conhecidas, uma vez que pode ocorrer a interação de vários fatores que podem acelerar ou inibir a reação (Rodrigues, 1994). A RAA pode ocorrer em questão de dias ou apenas após vários anos (Taylor, 1990).

Identificada inicialmente como ataque de hidróxidos alcalinos e silicatos, constituintes dos agregados, a RAA foi também verificada em agregados carbonáticos, na denominada Reação Álcali-Carbonato (RAC), atribuída à desdolomitização (Swenson, 1957; Hadley, 1961; Gillott, 1963; Sherwood & Newlon, 1964; Tang & Han, 1986; Tong, 1994; Ozol, 1994; Mei, 2003; Ramezani-pour, 2003; Mingshu & Min, 2004).

Várias hipóteses têm sido enunciadas na tentativa de explicar as etapas da referida reação. No entanto, ainda é necessário um número maior de ensaios laboratoriais específicos e mais seguros para auxiliar na compreensão da reação.

Este trabalho trata da Reação Álcali-Carbonato (RAC), não apenas fixando o problema na desdolomitização, mas procurando entender e encontrar os fatores ou materiais que desencadeiam essa reação, além das reações álcali-silicato e sílica.

O presente estudo tem como objetivo estudar diferentes rochas carbonáticas, as quais servirão como base para entender as diferentes mineralogias, texturas e estruturas das mesmas como agregados, utilizados em concretos na construção de barragens, que podem influenciar na RAC e entender como esta reação ocorre.

A amostragem dessas rochas foi de forma induzida, pois foram escolhidas cinco pedreiras e coletados seis tipos de rochas carbonáticas diferentes. Apenas em uma pedreira foram coletadas duas amostras, portanto, as outras quatro, foram coletadas uma amostra apenas. Cada amostra apresentava cerca de 300 kg, composta por vários blocos de rocha.

Cada amostra fazia parte de uma frente de lavra detonada, de cada pedreira, portanto estava em forma de blocos e estes foram separados devido às similaridades de cor, mineralogia, textura e estrutura, podendo assim compor uma amostra representativa daquele tipo de rocha carbonática.

É importante ressaltar que não foi interesse da pesquisa caracterizar a pedreira no qual foi coletada a amostra e sim estudar e entender a RAC, mais especificamente.

Dessa forma, serão tratados os seguintes assuntos:

\* Nos capítulos iniciais (Capítulos I e II) são apresentados os objetivos e as justificativas do trabalho e uma compilação bibliográfica sobre os assuntos que servirão de base para o trabalho em questão.

\* No Capítulo III são apresentados os Materiais utilizados neste trabalho e uma breve descrição dos mesmos, pois a caracterização destes será abordada num capítulo à parte.

\* No Capítulo IV são apresentados os Métodos utilizados, como análise química, petrográfica (macroscópica e microscópica), por Difração de Raios-X, por Microscopia Eletrônica da Varredura e ensaios de expansão como Reatividade de Rochas Carbonáticas - método do cilindro de rocha (NBR 10340/88 e ASTM C-586/92); Reatividade Potencial – Método Acelerado - ASTM C1260/01; Método dos Prismas de concreto - ASTM C-1105/95, Expansão Residual, além do Método Químico Canadense - AAR 23.26-A. Além destes são apresentados os ensaios físicos e de resistência realizados nas rochas e concretos. Neste capítulo são detalhadas as metodologias mais utilizadas para a verificação da RAC, como: análises macroscópicas, por microscopia ótica por luz refletida e transmitida, por Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura, além dos ensaios de reatividade potencial.

\* Os resultados dessas análises e ensaios são mostrados logo após, no Capítulo V.

\* Na discussão dos resultados, Capítulo VI, é dada ênfase à correlação entre os resultados analíticos, utilizando-se os dados obtidos pelos diferentes métodos para a compreensão do comportamento experimental dos materiais estudados.

\* Finalmente, nas conclusões e sugestões para novas pesquisas, Capítulo VII, são mostrados as principais conclusões deste trabalho, assim como recomendações de metodologias de verificação de reatividade de rochas carbonáticas.

## **1.1. Justificativas e Objetivos**

Com o aumento da procura da investigação da potencialidade reativa de rochas carbonáticas por construtoras de Barragens nos Laboratórios pertencentes ao Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., surgiu a necessidade de avanços nestes estudos, além da preocupação do departamento com Inovação em Pesquisa e Tecnologia. E como a Reação álcali-carbonato é pouco estudada no Brasil e as normas nacionais e internacionais apresentadas para o tema não abordam de forma satisfatória o assunto, foi apresentado à ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, o projeto “Viabilização do uso de agregados carbonáticos em obras de barragens”, para concorrer na carteira de P&D do

ano de 2003, ciclo 2001-2002. Um dos produtos desse trabalho é esta dissertação de mestrado.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- ❖ Contribuir para a compreensão da reação álcali carbonato;
- ❖ Verificar o comportamento de rochas carbonáticas como agregado para ser utilizado em obras de concreto, avaliando o desempenho e durabilidade das estruturas;
- ❖ Contribuir para definição das condições de utilização da rocha carbonática, como agregado, para concretos das estruturas hidráulicas;
- ❖ Expandir e aplicar técnicas modernas em ensaios e análises de caracterização de minerais potencialmente reativos, para rochas carbonáticas;
- ❖ Validar um método de caracterização; e
- ❖ Definir as condições de utilização da rocha carbonática, através da caracterização textural, mineralógica e química.

## *II – Revisão Bibliográfica*

Segundo Mehta & Monteiro (1994), o material mais largamente usado em construção é o concreto, normalmente feito com uma mistura de cimento Portland com areia, brita e água.

A escolha de um material de engenharia, para uma aplicação específica, deve levar em conta a sua capacidade de resistir a uma força aplicada, entre outros aspectos. A resistência é a medida da tensão exigida para romper o material, sendo a resistência do concreto função do processo de hidratação do cimento, o qual é relativamente lento, exceto para cimento do tipo ARI. Tradicionalmente nas especificações os ensaios de resistência do concreto são baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de 28 dias, exceto para cimento do tipo ARI, que são 7 dias.

Os tipos, quantidades e características das quatro fases sólidas principais (Mehta & Monteiro, 1994), geralmente, encontradas na pasta de cimento, que podem ser observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), são as seguintes:

- Silicato de Cálcio Hidratado – a fase do silicato de cálcio hidratado, abreviada para C-S-H, constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado e é, conseqüentemente, a mais importante na determinação das propriedades da pasta. A morfologia varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. Devido às suas dimensões coloidais e à tendência a aglomerar, os cristais podem ser observados com o advento do MEV. Na literatura tradicional, pode ser citado como C-S-H gel. A estrutura cristalina interna do C-S-H também permanece não totalmente distinguível, ela foi anteriormente assumida como semelhante à do mineral natural tobermorita, por isso, foi às vezes, denominada gel de tobermorita.
- Hidróxido de Cálcio – (C-H) cristais de hidróxido de cálcio (também chamado de portlandita) constituem 20 a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Em contraste com o C-S-H, o hidróxido de cálcio é um composto com uma estequiometria definida,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ele tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos. A morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde

formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas. A morfologia é afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. Comparado ao C-S-H, o potencial de contribuição do hidróxido de cálcio para a resistência devido a forças de Van der Waals é limitada, conseqüência de uma área específica consideravelmente menor. Além disso, a presença de uma quantidade considerável de C-H no cimento Portland hidratado tem um efeito desfavorável sobre a resistência química, a soluções ácidas, por ser a solubilidade do C-H maior do que a do C-S-H.

- Sulfoaluminatos de Cálcio – ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida e, conseqüentemente, desempenham um papel menor nas relações estrutura-propriedade. Já foi estabelecido que, durante os primeiros estágios da hidratação a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de trissulfato hidratado,  $C_6AS_3H_{32}$ , também chamado etringita, o qual forma cristais prismáticos aciculares. Em pastas de cimento Portland comum, a etringita transforma-se eventualmente em monossulfato hidratado,  $C_4ASH_{18}$ , que cristaliza em placas hexagonais. A presença de monossulfato hidratado em concreto de cimento Portland torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfato. Deve-se notar que tanto a etringita como o monossulfato, contêm pequenas quantidades de óxido de ferro, o qual pode substituir o óxido de alumínio na estrutura dos cristais.
- Grãos de Clínquer não hidratados – dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pasta de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação. As partículas apresentam tamanho entre 1 a 50  $\mu\text{m}$ , com a evolução da hidratação, primeiro são dissolvidas as partículas menores (desaparecem do sistema) e as partículas maiores tornam-se menores. Por causa do espaço disponível limitado entre as partículas, os produtos de hidratação tendem a cristalizar-se muito próximo das partículas do clínquer em hidratação, o que dá a aparência de formação de um revestimento ao redor deles. Em idades posteriores, devido à falta de espaço disponível, a hidratação *in loco* de partículas do clínquer

resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, cuja morfologia às vezes assemelha-se à de uma partícula do clínquer original.

## 2.1. Reação Álcali-Agregado

O tema Reação Álcali-Agregado (RAA) nas obras de concreto tem sido abordado desde a década de 30, quando o fenômeno começou a ser entendido e estudado.

A partir de 1920 foram observadas fissuras em diversos tipos de obras de engenharia, atribuídos ao ataque da opala e do chert - utilizados como agregados - pela solução concentrada de álcalis gerada no processo de hidratação do cimento (Stanton, 1940). Desde então, numerosos trabalhos têm sido desenvolvidos, na tentativa de elucidar os mecanismos das reações e os seus agentes desencadeadores (Biczok, 1972; Diamond, 1975; Kihara, 1986; Hoobs, 1988; Diamond, 1989; Kihara, 1993; Mehta & Monteiro, 1994).

Nos anos seguintes, um grande número de laboratórios procurou, por meio de pesquisa, dar resposta às várias dúvidas surgidas da revelação de Stanton. A principal dúvida a ser esclarecida era o mecanismo pelo qual a reação entre o hidróxido alcalino e algum componente do agregado poderia produzir a expansão a ela atribuída (Paulon, 1981).

Em 1944, Hansen publicou seus estudos baseados na hipótese da pressão osmótica e relacionou alguns minerais que apresentaram reação. Após grande quantidade de trabalhos efetuados entre 1940 e 1960, o interesse pelo problema virtualmente desapareceu. Entretanto, no início dos anos 70, começaram a surgir relatos de avarias de estruturas em vários países e o interesse pelo problema das reações alcalinas foi rapidamente reavaliado (*in* Paulon, 1981).

No Brasil, o marco na investigação detalhada do fenômeno de RAA foi o trabalho desenvolvido por Gitahy (1963) na década de 60, em uma associação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, com as Centrais Elétricas de Urubupungá (atual Companhia Energética de São Paulo, CESP), visando a utilização de cascalho como agregado na construção das Usinas Hidroelétricas de Jupia e Ilha Solteira, no

rio Paraná. Vários pesquisadores têm contribuído para a compreensão da Reação Álcali-Agregado, destacando a importância de minerais silicáticos como aqueles susceptíveis ao ataque dos álcalis (Paulon, 1981; Rodrigues, 1994; Pacelli & Fontoura, 1996; Andriolo, 1997; Hasparyk, 1999).

Os relatos internacionais no “*Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto*”, realizado em Goiânia pelo CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, em 1997, o mostram que dos casos relatados até 1995, (Charlwood & Solymar, 1995):

- Cerca de 50% referem-se a obras nos Estados Unidos e Canadá;
- A África do Sul mostra 12% das ocorrências relatadas;
- França e Noruega, 5% cada;
- Brasil e Espanha 3% cada;
- Portugal 2%.

Era de chamar a atenção que o Brasil havia relatado até então apenas 3 ocorrências: Moxotó, Peti e Pedras. Entretanto no transcorrer do “*Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto*”, realizado em Goiânia pelo CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, em 1997, observou-se que as ocorrências superavam a dezena (Andriolo, 1997).

A reação álcali-agregado é um processo químico no qual alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, pozolanas, agentes externos, etc) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto da reação forma-se um gel higroscópico expansivo. (Veiga *et al.*, 1997).

Kihara (1993) descreve a reação álcali-agregado como sendo “uma reação lenta e complexa que ocorre entre os álcalis ativos, ou disponíveis no cimento e algumas espécies de minerais presentes em alguns tipos de agregados que em condições especiais provocam a deterioração do concreto. A reação se manifesta no concreto por um padrão de fissuração, deslocamentos e uma exsudação de gel, (nem sempre presente)”. Segundo Biczok (1972), a reação álcali-agregado ocorre entre os álcalis  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  provenientes do cimento, a cal liberada pelo

cimento e os agregados reativos, que contenham ácido silícico amorfo ou que sejam fracamente cristalinos. De acordo com o autor, nesta reação ocorre a formação de um gel sílico-alcalino que ao adsorver água, incha exercendo pressões expansivas e causando fissurações. Conseqüentemente o concreto sofre dilatações gerando uma rede de fissuras em sua superfície. (*in* Hasparyk, 1999).

A RAA é dividida em três categorias, segundo a literatura (Stievenaid-Gireaud, 1987, Hoobs, 1988; Bulletin 79, 1991; Kihara, 1993 e Furnas, 1997; *in* Hasparyk, 1999):

- Reação Álcali-Sílica (RAS): ocorre entre a sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais e os íons hidroxilas provenientes da dissolução dos hidróxidos alcalinos.
- Reação Álcali-silicato (RAS): semelhante à anterior - álcali-sílica - porém mais lenta, envolve outros silicatos, tais como feldspatos, quartzo fundamentalmente deformado (tensionado) e minerais expansivos, presentes em folhelhos ou outras rochas sedimentares, metamórficas e magmáticas.
- Reação Álcali-Carbonato (RAC): ocorre entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas nos poros do concreto.

Dentre os diversos fatores que interferem na reação destacam-se: o cimento com alto teor de álcalis disponíveis para reagir, agregados potencialmente reativos e fatores ambientais tais como elevadas temperatura e umidade.

Em barragens, segundo o Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio de RAA, 1999, os registros de casos de reação álcali-agregado (Figuras 2.1 e 2.2) mostram como suas principais conseqüências:

- Fissuras entre as camadas de concretagem, principalmente nas galerias de drenagem, devido provavelmente à expansão diferencial entre essas camadas;
- Fissuras dispostas transversalmente aos condutos, em blocos de apoio dos condutos forçados;

- Deslocamentos diferenciais não reversíveis entre blocos;
- Expansão do concreto da tomada d'água, provocando a compressão do vertedouro ou vice-versa, causando como principais problemas operacionais, o travamento das comportas e o esmagamento do concreto na região da crista da barragem;
- Distorções nas estruturas da casa de força que têm como consequência: a perda da verticalidade do eixo do conjunto turbina-gerador, inclinação das palhetas do pré-distribuidor e a ovalização do estator e do poço da turbina.

Os principais indícios que levantam a suspeita da ocorrência da RAA em uma estrutura são:

- fissuras padrão tipo “mapa”, sendo que em concreto armado as fissuras tendem a ser orientadas;
- eflorescência e exsudação de gel;
- descoloração do concreto;
- agregados graúdos com bordas de reação;
- poros do concreto preenchidos total ou parcialmente por material esbranquiçado com composição do gel;
- microfissuração da argamassa com preenchimento de material branco.

A tomada de medidas preventivas à ocorrência da reação álcali-agregado depende de uma série de estudos preliminares, os quais deverão ser realizados antes do início da obra. Quanto à seleção dos agregados, devem ser executados ensaios e análises (análise petrográfica, ensaios acelerados em barras de argamassa e ensaios químicos) para verificar a potencialidade reativa dos mesmos. Se comprovada a reatividade do agregado e tornar-se inviável o uso de outro tipo de agregado, deverá ser feita a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, os quais constituem uma das maneiras mais indicadas para combater a reação, de uma forma geral.



Figura 2.1. Vista lateral do pilar do vertedouro - sentido montante à jusante - Barragem de Furnas.

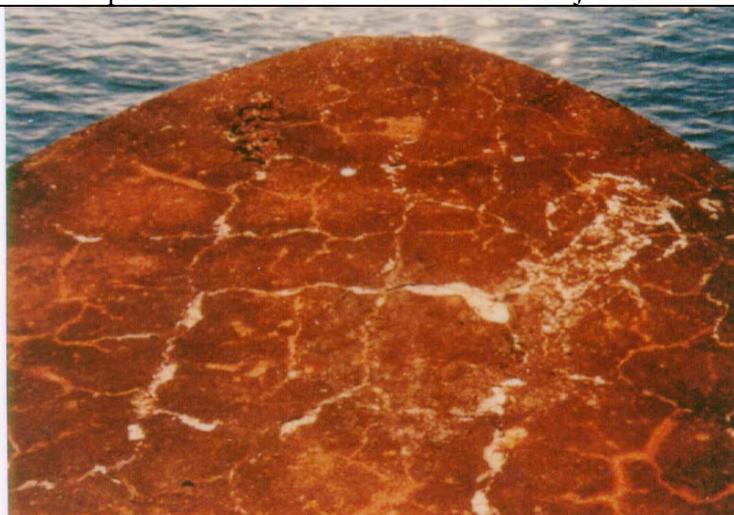


Figura 2.2. Detalhe do topo de um dos pilares do vertedouro com fissuração tipo mapa e deslocamento nas bordas. Barragem de Porto Colômbia.

## 2.2. Casos Mencionados na História

Segundo o Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, realizado em Goiânia em dezembro de 1999, de modo geral o comportamento das entidades ou comunidades técnico-científicas dos países onde se observam os fenômenos de RAA tem sido do tipo que pode ser avaliado pelas expressões que se citam:

- **Estados Unidos**- A partir da verificação dos problemas de RAA em várias barragens importantes (Parker, Stewart Mountain, Gene Wash, Copper Basin, Buck, American Falls, Coolidge, Owyhee, Hiwassee, Chickamauga e Fontana) e em obras rodoviárias e de arte, estudos e pesquisas independentes, mas com informações coordenadas, foram iniciados entre 1940-1941, através do Bureau of Reclamation, Corps of Engineers, Portland Cement Association, American Concrete Institute e os principais laboratórios do State Highway e Public Road Administration, de algumas empresas de cimento e universidades;
- **Austrália**- A partir de 1940 a Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) estabeleceu um programa de pesquisas “...To investigate the probable incidence of cement-aggregate reaction in Australia, and to provide a basis on which more fundamental investigations of the mechanism of the reaction could be developed...”
- **África do Sul**- Embora a RAA tenha sido notada na África do Sul, pela primeira vez em 1974, uma série de pesquisas coordenadas somente teve início no segundo semestre de 1977;
- **China**- Os estudos da RAA se reportam ao início dos anos 60. Nenhum caso de RAA fora noticiado até 1989, quando em 1991 o primeiro caso de deterioração de estruturas de concreto, na China, foi observado. Simultaneamente um grande número de estruturas de concreto, principalmente no Norte da China foi considerado como afetado pela RAA. A partir daí as rochas e areias das várias jazidas começaram a ser avaliadas em detalhes. Medidas preventivas não eram adotadas nas construções. Com o emprego de grandes teores de Cimento Portland, contendo elevados teores de álcalis e o uso de aditivos químicos, é de se prever a ocorrência de estruturas afetadas pela RAA, nos próximos anos.
- **Taiwan** - A partir de 1980 o governo e os institutos acadêmicos iniciaram várias pesquisas quanto à RAA. Foram coletadas amostras em 6 rios diferentes e 4 regiões rochosas.
- **Estudos Interlaboratoriais** - Após a 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete – Cape Town-South África, um número de cientistas de diferentes países (Canadá, Nova Zelândia, Alemanha, África do Sul) concordaram em participar de estudos conjuntos, interlaboratoriais sobre ensaios referentes à RAA.

Na Holanda o número de casos de estruturas com danos devido à RAA, aumentou de 3 para cerca de 35, entre 1990 e 1995 (Heijnen *et al*, 1996), causando com isso surpresa na expectativa dos profissionais envolvidos com o assunto naquele país.

### **2.3. Reação Álcali-Carbonato**

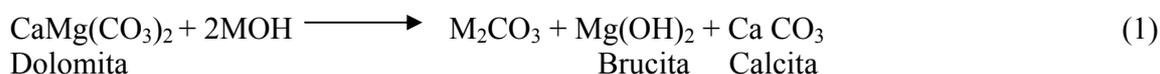
Anteriormente ao “Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials (ASTM STP, 169, 1956) e seus antecessores ASTM STP 22A, em 1943, e ASTM STP 22, em 1935, nunca havia sido tratado o assunto sobre reações deletérias de rochas carbonáticas, pois, tais reações só foram reconhecidas como um problema distinto, até que identificadas por Swenson em 1957, baseado nas suas investigações de expansão, fissuramento e soerguimento de concretos na vizinhança de Kingston, Ontário, Canadá.

Associada às numerosas ocorrências de concreto com rochas carbonáticas reativas em Ontário, nos Estados Unidos, estruturas de concreto também foram afetadas (Virgínia, Oeste da Virgínia, Kentucky, Missouri, Tennessee, Iowa, Illinois, Indiana e Nova York), Iraque, Hahrain, Inglaterra e China.

O assunto reação álcali-carbonato (RAC) foi discutido pela primeira vez, como uma reação distinta e separada das outras RAA, num tópico da extensão do capítulo da ASTM STP 169B, por Walker, 1978. Anteriormente, Hansen, na ASTM STP 169A, em 1966, discutiu a reatividade das rochas carbonáticas juntamente com outras rochas e minerais reativos, abaixo do título comum de reações químicas (Ozol, 1994).

Segundo Ozol (1994), várias reações envolvem as rochas carbonáticas - dolomíticas e não dolomíticas - embutidas em concretos ou argamassa, sendo reconhecida apenas a desdolomitização, responsável pela expansão do concreto. Esta é uma reação álcali-agregado distinta das reações do tipo álcali-sílica ou álcali-silicato, não só com relação aos produtos, como pela ausência da formação de gel, típico dessas últimas (*in* Paulon, 1981).

A reação, em termos gerais, ocorre quando o constituinte dolomítico é quimicamente atacado pelos álcalis do cimento, o que resulta na formação de brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico, conforme a reação (Hadley, 1961):



Onde M representa K, Na ou Li.

No concreto, o carbonato alcalino produzido pela desdolomitização, reage com os produtos da hidratação do cimento, como por exemplo, a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), segundo a reação:



Como a reação regenera o hidróxido alcalino, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo, ou até que a concentração de álcalis tenha sido suficientemente reduzida por reações secundárias. A reação ocorre com a máxima intensidade quando a calcita e a dolomita estão presentes em quantidades aproximadamente iguais ou quando ambas estão finamente divididas (Hadley, 1961, *in* Paulon, 1981).

Para a equação (1), a somatória dos volumes de produtos sólidos seria menor que a dos reagentes. Assim, a desdolomitização não seria a causa da expansão, mas criaria canais de acesso da água até as argilas expansivas inclusas na dolomita (Gillott, 1964). Entretanto, análises por Microscopia Eletrônica de Transmissão – TEM - de rochas altamente reativas de Kingston, mostraram que as argilas pertenciam à matriz e não aos cristais de dolomita. Mostraram ainda, que a brucita e calcita, produtos da reação, se formaram nas bordas dos cristais de dolomita, pela migração dos íons  $\text{M}^+$  e  $\text{OH}^-$ , o que provocou a expansão, Tang *et al*, 1986.

Entretanto, alguns autores (Sims & Sotiropoulos, 1983; Tang *et al*, 1991; Poole & Sotiropoulos, 1978) reportaram que, durante a desdolomitização, a calcita cristalizou *in situ*, mas o íon  $\text{Mg}^{2+}$  pode migrar para o exterior da zona que reagiu para combinar com íon  $\text{OH}^-$  para formar a brucita. O tamanho da dolomita e o valor do pH influenciam significamente na proporção da reação de desdolomitização (Tang *et al*, 1991; Gillott, 1963). A reação pode ser

acelerada por cada decrescimento do tamanho da dolomita ou crescimento do valor do pH, ou ambos.

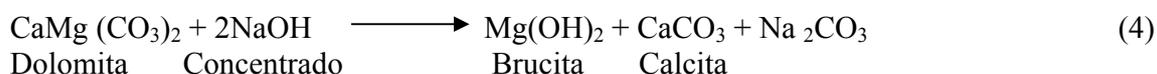
Outra versão para o mecanismo de reação, proposta por Tang *et al*, 1991, é que a expansão é causada pelos íons e moléculas de água que migram para dentro do espaço restrito e pelo crescimento da brucita recristalizada entre a camada reativa da calcita e da matriz, o qual formou o espaço restrito. Minerais de argila, neste mecanismo, apenas providencia caminhos através do qual a solução alcalina pode penetrar.

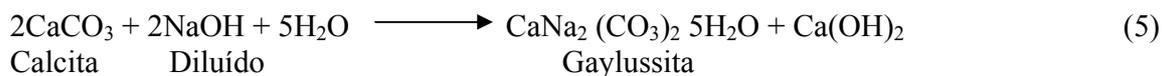
Porém, nem todos agregados dolomíticos são reativos (Gillott, 1963; Mingshu e Min, 2004). Existem muitas estruturas de concretos produzidos com agregados dolomíticos, os quais apresentaram performance satisfatória durante um longo período. Gillott (1963) realizou várias análises petrográficas de rochas carbonáticas e concluiu que apenas aquelas rochas com um tipo particular de textura foram reativas na reação álcali-carbonato. Certos calcários dolomíticos argilosos provenientes de Kingston, Canadá, foram altamente reativos. Estas rochas contêm 40 a 60% de dolomita ou calcita e cerca de 5 a 10% de resíduos ácidos – insolúveis. E são compostos por cristais de dolomita de 40 a 50 µm, que estão distribuídos numa matriz microcristalina de calcita e argilas.

Sherwood & Newlon (1964) efetuaram estudos de laboratório com o objetivo de determinar as reações químicas que contribuem para que exista a reação entre os álcalis do cimento e as rochas carbonatadas. Nestes estudos foram utilizadas a calcita e a dolomita de alta pureza, em cristais grossos e foram excluídas grandes variações de composição, textura e reatividade.

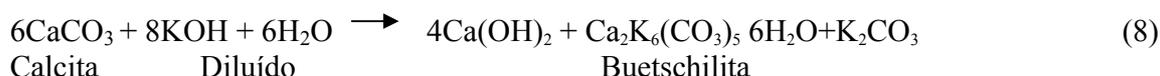
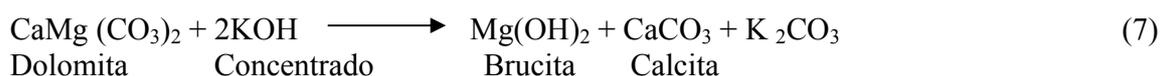
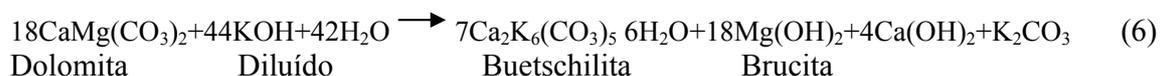
Os autores concluíram que as seguintes reações químicas podem se desenvolver nestes sistemas:

a) Reações envolvendo o NaOH:





b) Reações envolvendo o KOH:



Conforme a teoria de Hadley, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produzido nas reações (5) ou (6) ou (8), proveniente da hidratação de cimento, pode reagir com o carbonato alcalino (mostrado do lado direito da equação), em maior ou menor intensidade, para produzir mais álcalis em solução.

Segundo o Comitê 221 do American Concrete Institute (ACI), de 1998, a única evidência desta reação de desdolomitização (ou de decomposição) é a formação de hidróxido de magnésio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , brucita) ou um silicato de magnésio de composição mais complexa.

L. Tong & M. Tang (1995), utilizaram rochas reativas (fragmentos de dolomita e de magnesita, e calcário muito fino), britados num tamanho menor que 0,04mm e misturados com cimento Portland (com alto teor de álcalis), numa proporção de 4:1 e compactados a 300 MPa por 1 minuto. Foram confeccionados 6 cilindros por amostra, com 9 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Após 7 dias de cura foram tomadas as medidas dos cilindros, marcada como leitura inicial (referência), e levados a autoclave a 150 °C, numa solução a 10% de KOH por uma série de idades. A variação de comprimento em cada idade pode ser calculada. Os resultados mostraram que o grau da reação pode ser monitorado pela quantidade de dolomita consumida e produção de calcita nos cilindros com dolomita e pela quantidade de magnesita e brucita formadas nos cilindros com magnesita. Esses minerais foram identificados por DRX. Apesar de ser preferível adotar as mudanças da dolomita e magnesita através do monitoramento dos graus de reação nos cilindros, a identificação dos produtos de reação calcita e brucita se provaram tão bons quanto.

A quantidade de calcita medida foi maior do que a prevista pela desdolomitização, sugerindo que os produtos de hidratação do cimento (ex. portlandita) foram carbonatados pelo  $\text{CO}_3^{2-}$  produzido na desdolomitização, conforme a equação abaixo:

Reação de desdolomitização:



Diferente da reação álcali-silica, que também é uma reação de contato, que bordejia os agregados reativos e que tem facilidade de identificação dos seus produtos, a RAC apresenta dificuldade na identificação, dos produtos da desdolomitização. Entretanto, Tong (1994), dividiu em duas interfaces: interface I é a zona entre o agregado e a pasta de cimento; interface II é a região entre o cristal de dolomita e a matriz. Ele enfatizou que a desdolomitização é formada na interface II. Os produtos da desdolomitização foram identificados por investigação em detalhe por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

Usualmente as rochas carbonáticas podem conter quartzo, quartzo micro ou criptocristalino, que, também, podem provocar RAA. Entretanto é difícil confirmar se uma deterioração foi causada pela RAS ou RAC.

Através de repetidas análises, por medidas da variação do comprimento de barras de concreto ou argamassa e observações por microscopia ótica e de varredura, Mei (2003), confirmou que a solução de LiOH pode evitar a ASR, mas favorece a RAC. Assim pode-se separar as duas reações.

### III – Materiais

Para este trabalho foram selecionadas rochas carbonáticas de composição, textura, estruturas e proveniência distintas. Com estas rochas foram confeccionados prismas de concreto e barras de argamassa, utilizando-se cimentos com elevado teor de álcalis. Além dessas rochas utilizadas como agregados, foram também extraídos testemunhos de concreto de uma barragem contendo agregado de rochas carbonáticas, para avaliar o seu desempenho após anos em trabalho.

#### 3.1 – Agregados – Rochas Carbonáticas

A seleção das amostras procurou abranger rochas carbonáticas com diferentes características mineralógicas e texturais, para avaliar seu comportamento como agregado e as possíveis variações desse comportamento. Dentre as amostras foram incluídas rochas de pedreiras idênticas àquelas já utilizadas em uma barragem com mais de trinta anos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Proveniência, classificação litológica (segundo Folk, 1962; Tucker, 1982) e unidade litoestratigráfica das amostras.

REGISTRO	PROVENIÊNCIA	LITOTIPOS	GRUPO/FORMAÇÃO
284	Região de Vila Propício (GO).	Dolarenito muito fino	Faixa Brasília - Grupo Paranoá
285	Região de Vila Propício (GO).	Calcário Recristalizado	
286	Entorno do Distrito Federal	Calclutito	
289	Portelândia (GO).	Calclutito	Bacia Sedimentar do Paraná – Formações Irati e Corumbataí.
290	Alto Garça (MT)	Bio-calclutito Dolomítico	
291	Alto Garça (MT)	Bio-calclutito Dolomítico	

- Faixa Brasília - Grupo Paranoá

O Grupo Paranoá, de idade médio-proterozóica, está inserido na Faixa Dobrada Brasília, gerada pela Orogênese Brasileira do final do Neoproterozóico. O topo do Grupo Paranoá -Unidade Pelito Carbonatada – é formado por rochas pelíticas com intercalações decimétricas de quartzitos, além de lentes de dimensões variadas de rochas carbonáticas (Faria, 1995). A Unidade Pelito-Carbonatada é recoberta localmente por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí ou através de falha de empurrão por filitos, quartzitos ou calcixistos do Grupo Canastra.

Encontram-se na Unidade Pelito Carbonatada as rochas procedentes da região de Vila Propício (GO) e do entorno do Distrito Federal. As rochas carbonatadas de Vila Propício afloram por cerca de 30 km na direção geral nordeste/sudoeste, formando um conjunto de lentes de calcários, dolomitos e mármore, desde o sudeste da referida localidade até a proximidade do entroncamento das rodovias Goianésia/Dois Irmãos e Cocalzinho de Goiás/Dois Irmãos.

Na área do entorno do Distrito Federal existem pelo menos 10 lentes de calcário, de tamanhos variados, situadas na Unidade Pelito Carbonatada do Grupo Paranoá. A lente que foi objeto da amostragem para este estudo está posicionada dentro de metargilitos e metassiltitos de coloração creme.

O calcário tem coloração cinza-escuro, é finamente laminado, com granulação muito fina. No topo da lente, o calcário é preto, apresentando microfraturas verticais preenchidas por calcita branca.

- Bacia Sedimentar do Paraná

No sul de Goiás e Mato Grosso, são explorados níveis carbonáticos pertencentes às formações Irati e Corumbataí, de idade permiana. São predominantemente calcários, em geral dolomíticos e dolomitos intercalados em folhelhos pretos, carbonosos, ou localmente rosados. Pertencem a estas unidades as amostras de rochas procedentes de Portelândia (GO) e Alto Garça (MT).

As rochas procedentes de Alto Garça (MT) foram extraídas de pedreira que abrange níveis de ambas as formações – Irati e Corumbataí. Trata-se de calcário dolomítico de granulação muito fina, coloração avermelhada e esbranquiçada, situado na base da Formação Corumbataí, em contato com a Formação Irati. São camadas decimétricas com laminação plano-paralela, contendo nódulos de chert preto.

As rochas procedentes de Portelândia-GO ocorrem em uma camada de dolomito de aproximadamente 5 m de espessura. Este dolomito de granulação fina tem coloração cinza, apresentando-se com laminação plano-paralela, marcada por filmes milimétricos de folhelho negro. Nesses níveis é comum a presença de fósseis, como ossos de *Mesosaurus Brasilienses*,

dentos de tubarão e conchas diversas. A rocha apresenta-se muito fraturada, sendo que as fraturas comumente contem cristais de pirita. Localmente aparecem níveis centimétricos de chert preto.

### 3.2 – Testemunhos de Concreto da Barragem

Foram extraídos testemunhos de concreto de uma barragem, com 33 anos (período de construção 1971 - 1974), na qual utilizou-se agregado carbonático. Este constitui predominantemente o agregado graúdo (fragmentos com dimensões variadas), enquanto o agregado miúdo (entre 1 cm e 0,1 mm) é constituído de fragmentos de quartzo, quartzito, rochas carbonáticas e metapelitos. Pelo relatório de obra, a maioria dos agregados encontra-se na faixa granulométrica de Fuller para concretos de  $d_{\max} = 3''$ , apenas uma pequena percentagem com  $d_{\max} = 2''$ . Os testemunhos foram extraídos da galeria de drenagem da Tomada d'água e do bloco "B" da parede de montante da Ombreira Esquerda (Tabela 3.2).

Além da sua caracterização e verificação de possíveis RAA, os testemunhos serviram também como referência para comparação com prismas de concreto, que foram moldados segundo o traço utilizado para o concreto da barragem.

Tabela 3.2. Registros dos testemunhos de concreto, ensaios e análises.

Registro	Estrutura de Concreto	Ensaio e Análises Realizados
335 A	Galeria da Tomada d'água	Análises Petrográficas, DRX, MEV e Química
335 B		Ensaio de Expansão Residual
335 C		Análises Petrográficas, DRX, MEV e Química
335 D		Massa Específica, Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade
335 E		
335 F		
340 A	Ombreira Esquerda (Parede a montante da Barragem)	Análises Petrográficas, DRX, MEV e Química
340 B		Ensaio de Expansão Residual
340 C		Massa Específica, Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade
340 D		
340 E		

### 3.3 – Compósitos de Cimento

Para os ensaios de verificação da RAA foram confeccionados prismas de concreto e barras de argamassa. Para a moldagem dos prismas usou-se o mesmo traço (água:cimento (A/C) de 0,57) utilizado no concreto da barragem, associado com os tipos de rochas carbonáticas mencionadas acima (Tabela 3.1), além de cimentos - CP I 32 S - com alto teor de álcalis (Tabela 3.3) e areia, como agregado miúdo (Tabela 3.5 e Figura 3.1). As barras de argamassa foram confeccionadas utilizando-se o cimento sob o registro 366 e os prismas com o cimento sob o registro 941.

Tabela 3.3. Caracterização dos cimentos utilizados para confecção de barras e prismas.

PROPRIEDADES DETERMINADAS CP I-32		Registro 941	Registro 366	Limites NBR 5732/91		
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,15	3,10	---		
Finura	Peneira 200 ( %)	1,9	0,9	< 12,0		
	área específica (cm <sup>2</sup> /g)	3.210	4,78	>2600		
Tempo de Pega (h:min)	Início	4:00	1:40	>1:00		
	Fim	5:50	3:00	<10:00		
Água de Consistência - Pasta (%)		28,4	30,4	---		
Expansão em Autoclave (%)		0,3	0,1	<0,8		
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	27,0	36,7	≥ 10,0		
	7 dias	30,4	37,9	≥ 20,0		
	28 dias	35,3	48,7	≥ 32,0 ≤ 49,0		
Calor de Hidratação (J/g)	3 dias	264,5	---	---		
	7 dias	279,6	---	---		
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo		1,07	1,63	< 2,0	
	resíduo insolúvel		0,20	1,03	< 1,0	
	trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		3,12	4,09	< 4,0	
	óxido de magnésio (MgO)		4,42	4,94	<6,5	
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		19,54	19,19	---	
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,69	3,32	---	
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		5,07	4,20	---	
	óxido de cálcio (CaO)		61,30	60,06	---	
	óxido de cálcio livre (CaO)		1,7	1,90	---	
	Álcalis Totais	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)		0,19	0,30	---
		óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		1,25	1,18	---
		equivalente alcalino		1,01	1,08	---
	Álcalis Solúveis em Água	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)		0,16	0,21	---
		óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		1,08	0,75	---
		equivalente alcalino		0,87	0,70	---
	Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		5,30	7,65	---	
Composição Potencial Método de Bogue (%)	Silicato Tricálcico (C <sub>3</sub> S)		47,32	44,95	---	
	Silicato Dicálcico (C <sub>2</sub> S)		20,32	20,65	---	
	Aluminato Tricálcico (C <sub>3</sub> A)		8,88	5,51	---	
	Ferro Aluminato Tricálcico (C <sub>4</sub> AF)		8,19	10,10	---	

A areia utilizada na confecção dos prismas de concreto é composta por fragmentos de 0,03 a 2,4 mm, com grãos subangulosos a angulosos, de quartzo (mono e policristalino) e subordinadamente, de rocha granítica, e traços de muscovita, feldspato e minerais opacos. São raros os grãos de quartzo criptocristalinos, ou com extinção ondulante.

Na Figura 3.1 é apresentado o gráfico de Reatividade Potencial – Método Acelerado (ASTM C 1260/01) da areia lavada utilizada na confecção dos prismas, observando-se que a mesma permaneceu inócua após trinta dias de ensaio, conforme exigência do método.

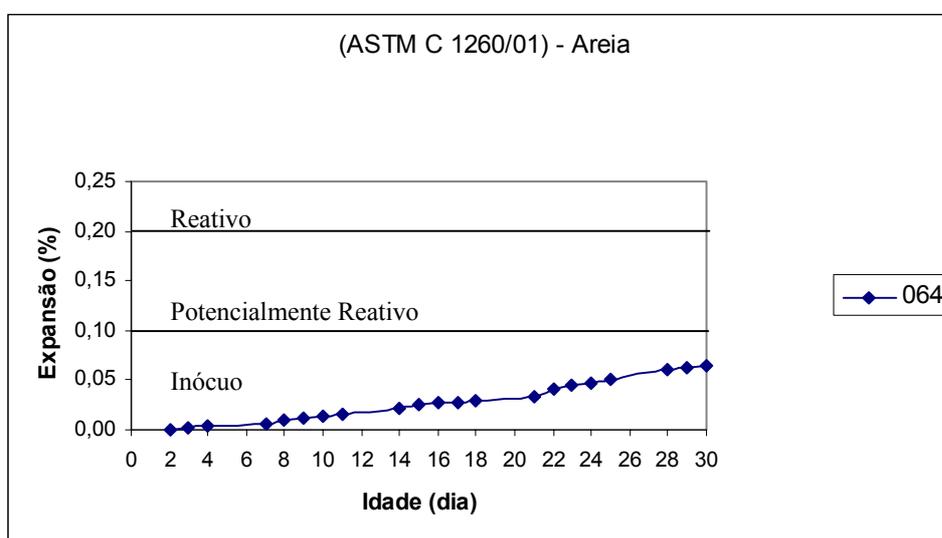


Figura 3.1. Gráfico de reatividade potencial – Método Acelerado (ASTM C 1260/01) da areia lavada utilizada para confecção dos prismas.

### 3.3.1– Barras de Argamassa e Prismas de Concreto

Para o desenvolvimento do presente estudo, atendendo às normas de verificação da reatividade potencial, de acordo com os métodos ASTM C 1260/01 e ASTM C 1105/95 (descritos no Capítulo IV), foram confeccionados, respectivamente, as barras de argamassa e os prismas de concreto.

As barras de argamassa e os prismas de concreto são identificados pelo registro do agregado (com o qual cada um foi moldado), acrescido da letra “B” ou “P”, respectivamente, conforme a

Tabela 3.4. Ainda nesta tabela são citados os ensaios e análises, aos quais estes materiais foram submetidos.

Tabela 3.4. Registros dos materiais cimentícios, ensaios e análises realizadas.

AMOSTRA (BARRA DE ARGAMASSA)	ENSAIOS E ANÁLISES REALIZADOS	AMOSTRA (PRISMA DE CONCRETO)	ENSAIOS E ANÁLISES REALIZADOS
284B	Ensaio de Reatividade Potencial pelo Método Acelerado – ASTM C 1260/01; Análises petrográficas e MEV.	284P	Ensaios de Reatividade Potencial – ASTM C 1105/95; tensão e deformação, módulo de elasticidade; Análises petrográficas, DRX e MEV.
285B		285P	
286B		286P	
289B		289P	
290B		290P	
291B		291P	

Legenda: B – barra de argamassa e P – prisma de concreto.

As barras de argamassa foram confeccionadas com o cimento registro 366 (Tabela 3.3), juntamente com as rochas britadas, até a finura de areia conforme as frações citadas na norma ASTM C 1260/01.

Os prismas de concreto para os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e verificação da expansão foram moldados de acordo com o mesmo traço do concreto da barragem. Foi utilizado o cimento de registro 941 (Tabela 3.3), sendo a caracterização do agregado e a dosagem determinada conforme as Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5- Caracterização dos Agregados Miúdo (areia) e Graúdo (rochas carbonáticas).

Registro	064	284	285	286	289	290	291
Agregado	Areia (Agregado Miúdo)	Mármore Dolomítico	Calcário Recrist.alizado	Calcário	Calculutito	Bio- Calculutito	Bio- Calculutito Dolomítico
Massa específica (g/cm³)	2,61	2,84	2,718	2,718	2,438	2,444	2,524
Absorção (%)	0,9	0,4	0,4	0,3	5,3	5,2	4,2
Granulometria (MF)	2,24	6,86	6,86	6,89	6,89	6,91	6,88
Teor de matéria orgânica(%)	+clara	---	---	---	---	---	---
Teor de Mat Pulverulento (%)	0,66	---	---	---	---	---	---

Tabela 3.6. Estudo de dosagem para a moldagem dos prismas de concreto.

Registro do agregado graúdo		284	289	285	286	290	291
Litotipos		Mármore Dolomítico	Calcilutito Dolomítico	Calcário Recristalizado	Calcário	Bio Calcilutito	Bio- Calcilutito Dolomítico
Dados de Composição	Cimento (941)	295					
	Água	168,1					
	Areia Natural	652	651	652	652	652	652
	Brita 19 mm	1.377	1180	1.318	1.318	1185	1.224
	Aditivo Incorporador de Ar	-	-	-	-	-	-
	Aditivo Plastificante	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
	Relação A/C	0,57					
Propriedades do Concreto Fresco	Abatimento (mm)	90	10	80	80	55	45
	Ar incorporado	5,0	2,1	5,0	5,0	3,8	3,5
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2.268	2.262	2.218	2.218	2.187	2.224
	Temperatura (°C)	23	22	22	22	24	24

## IV – Métodos

Os métodos de investigação empregados neste trabalho foram selecionados de forma a atender os seus objetivos, ou seja, verificar o comportamento das rochas carbonáticas utilizadas como agregado, bem como as suas reações com os álcalis presentes no cimento.

O comportamento das rochas, como agregado, foi avaliado através de ensaios de expansão, resistência e módulo de deformação, segundo normas específicas, enquanto para sua caracterização textural, mineralógica e química foram realizadas as análises petrográficas, mineralógicas, químicas e difratométricas (Tabela 4.1). Esta etapa está exemplificada no organograma da Figura 4.1. As relações entre este comportamento e as propriedades da rocha foram avaliadas pelas mesmas técnicas utilizadas na caracterização da rocha, juntamente com os resultados dos ensaios supracitados.

As reações ocorridas nos materiais cimentícios foram estudadas através da análise dos produtos gerados e das relações texturais destes produtos com a argamassa e com agregados, após os mesmos terem sido submetidos aos ensaios de expansão. Essas análises se realizaram com o uso de microscopia ótica sob luz transmitida e eletrônica de varredura, além da difração de raios-X. Esta etapa está exemplificada no organograma da Figura 4.2.

Todos os ensaios e as análises foram realizados de acordo com normas e procedimentos convencionais sumarizados nas Tabelas 4.1 a 4.3.

Tabela 4.1. Ensaios e análises utilizados nas rochas.

<b>Nome do Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>
Análise química – Determinação da Perda ao Fogo	NBR NM 18/04
Análise química - Determinação do Teor de Dióxido de Silício	NBR NM 22/04
Análise química Determinação dos Óxidos de Cálcio, Magnésio, Ferro e Alumínio pelo Método da Complexometria	NBR NM 11-2/04
Absorção e massa específica do agregado graúdo	NBR 9937/87
Absorção de água em agregado miúdo	NBR NM 30/01
Granulometria	NBR 7217/87
Teor de material pulverulento	NBR 7219/87
Análise Petrográfica	ASTM C-295/90
Análise por Difração de Raios-X.	

Agregados - Reatividade Potencial de Rochas Carbonáticas – Verificação	NBR 10340/88 e ASTM C – 586/92
Agregados - Reatividade Potencial pelo Método Acelerado - Verificação	ASTM C1260/01
Método dos Prismas de Concreto – Avaliação da Reação Álcali-Carbonato	ASTM C-1105/95
Método Químico Canadense	AAR 23 26A
Determinação de enxofre na forma de sulfeto e sulfato em agregados	NBR NM 16/04
Ensaio de Compressão Uniaxial em Materiais Rochosos	ASTM D2938/95
Método Químico Canadense	AAR 23.26-A

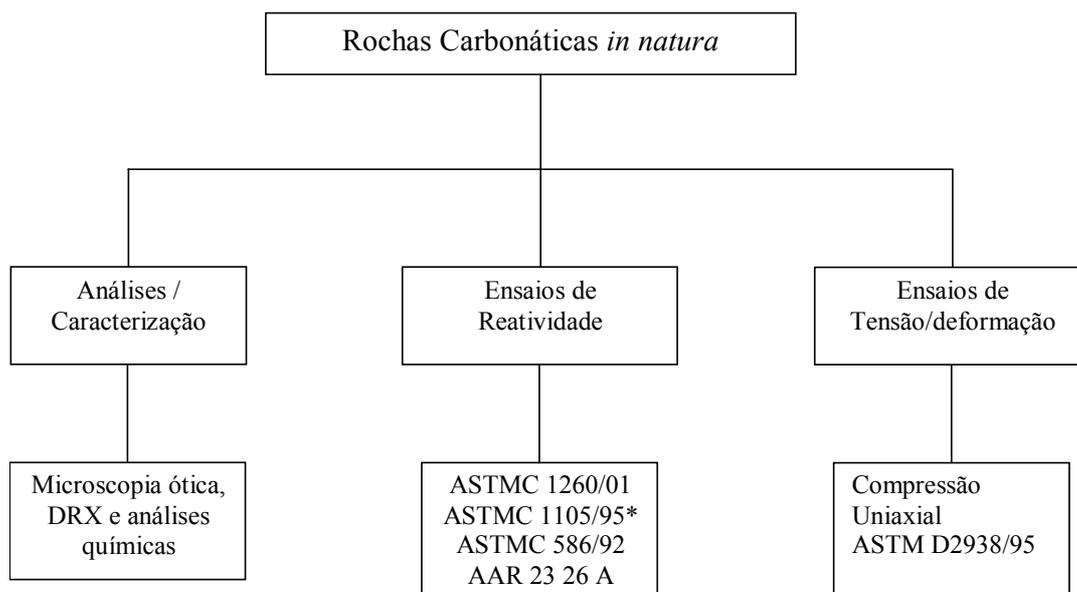


Figura 4.1. Organograma dos ensaios e análises realizados nas rochas *in natura*.

Nota: \*moldados conforme o traço da barragem estudada.

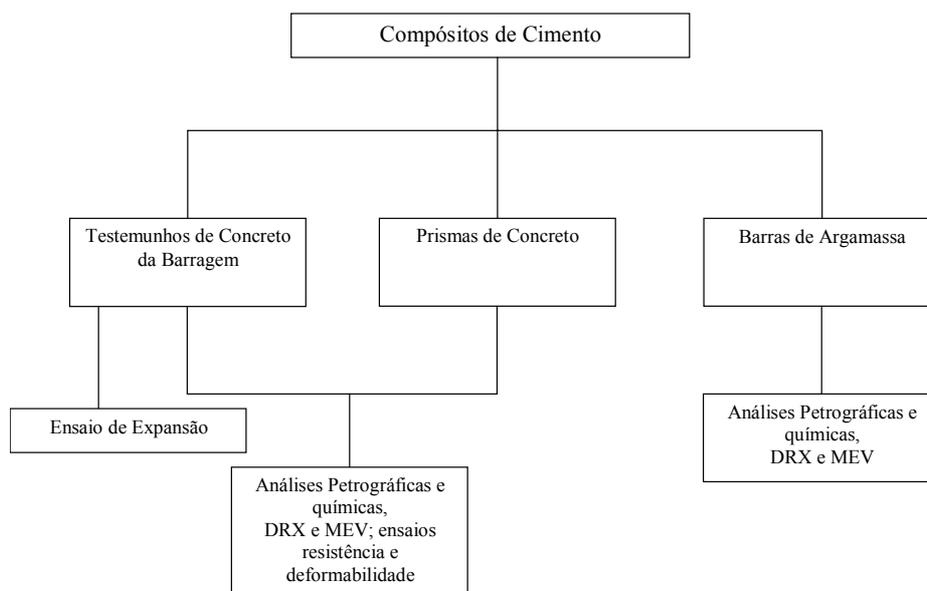


Figura 4.2. Organograma dos ensaios e análises realizados nos compósitos de cimento.

Nota: as análises petrográficas, química, MEV e DRX foram realizadas, nos prismas de concreto e barra de argamassa, após os ensaios de expansão.

Os cimentos utilizados nesta pesquisa foram submetidos à análise química e ensaios físicos para determinar as suas propriedades. Os ensaios e as análises realizados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Ensaios e análises realizados nos cimentos.

<b>Nome do Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>
Massa específica do cimento	NBR NM 23/01
Tempo de pega	NBR 11581/91
Finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)	NBR 5752/92
Finura pelo método permeabilidade do ar	NBR NM 76/98
Resistência à compressão do cimento	NBR 7215/91
Resíduo insolúvel	NBR 5744/89
Anidrido sulfúrico	NBR 5745/89
Óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol	NBR 7227/89
Análise química – Determinação da Perda ao Fogo	NBR NM 18/04
Análise química Determinação dos Óxidos de Cálcio, Magnésio, Ferro e Alumínio pelo Método da Complexometria	NBR NM 11-2/04
Alcalis Totais de Cimentos	NBR 5747/89
Análise química - Determinação do Teor de Dióxido de Silício	NBR NM 22/04
Autoclave	ASTM C-151/00
Calor de hidratação	NBR 8809/85
Determinação de Alcalis Solúveis de Cimentos	ASTM C114/97

Os prismas e testemunhos de concretos foram submetidos aos ensaios físicos e químicos, este último corresponde aos citados acima. Os ensaios mecânicos realizados estão apresentados na Tabela 4.3

Tabela 4.3. Ensaios de deformabilidade e resistência realizados nos concretos.

<b>Nome do Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>
Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	NBR 5739/94
Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação (secante)	NBR 8522/03

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada na análise da microestrutura dos materiais moldados (prismas de concreto e barras de argamassa), após serem submetidos aos ensaios de reatividade e nos testemunhos dos concretos extraídos da barragem estudada.

Todos esses ensaios e análises foram realizados nos Laboratórios do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia – GO. Algumas análises petrográficas e por DRX foram realizadas nos laboratórios do Instituto de Geociências da UnB.

## 4.1. Análise Petrográfica

Além do preconizado na norma ASTM C-295/90, a análise petrográfica foi realizada de acordo com as técnicas convencionais de análise microscópica para determinação das características texturais e composicionais das rochas, dos testemunhos de concreto extraídos, bem como das barras de argamassa e prismas de concreto moldados, após ensaios de reatividade.

As seis amostras de rochas carbonáticas foram submetidas às análises petrográficas macroscópica e microscopicamente. Macroscopicamente, as rochas foram classificadas a olho nu, enfatizando estrutura sedimentar, textura, cor, feições de deformação e mineralogia. Microscopicamente, as análises, além da classificação da rocha, objetivaram a observação da textura e estrutura, assim como deformações e seus preenchimentos.

Para a distinção dos carbonatos foram utilizados, também, ensaios com corante à base de alizarina red, porém como as rochas apresentaram a granulação muito fina, exceto a 285, a mineralogia foi determinada pela análise por Difração de Raios-X (DRX).

A seleção de amostras representativas foi efetuada após a investigação preliminar macroscópica e separadas pelas diferentes tonalidades, texturas, estruturas, para as rochas *in natura*. No total foram confeccionadas e analisadas 18 lâminas delgadas impregnadas, sendo 2 lâminas para cada amostra das rochas 284, 285 e 286; 4 lâminas da rocha 289; 3 lâminas da rocha 290 e 5 lâminas da rocha 291.

Durante a análise macroscópica, também se separou amostras para serem confeccionadas seções polidas, com o objetivo de identificar os minerais opacos, principalmente sulfeto. Para tal análise utilizou-se o Microscópio da marca ZEISS, com luz refletida.

Foram também preparadas 12 lâminas petrográficas impregnadas das barras de argamassa, submetidas ao ensaio de Reatividade Potencial – Método Acelerado – ASTM C 1260/01, e dos Prismas de concreto - ASTM C-1105/95. Foram confeccionadas ainda, 11 lâminas

delgadas impregnadas dos testemunhos de concretos extraídos da barragem estudada. Esses testemunhos de concreto extraídos da barragem, separados para as análises petrográficas, DRX, química e MEV, não foram submetidos a nenhum ensaio de reatividade.

Para as análises com as argamassas e com os concretos, o método de amostragem foi realizado segundo uma análise visual, onde foram escolhidas amostras que apresentam alguma evidência de RAA, como borda, poro preenchido, além de diferenças de tonalidades, estruturas e texturas dos agregados.

#### a) Microscopia ótica

É o método de investigação no qual se utiliza o microscópio polarizador de luz transmitida para análise de lâminas delgadas (com cerca de 0,02mm de espessura). Tem por finalidade a classificação petrográfica das rochas através da descrição dos minerais (com ênfase na identificação dos minerais deletérios), da textura e das estruturas. No caso de concretos, a análise petrográfica, além de embasar a classificação litológica dos agregados, permite verificar a ocorrência de microestrutura proveniente da RAA, tais como: bordas de reação ao longo dos agregados e a presença de microfissuras causadas pela expansão.

As análises foram realizadas utilizando-se o microscópio ótico de luz transmitida, marca LEICA, modelo ORTOLUX II POL-BK. A fim de ilustrar as análises petrográficas, foram realizadas fotomicrografias das lâminas em questão, tanto com nicóis cruzados (nX), como com nicóis paralelos (n//). E as análises por luz refletida foram realizadas utilizando o microscópio ótico Axiolab 40, da marca ZEISS.

## **4.2. Análise por Difração de Raios-X – DRX**

As análises por Difração de Raios-X (DRX) objetivam a identificação das fases cristalinas, incluindo-se tanto os minerais constituintes dos agregados, como os produtos de hidratação do cimento, além dos produtos cristalinos da RAA. As amostras foram submetidas a uma moagem prévia em moinho (100% passante na peneira 400 mesh) e analisadas em

Difratômetro da marca DIFRAC PLUS D5000, da SIEMENS. Para a identificação dos materiais foi utilizado o programa Eva, com banco de dados International Centre for Diffraction Data Release 1998, com mais de 100.000 fichas de minerais.

A análise pelo Método do Pó não-orientado (Amostra Integral), para a identificação das principais fases do material, foi feita pela colocação do material pulverizado em um suporte plástico circular de orifício plano e levado ao Difratômetro de Raios-X. Para a identificação dos constituintes da fração fina, fez-se a separação da fração argila, por sedimentação em coluna. Em seguida foram preparadas 03 lâminas de vidro orientadas, pela técnica do esfregaço, que consiste no deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a “lama”. Estas lâminas foram submetidas a análises, após tratamentos convencionais: 1) secagem ao ar (natural - N), 2) solvatação com etileno-glicol (glicolada - G) em dessecador sobre chapa aquecida a 50°C, por 12 horas e 3) aquecimento a 550°C por 3 horas (calcinada – C).

Todas as amostras de rocha foram analisadas como amostra integral e fração argila (natural, solvatada e calcinada). Devido ao tamanho reduzido, os minitestemunhos (cilindro de rocha) extraídos das rochas, foram analisados apenas como amostra integral, após serem submetidos aos ensaios de reatividade (Método do Cilindro de Rocha – ASTM 586/92), realizou-se apenas o método não-orientado. A análise do cilindro de rocha, após o ensaio de expansão foi feita para verificar possíveis alterações na mineralogia.

Nos concretos dos prismas e dos testemunhos extraídos da barragem foram separados os agregados graúdos e as argamassas, para as análises por DRX. Essa separação foi realizada em função da diferença de cristalinidade entre as fases sólidas, visto que os materiais da argamassa são menos cristalinos que os minerais da rocha. Essa característica pode mascarar algum pico e tornar o difratograma muito denso, dificultando a identificação das fases, principalmente da argamassa.

As análises por DRX foram tomadas, também, como indicativas da abundância dos minerais nas amostras (constituintes maior, menor e traço), pela comparação da intensidade de suas reflexões características. Assim, foram comparadas as intensidades das reflexões de 3,84Å

(calcita), 3,69Å (dolomita), 14,00Å (clorita e esmectita), 4,26Å (quartzo), 10,00Å (ilita e muscovita) e 7,00Å (antigorita).

### **4.3. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV**

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é uma técnica importante que auxilia na investigação da RAA. Amostras de concreto provenientes de obras de obras já concluídas, com indícios de expansões causadas pela RAA, ou amostras de laboratório (argamassa ou concreto) que foram previamente submetidas a ensaios para avaliar a reatividade potencial do agregado podem ser examinadas no MEV (Hasparyk, 1999). Com a identificação dos produtos de RAA, pode-se verificar a agressividade da estrutura mediante sua concentração e classificar os vários tipos de materiais neoformados.

As análises químicas e texturais das barras de argamassa, dos prismas de concreto, após ensaios de expansão, e dos testemunhos de concreto extraídos da barragem estudada foram realizadas através do microscópio eletrônico de varredura (marca LEICA, modelo S440i). Tanto as barras de argamassa, como os prismas de concreto e amostras de concreto extraído da barragem foram submetidos a uma investigação visual e, desta, foram separadas amostras de interesse para serem preparadas para análises de superfícies de fratura (topografia) e de amostras polidas (composição).

Cada tipo de preparação e análise representa uma característica diferente a ser obtida, ou seja, feição topográfica e/ou variação composicional, como especificado abaixo. Em ambos os casos, a técnica permite trabalhar com amostras espessas, alta resolução (30Å), grande profundidade de foco (300x melhor do que microscópio ótico) e imagens tridimensionais.

Como conhecido pela física, quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, diversos sinais são originados, os principais para análise no MEV são: os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os Raios X. Portanto, os principais detectores usados no MEV são:

- Elétrons secundários (SE)

São os responsáveis pela formação da imagem tridimensional e informações topológicas da superfície da amostra. Neste tipo de análise a amostra ideal é de superfície de fratura, principalmente para a identificação da morfologia dos produtos investigados.

- Elétrons retroespalhados (BSE)

A análise é feita principalmente em superfícies polidas, para assim facilitar as identificações de fases da amostra. Esta forma de análise permite investigar as diferentes fases presentes na amostras, através de seus tons de cinza, conforme o número atômico médio destas fases. Quanto maior for o número atômico médio, mais branco aparece o produto na imagem.

- Raios X

Os Raios-X são utilizados para identificar e quantificar elementos químicos presentes na amostra. No MEV, os raios-X são detectados por sistemas acoplados de EDS e/ou WDS. Nesta pesquisa utilizou-se o EDS, que detecta Raios X através da medição da energia característica de cada elemento químico, permitindo sua identificação nos produtos observados. Esta técnica é conhecida como “microanálise”. A microanálise compreende: tanto o EDS como o WDS, os quais apresentam as seguintes características gerais:

- Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios- X - EDS - análise simultânea e rápida (qualitativa e semiquantitativa)
- Espectrometria por Dispersão de Comprimento de Onda de Raios-X - WDS - análise demorada e mais precisa (quantitativa)

As amostras analisadas no MEV, por serem não condutoras precisaram de recobrimento da superfície com material condutor/contato, num processo de metalização com ouro e aterradas com tinta de prata, formando assim um circuito fechado de energia. Este processo de metalização é responsável pela boa formação de imagens, evitando assim um efeito indesejável, conhecido como “carregamento”.

#### **4.4. Ensaio de Reatividade – Método Acelerado (ASTMC-1260/01)**

Este método permite a avaliação rápida do comportamento de um agregado face a uma reação álcali-sílica. Sua metodologia é baseada no Método Acelerado Sul Africano NBRI – National Building Research Institute, desenvolvido por Oberholster & Davies (1986, *in* Hasparyk, 1999) e normalizada como ASTM C-1260/01. O método tem como objetivo acompanhar a variação do comprimento das barras de argamassa, expressando os resultados em % de expansão.

Possuindo o mesmo princípio do método das barras ASTM C-227/90, o ensaio torna-se acelerado após 24 horas de imersão em água a 80 °C, quando as barras são imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 N, a uma temperatura de 80 °C por 16 dias. Entretanto, no laboratório de Furnas é usual levar o ensaio até 30 dias de idade, uma vez que foi detectado um comportamento lento em certos agregados, conforme a própria norma (ASTM C 1260/01) menciona. As Figuras 4.3 a 4.6 ilustram o ensaio de reatividade potencial.

Preparação:

- Barras (no mínimo 3): dimensões: 25 mm x 25 mm x 285 mm
- Relação entre Cimento: agregado - 1:2,25.
- Relação A/C = 0,47 (em massa).
- Cimento: pode-se utilizar o referente da obra e/ou CPI com alto teor de álcalis. No presente trabalho foi utilizado um cimento com alto teor de álcalis, como citado no Capítulo III.

Foram moldadas 3 barras de argamassa de cada um dos tipos de rocha estudadas, como agregado miúdo. As frações granulométricas das rochas, britadas como areia para confecção da argamassa é seguida conforme sugere a ASTM C 1260/01.



Figura 4.3 – Foto do conjunto de tanques onde ficam estocadas as barras de argamassa.



Figura 4.4 – Foto da vista Interna do tanque onde ficam estocadas as barras de argamassa.



Figura 4.5 – Foto do momento da retirada da barra de argamassa para ser medida.

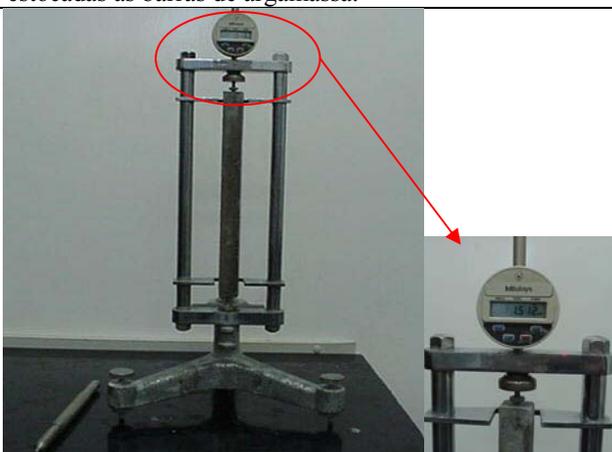


Figura 4.6 – Foto do equipamento de leitura da variação de comprimento das barras. Detalhe do relógio digital.

Em relação à norma ASTM C 1260/01, os seguintes parâmetros são apresentados para a expansão provocada pela reação álcali-agregado, no ensaio de Reatividade Potencial – Método Acelerado, utilizando o cimento CPI, com alto teor de álcalis:

- Expansão inócua para valor menor que 0,10% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem;
- Expansão deletéria para valor maior que 0,20% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem; e
- Valor entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias pode ser, tanto expansão inócua, quanto deletéria, sendo, pois, necessárias informações suplementares sobre os materiais em evidência, ou ainda, acompanhamento da variação de comprimento até a idade de 28 dias.

#### **4.5. Método dos Prismas de Concreto - Avaliação da Reação Álcali-Carbonato – ASTM C-1105/95**

Este método de ensaio - ASTM C 1105/95 - permite a avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas pela medida da variação do comprimento dos prismas de concreto confeccionados com estas rochas. Lembrando que o agregado miúdo (areia) não deve ser potencialmente reativo com os álcalis, quando o objetivo é verificar a potencialidade reativa dos agregados graúdos, como foi o caso da presente pesquisa.

Na Figura 4.7 está ilustrado a coloração dos calcários utilizados e nas Figuras 4.8 a 4.10 os detalhes da moldagem dos corpos-de-prova prismáticos, para a determinação da variação de comprimento, resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados. Deve-se lembrar que os prismas de concreto foram moldados seguindo o traço utilizado no concreto da barragem estudada e que as rochas foram britadas segundo a NBR 9941/87, com dimensão máxima de 19 mm (estipulada pela ASTM C 1105/95).

Na Tabela 3.6, estão apresentadas as dosagens utilizadas na confecção do concreto, tendo como agregado graúdo as rochas carbonáticas e objetivando a reconstituição do concreto da barragem amostrada (consumo de cimento e dosagem similar), a fim de se fazer, posteriormente, a comparação com os testemunhos extraídos das estruturas da barragem.

Foram preparados 3 prismas de concreto, conforme a ASTM C 157/93, nas dimensões 75mm x 75mm x 285mm, instalando-se internamente extensômetros da marca Excel. Segundo a ASTM C 1105/95, se não houver nenhuma especificação quanto à dosagem, deve-se seguir as instruções da ASTM C 157/93. Os prismas foram mantidos em câmara úmida conforme a ASTM C 511/95, sem imersão em água, e as leituras realizadas em 7, 28, 56 dias, 3, 6, 9 e 12 meses. O resultado é a expansão média dos 3 prismas.

Segundo a ASTM C 1105/95, expansões iguais ou superiores a 0,015% aos 3 meses, 0,025% aos 6 meses ou 0,030% em 1 ano são indicativas de um comportamento deletério da

combinação cimento/agregado utilizada, podendo a expansão ser classificada como potencialmente deletéria.



Figura 4.7 – Foto dos agregados carbonáticos 285, 286, 290 e 291, para ilustrar a coloração diferenciada.



Figura 4.8 – Foto da montagem dos extensômetros nas formas prismáticas.



Figura 4.9 – Foto do posicionamento dos extensômetros à meia altura da forma com concreto.



Figura 4.10 – Foto da moldagem e proteção dos corpos-de-prova com plástico (para evitar perda de umidade) até o transporte para a câmara úmida.

Nas Figuras 4.11 a 4.14, está ilustrada a retirada da moldagem dos corpos-de-prova prismáticos, para a determinação da variação de comprimento, a leitura de referência imersa em água e depois na câmara úmida.



Figura 4.11 – Momento da leitura nos extensômetros dos prismas de concreto moldados.



Figura 4.12 – Momento da leitura (de referência, nos CPs imersos em água) nos extensômetros dos prismas de concreto moldados.

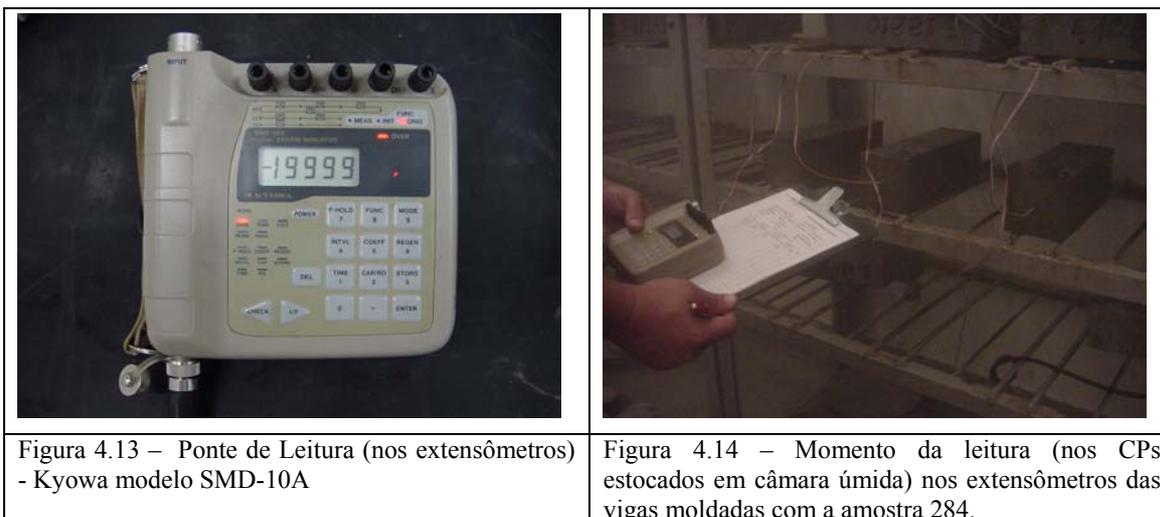


Figura 4.13 – Ponte de Leitura (nos extensômetros) - Kyowa modelo SMD-10A

Figura 4.14 – Momento da leitura (nos CPs estocados em câmara úmida) nos extensômetros das vigas moldadas com a amostra 284.

#### 4.6. Reatividade Potencial – Rochas Carbonáticas – NBR 10340/88 e ASTM C 586/92 (Método do Cilindro de Rocha)

Este método permite a avaliação das características expansivas de rochas carbonáticas (NBR 10340/88 e ASTM C 586/92). O ensaio consiste na verificação de variação do comprimento de minitestemunho (cilindro) extraído da rocha, com diâmetro de 9 mm e comprimento de 35 mm. O minitestemunho é imerso em água destilada até que haja variação mínima de comprimento ( $<0,02\%$ ), fazendo então a leitura de referência. Após então é imerso em NaOH a 1 N num recipiente selado, em temperatura ambiente de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . As leituras foram realizadas em 7, 14, 21 e 28 dias e intervalos de 4 semanas. Como recomendado pela norma o ensaio foi estendido por 1 ano, foram realizadas leituras a cada 12 semanas, trocando a solução a cada 6 meses. O resultado foi expresso em porcentagem de expansão.

A NBR 10340/88 não fixa limite de expansão; já segundo a ASTM C 586/92, 0,10% de expansão é indicativo de reação química. Este ensaio é considerado preliminar, desta forma se a rocha se comportar como potencialmente reativa, deve-se realizar outro teste com o concreto, para uma melhor caracterização da potencialidade da rocha, aplicando a ASTM C 1105/95.

As Figuras 4.15 a 4.18 ilustram o ensaio de reatividade potencial para rochas carbonáticas.



Figura 4.15 – Foto do minitestemunho extraído da rocha carbonática e com suas extremidades torneadas para serem medidas pelo relógio digital.



Figura 4.16 – Foto das amostras imersas em recipiente com NaOH a 1 N.



Figura 4.17 – Foto do momento da retirada da amostra do recipiente para a medição/leitura.



Figura 4.18 – Foto do equipamento de leitura e detalhe do relógio digital, com a amostra.

#### 4.7. Verificação da Variação de Comprimento (Expansão Residual)

A verificação da variação de comprimento (Expansão Residual) dos testemunhos de concreto extraídos da barragem foi determinada nos corpos-de-prova estocados em água à temperatura de 40°C e efetuadas leituras periódicas através de relógio comparador, nos pinos colados no topo e na base dos testemunhos, sendo uma adaptação da norma ASTM C 1105/95. Para esse ensaio foram selecionados 4 testemunhos, sendo 2 testemunhos extraídos de cada estrutura (Galeria de Tomada d'Água e da Ombreira esquerda). As Figuras 4.19 a 4.26, ilustram o procedimento para a verificação da expansão residual.



Figura 4.19. Foto dos testemunhos de concreto e dispositivo de medição com barra Invar.



Figura 4.20. Foto do relógio digital utilizado nas medições de variação de comprimento.



Figura 4.21. Foto do momento da medição do comprimento de referência.



Figura 4.22. Foto ilustrando o ponto de referência (alinhamento do pino fixado no CP) das leituras.



Figura 4.23. Foto do pino de aço inoxidável fixado do topo e base dos testemunhos.



Figura 4.24. Foto do momento da medição do comprimento de referência.



Figura 4.25. Foto dos corpos-de-prova estocados imersos em água à temperatura de 40°C .



Figura 4.26. Figura do momento da leitura no (corpo-de-prova estocado imerso em água à temperatura de 40°C).

#### 4.8. Ensaio Químico Canadense – AAR 23.26-A

O ensaio químico canadense, proposto por Roger (1986) e normalizado na AAR 23.26-A, tem por objetivo a identificação da potencialidade da rocha quanto à RAC. Este método relaciona a razão  $\text{CaO} / \text{MgO}$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , onde separa os carbonatos das argilas. Os resultados das análises químicas, referente aos óxidos citados acima, são plotados num gráfico (Figura 4.27) onde mostra a distribuição das amostras estudadas segundo a sua composição química. São definidas 2 regiões para agregados considerados não reativos e uma para agregados considerados potencialmente expansivos, conforme mostra a figura abaixo.

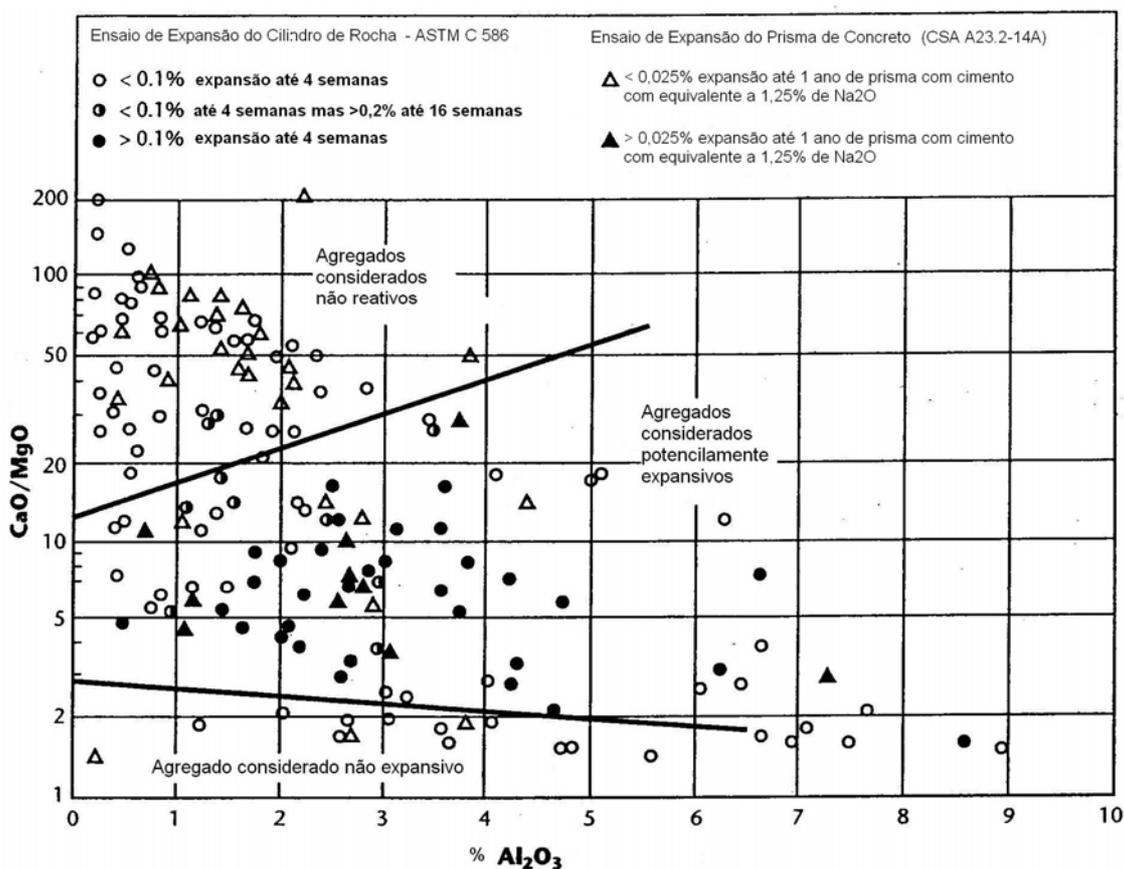


Figura 4.27 - Gráfico referente a razão CaO/MgO versus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utilizado pela norma AAR 23.26-A.

#### 4.9. Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

Quando foram moldados os prismas de concreto, para serem submetidos aos ensaios da ASTM C 1105/95, também foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, segundo as normas NBR 5739/94 e NBR 8522/03, para serem submetidos aos ensaios de determinação das propriedades mecânicas e elásticas dos mesmos. Para a realização desses ensaios foram moldados 3 cilindros de concreto para serem rompidos nas idades de 7, 28, 90 e 180 dias, totalizando assim 12 corpos-de-prova para cada amostra de rocha estudada, nas dimensões de 10 x 20 cm. Na determinação do módulo de elasticidade utilizou-se o plano de carga (tangente inicial) com a tensão fixada em 40 % da tensão de ruptura do corpo-de-prova de referência. Para o testemunho de concreto extraído da barragem foram separados, também, 2 testemunhos de cada estrutura estudada (Galeria de Tomada d'Água e da Ombreira

esquerda), para determinação das duas propriedades, em dimensões variadas, em virtude da extração dos mesmos.

Os ensaios de resistência à compressão foram executados com base na norma NBR 5739/94 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Para determinação do módulo de elasticidade utilizou-se a norma NBR 8522/03 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação (secante).

Os ensaios de módulo foram realizados com extensômetro mecânico e extensômetros elétricos. As Figuras 4.28 e 4.29 ilustram os dois tipos de extensômetros empregados.

O extensômetro mecânico (Compressômetro-expansômetro) é constituído de dois estribos (ou duas garras), um dos quais rigidamente ligado ao corpo-de-prova e o outro ligado a dois pontos diametralmente opostos, de modo que se tenha rotação livre. Em um ponto, entre os dois pontos de apoio do estribo que gira, será usado uma haste pivô, para manter constante a distância entre os estribos, de modo que no ponto oposto, na circunferência, a mudança na distância entre os estribos seja igual à soma das deformações de duas linhas de medida diametralmente opostas.

O extensômetro eletrônico (EMIC) é composto por configuração dupla com sensores independentes para medição em cada lado do corpo de prova e caixa de equalização para obtenção do sinal de deformação média, com jogo de adaptadores para mudança da base de medida. Amplitude de operação: máximo deslocamento mensurável 2,5 mm, montagem direta sobre o corpo-de-prova, resolução 0,0001 mm.

Os strain gages (extensômetro elétrico de fio ou lâmina) podem ser colados nas superfícies dos materiais ou também embutidos em corpos-de-prova. O princípio básico de operação dos extensômetros microrresistivos tipo strain gages é similar ao dos extensômetros Carlson. Os materiais dos condutores elétricos possuem uma sensibilidade à deformação, definida como a relação da variação da resistência elétrica relativa do condutor para a variação relativa de seu comprimento, podendo ser considerados como medidor de deformação. A sensibilidade de deformação é função das variações dimensionais ocasionadas quando o condutor é esticado

elasticamente, ocasionando alguma variação na resistividade básica do material com a deformação.

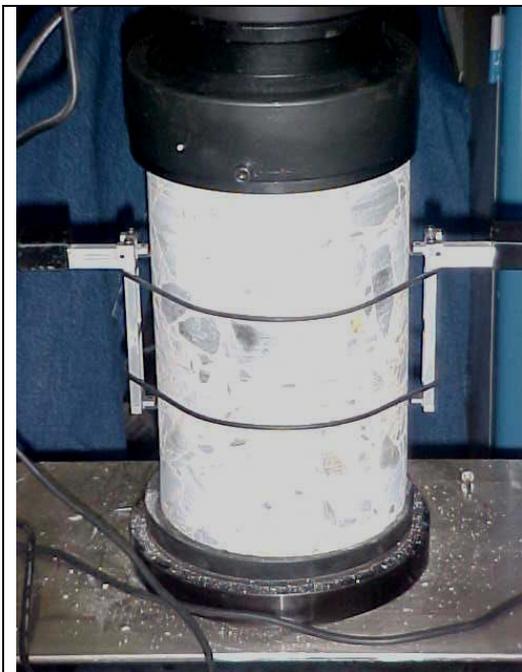


Figura 4.28 – Ensaio de módulo de elasticidade com extensômetro elétrico (EMIC).



Figura 4.29 – Ensaio de módulo de elasticidade com extensômetro mecânico e elétrico, strain gage colado.

#### 4.10. Compressão Uniaxial

Estes ensaios foram realizados segundo a ASTM D 2938/95 e utilizando-se máquina rígida servo-controlada, com capacidade de aplicação de 5,0 MN de carga axial e rigidez de 5,02 MN/mm. A vista geral do equipamento é apresentada na Figura 4.30.

O carregamento foi controlado através de uma razão de deformação radial máxima limite para os corpos-de-prova por unidade de tempo, permitindo a definição contínua do diagrama *tensão x deformação*.

Para a realização desse ensaio foram extraídos 2 testemunhos de cada rocha estudada. Esses testemunhos foram preparados segundo a norma ASTM D 4543-01/01.



Figura 4.30 – Foto do sistema Servo-Controlado para ensaios de compressão das rochas.

As deformações foram medidas através de um conjunto de três transdutores de deslocamento do tipo LVDT, dois deles dispostos diametralmente opostos à geratriz do corpo-de-prova e destinados à obtenção da deformação axial do mesmo. Esses transdutores foram fixados em dois anéis apoiados em cabeçotes de aço de alta dureza em contato com as extremidades do corpo-de-prova. O terceiro transdutor foi fixado à meia altura do corpo-de-prova através de um sistema de corrente, de forma a se obter a deformação circunferencial. O detalhe da montagem do corpo-de-prova pode ser visualizado na Figura 4.31. Como resultado do ensaio de compressão uniaxial, além da resistência à compressão, foi obtido valor de módulo de deformabilidade das rochas.



Figura 4.31 – Foto em detalhe da montagem do corpo-de-prova.

## V – Resultados

Os resultados aqui apresentados se referem aos materiais estudados sistematicamente, os quais foram submetidos a análises instrumentais para caracterização mineralógica e tecnológica e a ensaios de reatividade, conforme descritos no Capítulo IV (Tabelas 4-1 a 4-3) e na Tabela 5.1.

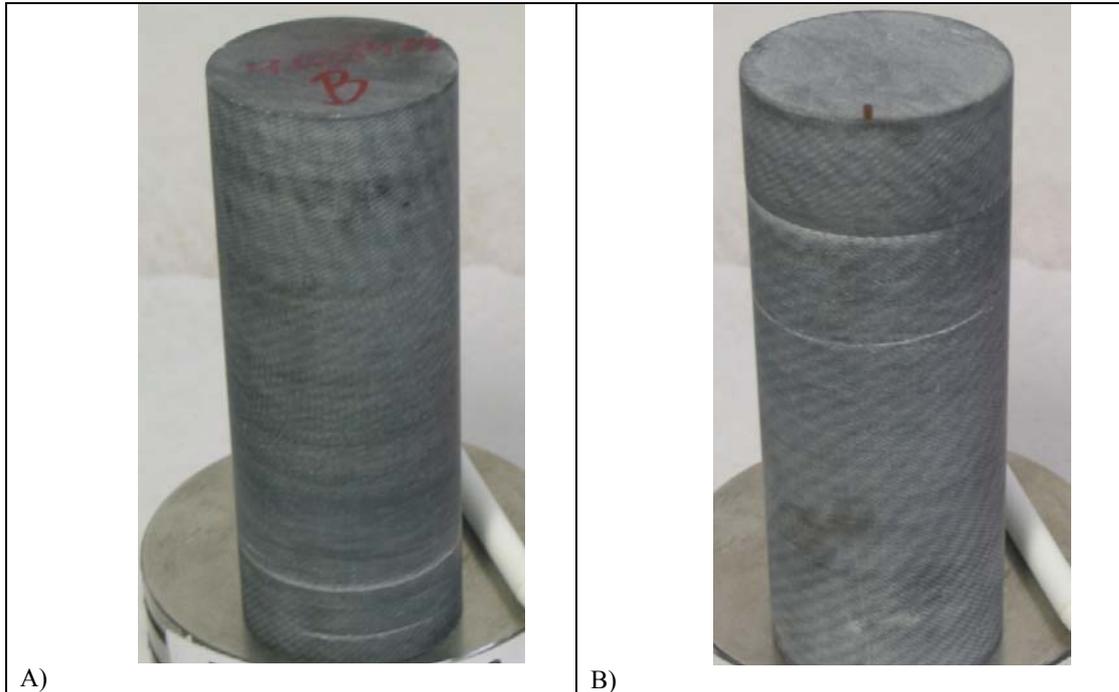
Tabela 5.1. Materiais e as respectivas análises e ensaios.

<b>Materiais estudados</b>	<b>Total de amostras</b>	<b>Análises</b>	<b>Ensaio</b>
Agregado: rochas	06	Petrográfica, química, DRX	Reatividade potencial – Método do cilindro de rocha (ASTM C 586), ensaios de resistência e deformabilidade.
Testemunhos da barragem	11	Petrográfica, química, DRX e MEV	Expansão residual e ensaios de resistência e deformabilidade.
Barras de Argamassa	18	Petrográfica, DRX e MEV	Reatividade potencial – Método Acelerado (ASTM C 1160/01).
Prismas de concreto	18	Petrográfica, química, DRX e MEV	Reatividade potencial para Rochas Carbonáticas– Método dos prismas de concreto (ASTM C 1105/95), ensaios de resistência e deformabilidade.

Conforme mostrado na Tabela 5.1 foi estudado um total de 53 amostras através de análises e ensaios para verificar-se o comportamento das rochas carbonáticas como agregado.

### **5.1. Petrografia**

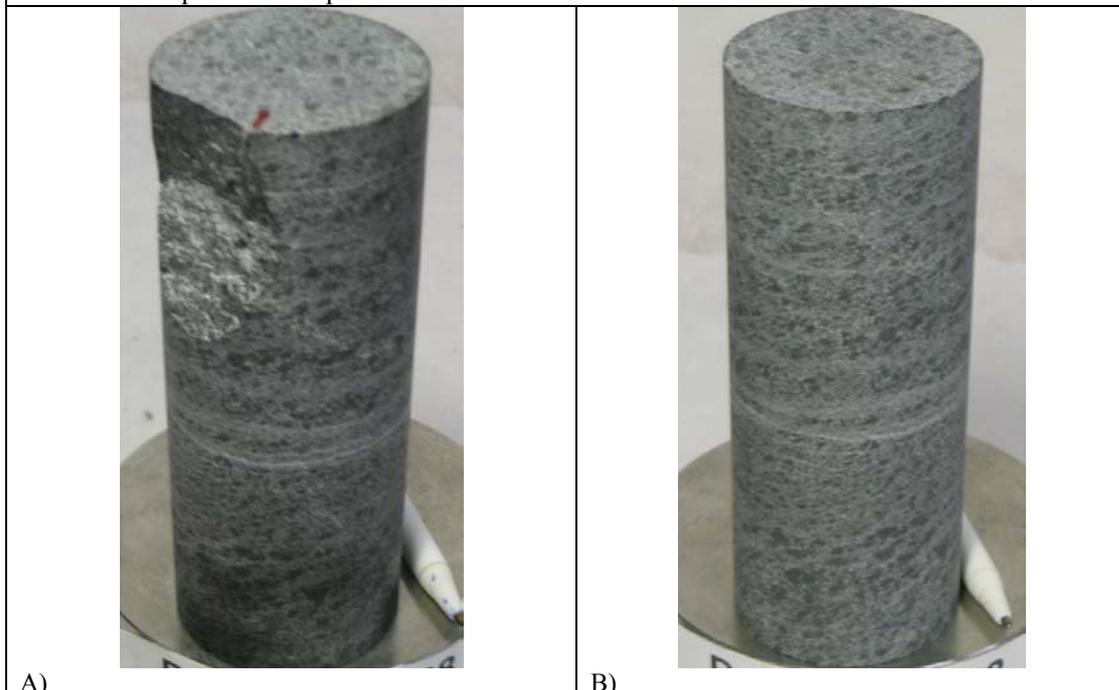
As análises petrográficas mostraram as feições estruturais, texturais e composicionais das rochas carbonáticas e dos compósitos a base de cimento: prisma de concreto e barra de argamassa (após ensaio de reatividade), além dos testemunhos da barragem. Nas Figuras 5.1 a 5.6 são apresentadas as fotos dos testemunhos extraídos das rochas estudadas, com o objetivo de ter o aspecto visual geral das amostras, sendo as mesmas submetidas aos ensaios de resistência e deformabilidade.



A)

B)

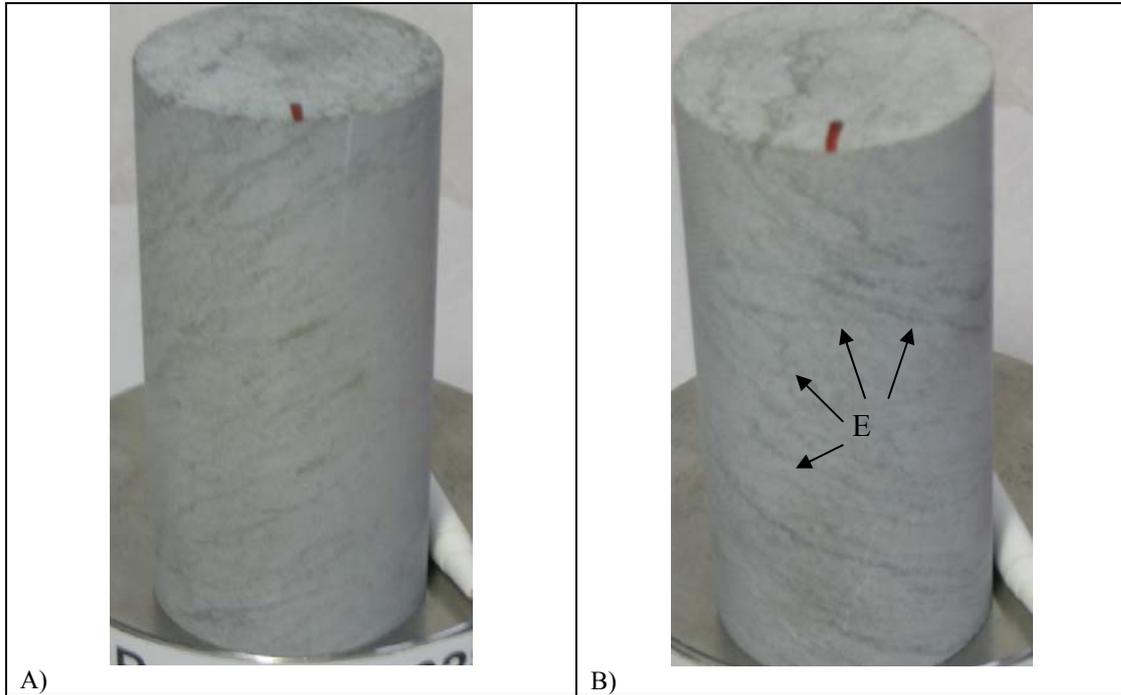
Figuras 5.1 A e B. Testemunhos da amostra 284, observando-se a coloração cinza, lâminas mais escuras intercaladas com camadas cinza médio; planos milimétricos correspondem a microfraturas preenchidas por carbonato.



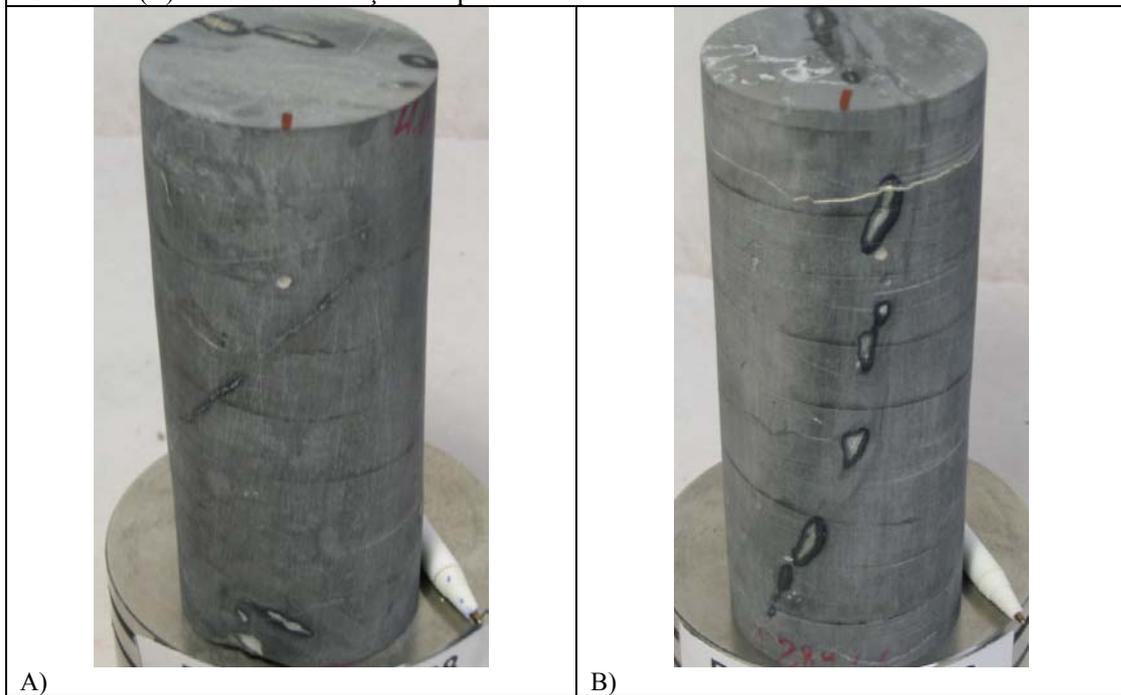
A)

B)

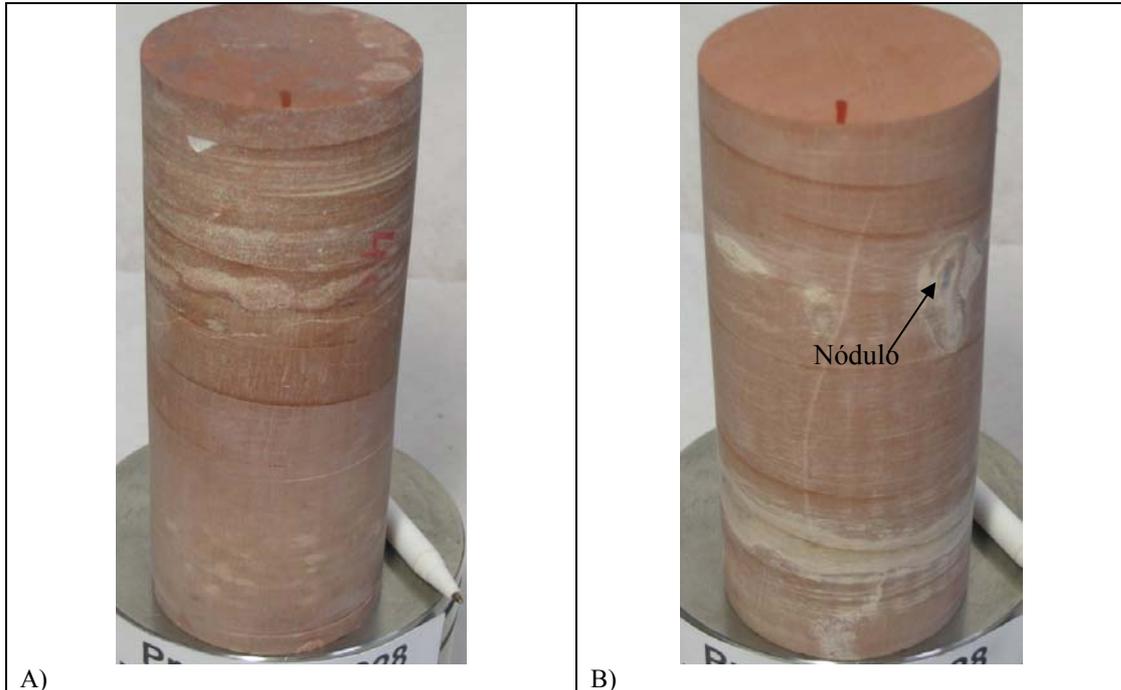
Figuras 5.2 A e B. Testemunhos da amostra 285, observando-se a coloração cinza, com zonas mais escuras (mosqueadas), fraturas milimétricas, preenchidas por carbonato, cortando a rocha em várias direções.



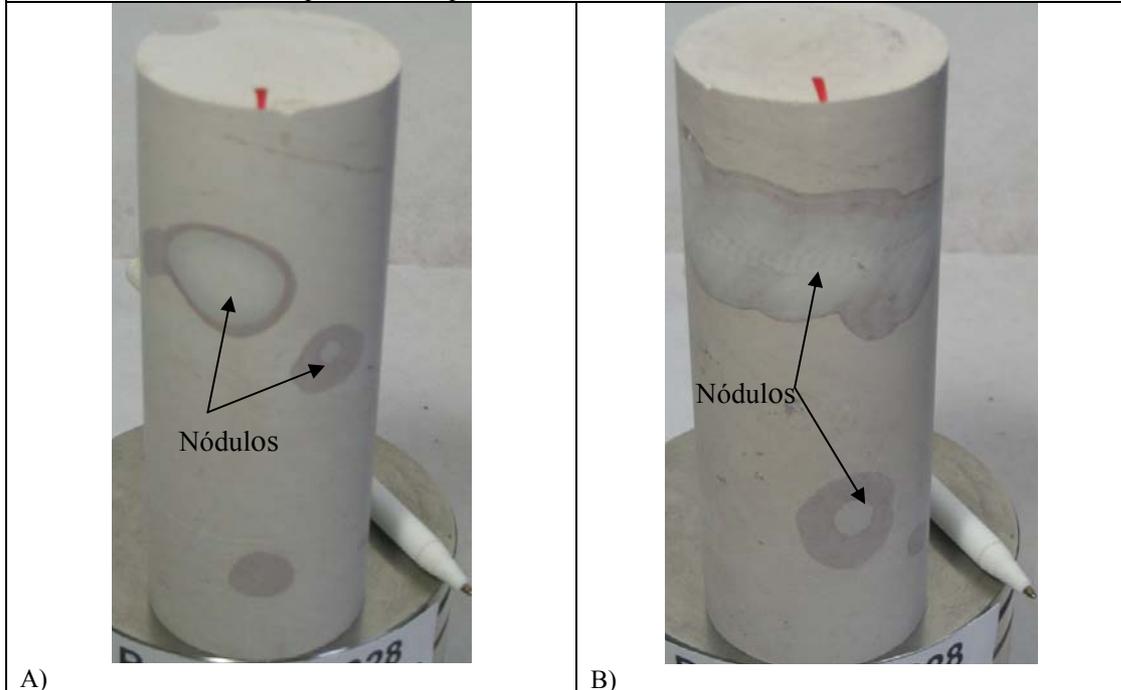
Figuras 5.3 A e B. Testemunhos da amostra 286, observando-se a coloração cinza clara, estilolitos (E) cortam a laminação incipiente.



Figuras 5.4 A e B. Testemunhos da amostra 289, observando-se a coloração cinza claro a escuro, lâminas mais escuras intercaladas com camadas cinza claro; fraturas milimétricas preenchidas por nódulos de chert e/ou carbonato.



Figuras 5.5 A e B. Testemunhos da amostra 290, observando-se a coloração rosa claro a vermelha, acamamento centimétrico a decimétrico com níveis microfossilíferos com 1cm de espessura; nódulos milimétricos a centimétricos, de material silicoso (chert/cacedônia); fraturas submilimétricas preenchidas por carbonatos.



Figuras 5.6 A e B. Testemunhos da amostra 291, observando-se a coloração esbranquiçada, nódulos de sílica e fraturas submilimétricas.

### 5.1.1 Agregados – Rochas Carbonáticas

A caracterização das rochas utilizadas como agregados, compreendeu a descrição macroscópica (Tabela 5.2) e microscópica, conforme o procedimento indicado no Capítulo IV. Em função da granulação fina, as rochas foram classificadas mineralogicamente, utilizando-se os resultados da DRX, pois o uso da solução à base de Alizarina-red mostrou-se ineficiente na distinção dos minerais carbonáticos, exceto na amostra 285, graças à sua granulação média. As feições microscópicas variam nas diversas amostras estudadas.

Tabela 5.2. Classificação e descrição macroscópica das rochas carbonáticas.

UNIDADE	AMOSTRA	LITOTIPOS	CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA
Grupo Paranoá	284	Dolarenito muito fino (Figuras 5.1 A e B)	Coloração cinza claro, com camadas centimétricas e laminação fina, ocasionalmente marcada por filmes argilosos e granulação muito fina, fraturas submilimétricas preenchidas por carbonato.
	285	Calcário Recristalizado (Figuras 5.2 A e B)	Coloração cinza escura a clara, mosqueada como efeito de recristalização, cristais bem desenvolvidos; veios de carbonato esbranquiçado cortando a rocha; estilolitos em várias direções e feições de deformação tectônica.
	286	Calclutito (Figuras 5.3 A e B)	Coloração cinza clara, laminação incipiente, granulação muito fina, finamente recristalizada, estilolito, predominante, concordam, parcialmente, com a laminação.

Tabela 5.2. Classificação e descrição macroscópica das rochas carbonáticas.

UNIDADE	AMOSTRA	LITOTIPOS	CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA
Bacia do Paraná	289	Calclutito (Figuras 5.4 A e B)	Coloração cinza claro a escuro, acamamento plano, com camadas centimétricas marcadas por lâminas argilosas escuras; granulação muito fina; cristais (mili a centimétricos) bem formados de pirita; fraturas milimétricas ao longo das quais ocorrem nódulos de chert, ou preenchimento por carbonatos.
	290	Bio-calclutito Dolomítico (Figuras 5.5 A e B)	Coloração rosa claro a vermelha; acamamento centimétrico a decimétrico com níveis microfossilíferos com 1cm de espessura; granulação muito fina; nódulos milimétricos a centimétricos, de material silicoso (chert/cacedônia); fraturas submilimétricas preenchidas por carbonatos.
	291	Bio-calclutito Dolomítico (Figuras 5.6 A e B)	Coloração esbranquiçada, estrutura maciça com acamamento incipiente; granulação muito fina nódulos de sílica, fraturas submilimétricas.

Os estudos petrográficos das rochas usadas como agregado mostraram que as deformações tectônicas são a principal feição que distingue as rochas provenientes do Grupo Paranoá e da Bacia do Paraná. Enquanto nas primeiras são evidentes as fraturas, os estilólitos e, ocasionalmente, a foliação, nas últimas estas feições são bastante discretas, ou não foram vistas. Todas as amostras estudadas, exceto a 285 que apresenta forte recristalização, têm granulação fina a muito fina. Entretanto as estruturas e a composição variam dentro da mesma unidade litoestratigráfica. Como citado anteriormente, a composição mineral de todas as amostras estudadas foi definida a partir dos resultados das análises por DRX, sendo os minerais opacos identificados através de microscopia ótica de luz refletida.

- **Rochas do Grupo Paranoá**

Provenientes das regiões de Vila Propício (284 e 285) e do entorno do Distrito Federal (286), as amostras estudadas correspondem, respectivamente a **dolarenito muito fino, calcário recristalizado e calclutito**. Apresentam coloração cinza média a escura, sendo formadas por camadas de espessura centimétrica, marcadas por variação da granulação e conteúdo de material argiloso. Fortemente coesas, as porções carbonáticas apresentam estrutura

predominantemente maciça, enquanto os níveis argilosos são lâminas milimétricas a centimétricas, que determinam planos preferenciais de rompimento. Estes planos correspondem também a fraturas, por vezes relacionadas a estilólitos, ou preenchidas por calcita cristalina. Ao microscópio, mostram granulação muito fina (exceto 285), mas outras feições texturais são distintas, como descrito a seguir.

**Dolarenito muito fino (284):**

Os níveis carbonáticos apresentam granulação de areia muito fina, intensamente recristalizados. Os cristais, em geral alongados (Figuras 5.7 A a D), se orientam segundo uma direção preferencial, aparentemente o acamamento, marcado também por cristais maiores de dolomita. Nestes, os argilominerais são raros, mas são comuns nos níveis mais finos, milimétricos, sendo associados a cristais de quartzo. Planos mal definidos, cortando o acamamento, representam uma foliação incipiente, ocasionalmente destacada por planos de fratura, nos quais se alojam minerais opacos associados a cristais de carbonatos. Raros grãos são substituídos por cristais de calcita que, em geral se estendem como cimento. Os minerais opacos foram identificados como pirrotita, o mais abundante, seguido da pirita e raros cristais de calcopirita. Esses minerais encontram-se frescos sem superfície corroída. A pirita apresenta dimensões de 0,005 a 0,17 mm, ocorre geralmente idiomórfica em cristais isolados ou associados à borda da pirrotita. A pirrotita apresenta dimensões entre 0,005 a 0,32 mm e ocorre como massas disformes intersticiais. A calcopirita ocorre com cerca de 0,003 mm de diâmetro, preferencialmente inclusas na pirrotita, porém ocorrem raros intercrescidos por justaposição com a pirita. Há muitos cristais de granulação muito fina de pirita e pirrotita disseminados na rocha. Ocorrem ainda, raros cristais prismáticos de zircão.

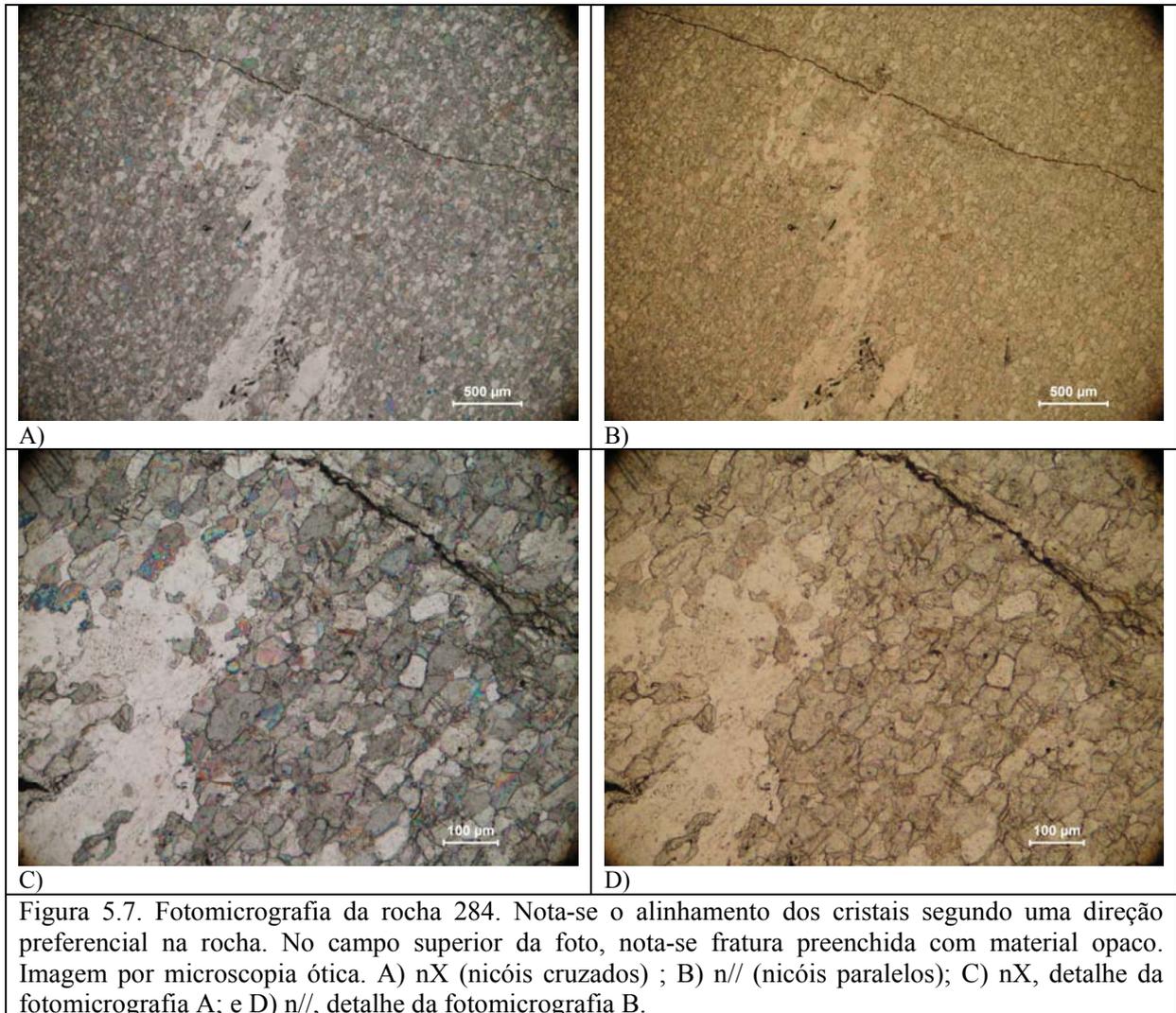
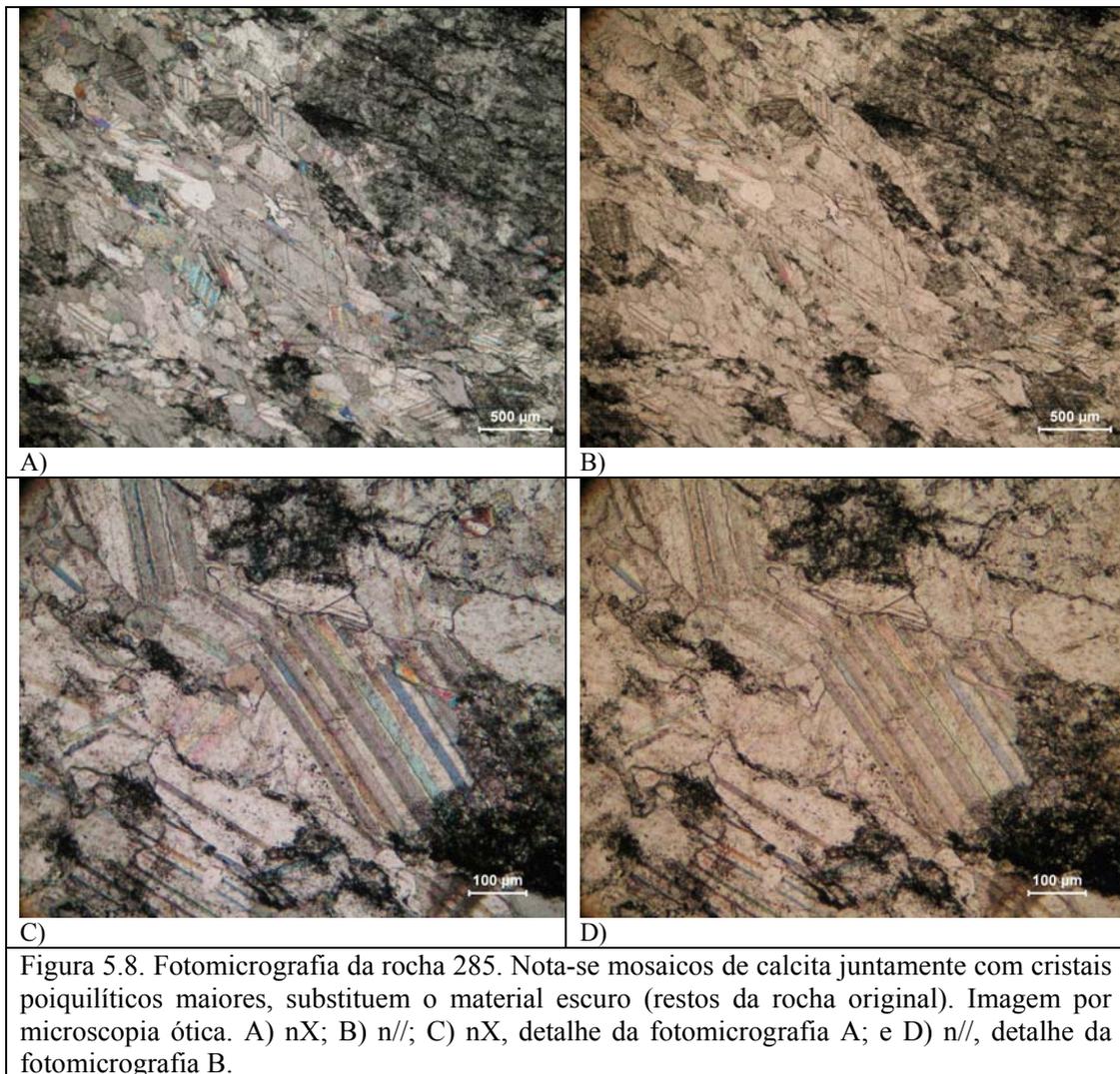


Figura 5.7. Fotomicrografia da rocha 284. Nota-se o alinhamento dos cristais segundo uma direção preferencial na rocha. No campo superior da foto, nota-se fratura preenchida com material opaco. Imagem por microscopia ótica. A) nX (nicóis cruzados) ; B) n// (nicóis paralelos); C) nX, detalhe da fotomicrografia A; e D) n//, detalhe da fotomicrografia B.

### Calcário recristalizado (285):

Em lâmina, esta rocha é constituída por um mosaico de calcita, constituído por cristais anédricos com dimensões entre 0,25 e 0,10 mm. Imersos nesses mosaicos, cristais poiquilíticos maiores substituem o material escuro (proeminentes em amostras de mão), atribuídos a restos preservados da rocha original (Figuras 5.8 A a D). Os cristais poiquilíticos envolvem estilolitos, grãos dedríticos de quartzo (areia muito fina), cristais euédricos a subédricos de minerais opacos, além de argilominerais. A foliação da rocha é marcada pela orientação dos cristais, fraturas e estilolitos. Os minerais opacos são representados pela pirita, calcopirita, pirrotita, ilmenita e esfarelita. A pirita está preferencialmente alongada segundo a foliação da rocha, com comprimento até 0,7 mm, porém encontram-se cristais disseminados

de forma desordenada com diâmetro de 0,005 mm a 0,05 mm. Alguns cristais de pirita apresentam alteração para a hematita nas bordas e fraturas. A esfarelita ocorre em cristais de granulação fina, alongados segundo a foliação. A calcopirita ocorre tanto em cristais euédricos com diâmetro em torno de 0,030 mm, quanto em grãos arredondados de até 0,1 mm de diâmetro, também ocorrem inclusas em pirita e em ilmenita. A pirrotita é rara e encontra-se associada à pirita.



#### Calcilutito (286):

Rocha de granulação muito fina, com recristalização fina, contem raros cristais de calcita dispersos. As feições de deformação são destacadas por estilolitos (Figuras 5.9 A a D) com

padrão anastomosado, aproximadamente, concordante com o acamamento, marcados por palhetas muito finas de clorita. As fraturas, milimétricas a submilimétricas, cortadas pelos estilolitos são preenchidas por carbonatos e minerais opacos. Raros grãos submilimétricos de quartzo estão dispersos na lâmina. O mineral opaco é representado pela pirita. Este mineral apresenta dimensões entre 0,003 mm a 0,060 mm, ocorrem disseminados na rocha, estão frescos e bem formados.

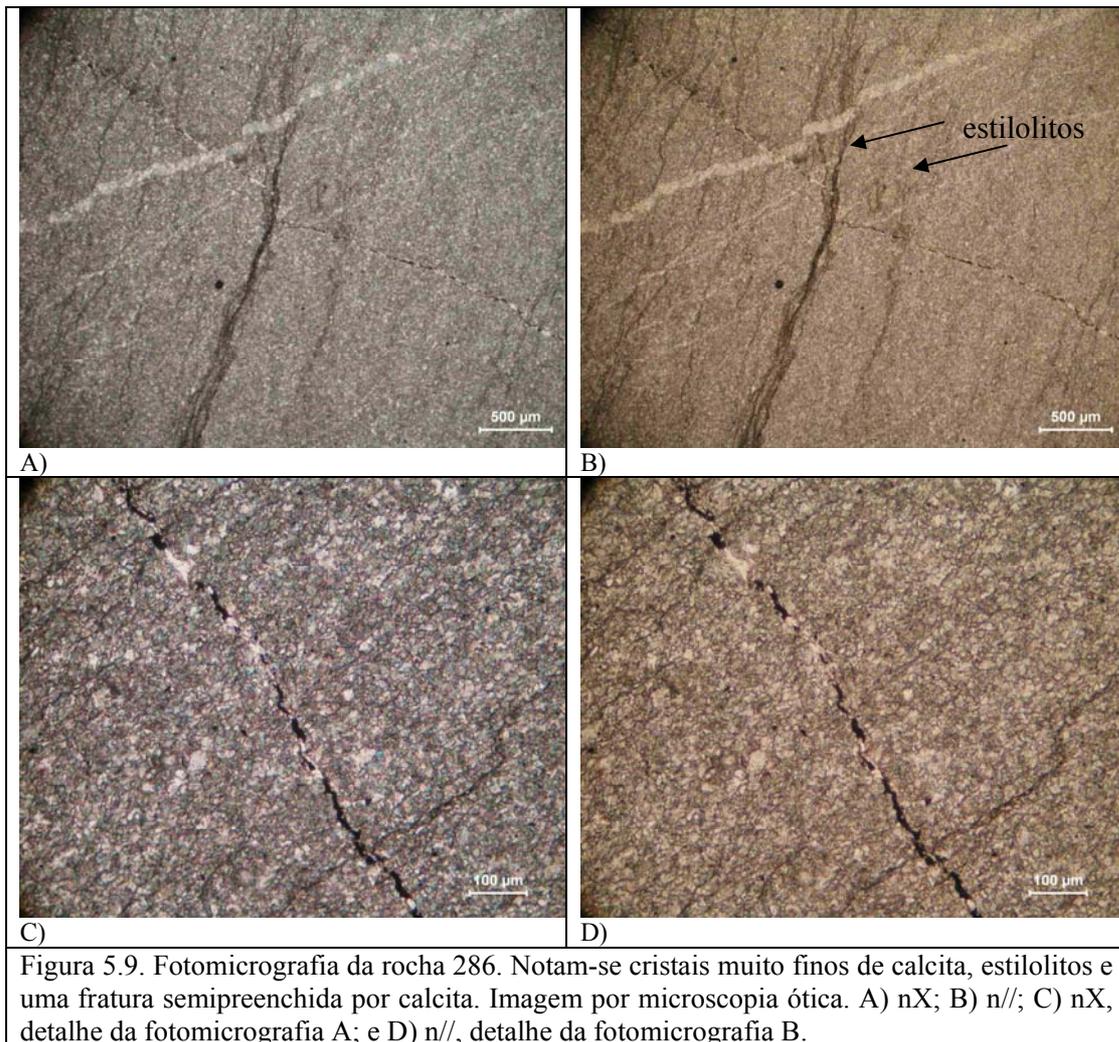


Figura 5.9. Fotomicrografia da rocha 286. Notam-se cristais muito finos de calcita, estilolitos e uma fratura semipreenchida por calcita. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da fotomicrografia A; e D) n//, detalhe da fotomicrografia B.

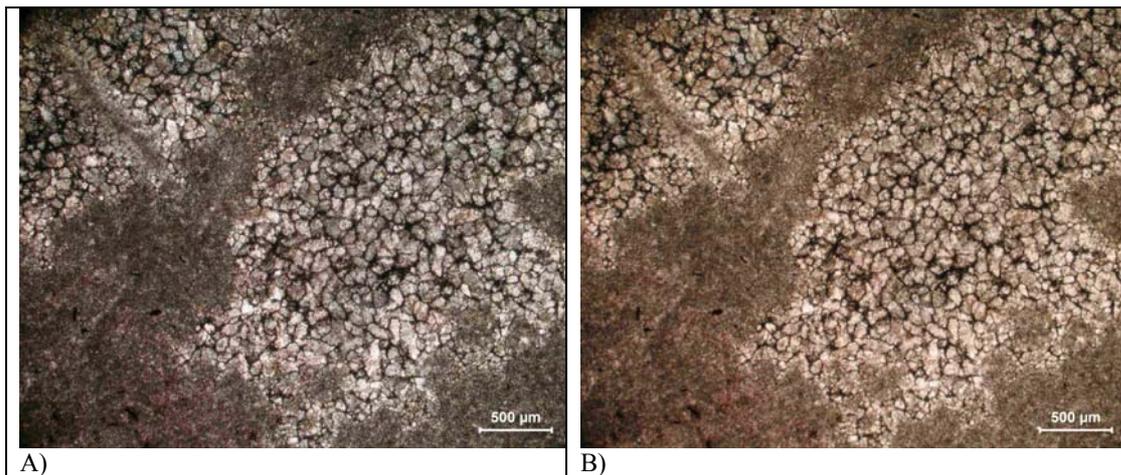
- **Rochas da Bacia do Paraná**

A amostra proveniente de Portelândia - GO (289) tem coloração cinza escura, classificada como **calcilito**, enquanto as de Alto Garça - MT são avermelhada (290) e esbranquiçada (291), ambas classificadas como **bio-calcilito dolomítico**. Formadas por camadas de

espessura centimétrica a decimétricas definidas pela variação de coloração, apresentam filmes argilosos descontínuos. Contêm microfósseis e nódulos de chert de diâmetros variados e alguns estão estirados segundo o acamamento. Todas as amostras têm granulação de dimensão silte ou menor, quase totalmente recristalizadas, com cristais submilimétricos.

**Calclutito (289):**

O acamamento insipiente é marcado por níveis portadores de material opaco. Raros grãos opacos, dispersos, têm formas subédricas quadráticas, sugestiva de sulfeto de ferro. Rocha de granulação muito fina parcialmente obliterada pela recristalização de cristais submilimétricos de calcita. Localmente, apresenta mosaicos de cristais maiores de calcita que formam agregados (Figuras 5.10 A a D). Algumas cavidades irregulares são conectadas, entre si, através de finos canais. Os cristais maiores de calcita são circundados por películas intersticiais de minerais opacos. São raros os oóides indicados por estruturas circulares contendo calcita recristalizada. Veios finos preenchidos por calcita, localmente, associada a argilominerais, cortam a rocha e não apresentam direção preferencial. O mineral opaco é representado pela pirrotita, como cristais anhédricos, com dimensões entre 0,003 mm a 0,030 mm, a maioria apresenta-se alterado para limonita.



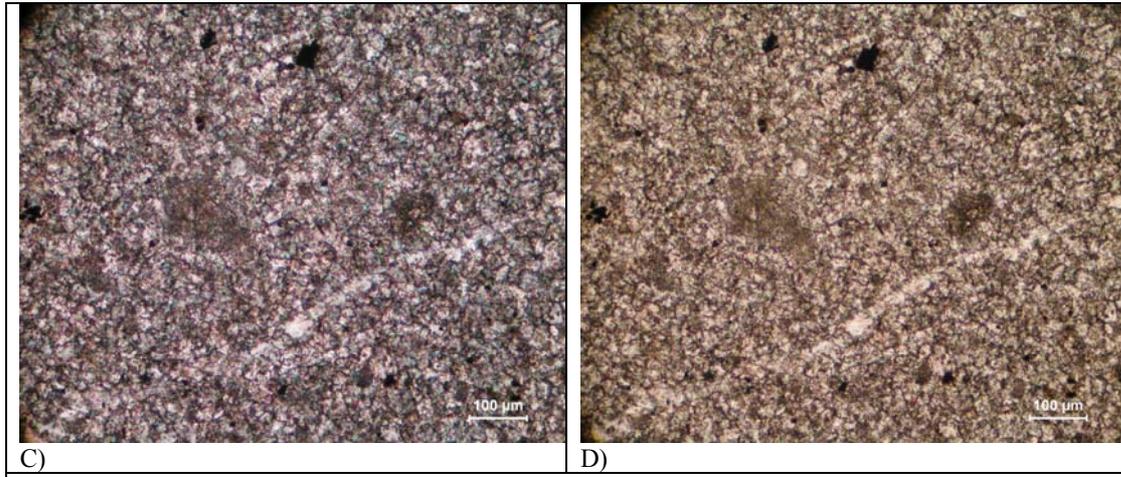


Figura 5.10. Fotomicrografia da rocha 289. Porção com cristais muito finos de calcita bordejando agregados de mosaicos de cristais maiores do mesmo mineral, opacos disseminados e veio de calcita que corta a lâmina. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da porção mais fina; e D) n//, detalhe da porção mais fina.

#### **Bio-calcilutito dolomítico (290 e 291):**

As duas amostras provenientes de Alto Garça, embora macroscopicamente distintas pela coloração avermelhada (290) e esbranquiçada (291), são bastante semelhantes ao microscópio. A calcita é o principal componente e ocorre como cristais submilimétricos (Figuras 5.11 A a D e 5.12 A a D), enquanto a dolomita apresenta-se em pequenos romboedros bem formados dispersos. Destacam-se fragmentos de conchas de até 0,5 mm (Figuras 5.12 A e B), preenchidas por calcita, ou chert, que constituem níveis distintos. São comuns os grãos de quartzo e de minerais opacos, estes, geralmente em agregados alongados paralelos ao acamamento. Veios submilimétricos sem direção preferencial cortam a rocha e são preenchidos por calcita e/ou material opaco (Figuras 5.12 C e D). Apenas a amostra 291 apresentou minerais opacos, representados por pirita e hematita, com tamanhos entre 0,03 a 0,003 mm.

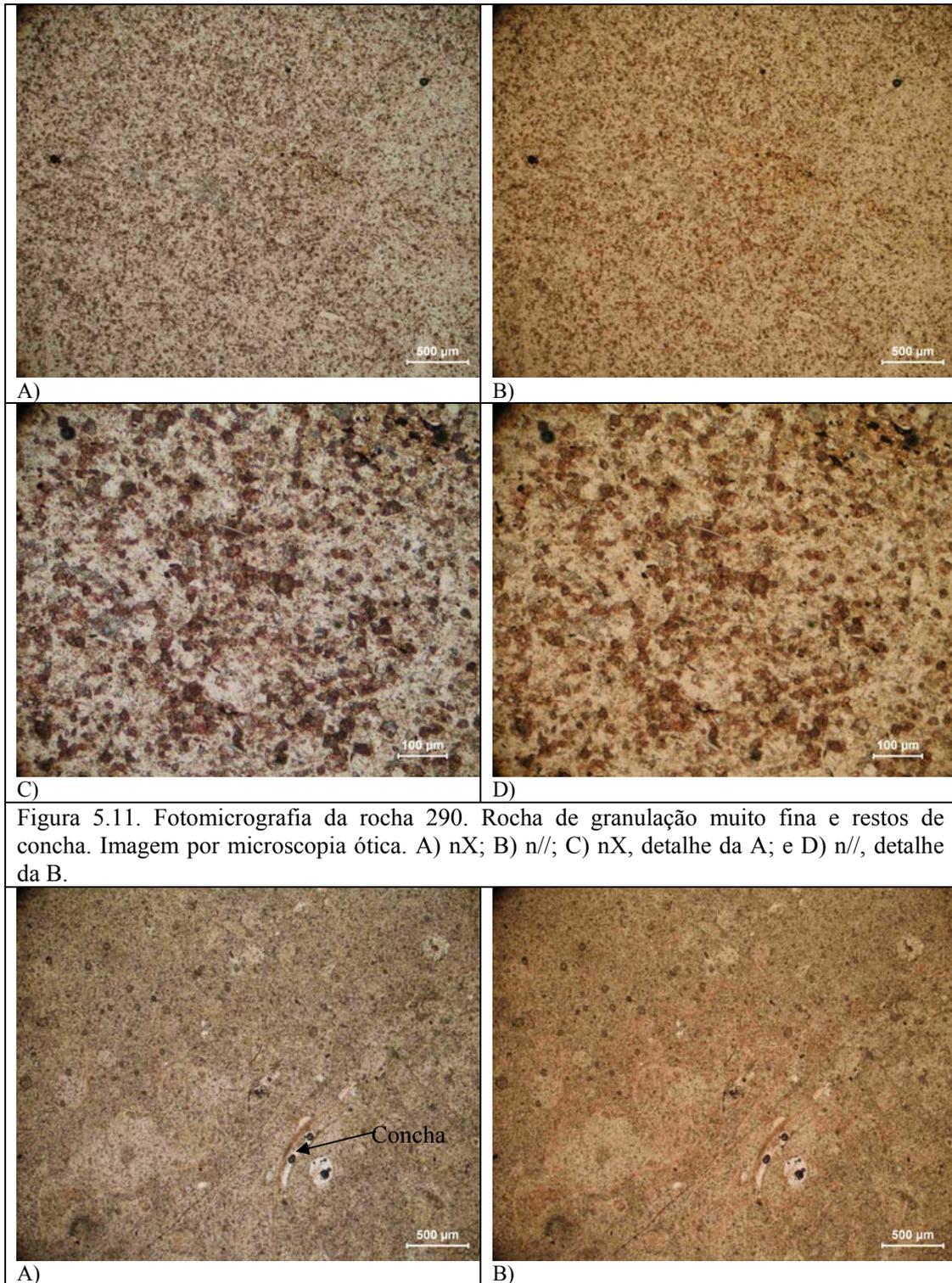


Figura 5.11. Fotomicrografia da rocha 290. Rocha de granulação muito fina e restos de concha. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da A; e D) n//, detalhe da B.

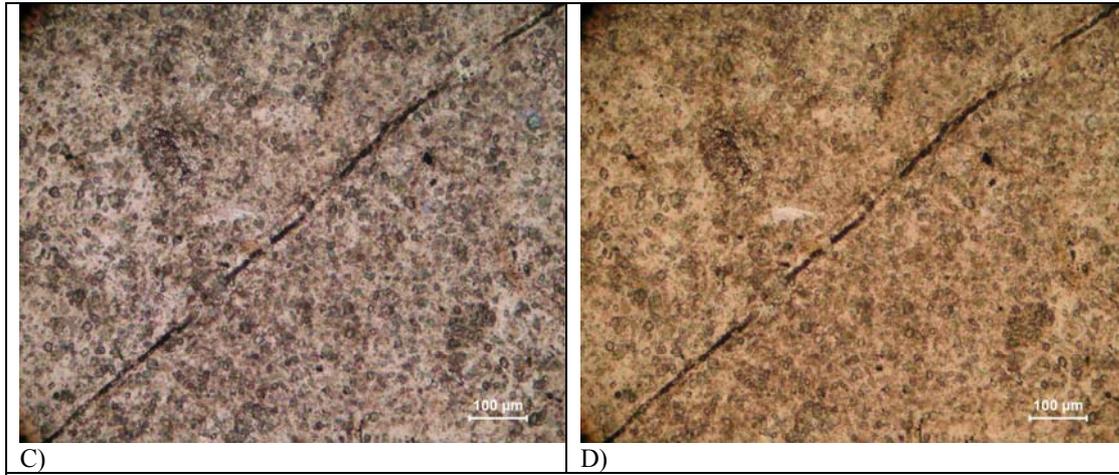


Figura 5.12. Fotomicrografia da rocha 291. Rocha de granulação muito fina, opacos disseminados, veio de material opaco que corta a lâmina e restos de conchas preenchidas por calcita e chert. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX, detalhe da porção mais fina; e D) n//, detalhe da porção mais fina.

### 5.1.2. Concretos da Barragem

Dos 11 testemunhos extraídos da barragem foram confeccionadas 11 lâminas delgadas impregnadas (Tabela 5.3). Após análise visual foram escolhidas amostras que apresentam alguma evidência de RAA, como borda, poro preenchido, além de diferenças de tonalidades, estruturas e texturas dos agregados. Assim, foram confeccionadas 2 lâminas da amostra 335 A e 2 da amostra 335 D, que fazem parte da Galeria de Tomada d'Água, além de 7 lâminas da Ombreira esquerda (340 A).

Tabela 5.3. Descrição macroscópica dos testemunhos da barragem.

Posição	Testemunhos da Barragem	Petrografia, MEV e DRX	Caracterização macroscópica
Galeria da Tomada d'água	335 A	X	Concreto íntegro, denso, sem presença de pulverulência, com poros de ar incorporado, alguns preenchidos por material branco. O agregado graúdo apresenta tamanhos entre 1,5 e 7,0 cm de maior comprimento e é constituído por rochas carbonáticas de coloração cinza clara. O agregado miúdo é composto basicamente por quartzo e quartzito. A aderência entre o agregado e a argamassa é boa. Em algumas bordas são observadas películas brancas neste contato. Outras feições macroscópicas de RAA não são observadas. Não apresenta fissuras.
	335 B		
	335 C		
	335 D	X	
	335 E		
	335 F		
Ombreira Esquerda (Parede a	340 A	X	Concreto íntegro, denso, sem presença de pulverulência, com poros de ar incorporado, eventualmente preenchidos por material branco. O agregado graúdo apresenta tamanhos entre 1,0 e 10,0 cm de maior comprimento e é constituído por rochas carbonáticas de coloração cinza escura. O pouco
	340 B		

Posição	Testemunhos da Barragem	Petrografia, MEV e DRX	Caracterização macroscópica
montante da Barragem)	340 C		agregado miúdo é composto basicamente por quartzo e quartzito. A aderência entre o agregado e a argamassa é boa. Em algumas bordas são observadas películas brancas neste contato. Outras feições macroscópicas de RAA não são observadas. Apresenta diminutas fissuras. Alguns fragmentos do agregado miúdo apresentam coloração amarelo-ocre. A quantia de cimento utilizada para compor a argamassa destes testemunhos é inferior àquela utilizada na argamassa dos testemunhos da galeria da tomada d'água.
	340 D		
	340 E		

O material dos agregados, tanto graúdo quanto miúdo, apresenta as mesmas características em todos os testemunhos, independentemente da sua posição na barragem, diferindo apenas na coloração.

Agregado Graúdo:

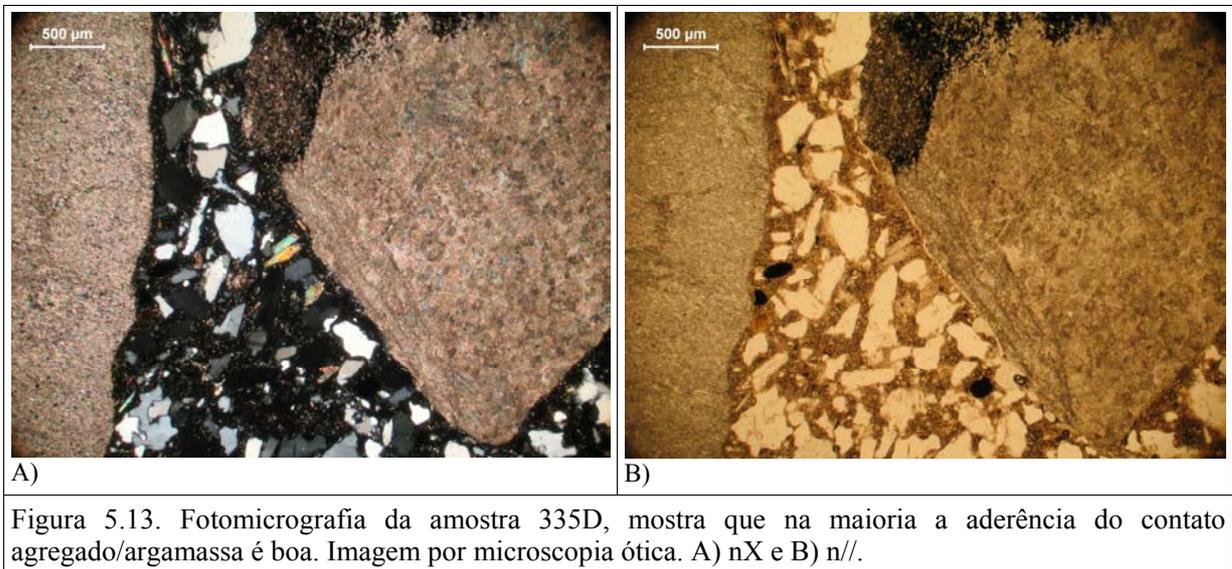
O agregado graúdo é constituído por fragmentos de rochas carbonáticas, geralmente de coloração cinza, estrutura maciça com raros fragmentos laminados, classificado como Calcário. Ao microscópio observa-se granulação média (calcarenito) a fina (calcilito), além de raros fragmentos de calcirrudito, constituído por intraclastos arredondados de calcilito. A maioria dos fragmentos corresponde a rochas mais ou menos recristalizadas, com cristais submilimétricos, ocasionalmente milimétricos, anhédricos, com aspecto turvo em luz transmitida. Nos fragmentos de calcilito, nota-se a orientação dos grãos e dos microcristais segundo o acamamento, mas esta orientação não é notada nos calcarenitos. A laminação vista em um único fragmento, resulta da alternância de lâminas de granulação e textura diferentes. São comuns as microfraturas, por vezes preenchidas por calcita cristalina. Os estilolitos parecem favorecer localmente a recristalização de calcita. O mineral opaco é representado pela pirita, que ocorre disseminada na rocha; apresenta-se em cristais subédricos com dimensões entre 0,005 a 0,015 mm, representando a minoria, porém a maioria ocorre em cristais euhédricos de forma hexagonal, com tamanho variando de 0,005 a 0,010 mm, e raros cristais disseminados de 0,150 mm, e também em agregados de cristais intercrescidos com 0,010 mm de diâmetro.

Agregado Miúdo:

É composto por fragmentos subangulosos a angulosos de 80% de quartzo (mono, policristalino e criptocristalino), freqüentemente com extinção ondulante alta (ângulo maior que 25°), cerca de 10% de fragmentos de calcário e menos de 10% de fragmentos de micas (em geral muscovita, ou constituinte de rocha metapelítica), contendo também cerca de 2% de material opaco, além de outros, sendo o feldspato muito raro.

Argamassa:

A argamassa dos testemunhos de concreto da barragem encontra-se acastanhada, com poros e poucas fissuras. O contato agregado/argamassa na maioria dos testemunhos apresenta-se bem aderido (Figuras 5.13 A e B), exceto na amostra 335 A (Figuras 5.14 A e B). Em todas as amostras foram evidenciadas algumas películas opacas no contato entre agregado/argamassa, as quais podem ser relacionadas à presença de RAA (Figuras 5.15 A e B).



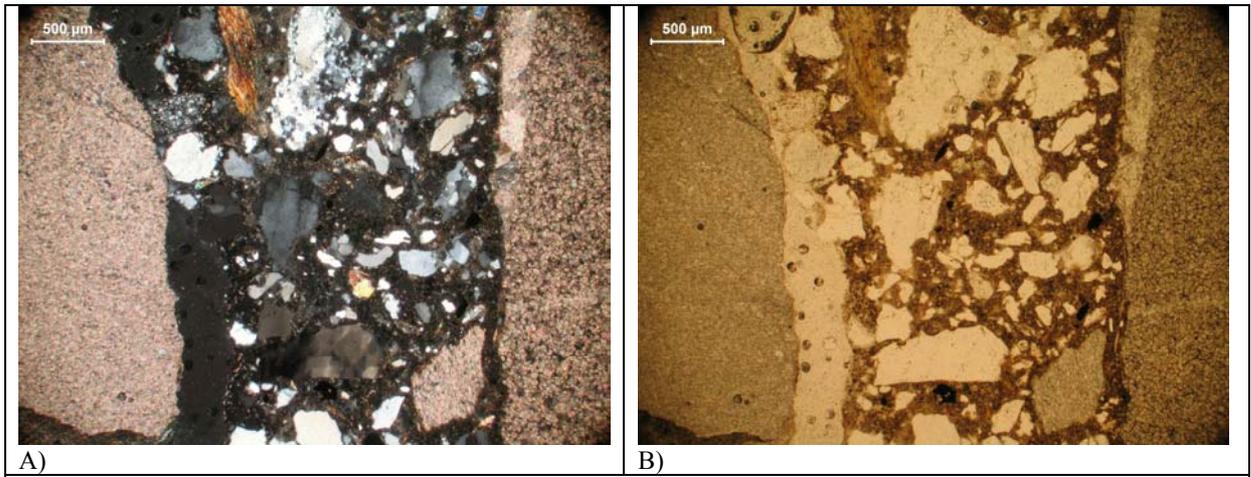


Figura 5.14. Fotomicrografia da amostra 335A, mostra a pouca aderência e perda de material do contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n//.

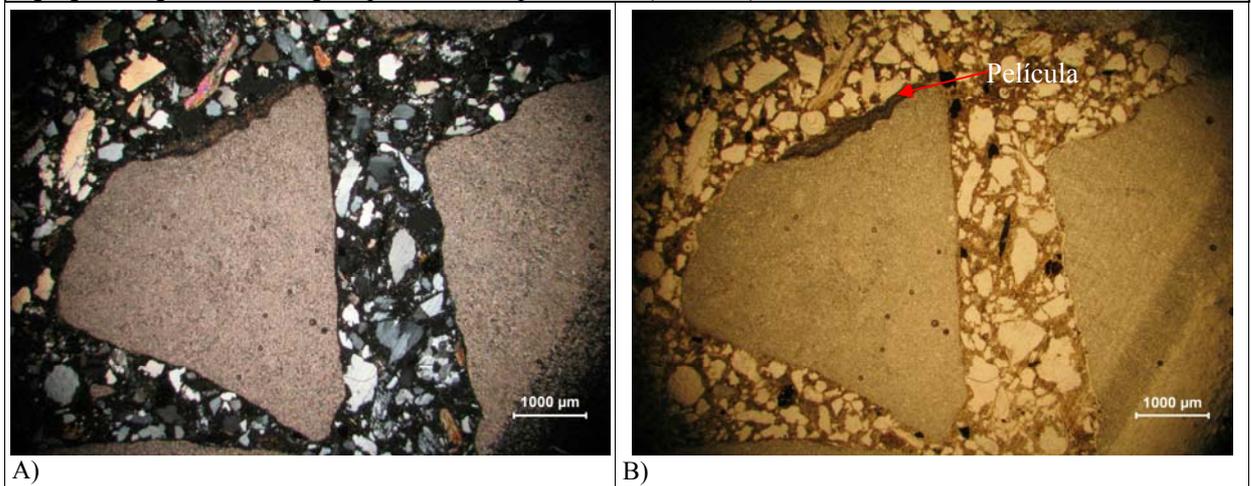


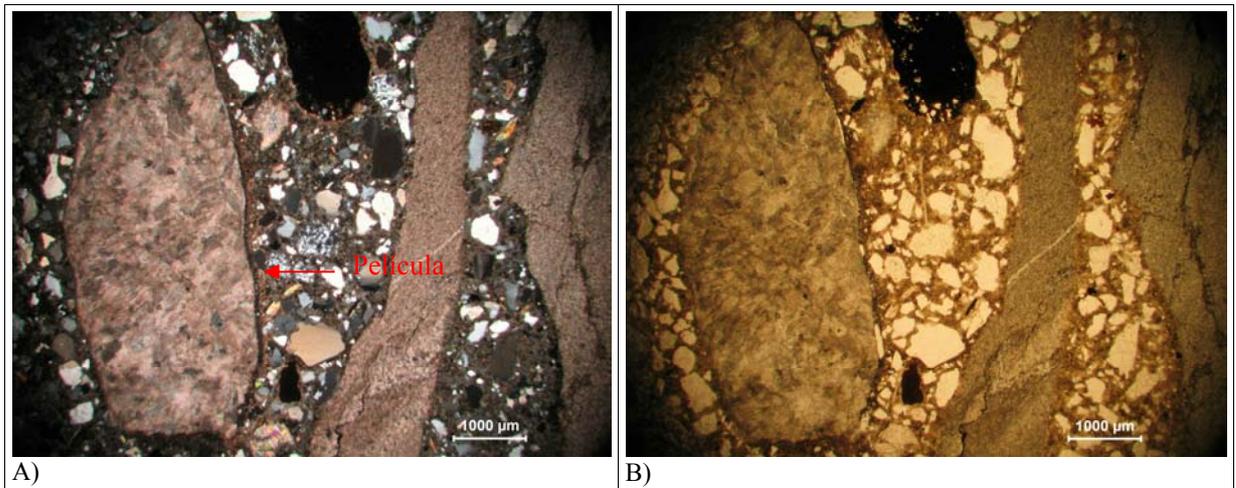
Figura 5.15. Fotomicrografia da amostra 335A, presença de película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n//.

Como citado na Tabela 5.3, foram estudadas, por microscopia ótica e difração de raios-X, duas amostras dos testemunhos provenientes da Galeria de Tomada d'Água (335A e 335D). O testemunho de concreto 335A apresenta, macroscopicamente, microfaturas contínuas que cortam tanto o agregado graúdo, o miúdo, como a argamassa (Figura 5.16).



Figura 5.16. Fotografia do testemunho de concreto 335A. Nota-se microfissuras que cortam o agregado e a argamassa. O agregado graúdo é semelhante à rocha 286, notam-se os estilolitos e a granulação muito fina.

Na lâmina referente ao testemunho de concreto 335D também se observa a existência de películas ao longo do contato agregado/argamassa (Figuras 5.17 A e B). Entretanto, as suas dimensões submicroscópicas e ausência de material (Figuras 5.17 C e D), em função de sua fragilidade, impossibilitam a sua determinação mesmo através de análises microlocalizadas.



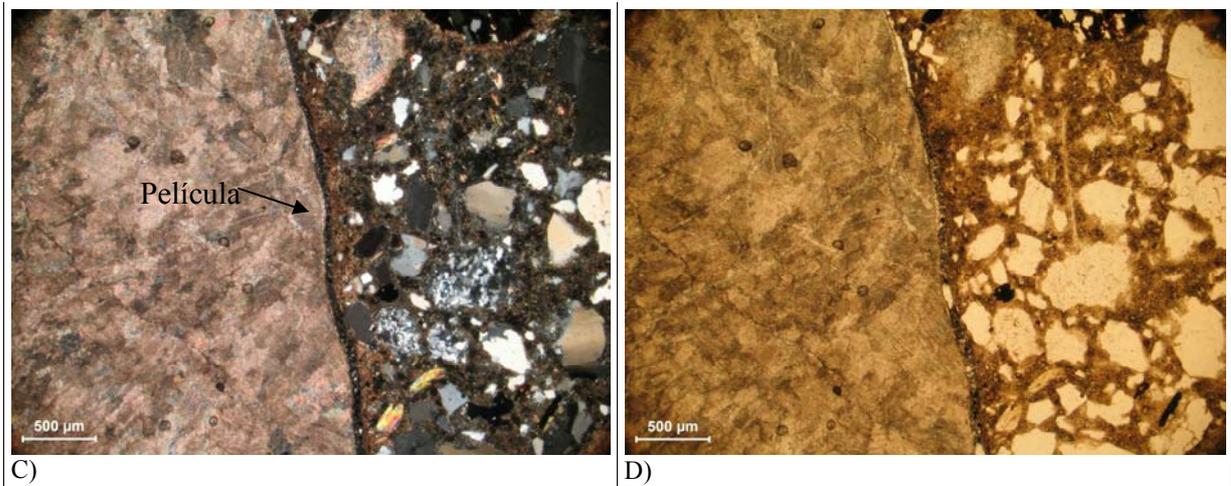


Figura 5.17. Fotomicrografia da amostra 335D, presença de película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX e D) n//.

Já nos cinco testemunhos de concreto da Ombreira Esquerda, 340 A a E, macroscopicamente são observadas fraturas contínuas, que cortam tanto agregado como argamassa. (Figura 5.18).



Figura 5.18. Fotografia do testemunho de concreto 335A. Notam-se microfissuras que cortam o agregado e a argamassa. O agregado graúdo é semelhante à rocha 286, notam-se os estilólitos e a granulação muito fina.

Nota-se ainda, a presença de películas de material esbranquiçado no contato agregado/argamassa, fraturas e estilolitos (Figuras 5.19 A e B).

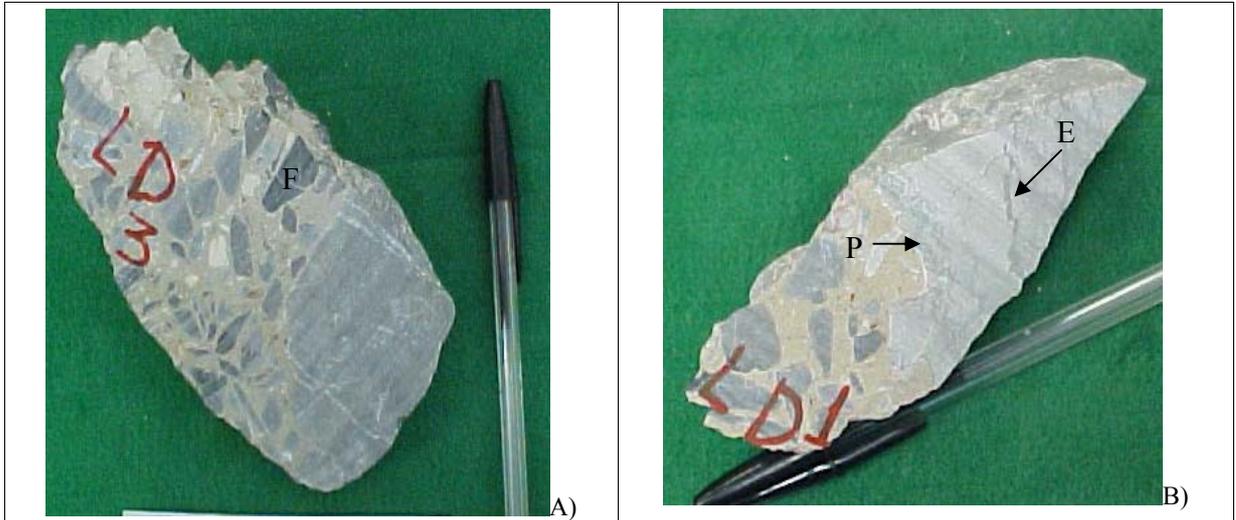
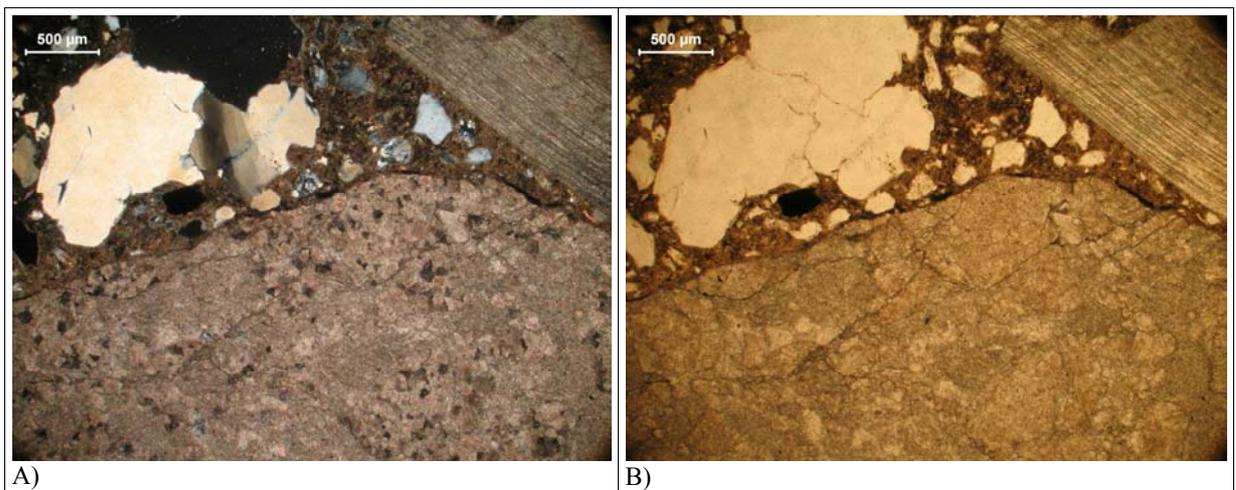


Figura 5.19. Fotografia do testemunho de concreto 340A. Nota-se microfissuras (F) que cortam o agregado e a argamassa, película (P) branca no contato agregado/argamassa. Observam-se estilolitos (E) e a granulação muito fina.

Essas feições são confirmadas microscopicamente, verificando-se, também, semelhança com a rocha 286, conforme apresentado nas Figuras 5.20 A a D. Também, nestas amostras, grande parte do material da borda foi perdido na confecção da lâmina.



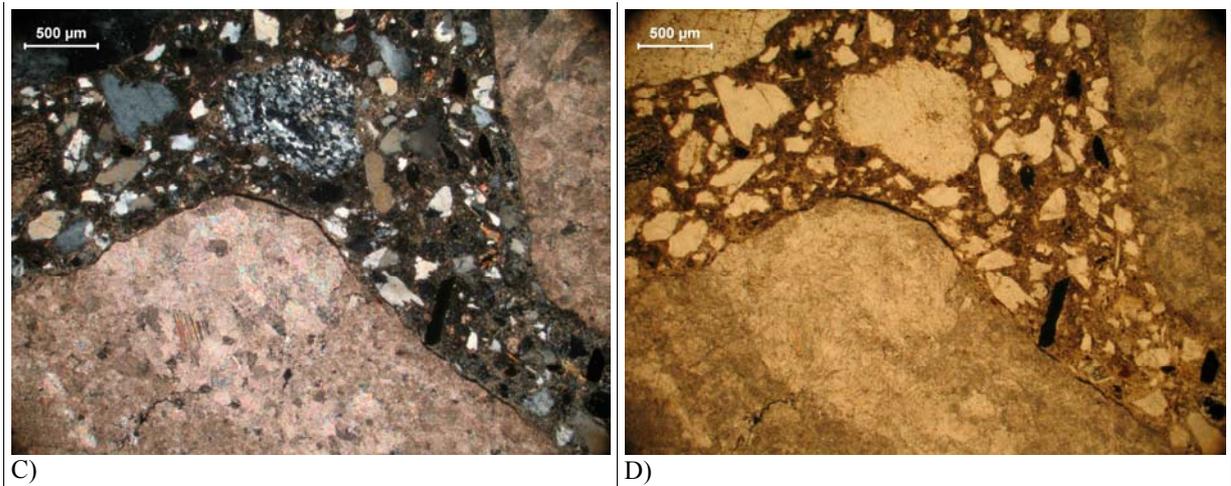


Figura 5.20. Fotomicrografia da amostra 340 A, película no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX e D) n//.

### 5.1.3. Barras de Argamassa (ASTM C 1260/01)

As barras de argamassa referentes às seis rochas estudadas, após 30 dias imersas numa solução de NaOH, a 1 N (ASTM C 1260/01) foram descritas macroscopicamente e delas foram confeccionadas 12 lâminas delgadas impregnadas, sendo 2 lâminas de cada amostra.

Macroscopicamente, as barras de argamassa apresentam feições comuns, como boa aderência e coesão. Destacam-se na maioria das barras de argamassa a presença de poros de ar incorporados, geralmente não preenchidos, que, por vezes, mostram bordas de coloração mais escura que o restante da amostra (Figuras. 5.21 A e B). Além disso, nas barras de argamassa 290B e 291B foram observadas fissuras contínuas, como mostrado na Figura 5.22, provavelmente atribuídas a RAA.

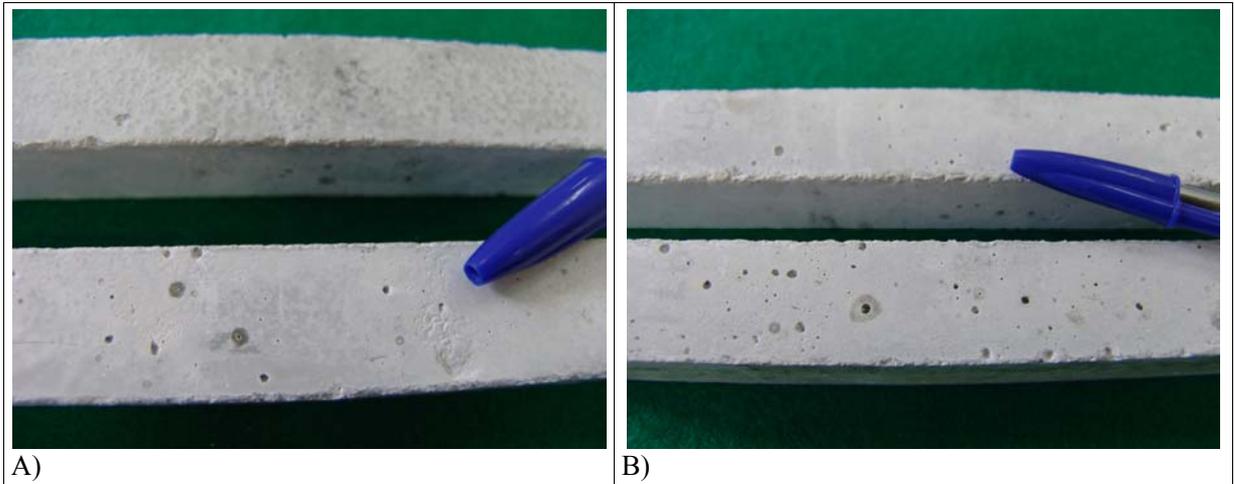


Figura 5.21. Fotografia das barras de argamassa, após ensaio de reatividade. A) Barra de argamassa 285B e B) Barra de argamassa 286B, notam-se bordas de coloração mais escura em volta dos poros.



Figura 5.22. Fotografia da barras de argamassa 291B, após ensaio de reatividade. Detalhe das fissuras na barra de argamassa.

A barra de argamassa, com o agregado 286, apresentou material vítreo amarelado e material branco preenchendo os poros (Figuras 5.23 A e B).

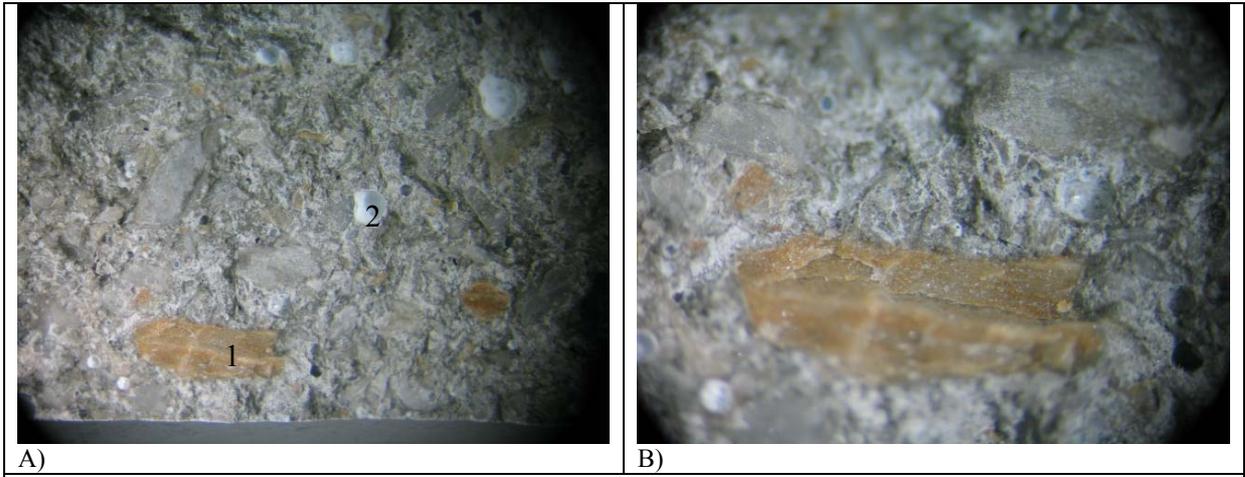


Figura 5.23. Fotografias da barra de argamassa 286B, após ensaio de reatividade. Notam-se material vítreo amarelado (1) e dos poros preenchidos pelo material branco (2). Imagem por lupa. A) aumento 6,4x; B) aumento 16x.

Microscopicamente, todas as barras de argamassa apresentaram-se com coloração acastanhada, pouco fissuradas e com poros de ar incorporado. Em alguns poros das barras 285 B e 286 B, que se encontram parcialmente preenchidos, nota-se a presença de prováveis produtos de hidratação do cimento, citados no Capítulo II, não identificados devido às dimensões submicroscópicas, conforme mostrado nas Figuras 5.24 A e B.

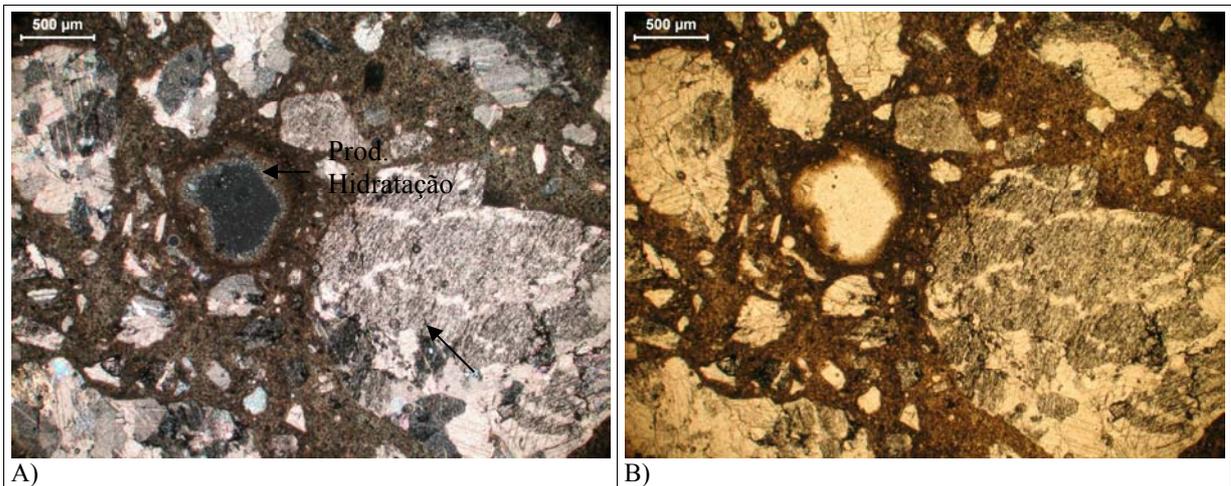
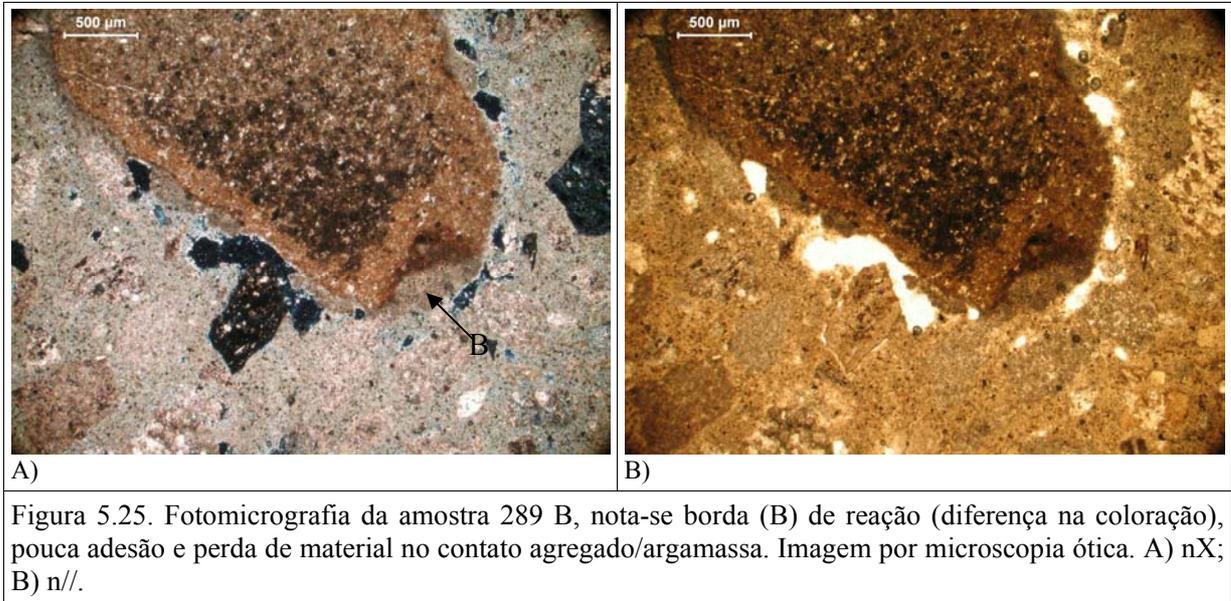


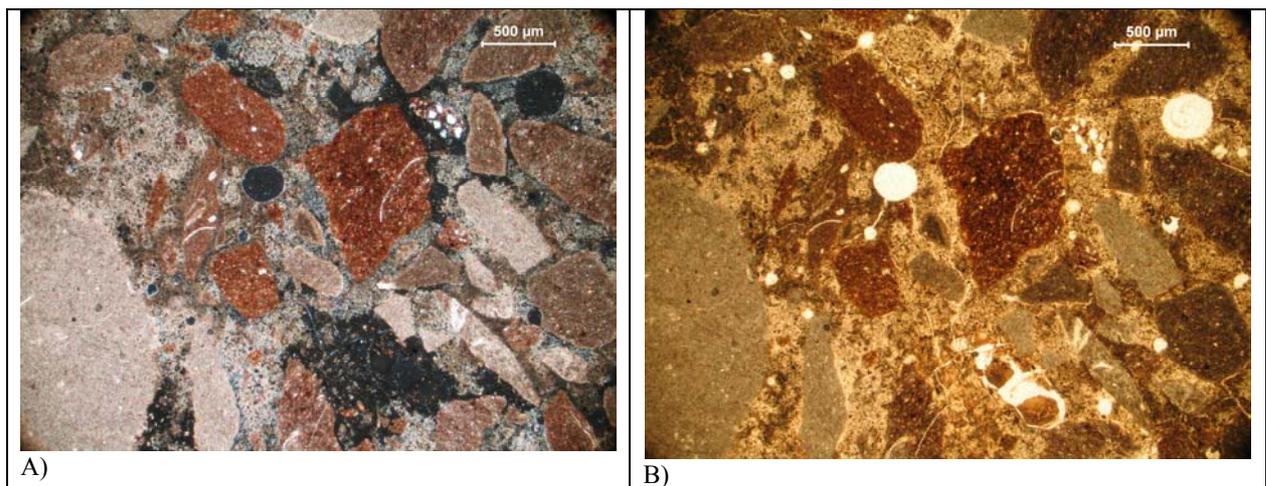
Figura 5.24. Fotomicrografia da amostra 285 B, presença de prováveis produtos de hidratação no poro e boa adesão no contato agregado/argamassa. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//.

Na amostra 289B são observadas bordas de reação entre o agregado e a argamassa, sendo que essas bordas são evidenciadas principalmente pela diferença de coloração nas proximidades

do contato, como mostrado nas Figuras 5.25 A e B, e podem vir a constituir produtos de RAA, já que indica uma transformação no agregado sob influência da pasta de cimento.



Em escala microscópica as barras de argamassa 290 B e 291 B também se apresentam muito fissuradas. As fissuras e poros presentes nessas amostras encontram-se parcialmente preenchidos por material neoformado (Figuras 5.26 A a D), mas, como citado anteriormente, não identificado devido às dimensões submicroscópicas.



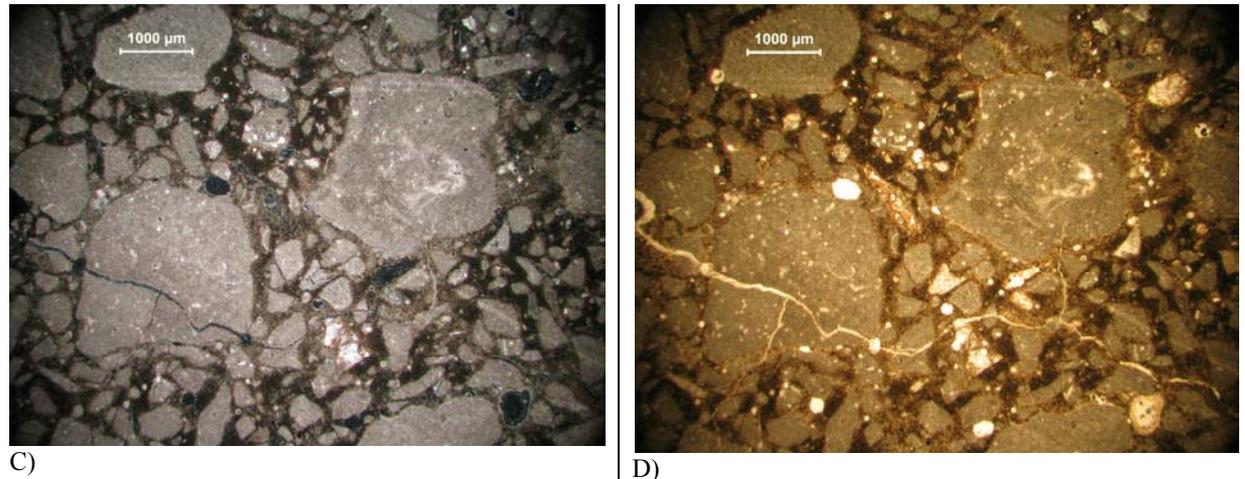


Figura 5.26. Fotomicrografia das amostras 290 B e 291 B, nota-se fissuras e poros preenchidos. Imagem por microscopia ótica. A) Amostra 290 B, nX; B) Amostra 290 B, n//; C) Amostra 291 B, nX; D) Amostra 291 B, n//.

A partir dos resultados acima apresentados para as barras de argamassa utilizando-se os seis tipos de agregados aqui estudados, verificou-se que: 1) a barra de argamassa **284 B** não apresentou nenhuma anormalidade; 2) as barras de argamassa dos agregados **285** e **286** apresentam poros parcialmente preenchidos, ainda que em diminutos cristais, prováveis produtos de hidratação do cimento; 3) a barra de argamassa, do agregado **289**, apresentou bordas de reação no contato entre agregado/argamassa, que podem gerar novos produtos; e 4) as barras de argamassa dos agregados **290** e **291** apresentam-se fissuradas e com poros, sendo que tanto as fissuras como os poros encontram-se parcialmente preenchidos por material neoformado, podendo atribuir a RAA.

#### 5.1.4. Prismas de Concreto

Os prismas de concreto, preparados com as amostras de agregados, descritos no item 5.1.1, e submetidos ao ensaio de Reatividade Potencial para rochas carbonáticas – Prismas de Concreto (ASTM C 1105/95), foram observados macroscopicamente, após o término do ensaio, quanto aos contatos agregado/argamassa, variação de coloração tanto na argamassa quanto no agregado, poros preenchidos e fissuras. Esses critérios orientaram a separação de fragmentos para serem observados diretamente por microscopia eletrônica de varredura e que

também resultou na confecção e análise de 12 lâminas delgadas impregnadas, 2 para cada amostra de rocha.

A grande maioria do agregado graúdo, de todas as amostras estudadas, o qual é constituído de fragmentos de rocha carbonática menores que 19 mm, não apresentou nenhuma mudança textural, estrutural e mineralógica aparente em relação à rocha *in natura* utilizada.

Da mesma forma que o agregado graúdo, o agregado miúdo também não apresentou variação textural, e nem mineralógica em relação da areia *in natura*.

A argamassa encontra-se acastanhada e o contato agregado/argamassa na maioria das amostras é bem aderido (Figuras 5.27 A e B). Notam-se os poros com diâmetros variando de 0,04 a 1,5 mm, alguns preenchidos com provável produto de hidratação do cimento (Capítulo II) e poucas fissuras na argamassa (Figuras 5.28 A e B).

Nas amostras com os agregados 284 e 285 não foram evidenciados produtos e feições que possam ser relacionadas à RAA. A amostra 285 P apresentou macroscopicamente uma faixa de material depositado entre o agregado e argamassa, transparente a translúcida e cristalina, sendo provavelmente composta por carbonatos (Figuras 5.27 C). Como foi encontrado apenas em um fragmento e não há outras evidências, não se pode relacionar este produto com a RAC, já que a rocha *in natura* contém veios submilimétricos de carbonato.

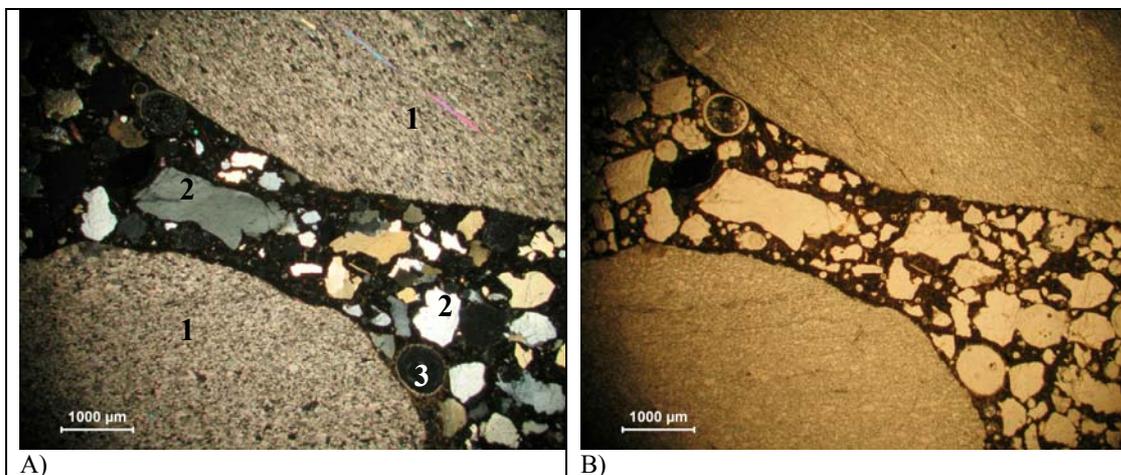




Figura 5.27. Fotomicrografia da amostra 284 P, nota-se fragmentos da rocha 284 (1), agregado miúdo (2) poros e boa aderência no contato fissuras e poros parcialmente preenchidos (3). Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//. C) Fotografia do prisma de concreto 285 P, vista da faixa de material depositado no contato agregado e argamassa, provável carbonato (C). Imagem por lupa. Aumento de 6,4x.

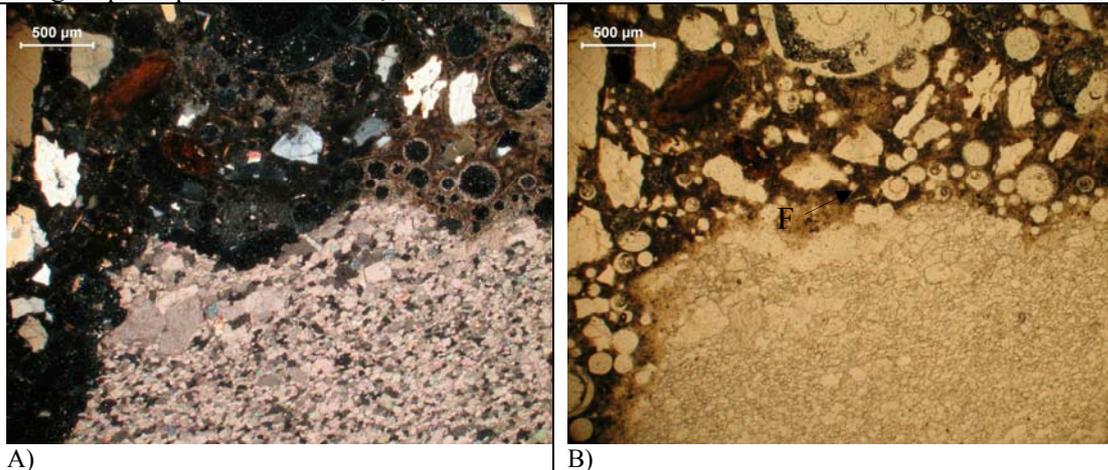
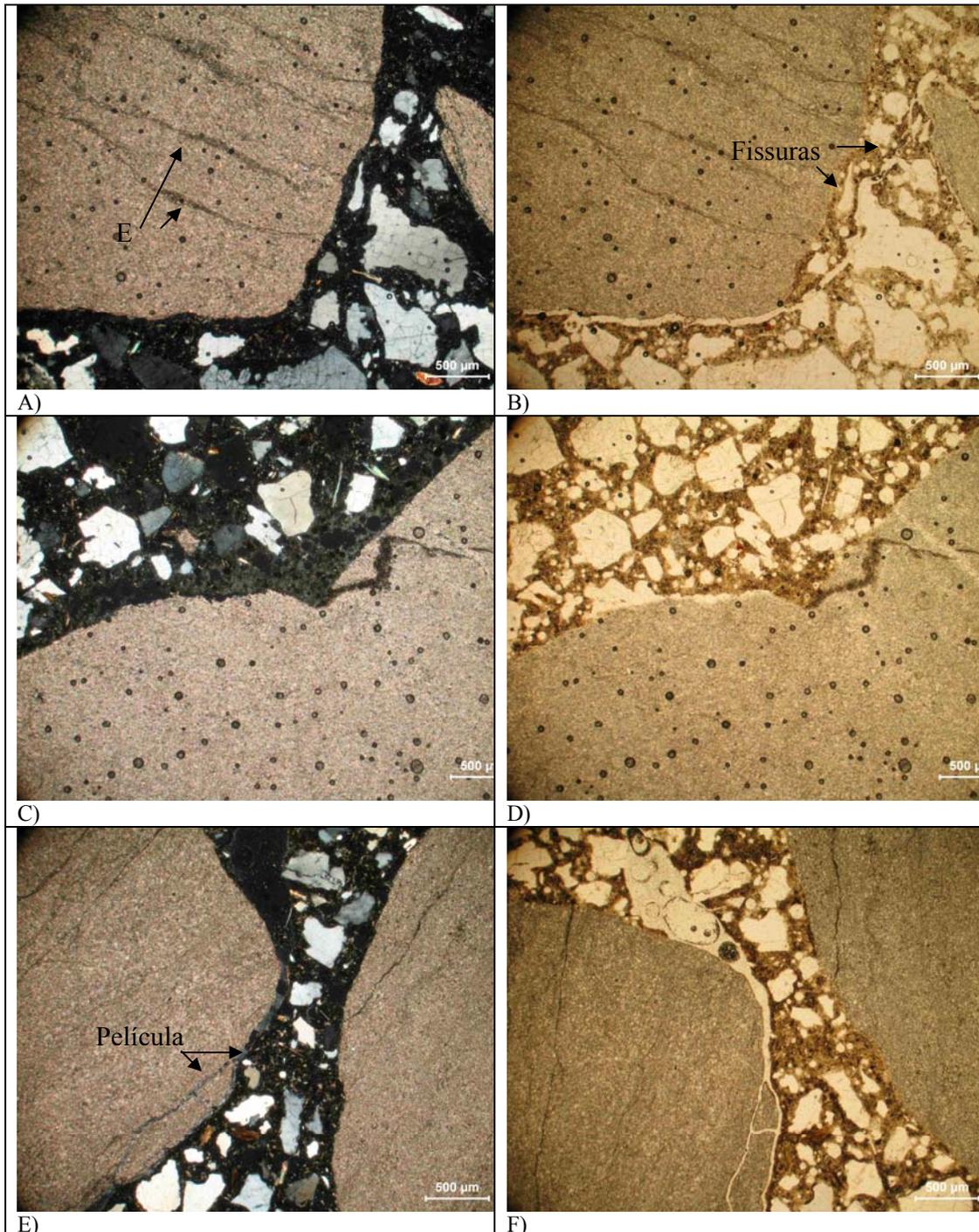


Figura 5.28. Fotomicrografia da amostra 284 P, nota-se poros parcialmente preenchidos e raras fissuras (F). Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//.

As amostras com os agregados 286, 289, 290 e 291, que se apresentaram mais fissuradas, com o contato agregado/argamassa pouco aderido, provavelmente em função da perda de material durante a preparação da lâmina, mostram feições que podem ser relacionadas a RAA, conforme descrito abaixo para cada agregado utilizado.

Nos prismas de concreto com o agregado 286 observam-se, microscopicamente, películas que circundam o contato agregado/argamassa e, eventualmente, atravessam tanto a argamassa (Figuras 5.29 A, B, E e F) como o agregado graúdo (Figuras 5.29 C, D, G a I).

Essas películas podem ou não ser relacionadas a produtos neoformados em função de RAA. Porém apenas através de microscopia ótica não é possível afirmar que exista material ali depositado e que se trata de produto relacionado a RAA. Assim, essas porções foram selecionadas para serem analisadas por MEV/EDS.



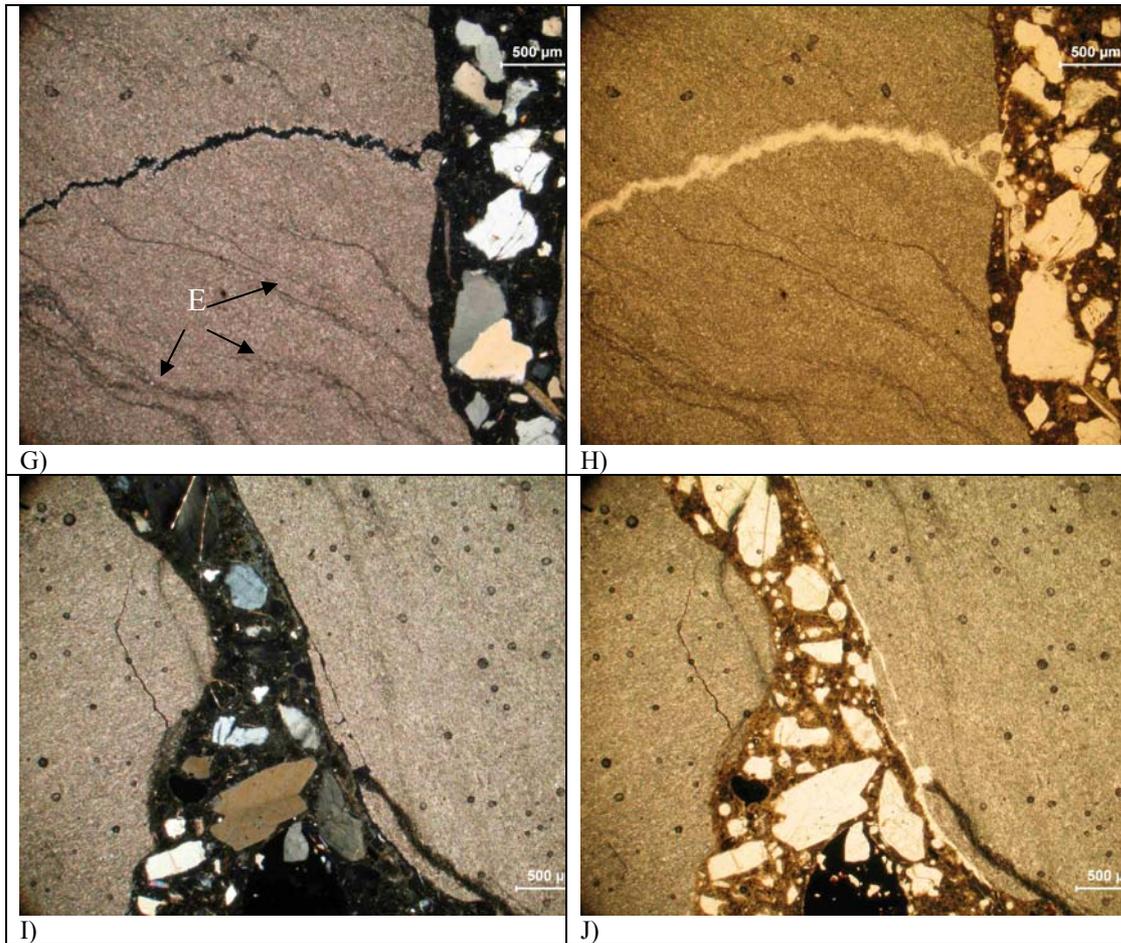


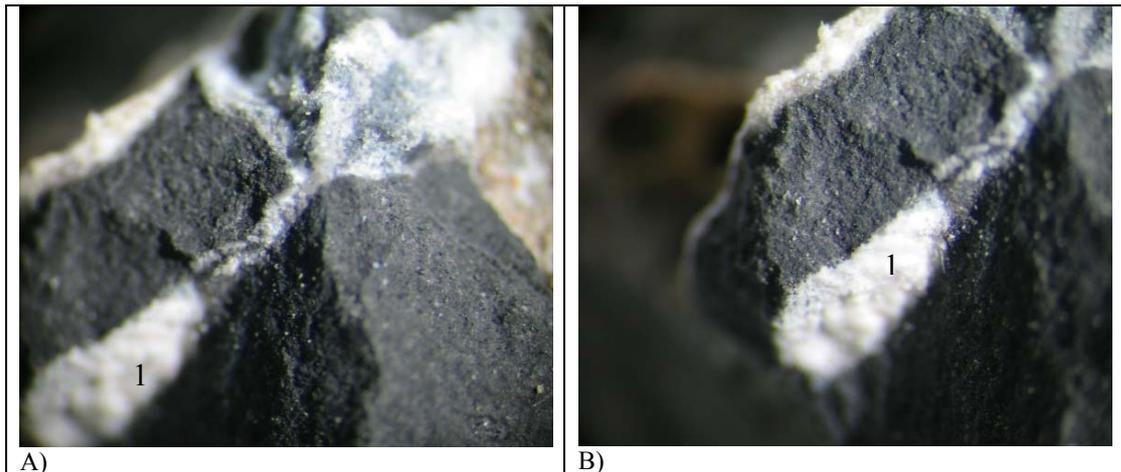
Figura 5.29. Fotomicrografias da amostra 286 P: notam-se fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa; em algumas dessas fissuras encontram-se películas. Notam-se mudança na coloração dos estilólitos (E), em relação da rocha *in natura*. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX; D) n//; E) nX; F) n//; G) nX; H) n//; I) nX; J) n//.

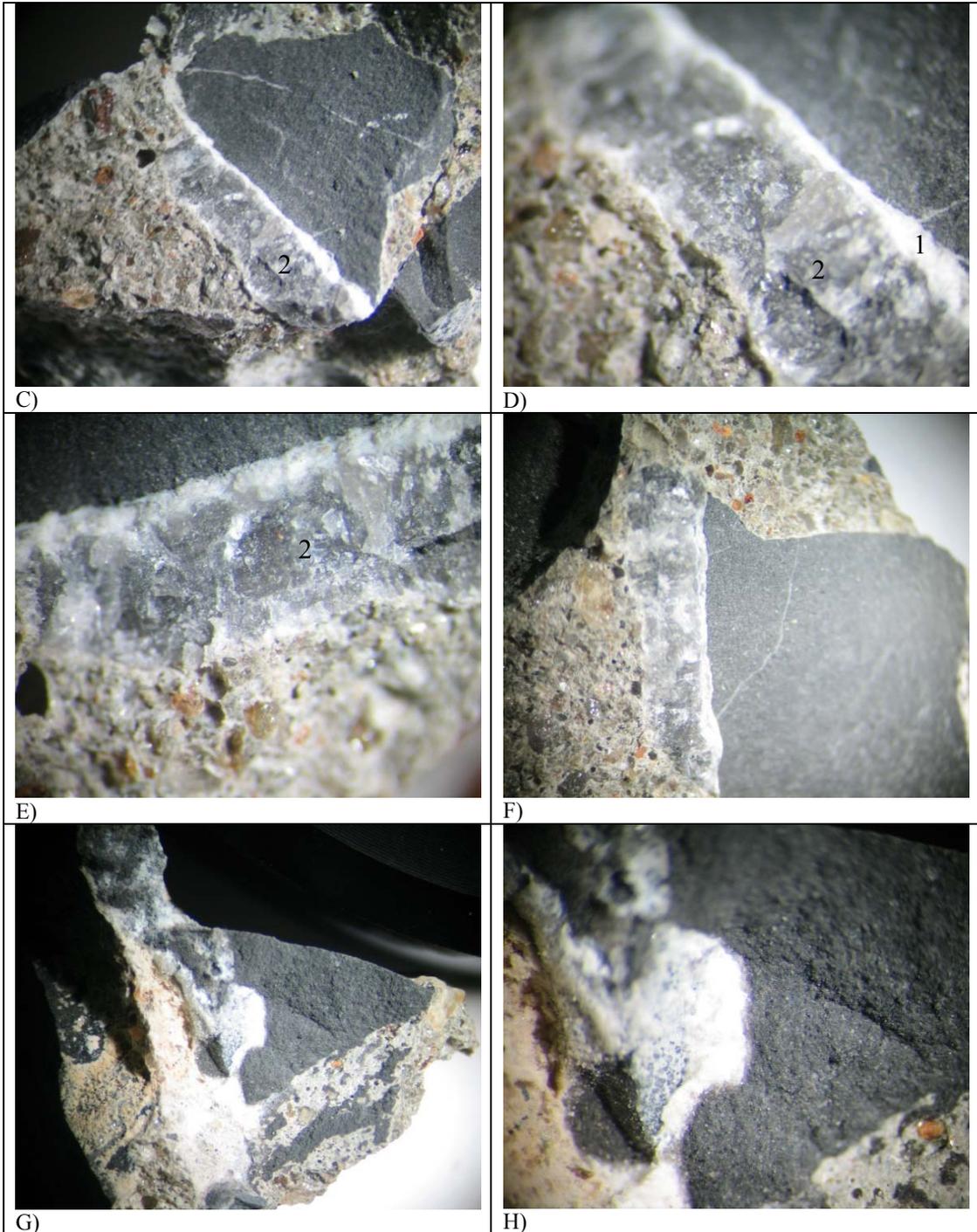
Uma feição de destaque é a mudança na coloração da fase mineral que marca os estilólitos (Figuras 5.29 G e H), ou seja, palhetas de clorita na rocha *in natura*, com coloração esverdeada, adquirem a coloração verde escuro a acastanhado, podendo esta variação estar relacionada com uma mudança mineralógica. Nestes fragmentos não foram observadas mudanças nas bordas do contato agregado/argamassa. Nas análises por DRX observou-se que, a clorita, bem definida na amostra da rocha *in natura*, após o ensaio de Reatividade Potencial foi parcialmente substituída por saponita (esmectita), no agregado retirado do prisma de concreto. Esta substituição pode estar relacionada com a mudança de cor observada nas análises por MO.

Nos prismas de concreto com o agregado 289 além de observar uma série de feições de alteração em escala microscópica, foi verificada também em amostras de mão a presença de material neoformado, além de poros e bordas de alteração.

Nas Figuras 5.30 A a M são apresentadas feições de material neoformado tanto no contato do agregado com a argamassa, como cortando toda a extensão do agregado. Macroscopicamente, o material depositado entre o agregado e argamassa e dentro do agregado parece ser constituído de duas fases minerais distintas, se não composicionalmente, pelo menos em relação a cristalinidade e diafanidade. Uma das fases apresenta-se transparente a translúcida e cristalina, sendo provavelmente composta por carbonatos (Figuras 5.30 C a F e I). A outra fase tem aspecto pulverulento, cor branca e é translúcido (Figuras 5.30 A, B, G e H). Esse material foi extraído manualmente, com auxílio de estilete, pinça e lupa para ser analisado por DRX. Os resultados confirmaram a presença de duas fases minerais distintas e são apresentadas no item 5.2.

Poros esféricos e vesículas irregulares estão presentes e encontram-se em geral preenchidas por material branco translúcido. Associam-se a esses poros e vesículas, bordas de alteração evidenciadas em função da diferença de coloração (Figuras 5.30 J a M).





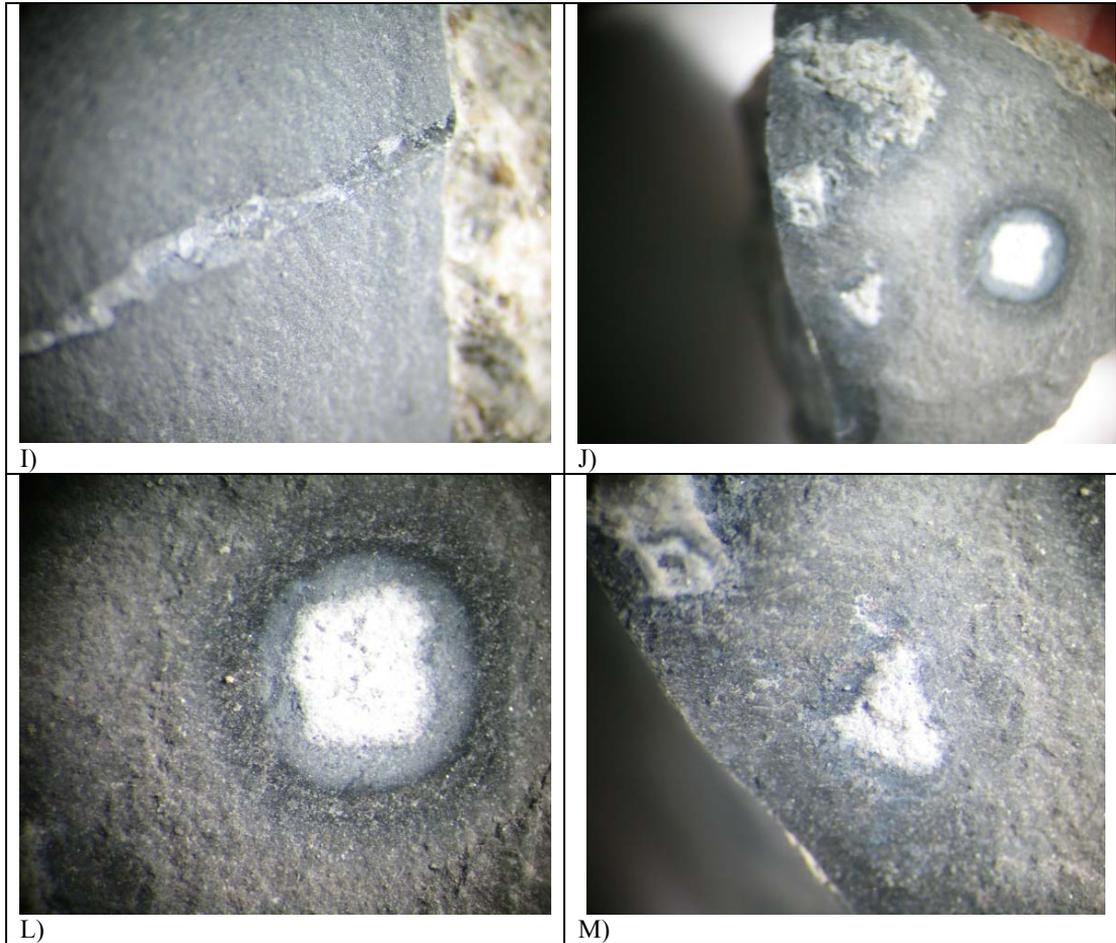


Figura 5.30. Fotografias do prisma de concreto 289 P, após ensaio de reatividade. Vista do material depositado tanto no contato agregado/argamassa, como na argamassa ou cortando o agregado. O material transparente a translúcido e cristalino é composto por carbonatos (2). Fase de aspecto pulverulento, cor branca e translúcido (1), provavelmente, argilomineral. Imagem por lupa. A) aumento 16x; B) aumento 6,4x; C) aumento de 6,4x; D) e F) aumento 16x; G) aumento 6,4x; H) e I) aumento 16x; J) aumento 6,4x; L) e M) aumento 16x.

Microscopicamente, a feição de alteração mais evidente na amostra com o agregado 289 é a presença de películas ou filmes bastante irregulares ao longo do contato agregado/argamassa ou cortando toda a argamassa (Figuras 5.31 A e B). A disposição irregular dessas películas sugere que se trata de neoformação de material.

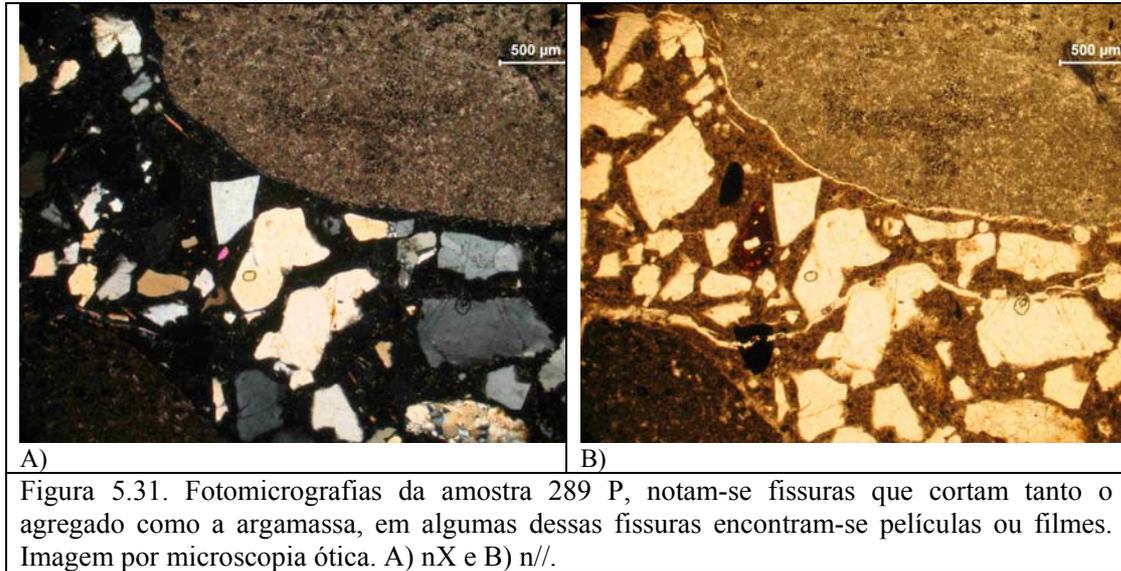
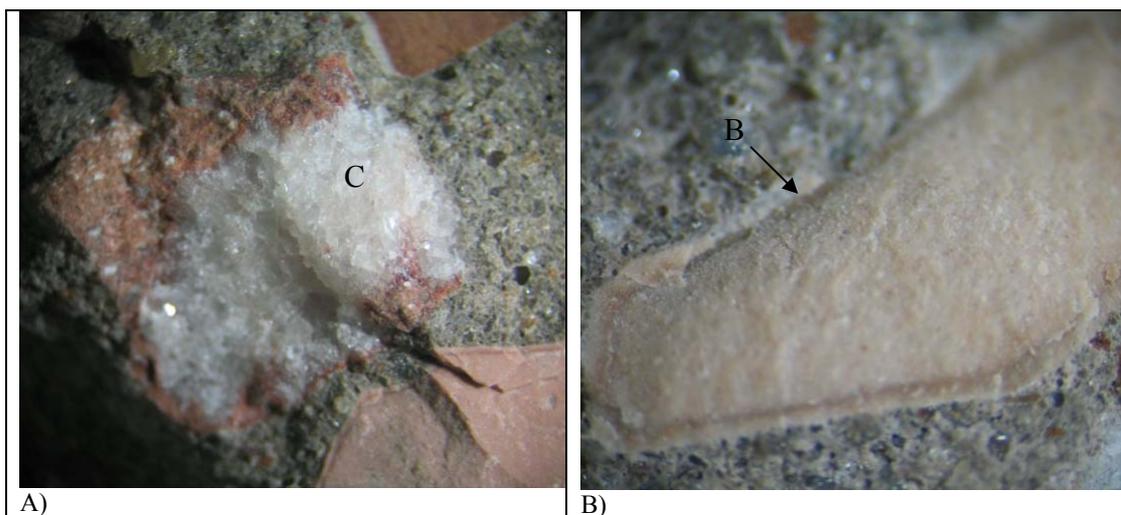


Figura 5.31. Fotomicrografias da amostra 289 P, notam-se fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa, em algumas dessas fissuras encontram-se películas ou filmes. Imagem por microscopia ótica. A) nX e B) n//.

Os prismas de concreto com o agregado 290 macroscopicamente mostraram duas feições principais, ou seja: 1) bordas de reação no agregado, evidenciadas em função da coloração dos fragmentos (Figuras 5.32 B, D e E); 2) deposição de material cristalino esbranquiçado, possivelmente carbonato, formando bolsões irregulares (Figuras 5.32 A e F). Além disso, são observados na argamassa poros parcialmente preenchidos e no contato agregado/argamassa são vistos filmes descontínuos, de coloração esbranquiçada (Figura 5.32 C), porém de difícil observação.



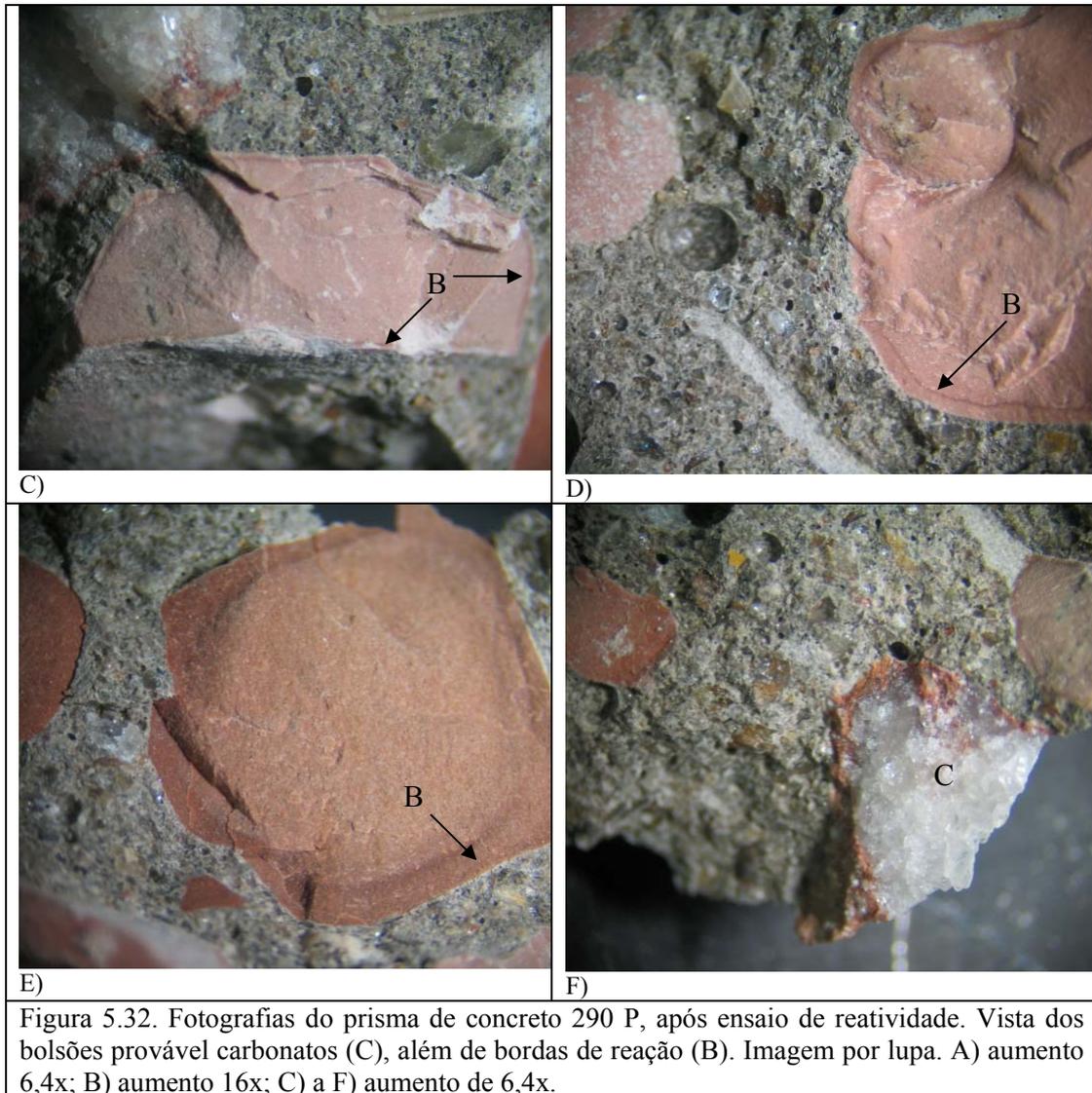


Figura 5.32. Fotografias do prisma de concreto 290 P, após ensaio de reatividade. Vista dos bolsões provável carbonatos (C), além de bordas de reação (B). Imagem por lupa. A) aumento 6,4x; B) aumento 16x; C) a F) aumento de 6,4x.

Microscopicamente, as feições mais comuns são filmes ou películas irregulares no contato agregado/argamassa, conforme apresentado nas Figuras 5.33 A a D. A presença de poros parcial ou totalmente preenchidos também é observada.

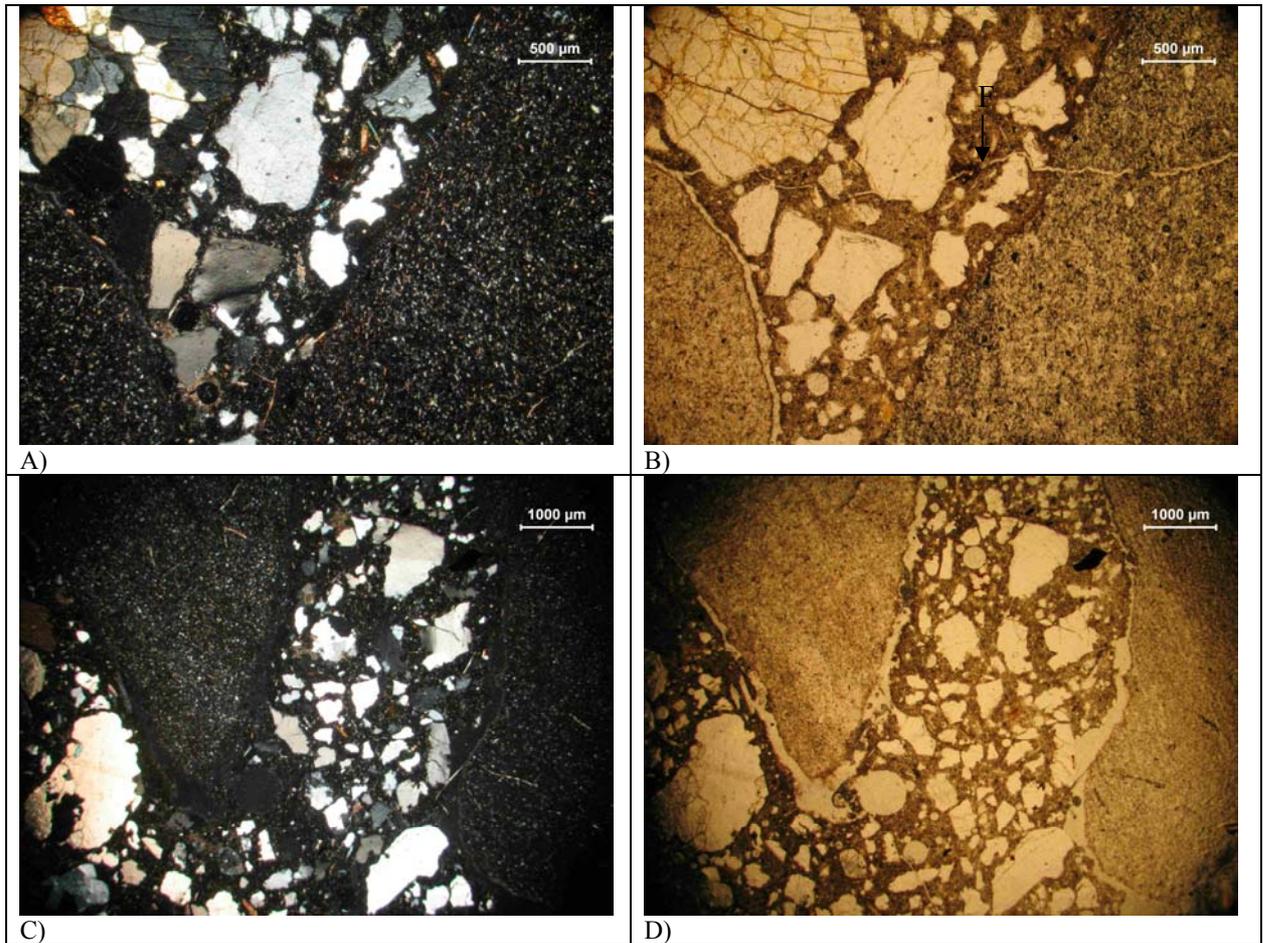
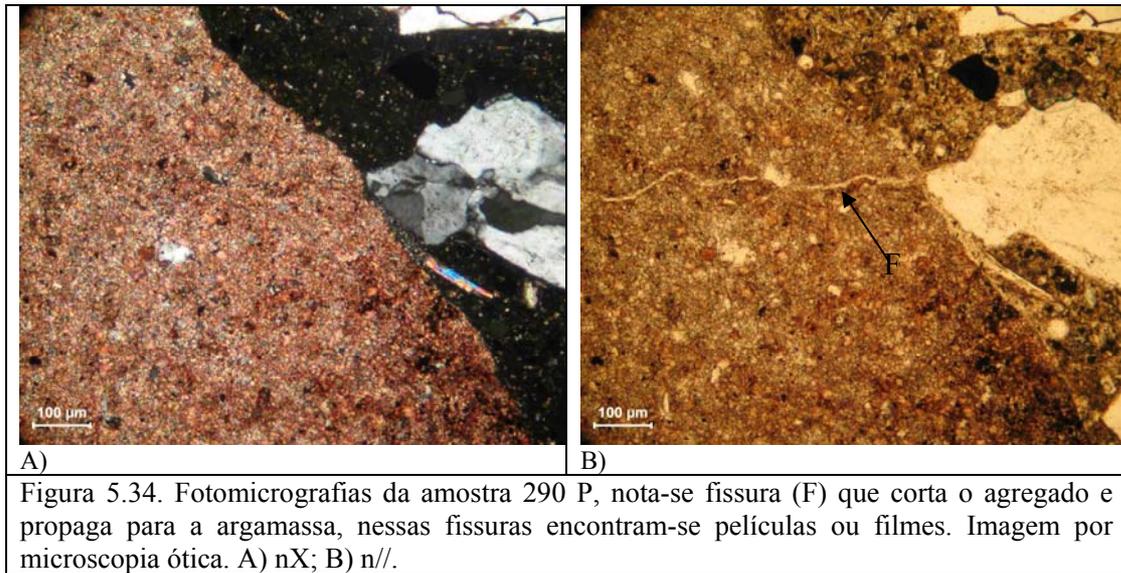
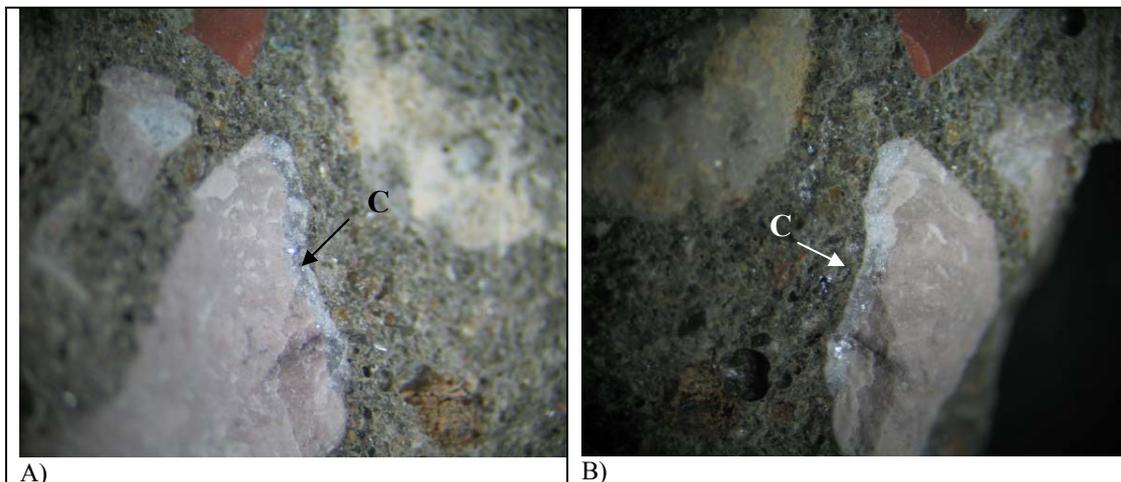


Figura 5.33. Fotomicrografias da amostra 290 P, notam-se fissuras (F) que cortam tanto o agregado como a argamassa, em algumas dessas fissuras encontram-se películas ou filmes. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//; C) nX; e D) n//.

Como citado anteriormente, para a amostra com o agregado 289 e evidenciado na amostra com o agregado 290 (Figuras 5.34 A e B), a disposição irregular dessas películas, por vezes cortando tanto o agregado como a argamassa, sugere que se trata de neoformação de material.



A principal feição observada macroscopicamente nos prismas de concreto com o agregado 291 foi a deposição de material cristalino esbranquiçado, provavelmente carbonato, entre a argamassa e o agregado, conforme apresentado nas Figuras 5.35 A e B. Além disso, foram verificadas também a presença de bordas de reação (Figura 5.35 D), além de poros parcialmente preenchidos (Figuras 5.35 C, E e F).



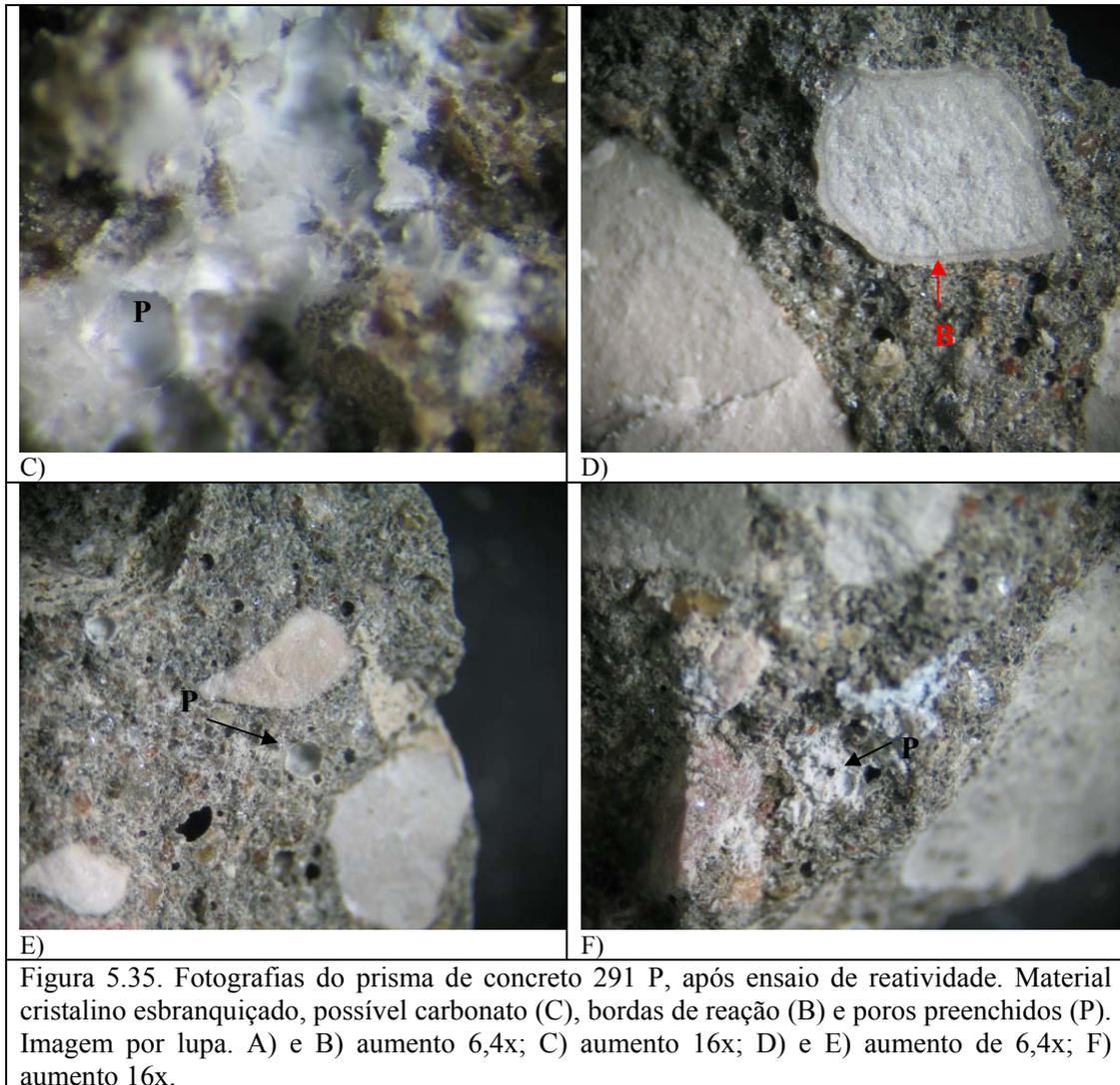
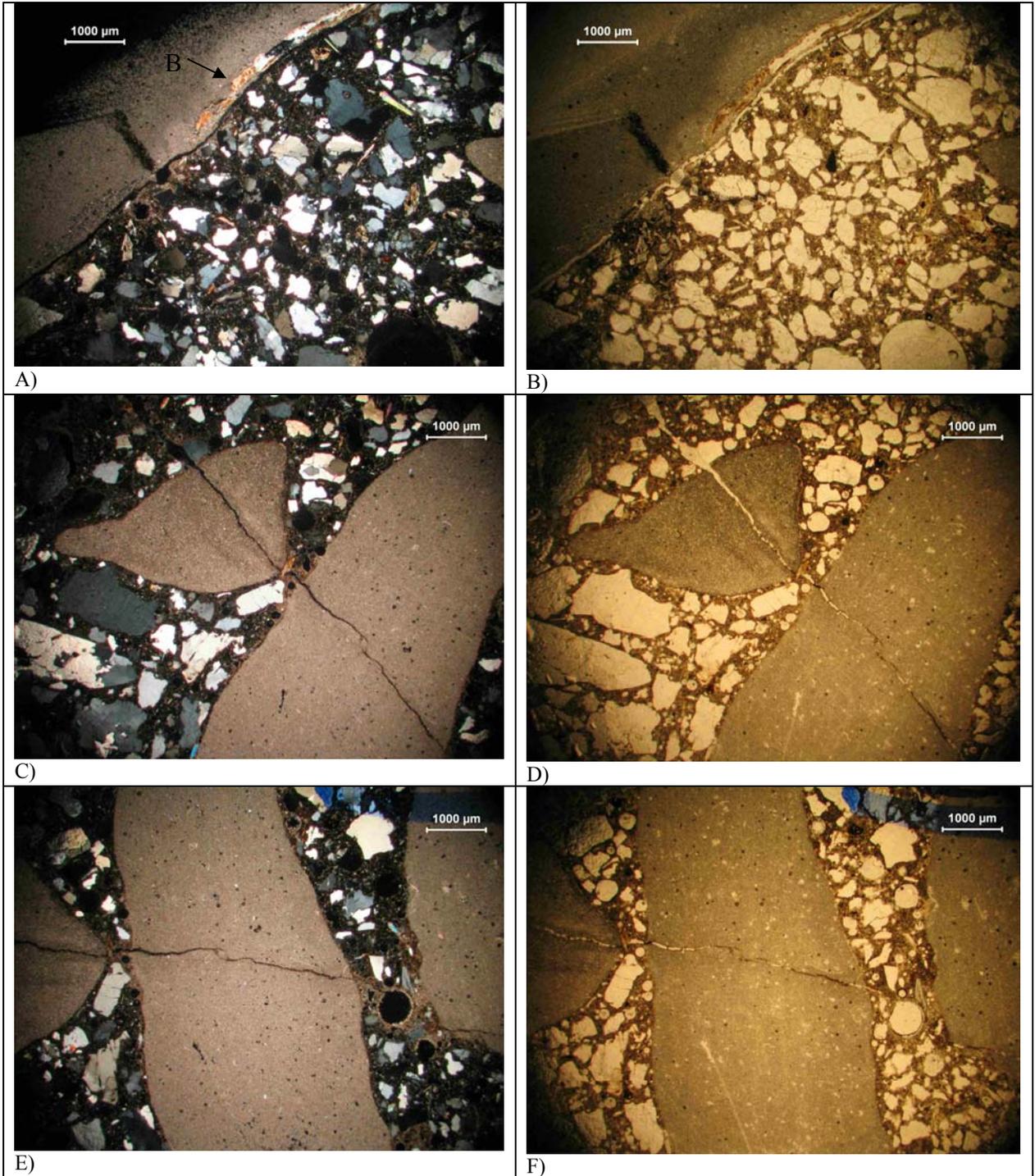


Figura 5.35. Fotografias do prisma de concreto 291 P, após ensaio de reatividade. Material cristalino esbranquiçado, possível carbonato (C), bordas de reação (B) e poros preenchidos (P). Imagem por lupa. A) e B) aumento 6,4x; C) aumento 16x; D) e E) aumento de 6,4x; F) aumento 16x.

Microscopicamente, são observadas duas feições de alteração num mesmo local, ou seja: 1) películas cortando tanto o agregado como a argamassa; e 2) associadas à presença dessas películas ocorrem bordas de reação, principalmente no agregado, evidenciadas através da diferença de coloração. A ocorrência conjunta das duas feições acima descritas sugere que efetivamente trata-se de alteração/reação e não retirada de material durante a confecção da lâmina (Figuras 5.36 A a J). Além disso, foi verificada, também, a presença de poros parcialmente preenchidos (Figuras 5.36 I e J).



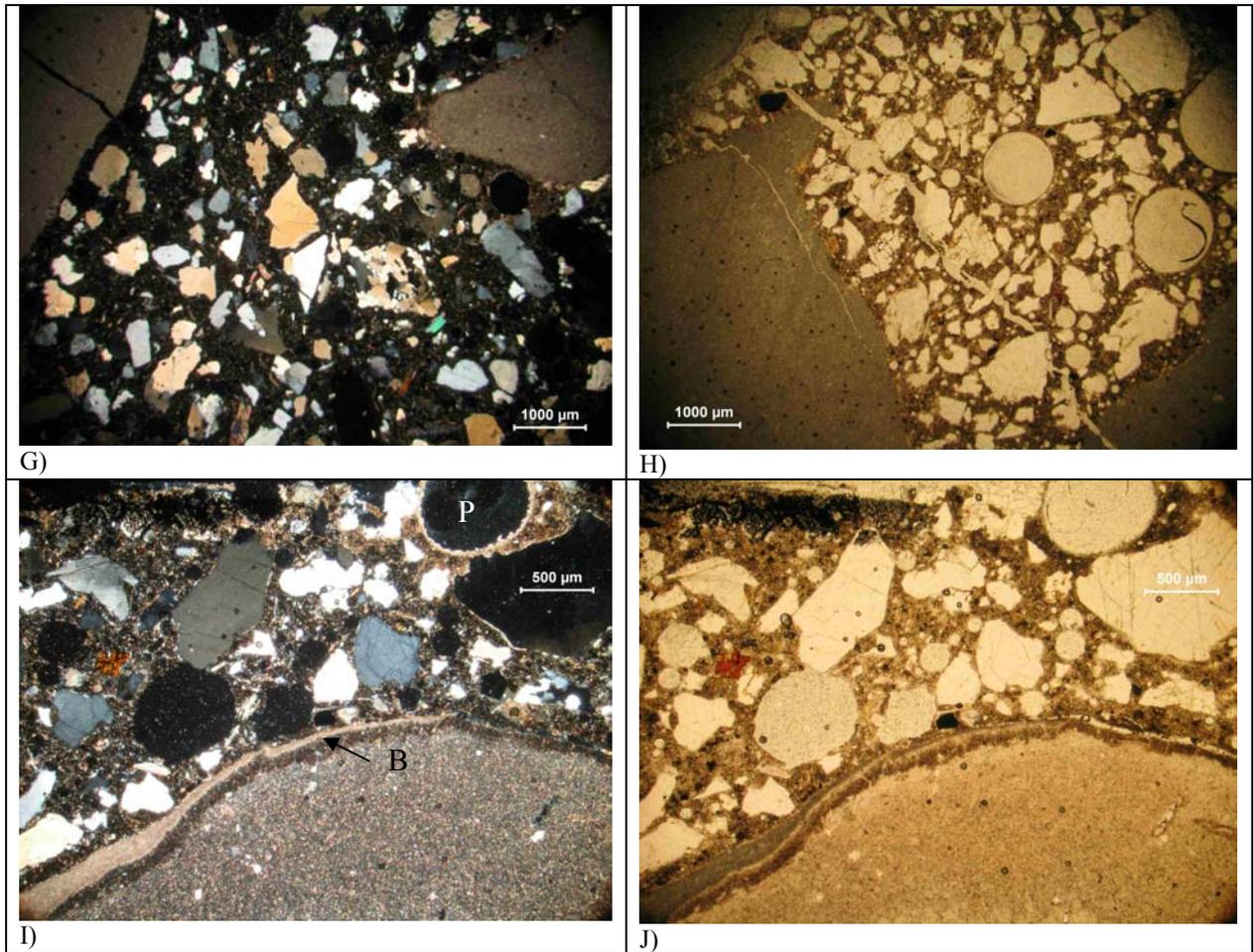


Figura 5.36. Fotomicrografias da amostra 291 P, fissuras que cortam tanto o agregado como a argamassa, nessas fissuras encontram-se películas ou filmes, poros preenchidos (P), bordas (B) de reação, principalmente no agregado, evidenciadas através da diferença de coloração. Imagem por microscopia ótica. A) nX; B) n//.

Assim, através da análise dos resultados dos prismas de concreto, por microscopia ótica, pode-se antever que as amostras com os agregados 286, 289, 290 e 291 podem vir a apresentar RAA. A amostra 286 P mostra indício de RAS, enquanto, as amostras de rocha 289, 290 e 291 podem apresentar RAC quando aplicadas como agregado no concreto.

Considerando os resultados conjuntos da barra de argamassa e do prisma de concreto confeccionados com os seis agregados estudados, os 286, 289, 290 e 291, poderiam ser considerados potencialmente reativos.

## 5.2. Difração dos Raios-X - DRX

Através da difração de raios-X – DRX - foram identificadas as fases cristalinas constituintes de rochas utilizadas como agregado e dos materiais cimentícios. Esta identificação serviu como base para a classificação petrográfica das rochas carbonáticas utilizadas como agregados, além de permitir a verificação de alterações mineralógicas ocorridas durante os ensaios de reatividade. A seguir são apresentados os resultados obtidos para os materiais analisados.

### 5.2.1. Agregados – Rochas Carbonáticas

A partir da comparação entre a predominância da calcita e da dolomita, as rochas carbonáticas *in natura* foram classificadas como calcários, calcários dolomíticos e dolomitos (Tabela 5.2). As análises por DRX revelaram também os constituintes menores e traços das rochas carbonáticas. Após ensaios de expansão (minitestemunhos) e da utilização como agregado nos prismas de concreto, fragmentos das rochas foram novamente analisados, tendo apresentado variações relativamente notáveis.

#### Rocha *in natura*

A composição das rochas foi determinada através de análises sucessivas da amostra total (AT) e da sua fração argila (FA) submetida aos tratamentos convencionais. Os constituintes maiores foram definidos na análise da amostra total, enquanto os constituintes menores, representados especialmente pelos argilominerais, foram caracterizados na fração argila (Tabela 5.4.). Os constituintes maiores das rochas são calcita ou dolomita, sendo que, quando uma predomina, a outra ocorre como constituinte menor, ou traço. Exceto nas amostras 290 e 291 (apenas na amostra total), na maioria das outras amostras o quartzo é constituinte traço, não tendo sido observado na amostra 289 em ambas frações, e nem na fração argila da amostra 285. Na fração argila, ambos os carbonatos ocorrem, sendo que a dolomita mostra sempre reflexões menos intensas que na amostra total, com exceção de 284, em que é constituinte maior.

Dentre os constituintes menores, melhor evidenciados na fração argila, estão os argilominerais, predominando ilita e esmectita, esta última identificada como saponita. A ilita está presente em todas as amostras do Grupo Paranoá, mas em apenas uma da Bacia do Paraná (290), como constituinte traço em ambas as frações. É constituinte menor tanto da amostra total (285), como da fração argila (284 e 286), ocorrendo como traço nas demais. Não identificada apenas no calcilutito 286, a saponita (grupo da esmectita), é constituinte traço de todas as outras amostras totais e da fração argila das rochas 285, 290 e 291; é constituinte menor na fração argila das amostras 284 e 289. A clorita só está bem definida na amostra 286 (Grupo Paranoá), sendo constituinte traço e menor, respectivamente, da amostra total e da fração argila. Constituinte menor e maior, respectivamente, da amostra total e da fração argila, destaca-se a antigorita, no calcilutito 289 (Bacia do Paraná). No Anexo I estão apresentados os difratogramas das rochas estudadas.

Tabela 5.4. – Constituintes maiores, menores e traços das rochas carbonáticas estudadas.

Minerais	calcita		dolomita		quartzo		ilita		saponita		antigorita		clorita	
	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA
284 Dolarenito muito fino	m	m	M	M	T	T	T	m	T	m	-	-	-	-
285 Calcário Recristalizado	M	M	T	T	T	-	m	T	T	T	-	-	-	-
286 Calcilutito	M	M	T	T	T	T	T	m	-	-	-	-	T	m
289 Calcilutito	M	M	T	T	-	-	-	-	T	m	m	M	-	-
290 Bio-calcilutito Dolomítico	M	M	m	m	m	m	T	T	T	T	-	-	-	-
291 Bio-calcilutito Dolomítico	M	M	M	T	m	T	-	-	T	T	-	-	-	-

Legenda: AT: amostra total; FA: fração argila. (M) constituinte maior, (m) constituinte menor, (T) constituinte traço e (-) ausência do mineral.

#### Minitestemunhos:

Após terem sido submetidas a ensaio de reatividade (Método do Cilindro de Rocha – ASTM 586/92), os minitestemunhos confeccionados a partir das rochas *in natura* (285, 286, 289, 290 e 291), foram analisados por DRX. A comparação entre os difratogramas de rocha *in natura* e de minitestemunhos mostrou variações na composição, indicada tanto pela mudança

nas intensidades, como pelo desaparecimento ou aparecimento de reflexões. As intensidades de reflexões do quartzo diminuíram em quatro minitestemunhos (285, 286, 290 e 291), da mesma forma que, no minitestemunho de calcilutito 289, diminuíram as intensidades da dolomita e da antigorita. Neste minitestemunho verifica-se o aumento da intensidade das reflexões da esmectita, o mesmo ocorrendo no calcilutito 290. As alterações na composição mineral correspondem ao desaparecimento da dolomita (285, 290 e 291), da illita e da clorita (286). Esta última, sendo um constituinte menor da fração argila da amostra *in natura* (286), dá lugar, no minitestemunho, à saponita (grupo da esmectita), identificada por reflexões muito baixas e largas. Na análise do minitestemunho 291, as reflexões muito baixas nas posições de  $d \sim 4,75 \text{ \AA}$  e  $\sim 2,36 \text{ \AA}$  (não observadas na amostra *in natura*) sugerem a formação da brucita. No minitestemunho do calcário 285 surgem reflexões bem definidas em  $3,63 \text{ \AA}$  e  $2,70 \text{ \AA}$ , as quais não foram relacionadas a nenhuma fase cristalina. No anexo II estão apresentados os difratogramas dos minitestemunhos, juntamente com as rochas *in natura*, para efeito de comparação.

### 5.2.2. Compósitos de Cimento

Os agregados e as argamassas constituintes dos testemunhos da barragem e dos prismas de concreto moldados foram analisados em separado. A composição dos agregados extraídos dos prismas de concreto (após 150 dias de ensaio de reatividade) foi comparada com as respectivas rochas *in natura*. Foi tentada também a comparação entre os agregados do testemunho da barragem com rochas semelhantes. Dentre os produtos de hidratação do cimento da argamassa, em difratogramas de DRX, destaca-se a portlandita, graças à sua estrutura cristalina bem organizada, ao contrário de outros produtos, com reflexões mal definidas.

#### Concreto da Barragem:

O concreto da Barragem foi analisado a partir das mesmas amostras selecionadas para a petrografia (Tabela 5.3), num total de três amostras. Em cada amostra foram separados para análises agregados graúdos (rocha carbonática) e argamassa, como pode ser observado nas Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente. De cada testemunho foram selecionados, dentre os

maiores, fragmentos escolhidos aleatoriamente e analisado como amostra total (AT) e fração argila (FA).

Os fragmentos de agregado analisados são todos carbonáticos, tendo a calcita como constituinte maior de todos eles, tanto na amostra total, como na fração argila, exceto na 335 A, que é constituinte menor, nesta fração. A dolomita, constituinte menor (335 A e 340 A) e traço (335 D) nas amostras totais, não ocorre na fração argila. O quartzo só foi identificado nas amostras totais 335 A e 335 D, como constituinte traço. A ilita só não foi encontrada na amostra total 340 A, sendo constituinte menor nas demais. A saponita está presente em todas as análises das amostras 335 A e 340 A, e é constituinte traço em todas as frações. Na amostra 335 D, apenas pode ser sugerida a sua presença. A clorita é apenas sugerida nas análises da 335 D e 340 A. A caolinita é constituinte traço de todas as amostras em todas as análises, exceto na fração total da amostra 340 A, que está ausente. Na amostra 335 D, nota-se reflexões muito baixas em  $d \sim 4,75 \text{ \AA}$ , que poderiam sugerir a presença de brucita, entretanto, estas reflexões são também associadas à caolinita, que é claramente registrada no difratograma. No anexo III estão apresentados os difratogramas dos concretos da barragem, separados em agregado e argamassa.

Tabela 5.5 - Constituintes dos agregados extraídos dos testemunhos de concreto da barragem.

Minerais	calcita		dolomita		quartzo		ilita		saponita		clorita		caolinita	
	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA
335 A	M	m	m	-	T	-	m	m	T	T	-	-	T	T
335 D	M	M	T	-	T	-	m	m	-	-	T	T	T	T
340 A	M	M	m	-	-	-	-	m	T	T	T	T	-	T

Legenda: (-) ausência do mineral, (T) traço, (m) menor e (M) maior representam a proporção de cada constituinte mineral.

A análise da argamassa mostra a contribuição do agregado, cujas reflexões são mais intensas que dos produtos de hidratação do cimento. Os minerais do agregado são identificados como a calcita e o quartzo como constituintes maiores, seguidos de ilita, esmectita, dolomita e caolinita. O produto de hidratação do cimento (Tabela 5.6), com as reflexões características ( $d \sim 4,92 \text{ \AA}$ ;  $3,11 \text{ \AA}$ ;  $2,62 \text{ \AA}$ ;  $1,92 \text{ \AA}$ ) melhor definidas é a portlandita, participando como constituinte menor (335 D e 340 D) e traço (335 A). Reflexões largas e baixas em  $7,51 \text{ \AA}$ ;  $3,80 \text{ \AA}$ ;  $2,77 \text{ \AA}$ ;  $2,64 \text{ \AA}$  e  $1,65 \text{ \AA}$  são atribuídas ao  $C_4ACH_{11}$  (aluminato de cálcio hidratado), constituinte traço (335 A e 335 D) e menor (340 A). A etringita é sugerida por reflexões baixas ( $d \sim 9,59 \text{ \AA}$ ;  $5,5 \text{ \AA}$  e  $3,56 \text{ \AA}$ ), notada como traço em 335 D e 340 A.

Tabela 5.6 - Constituintes das argamassas extraídas dos testemunhos de concreto da barragem.

Amostra	Calci- ta	Dolomi- ta	Quart- zo	Ilita	Saponita	Clori- ta	Caolini- ta	Etringi- ta	C <sub>4</sub> AH <sub>11</sub>	Portlandi- ta
335 A	M	T	m	m	T	-	T	-	T	T
335 D	M	T	m	m	-	T	-	T	T	m
340 A	m	T	M	m	-	-	-	T	m	m

Legenda: (-) ausência do mineral, (T) traço, (m) menor e (M) maior representam a proporção de cada constituinte mineral

### Prismas de Concreto:

Para as análises dos prismas de concreto foram retirados fragmentos de agregados e porções da argamassa. Apesar desta separação, reflexões correspondentes a produtos de hidratação do cimento aparecem nos difratogramas dos agregados, sendo o mais comum a portlandita. Além desses, nota-se também a influência eventual do agregado miúdo como o feldspato e, possivelmente a ilita e o quartzo.

No geral, após o ensaio de Reatividade Potencial, os agregados mantiveram a composição semelhante à da rocha *in natura* (Tabela 5.4), com algumas variações das intensidades das reflexões, ou perderam, ou adquiriram fases. Apenas o difratograma da amostra 285 P manteve a mesma feição.

As variações significativas foram observadas nas amostras: 284 P, 286 P e 289 P. Na fração argila da amostra 284 P, as reflexões da saponita desaparecem. Nas amostras 286 P e 290 P foi identificada a caolinita - não observada na rocha *in natura* - e a clorita - bem definida na primeira amostra - rocha *in natura* - é substituída parcialmente pela esmectita. Na amostra 289 P, a antigorita - constituinte menor em ambas frações, na amostra *in natura*, figurava como maior na fração argila, enquanto a saponita tem reflexão menos intensa na fração argila após o ensaio. No Bio-calculutito dolomítico (291), o quartzo que ocorria como menor na amostra total, passa a ser constituinte traço nesta amostra. Na Tabela 5.7 estão apresentados os minerais identificados nos agregados extraídos dos prismas de concreto.

Tabela 5.7. - Constituintes dos agregados extraídos dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade potencial.

Minerais	calcita		dolomita		quartzo		ilita		saponita		clorita		caolinita		antigorita		
	Amostra	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA	AT	FA
284 P	m	m	M	M	T	T	m	m	T	-	-	-	-	-	-	-	-
285 P	M	M	T	T	T	-	m	T	T	T	-	-	-	-	-	-	-
286 P	M	M	m	T	m	-	T	m	T	m	T	T	T	T	-	-	-
289 P	M	M	T	T	T	T	-	-	T	m	-	-	-	-	M	M	-
290 P	M	M	m	T	M	m	m	T	m	T	-	-	T	-	-	-	-
291 P	M	M	M	T	T	T	T	T	T	m	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: (-) ausência do mineral, (T) traço, (m) menor e (M) maior representam a proporção de cada constituinte mineral

Os difratogramas das amostras totais e da fração argila indicam que alguns minerais se alteraram, como a clorita e a dolomita, mas outras diferenças, como a o aparecimento de caolinita e/ou aumento do quartzo e da ilita podem representar contaminação com a argamassa. No anexo IV estão apresentados os difratogramas dos prismas de concreto moldados, separados em agregado e argamassa. A argamassa, além dos produtos de hidratação do cimento, apresenta constituintes do agregado, particularmente, miúdo (Tabela 5.8).

Tabela 5.8. - Constituintes das argamassas (amostra total) extraídas dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade potencial.

Minerais	Calcita	Dolomita	Quartzo	Iilita	Saponita	Antigori-ta	Clorita	Portlandita	Etringita	C <sub>4</sub> AH <sub>11</sub>
Amostra										
284	m	M	m	T	-	-	-	m	T	T
285	M	T	m	m	T	-	-	m	T	T
286	M	T	m	T	T	-	T	m	T	T
289	M	T	m	-	T	m	-	m	T	-
290	M	m	M	T	-	-	-	m	T	m
291	M	m	M	-	-	-	-	m	T	T

Legenda: (-) ausência do mineral, (T) traço, (m) menor e (M) maior representam a proporção de cada constituinte mineral.

Além dessas, o material pulverulento da borda da amostra 289 P foi analisado como amostra total, não orientada, que dada a sua pequena quantidade foi fixada sobre fita adesiva dupla face, a qual produz reflexões intensas em 6,44 Å; 5,34 Å e 3,53 Å. O pó analisado é marcado pelas reflexões em 12,60 Å; 4,93 Å; 4,38 Å; 2,50 Å e 1,60 Å atribuídas à sepiolita, compatível com as características macroscópicas do material analisado, conforme apresentado no Anexo V.

A partir destes resultados, verifica-se que a mineralogia original – minerais carbonáticos, argilominerais e quartzo - das amostras foi parcialmente preservada, após terem sido submetidas aos ensaios de reatividade. Entretanto, a clorita e a dolomita mostraram-se mais susceptíveis a alterações durante os ensaios de reatividade do prisma de concreto. A clorita se alterando para esmectita, cria condições de expansibilidade para o agregado. A sepiolita, preferencialmente no contato entre agregado e argamassa, forma-se a partir do consumo de magnésio e silício, enquanto a brucita é formada, quando esse último elemento não está disponível.

### **5.3. Análise Química**

As análises químicas das rochas, dos corpos-de-prova moldados e dos testemunhos da barragem, foram realizadas conforme a metodologia citada no Capítulo IV. Para análise dos prismas e dos testemunhos de concreto, foram separados o agregado da argamassa e analisados separadamente, como citados na análise por DRX.

#### **5.3.1. Agregados - Rochas Carbonáticas**

Todas as rochas analisadas (Tabela 5.2) são carbonáticas, predominantemente calcíticas, sendo três delas dolomíticas (Figura 5.37 A). O conteúdo em sílica mostra dois conjuntos distintos: menos que 5,5% em três delas e mais que 12 até 27% nas outras três. Observa-se a tendência de correlação positiva entre o conteúdo mais alto em sílica e alumina (Figura 5.37 B) e ferro, interpretada como a presença de argilominerais. Entretanto, na amostra 289 o conteúdo de sílica é elevado, mas alumina é baixa, enquanto MgO também é alto (Figura 5.37 C). Esta composição pode indicar, tanto a silicificação de dolomito como um maior conteúdo em argilominerais magnesianos, considerando-se que a perda ao fogo (PF) é uma das mais baixas (Figura 5.37 D). Na Tabela 5.9. está apresentada a composição química das amostras, dada em porcentagem de óxidos.

Tabela 5.9 - Análise química das rochas carbonáticas estudadas.

Amostras	Análise Química								
	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S	PF
284	3,46	16,65	0,68	1,28	32,16	0,05	0,41	0,02	44,03
285	3,50	0,62	0,27	0,52	50,66	0,14	0,11	0,10	41,80
286	12,84	2,71	1,40	3,63	41,12	0,35	0,92	0,01	35,86
289	19,13	16,04	0,66	0,38	31,34	0,03	0,02	0,09	30,39
290	27,35	7,67	2,52	6,25	24,30	0,08	0,11	0,00	29,27
291	5,48	3,28	0,47	0,84	47,44	0,05	0,29	0,02	40,77

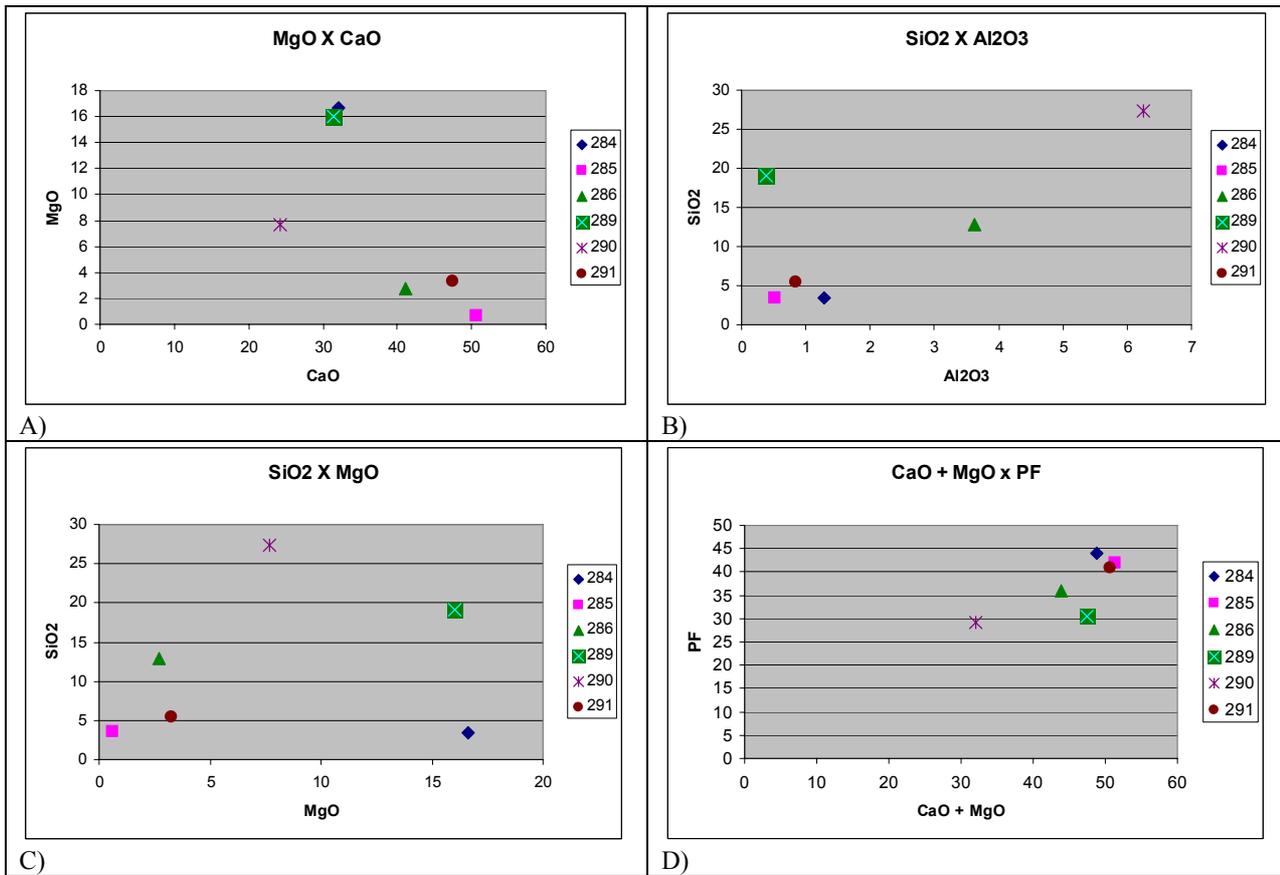


Figura 5.37. Gráficos a partir dos elementos químicos que constituem as fases minerais das amostras. A) MgO versus CaO; B) SiO<sub>2</sub> versus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; C) SiO<sub>2</sub> versus MgO; e D) CaO+MgO versus PF.

### 5.3.2. Concreto da Barragem

As análises químicas foram realizadas separadamente, para os agregados e para as argamassas (Tabela 5.10). Os agregados dos três testemunhos apresentam composição química bastante semelhantes, compatível com a mesma proveniência. As argamassas de dois testemunhos, também são semelhantes, mas aquela proveniente da “ombreira” difere das

anteriores pelo alto conteúdo em sílica, compensado pelo baixo conteúdo em cálcio, sugerindo maior contribuição de agregado fino de quartzo, em detrimento das rochas carbonáticas. A comparação entre as composições do agregado e da argamassa indica uma correlação positiva apenas nos conteúdos de sódio e potássio. Comparativamente, a rocha que mais se assemelha quimicamente ao agregado da barragem é aquela proveniente do entorno do Distrito Federal (286).

Tabela 5.10. Análise química dos testemunhos de concreto.

Amostras	Análise Química								
	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PF
335 Agregado	10,79	2,15	0,93	2,60	43,11	0,22	1,24	0,15	36,70
335 Argamassa	20,89	1,71	1,23	3,56	37,09	0,16	1,12	0,52	31,24
338 Agregado	10,46	1,72	0,79	2,32	44,13	0,74	1,19	0,14	37,19
338 Argamassa	22,32	2,03	1,69	3,79	37,33	0,14	1,06	0,64	29,67
340A Agregado	9,86	1,83	0,66	1,72	45,28	1,61	0,74	0,20	37,76
340A Argamassa	50,35	1,51	0,93	2,50	22,13	2,29	0,42	0,39	18,58

### 5.3.3. Prismas de Concreto

As análises químicas foram realizadas separadamente, para os agregados e para as argamassas, para todos os prismas de concreto (Tabela 5.11).

A composição química da rocha comparada com a do agregado dela derivado, após ensaio de expansão, mostra uma tendência ao aumento da sílica e diminuição do cálcio, que pode ser explicada pela maior resistência da primeira à abrasão na britagem. Os demais constituintes não mostram relações diretas entre as composições da rocha e do agregado, com exceção da amostra 290P, que apresentou um aumento significativo de K<sub>2</sub>O, que pode ser relacionado com contaminação da argamassa. Na argamassa, observa-se uma relação positiva entre o conteúdo em MgO do agregado e da argamassa, exceto na amostra 291. Esta, na qual o conteúdo em sílica é baixo no agregado, mas é o mais alto na argamassa, contém o menor valor de MgO, embora este constituinte seja relativamente alto no agregado.

Tabela 5.11. Resultados das análises química dos prismas de concreto.

REGISTRO	ANÁLISE QUÍMICA								
	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PF
284P Agregado	6,21	15,89	0,67	1,27	30,83	1,10	0,31	0,31	41,91
284P Argamassa	17,43	8,50	1,45	2,71	32,28	0,17	0,45	0,87	32,55
285P Agregado	5,66	1,96	0,43	1,28	47,55	0,23	0,36	0,17	40,45
285P Argamassa	21,32	1,91	1,60	3,70	37,50	0,34	0,63	0,77	29,10
286P Agregado	14,18	2,93	1,33	3,16	39,90	0,18	1,19	0,18	34,72
286P Argamassa	22,95	2,41	1,22	3,72	39,53	0,20	0,87	0,87	28,53
289P Agregado	18,62	15,99	0,50	0,86	31,51	0,10	0,14	0,19	30,78
289P Argamassa	23,46	8,43	1,29	2,38	32,76	0,30	0,25	0,69	28,33
290P Agregado	38,04	3,78	2,11	7,61	21,18	0,19	4,39	0,15	20,92
290P Argamassa	27,39	2,09	2,09	4,96	32,89	0,23	1,32	0,96	24,56
291P Agregado	8,64	6,88	0,42	1,33	40,47	0,15	0,66	0,12	40,66
291P Argamassa	46,06	0,72	1,10	2,26	23,55	0,15	0,43	0,55	20,66

#### 5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após investigação visual e por lupa binocular das barras de argamassa, dos prismas de concreto moldados e dos testemunhos de concreto extraídos da barragem, foram separados fragmentos, nos quais observou-se a possível presença de bordas de reação, poros preenchidos, mudanças de tonalidade tanto na argamassa como no agregado, entre outras feições para serem analisados por MEV.

Nas barras de argamassa foram observadas, macroscopicamente, fissuras nas amostras 290B e 291B (Figura 5.22) e material exsudado, de coloração amarelada, na barra de argamassa da amostra 286B (Figura 5.23 A e B), como citado no item 5.1.3. Pela análise da superfície de quebra desses materiais, por MEV com EDX, utilizando o detector de elétrons secundários, observou-se que a aderência e a coesão são regulares (Figura 5.38), com produtos de hidratação (Figura 5.39) comuns ao concreto, além de produtos com composição sílico-

cálcico-alcálicas (Figuras 5.40 e 5.41). Esses produtos, que podem estar associados à reação álcali-silica e apresentam variação em sua morfologia (Figuras 5.42 a 5.46).

De uma maneira geral, a maioria dos produtos neoformados, com composição sílico-cálcico-alcálicas, apresentam microscopicamente as seguintes feições: 1) material de preenchimento com estrutura maciça de aspecto quebradiço (Figuras 5.42 e 5.46), semelhante a gretas de contração (Figura 5.40); 2) material criptocristalino com hábito alongado e entrelaçado apresentando forma de rede (Figura 5.43); e 3) material criptocristalino de hábito acicular (Figura 5.43) ou forma rendada (Figura 5.45).

As outras barras de argamassa estudadas, 284B, 285B e 289B apresentam boa aderência e coesão, e os produtos de hidratação comumente encontrados no concreto, tais como CH, C-S-H e etringita (Figura 5.47). Porém, a barra de argamassa da amostra 285B apresenta também alguns poros preenchidos por gel. Embora produtos associados à reação álcali-silica estejam presentes, não foram encontradas evidências da reação álcali-carbonato.

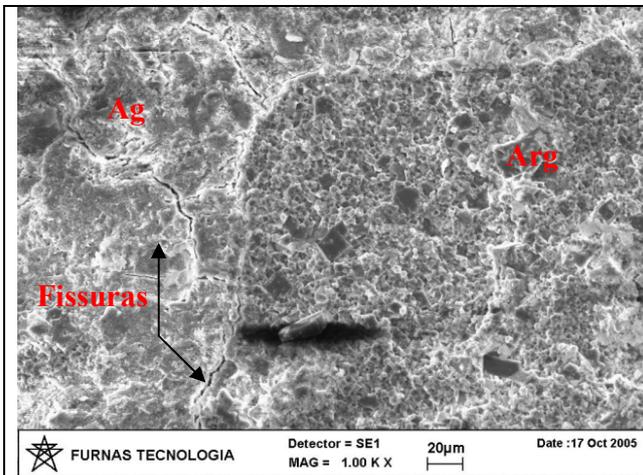


Figura 5.38. Micrografia da amostra 291B. Contato agregado (Ag) / argamassa (Arg) pouco aderido e fissuras. Imagem por MEV.

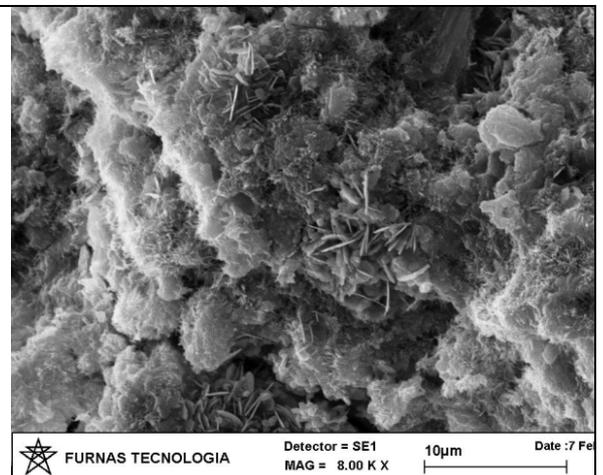


Figura 5.39. Micrografia da amostra 290B. Produtos de hidratação (CH, C-S-H) na pasta de cimento. Imagem por MEV.

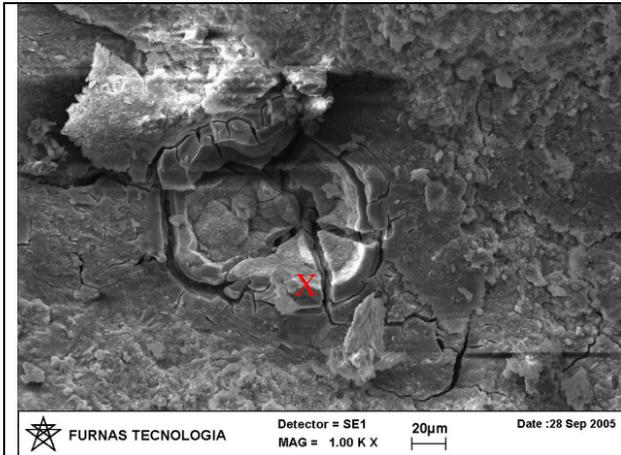


Figura 5.40. Micrografia da amostra 291B. Poro com gel maciço, gretado e no centro, textura botroidal. Imagem por MEV.

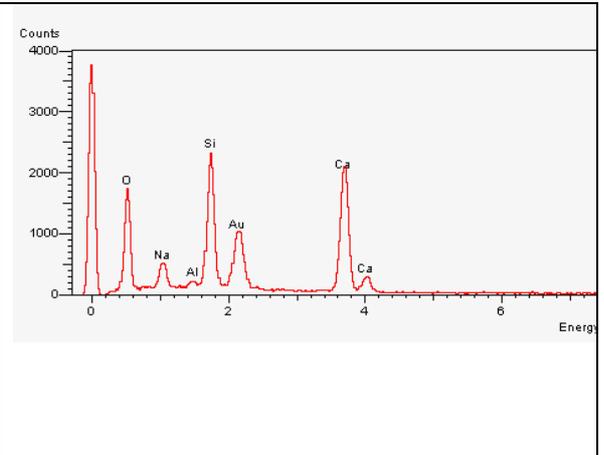


Figura 5.41. Microanálise, realizada no ponto indicado com X, do gel da Figura 5.40, constituído de sílica, cálcio e sódio.

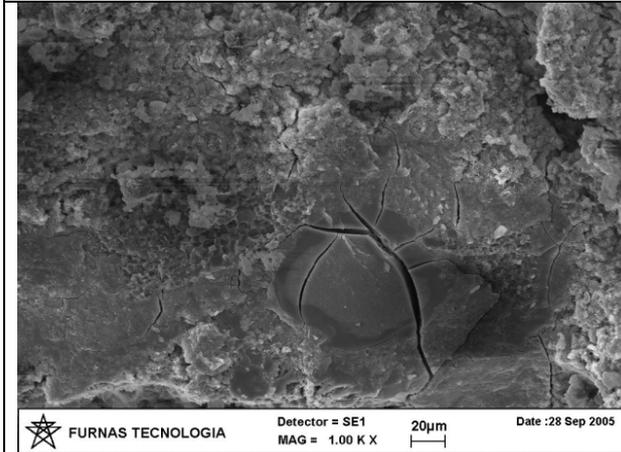


Figura 5.42. Micrografia da amostra 290B. Gel maciço ao longo da pasta de cimento. Imagem por MEV.

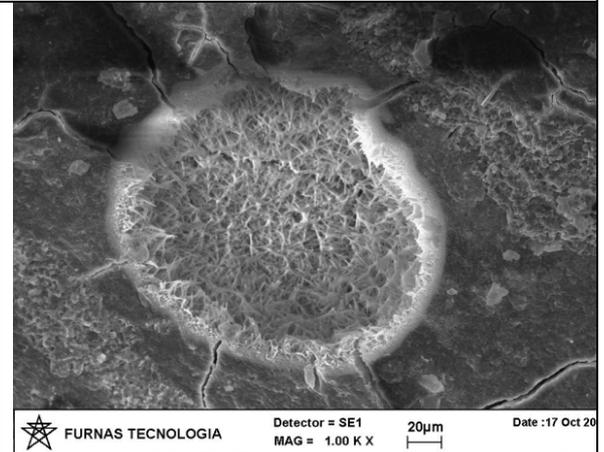


Figura 5.43. Micrografia da amostra 290B. Poro com produto neoformado de cristais entrelaçados. Imagem por MEV.

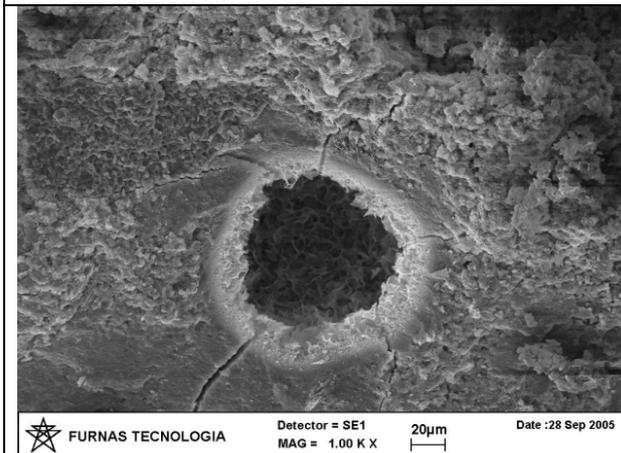


Figura 5.44. Micrografia da amostra 290B. Poro com produto neoformado de forma acicular. Imagem por MEV.

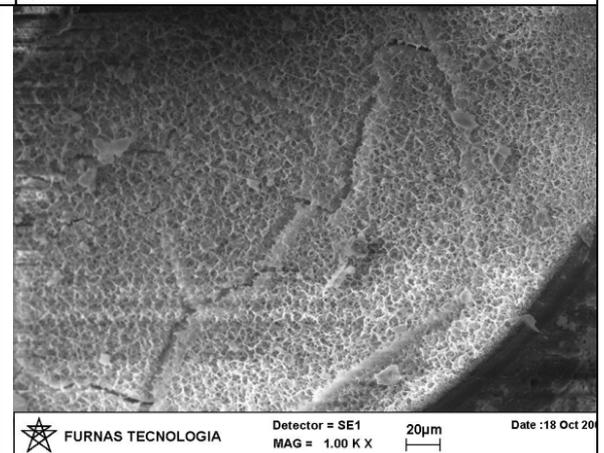
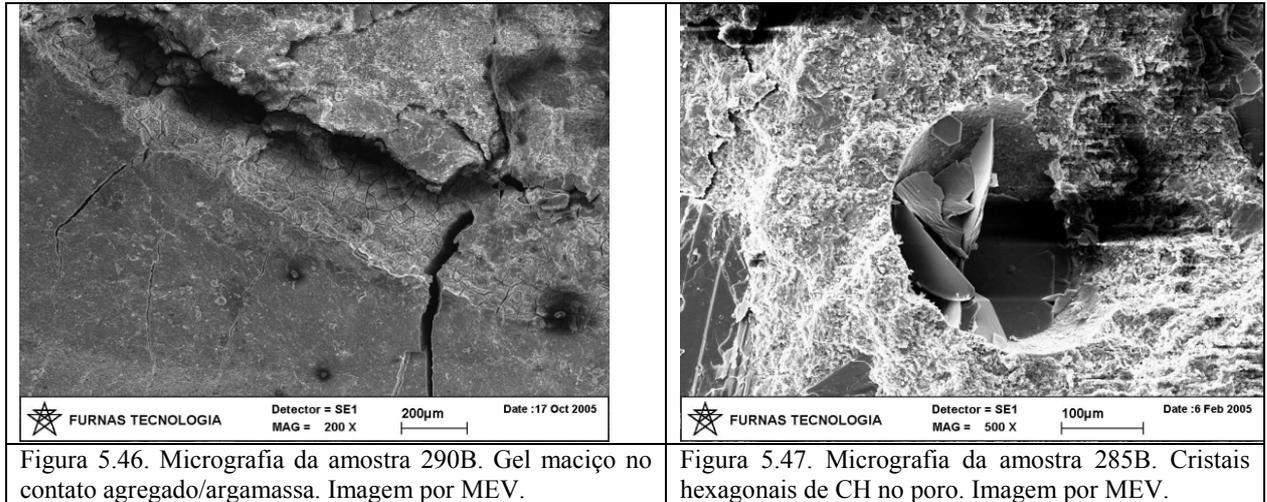


Figura 5.45. Micrografia da amostra 291B. Poro com produto neoformado rendado. Imagem por MEV.



Em geral, os fragmentos retirados dos prismas de concreto, apresentam feições semelhantes àquelas das barras de argamassa, em relação à aderência agregado/argamassa (Figura 5.48), coesão e presença de produtos de hidratação (CH e C-S-H) (Figura 5.49), exceto a amostra do prisma de concreto 290P que não apresenta boa aderência no contato agregado/argamassa (Figura 5.50), mostrando pouca coesão da argamassa e contato com presença de material pulverulento.

Nos prismas de concreto não foi encontrado produto neoformado da reação álcali-silica. No entanto, foi verificada maior ocorrência de etringita (Figuras 5.51 e 5.52). Porém, em fragmentos dos prismas de concreto 285, 289, 290 e 291 foram encontradas bordas de calcita no contato agregado/argamassa e em fragmentos do prisma de concreto da amostra 289P foi observada a presença de auréola zonada com material branco translúcido. Esses produtos podem se referir à reação álcali-carbonato, conforme será detalhado a seguir, no item 5.4.1.

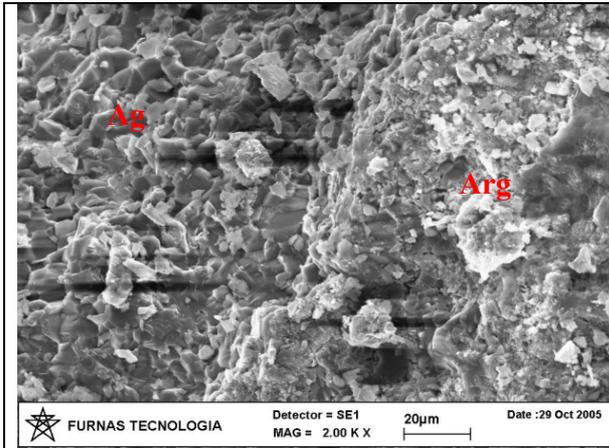


Figura 5.48. Micrografia da amostra 286P. Boa aderência no contato agregado (Ag)/Argamassa (Arg). Imagem por MEV.

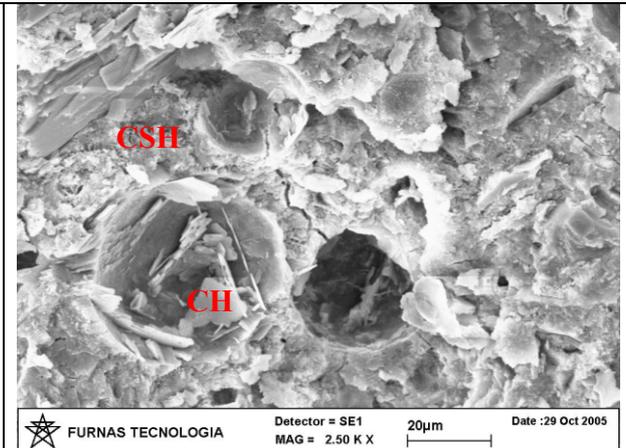


Figura 5.49. Micrografia da amostra 286P. Produtos de hidratação do cimento CH e C-S-H. Imagem por MEV.

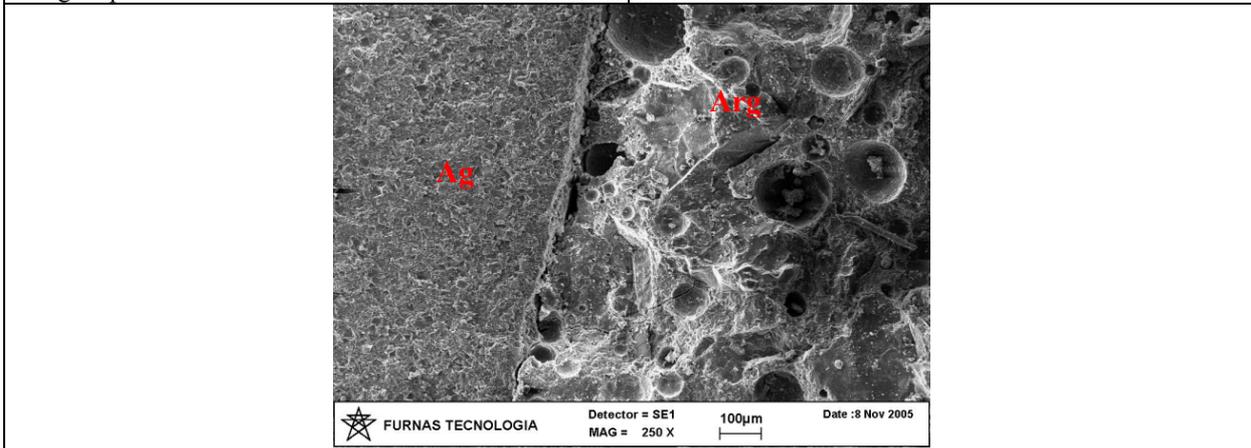


Figura 5.50. Micrografia da amostra 290P. Falta de aderência no contato agregado (Ag)/argamassa (Arg). Imagem por MEV.

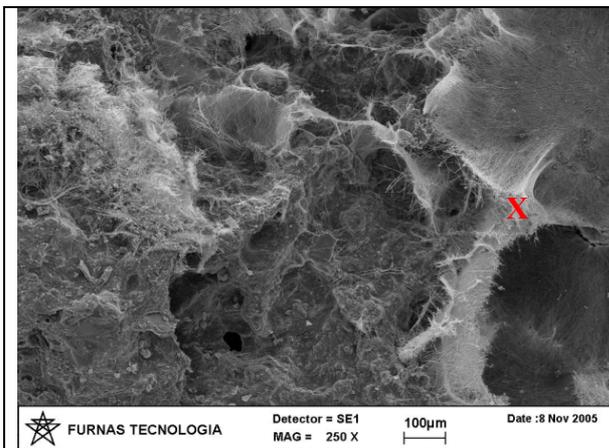


Figura 5.51. Micrografia da amostra 291P. Etringita na argamassa. Imagem por MEV.

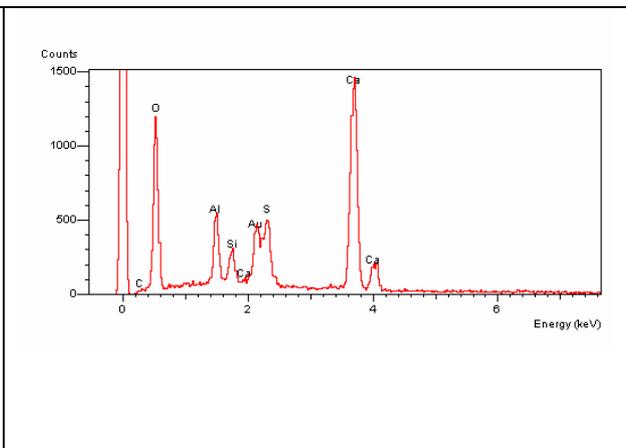


Figura 5.52. Microanálise da etringita (ponto marcado com X) referente à Figura 5.51.

Três testemunhos de concreto da barragem, ou seja, 335A, 335D e 340A foram submetidos a análise por MEV. Todos apresentaram falta de aderência entre o contato agregado/argamassa (Figura 5.53), conforme observado durante as análises por MEV, porém mantendo-se a argamassa coesa (Figura 5.54) e com presença de produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas (Figura 5.55), produtos de hidratação (prováveis CH e C-S-H) (Figura 5.56), e provável etringita secundária (Figuras 5.57 e 5.58).

A amostra 335A foi a que mais apresentou gel, tanto nos poros, na argamassa, como ao longo dos contatos agregado/argamassa. Nessas amostras de testemunhos de concreto da barragem não foi identificado nenhum produto da reação álcali-carbonato.

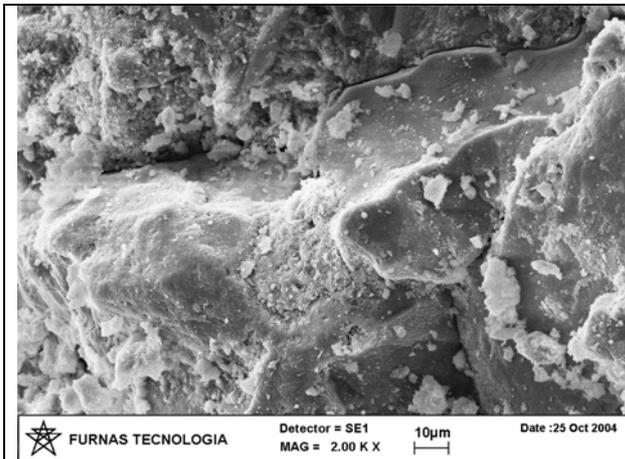


Figura 5.53. Micrografia da amostra 340A. Falta de aderência no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV.

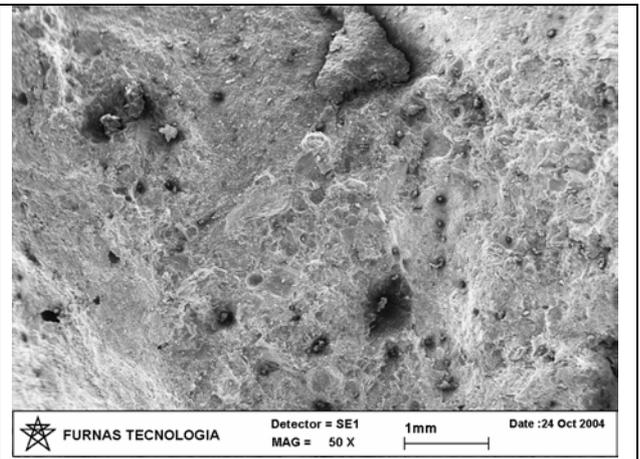


Figura 5.54. Micrografia da amostra 340A. Argamassa coesa. Imagem por MEV.

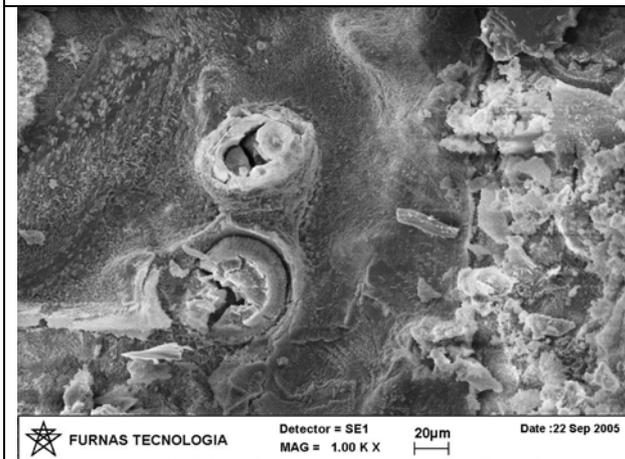


Figura 5.55. Micrografia da amostra 335A. Gel maciço nos poros. Imagem por MEV.

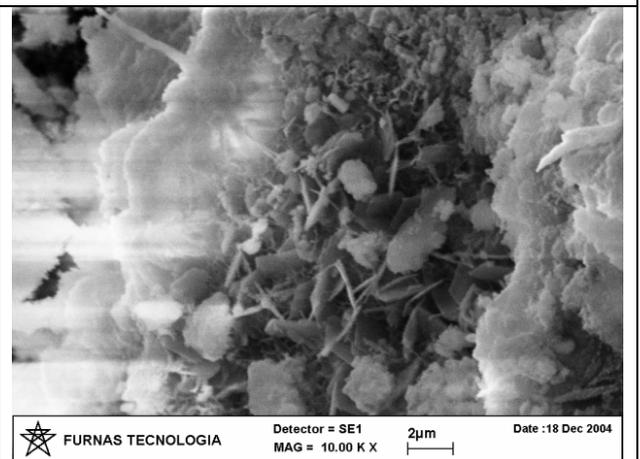


Figura 5.56. Micrografia da amostra 340A. Produtos de hidratação do cimento CH e C-S-H. Imagem por MEV.

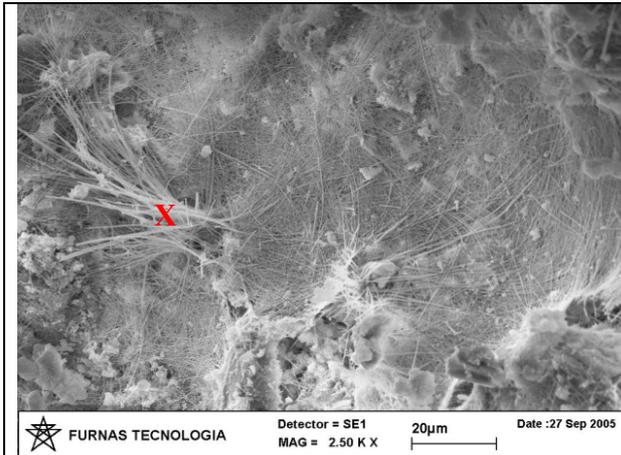


Figura 5.57. Micrografia da amostra 335A. Etringita na argamassa. Imagem por MEV.

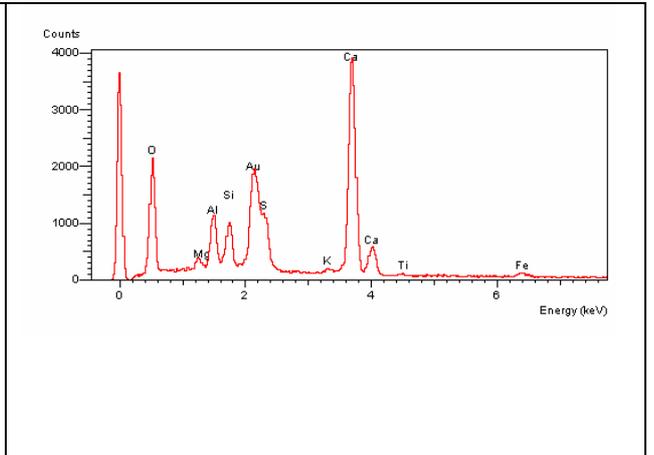


Figura 5.58. Microanálise da etringita (ponto marcado com X) referente à Figura 5.57.

Foram escolhidos, também, outros fragmentos, de forma aleatória, para serem analisados com o objetivo de se localizar demais produtos da reação, os quais não foram detectados no exame preliminar. Nestas investigações foram escolhidos fragmentos dos testemunhos de concreto da barragem e dos prismas de concreto, nas quais encontrou-se etringita (Figura 5.59). Produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas foram encontrados apenas na amostra 335 A. Estes produtos foram observados sobre o agregado (Figura 5.60), mas principalmente dispersos ao longo da argamassa (Figuras 5.61 e 5.62).

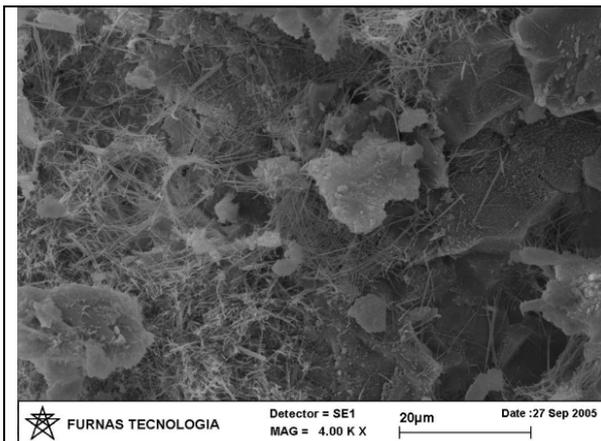


Figura 5.59. Micrografia da amostra 335A. Etringita na argamassa. Imagem por MEV.

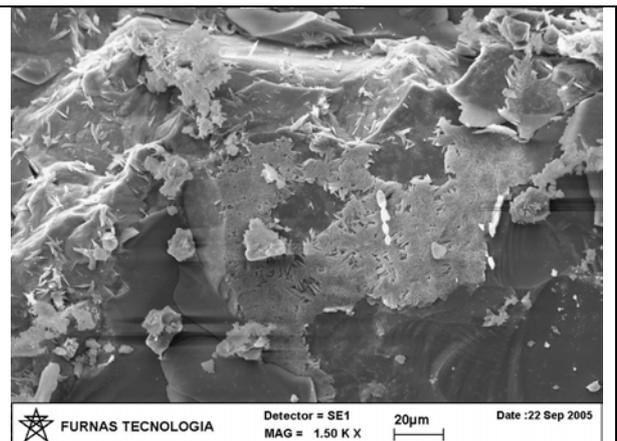


Figura 5.60. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas sobre o agregado. Imagem por MEV.

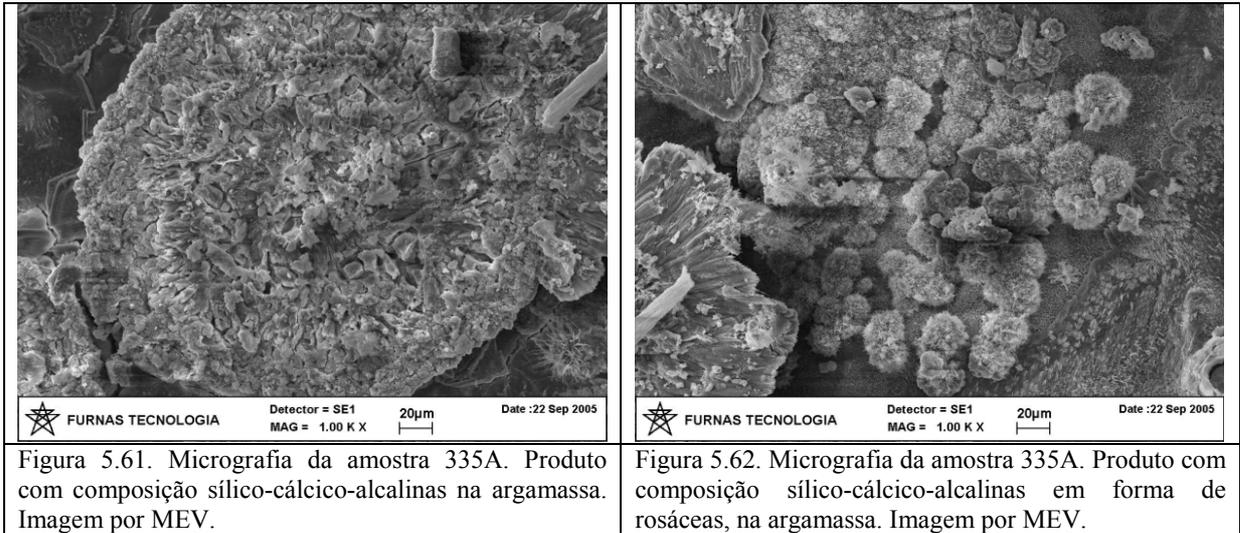


Figura 5.61. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas na argamassa. Imagem por MEV.

Figura 5.62. Micrografia da amostra 335A. Produto com composição sílico-cálcico-alcálicas em forma de rosáceas, na argamassa. Imagem por MEV.

### 5.4.1. Produtos da Reação Álcali-Carbonato

De todos os fragmentos analisados, provenientes tanto das barras de argamassa, dos prismas de concreto, bem como dos testemunhos de concreto da barragem, em apenas uma amostra, ou seja, no prisma de concreto da amostra 289 P (Figura 5.30 D), foi verificada a presença de produtos que podem ser relacionados à reação álcali-carbonato. Nesta amostra foi verificada a ocorrência de cristais aciculares radiais de composição sílico-magnésiana, associados a uma faixa de material maciço, cristalino, constituído de calcita, entre o contato agregado/argamassa.

No prisma de concreto desta amostra foi verificada a presença de um filme de material branco translúcido seguido de material branco transparente a translúcido, de espessura maior, em torno de 2,4 mm, estando estes produtos dispostos de forma paralela ao contato agregado/argamassa. A análise por MEV mostrou que o material branco translúcido, apresenta forma acicular radial (Figuras 5.63 a 5.65), encontra-se entre a faixa do material branco transparente a translúcido e o agregado. A microanálise realizada por EDS, mostrou a composição sílico-magnésiana (Figura 5.66). O elemento cálcio, que aparece na microanálise, é devido as finas camadas do material de forma acicular radial, onde o raio-X passa através das palhetas e encontra o material maciço (de composição cálcica) que encontra-se ao lado, devido a sua capacidade de penetração na amostra. A forma deste

mineral assemelha-se aos argilominerais e após análise do mesmo por DRX, comprovou que se trata de uma sepiolita (Anexo V).

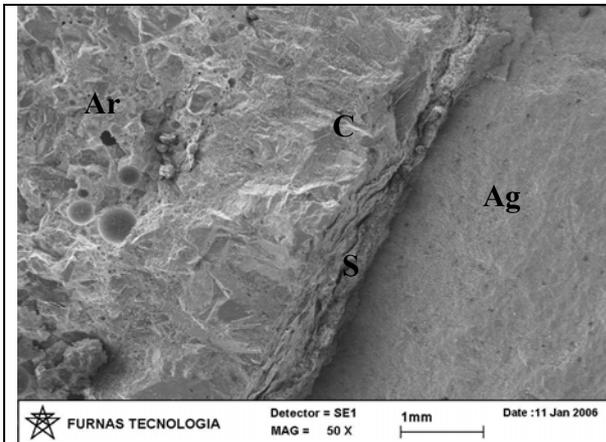


Figura 5.63. Micrografia da amostra 289 P. Filme de material acicular (S), seguido de material maciço (C), entre a argamassa (Ar) e o agregado (Ag). Imagem por MEV.

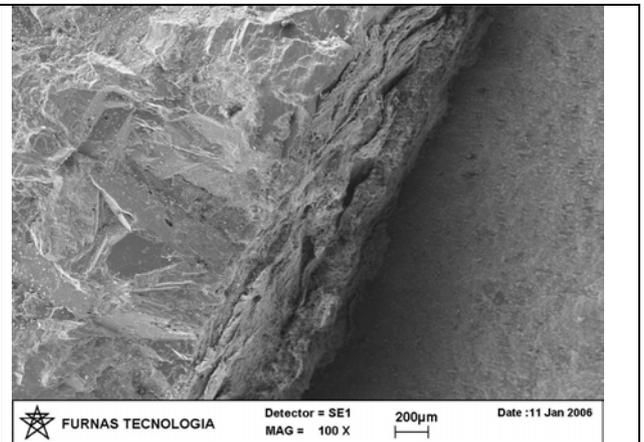


Figura 5.64. Ampliação da Figura 5.63.

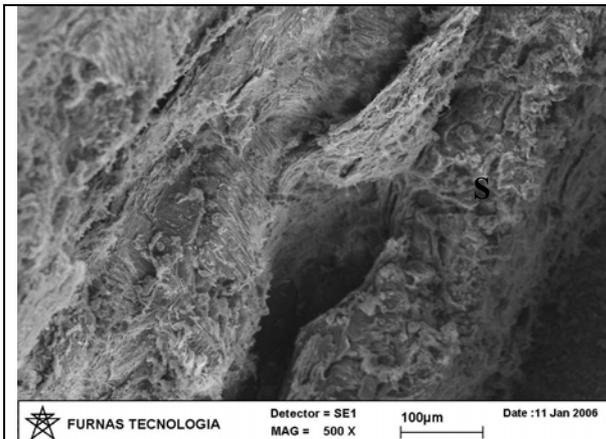


Figura 5.65. Micrografia da amostra 289 P. Detalhe do material acicular (S). Imagem por MEV.

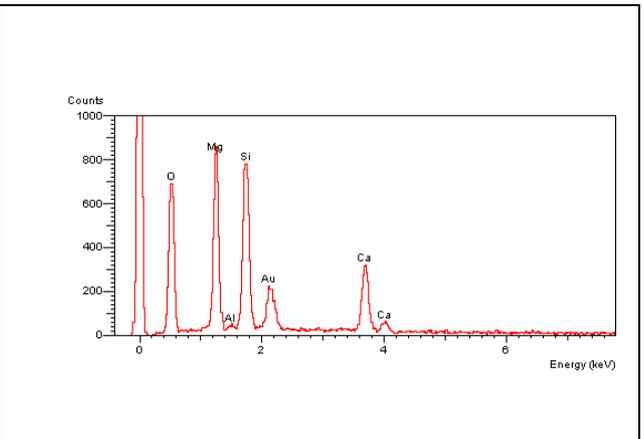
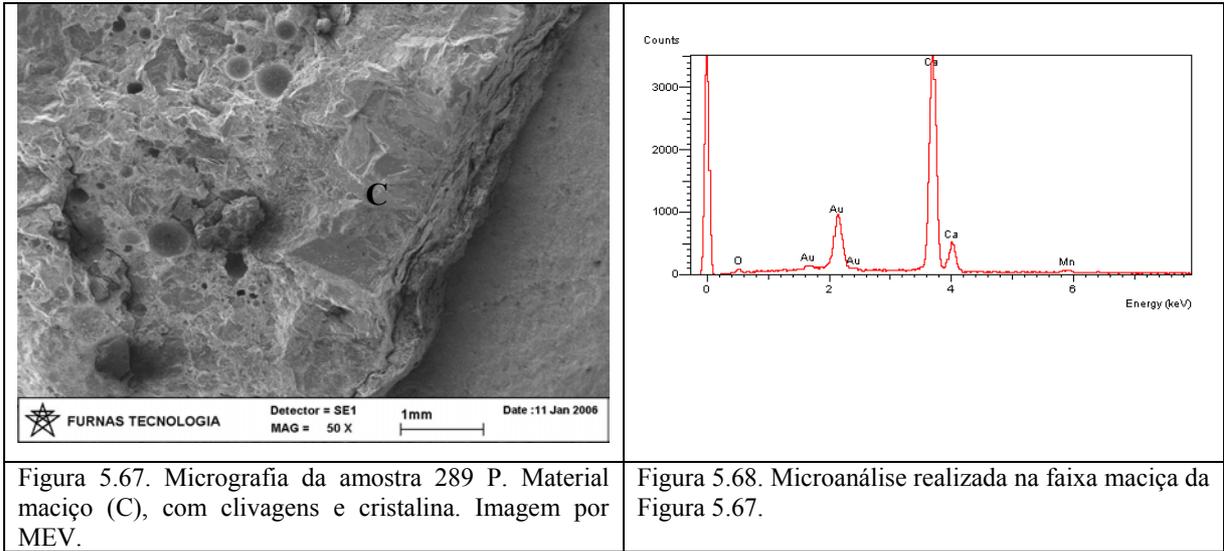
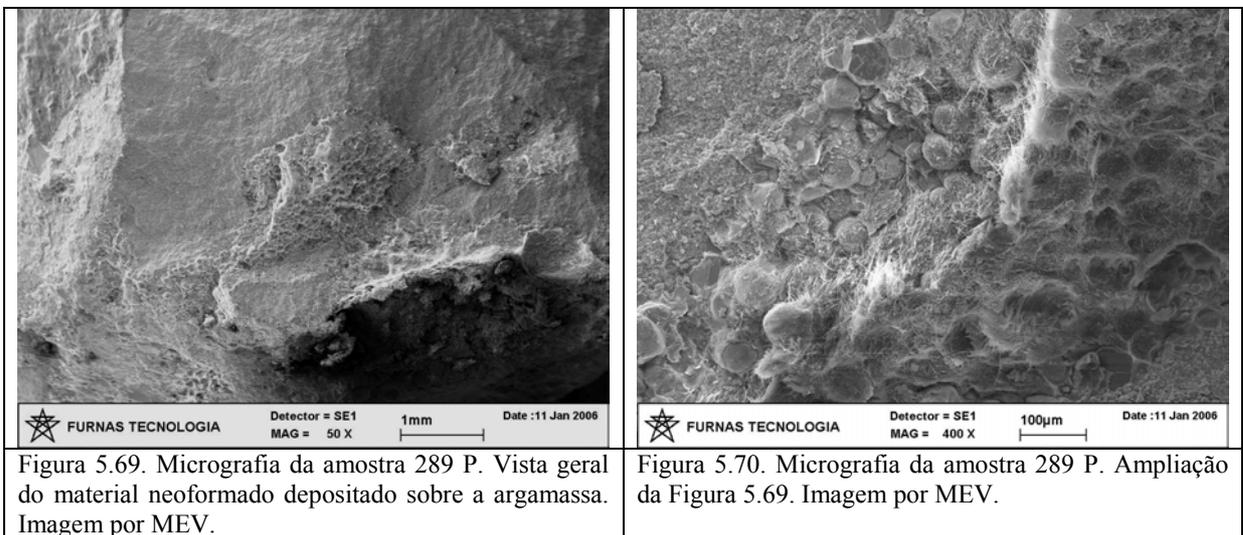


Figura 5.66. Microanálise realizada nas acículas da Figura 5.65.

O material branco transparente a translúcido, apresenta estrutura maciça e mostra algumas clivagens (Figura 5.67), a composição é basicamente cálcio (Figura 5.68). Como citado acima, para este mineral a base de cálcio, foi confirmado por DRX, que se trata de uma calcita (Anexo V).



Outras porções analisadas repetiram o citado acima, porém outras apresentaram acículas, com a mesma composição sílico-magnésiana e nódulos de composição cálcica (Figuras 5.69 a 5.74) sobre a argamassa, e outros no contato entre agregado/argamassa (Figuras 5.75 e 5.76).



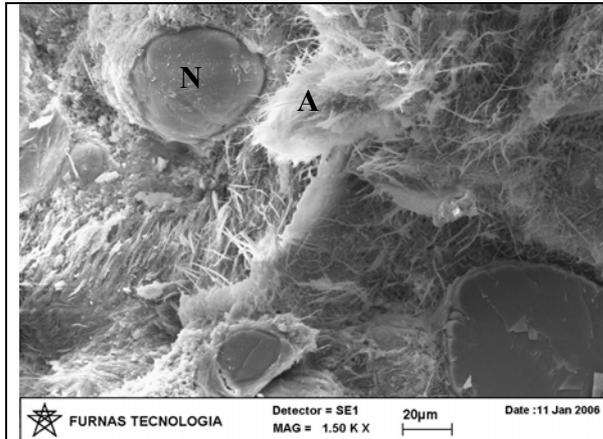


Figura 5.71. Micrografia da amostra 289 P. Nota-se os nódulos (N) de composição cálcica e as acículas (A) sílica/magnesianas. Imagem por MEV.

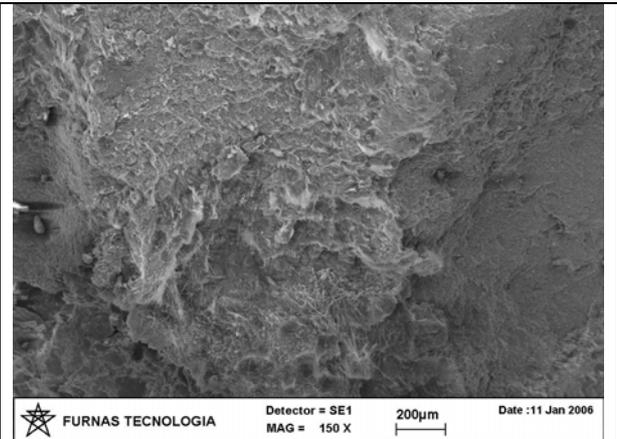


Figura 5.72. Micrografia da amostra 289 P. Vista geral do material neoformado depositado sobre a argamassa. Imagem por MEV.

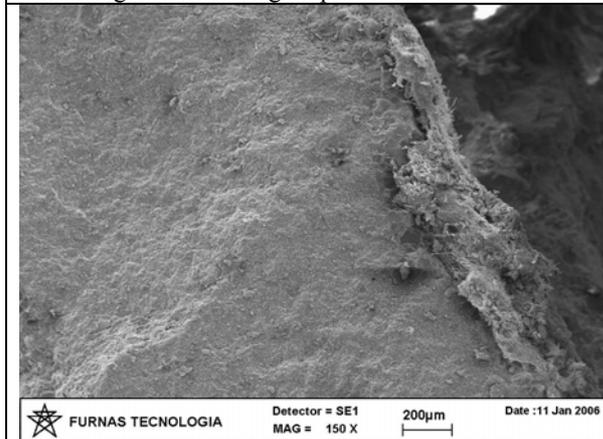


Figura 5.73. Micrografia da amostra 289 P. Material neoformado depositado no contato do agregado. Imagem por MEV.

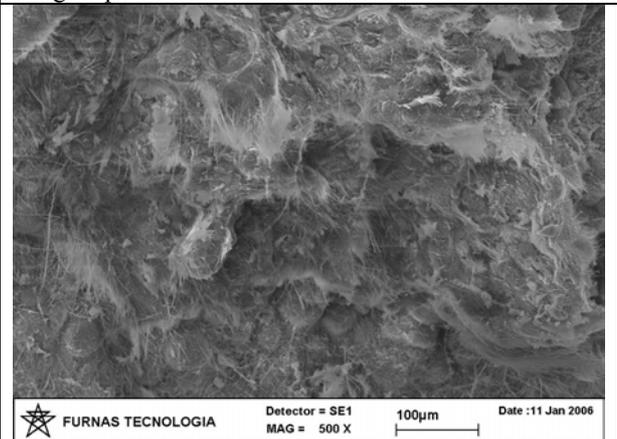


Figura 5.74. Micrografia da amostra 289 P. Material acicular sobre a argamassa. Imagem por MEV.

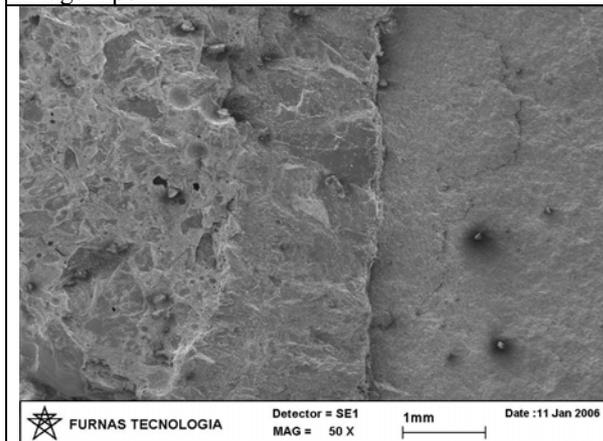


Figura 5.75. Micrografia da amostra 289 P. Material maciço no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV.

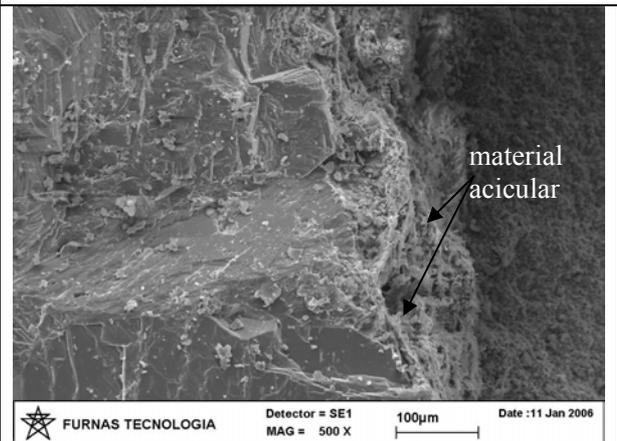


Figura 5.76. Micrografia da amostra 289 P. Ampliação material maciço, nota-se a deposição do material acicular na sua borda. Imagem por MEV.

Nos prismas de concreto 285 P e 291 P ocorre apenas a faixa de material maciço (Figuras 5.77 a 5.80), cristalino, constituído de calcita, entre o contato agregado/argamassa. Na amostra 291P, pode sugerir que este produto é neoformado e decorrente da RAC.

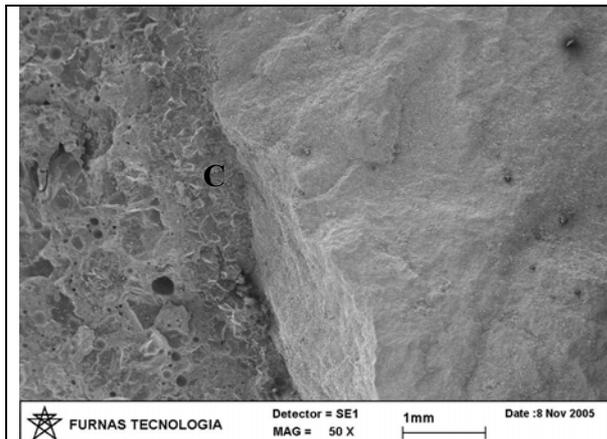


Figura 5.77. Micrografia da amostra 291 P. Material maciço (C), calcita, no contato agregado/argamassa. Imagem por MEV.

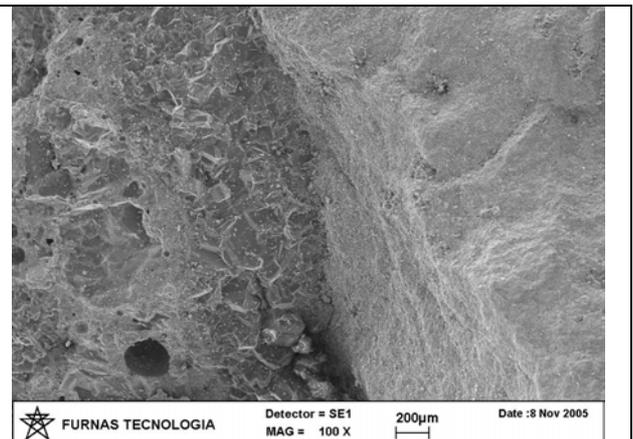


Figura 5.78. Micrografia da amostra 291 P. Ampliação da Figura 5.76. Imagem por MEV.

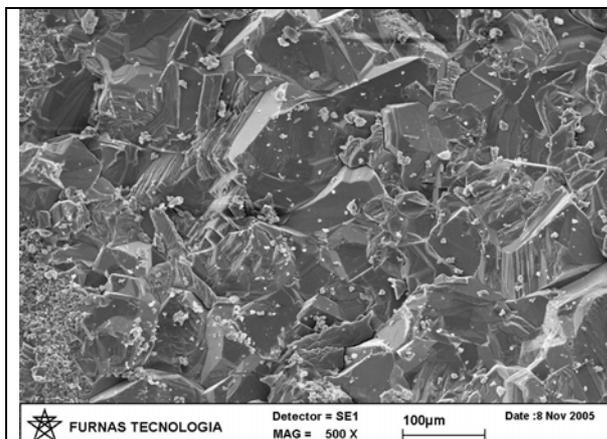


Figura 5.79. Micrografia da amostra 291 P. Ampliação da faixa de calcita. Imagem por MEV.

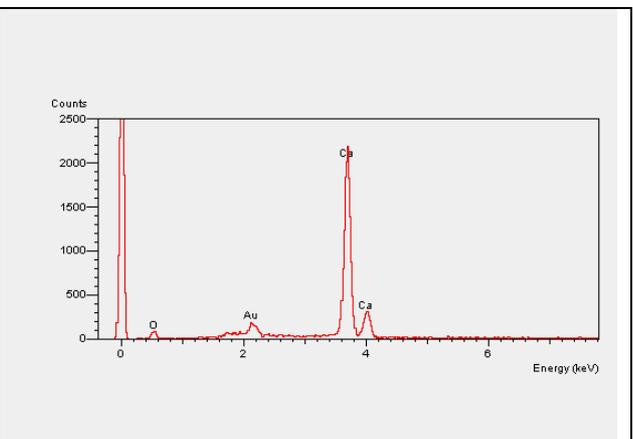


Figura 5.80. Microanálise realizada na faixa maciça da Figura 5.79.

## 5.5. Ensaios de Expansão

Para a verificação da potencialidade de reatividade álcali-agregado, das rochas estudadas, foram realizados ensaios de Reatividade Potencial – Método Acelerado, ASTM C 1260/01, Reatividade Potencial – Rochas Carbonáticas (Método do Cilindro de Rocha), ASTM C 586,

NBR 10340/88, Reatividade Potencial para Rochas Carbonáticas – Prismas de Concreto, ASTM C 1105/95, além da expansão residual nos concretos extraídos da barragem estudada.

### **5.5.1 Reatividade Potencial – Método Acelerado (ASTMC 1260/01)**

Como citado no Capítulo IV, para a realização do ensaio de reatividade potencial – método acelerado, foram preparadas barras de argamassa na proporção 1:2,25, conforme estabelecido no método de ensaio, mantendo a relação água/cimento igual 0,47. As barras de argamassa são imersas em uma solução de NaOH a 1N e ficam mantidas a uma temperatura de 80°C, por 30 dias.

Segundo a norma ASTM C 1260/01, os seguintes parâmetros são apresentados para a expansão provocada pela reação álcali-agregado, no ensaio de Reatividade Potencial – Método Acelerado, utilizando o cimento CPI, com alto teor de álcalis:

- Expansão inócua para valor menor que 0,10% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem;
- Expansão deletéria para valor maior que 0,20% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem; e
- Valor entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias pode ser, tanto expansão inócua, quanto deletéria, sendo, pois, necessárias informações suplementares sobre os materiais em evidência, ou ainda, acompanhamento da variação de comprimento até a idade de 28 dias.

A natureza da expansão foi deletéria para os agregados 286, 290 e 291 combinados com o cimento com alto teor de álcalis, com análise feita na idade de 30 dias, conforme pode visto na Figura 5.81. Já as demais rochas são consideradas não reativas por esta metodologia, do ponto de vista da reação álcali-sílica.

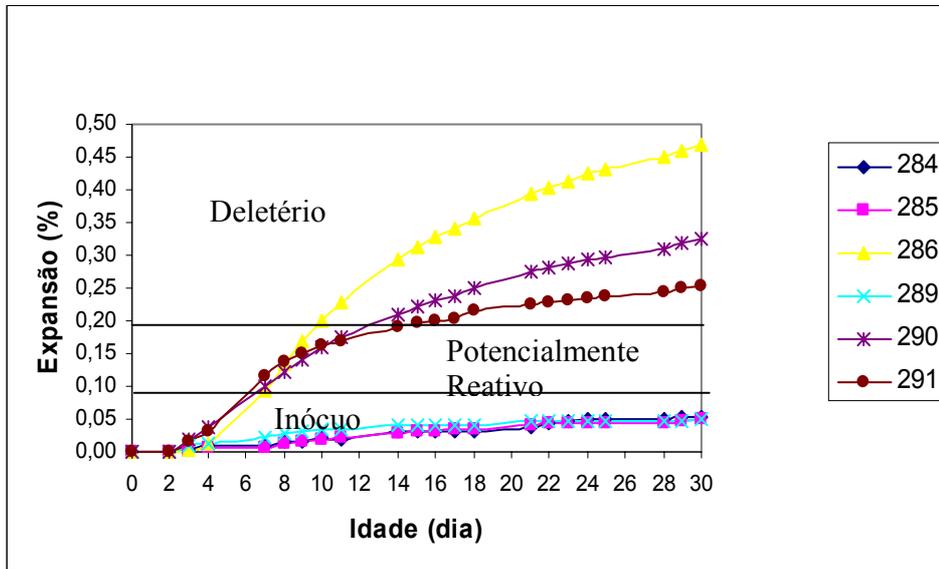


Figura 5.81 – Gráfico de reatividade potencial – Método ASTM C 1260/01.

### 5.5.2. Reatividade Potencial – Rochas Carbonáticas - Método do Cilindro de Rocha (ASTM C 586/92, NBR 10340/88)

O ensaio de reatividade pelo método da ASTM C 586/92 é determinado em minitestemunhos, extraídos na forma cilíndrica da rocha, com 9 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento, que foram imersos em solução de NaOH a 1N e mantidos em temperatura ambiente por aproximadamente 365 dias, cujo objetivo é o acompanhamento da variação de comprimento dos minitestemunhos para se determinar as expansões geradas na rocha.

Pela ASTM C 586/92, apenas expansão superior a 0,10%, é um indicativo de reação. A NBR 10340/88 não fixa porcentagens. Portanto, pela ASTM C 586/92, apenas as amostras 290 e 291 comportaram-se como potencialmente reativas. Na Figura 5.82 estão apresentados os resultados dos ensaios.

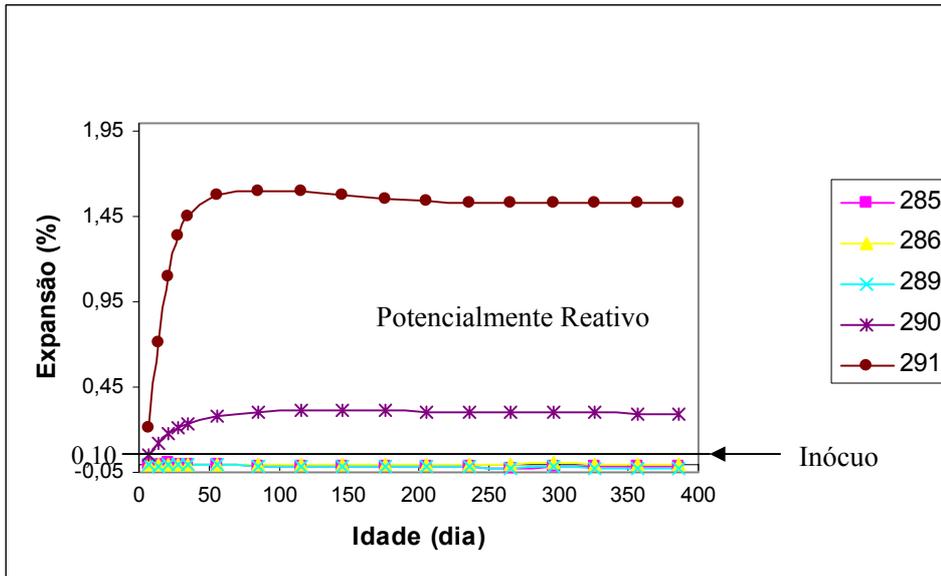


Figura 5.82- Gráfico de reatividade potencial para rochas carbonáticas – Método do cilindro de rocha.

Em resumo estão apresentados os resultados das reatividades pela ASTM C 1260/01 e ASTM C 586, NBR 10340/88, juntamente com o tipo litológico das rochas e a composição estimada, na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Resultados dos ensaios de reatividade (ASTM C 1260/01 e ASTM C-586, NBR 10340/88), juntamente com o tipo litológico das rochas estudadas.

AMOSTRA	LITOLOGIA	R.P.M.A % (dias)		R. M-T % (meses)			
		16	30	3	6	9	12
284*	Dolarenito muito fino	0,03	0,05	-	-	-	-
285	Calcário Recristalizado	0,03	0,05	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
286	Calcilutito	0,33	0,47	-0,01	0,00	0,00	0,00
289	Calcilutito	0,04	0,05	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03
290	Bio-calcilutito Dolomítico	0,23	0,33	0,30	0,31	0,30	0,29
291	Bio-calcilutito Dolomítico	0,20	0,25	1,60	1,56	1,54	1,53

Legenda:

R.P.M.A – Reatividade Potencial - Método Acelerado;

R.MT – Reatividade Potencial para Rochas Carbonáticas – Método do Cilindro de Rocha;

\*Não foi possível a extração do minitestemunho

### 5.5.3. Método dos Prismas de Concreto - (ASTM C 1105/95)

Como citado no Capítulo IV, segundo a ASTM C 1105/95, expansões iguais ou superiores a 0,015% aos 3 meses, 0,025% aos 6 meses ou 0,030% em 1 ano são indicativas de um comportamento deletério da combinação cimento/agregado utilizada, podendo a expansão ser classificada como potencialmente deletéria.

Pelos resultados pode-se observar que todas as amostras apresentaram expansões maiores que 0,015%, antes dos 3 meses de ensaio; exceto a amostra 286 P que não alcançou este limite, porém, pode-se notar a tendência na expansão. As amostras 284 P, 289 P e 291 P, foram as que apresentaram resultados consistentes e indicativos de potencialidade à reatividade. A amostra 290 P comportou-se como expansiva, porém seu resultado deve ser interpretado com cautela. Nas Figuras 5.83 a 5.88, estão apresentados as variações de comprimento (expansão) dos seis tipos de calcários de acordo com a ASTM C 1105/95, combinados com o cimento CP I 32, com alto teor de álcalis apresentados no Capítulo III.

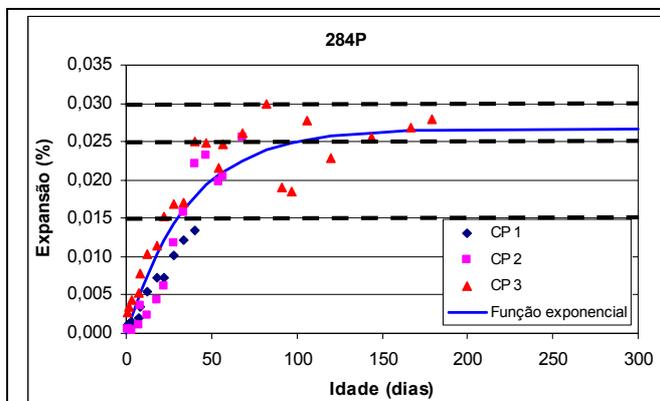


Figura 5.83 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 284 (Dolarenito muito fino).

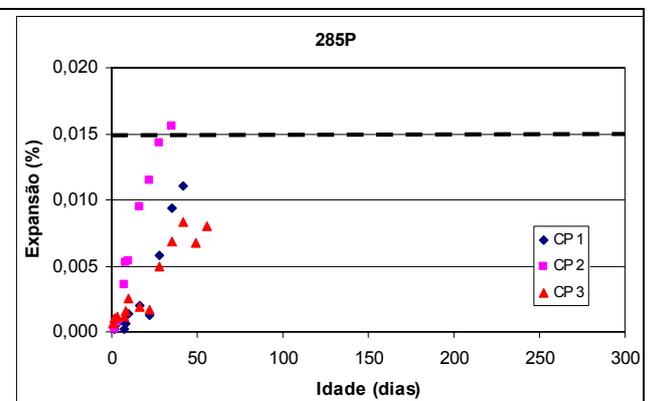


Figura 5.84 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 285 (Calcário Recristalizado).

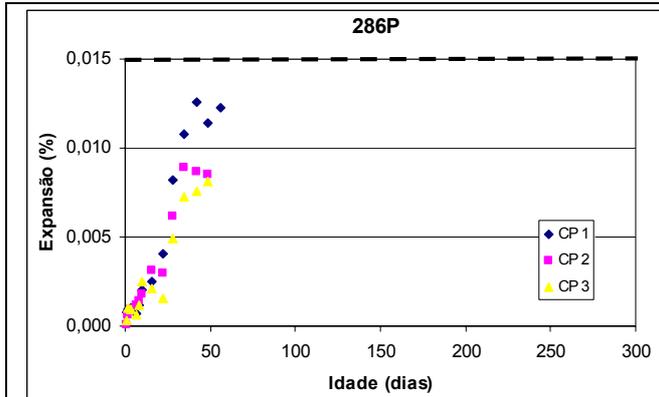


Figura 5.85 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 286 (Calculutito).

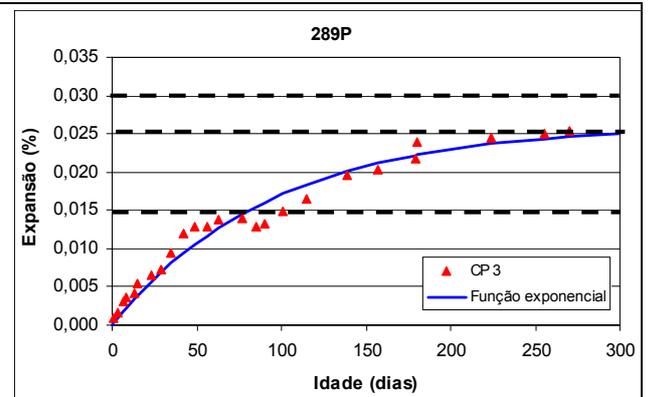


Figura 5.86 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 289 (Calculutito).

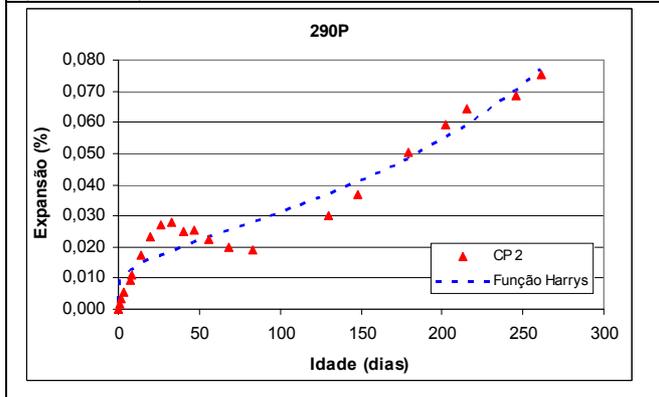


Figura 5.87 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 290 (Biocalculutito dolomítico).

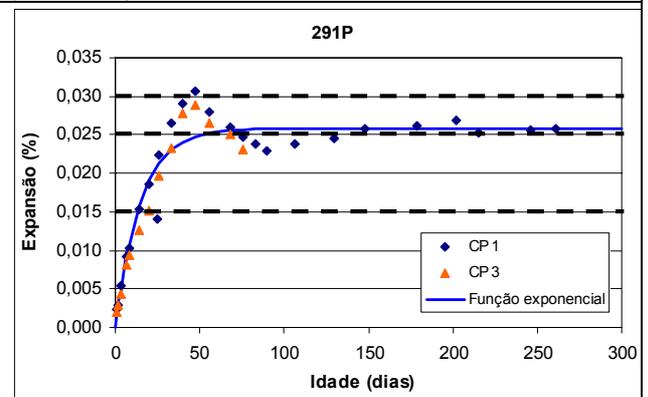


Figura 5.88 – Gráfico referente ao ensaio de reatividade potencial – ASTM C 1105, utilizando a rocha 291 (Biocalculutito dolomítico).

Nota: Todos os ajustes foram executados pelo programa curve expert.

Os resultados desses ensaios apresentaram variações, que foram detectadas e atribuídas à provável, expansão rápida do concreto que teria eventualmente danificado alguns extensômetros que foram colocados no interior dos prismas de concreto, quando moldados. Esta expansão pode ser notada em todos os gráficos, nos primeiros 60 dias de ensaio.

Os resultados são apresentados até a data de ensaio possível de serem medidas as expansões e com valores consistentes nos prismas de concreto aproveitados. Portanto, foram utilizados os seguintes dados: amostra 284P, até 179 dias, da 289P até 270 dias, das 285P e 286P até 60 dias; e das 290 P e 291P até 261 dias. Foi utilizado um programa de ajuste de curva, o Curve Expert nas expressões.

### 5.5.4. Verificação da Variação de Comprimento (Expansão Residual)

A verificação da variação de comprimento (Expansão Residual) dos testemunhos de concreto extraídos da barragem foi determinada nos corpos-de-prova estocados em água, à temperatura de 40°C, e efetuadas leituras periódicas através de relógio comparador, nos pinos colados no topo e na base dos testemunhos.

Nos gráficos apresentados (Figuras 5.89 a 5.91), observa-se que os testemunhos de concreto apresentam expansões residuais, isso mostra que estas amostras ainda possuem potencialidade para reagir.

Os resultados da expansão dos testemunhos de concreto da barragem apresentaram oscilações, como pode ser visto nos gráficos, inerentes ao processo de medição. Como esse ensaio é uma adaptação da norma ASTM C 1105/95, essas variações podem ser relacionadas com as dimensões e o peso maiores que dos prismas de concreto moldado, portanto, podem ocorrer variações quando a amostra é colocada no relógio de medição, pois qualquer movimento pode interferir no resultado, além da fixação externa dos pinos de medição, uma vez que se trata de concreto extraído e não moldado.

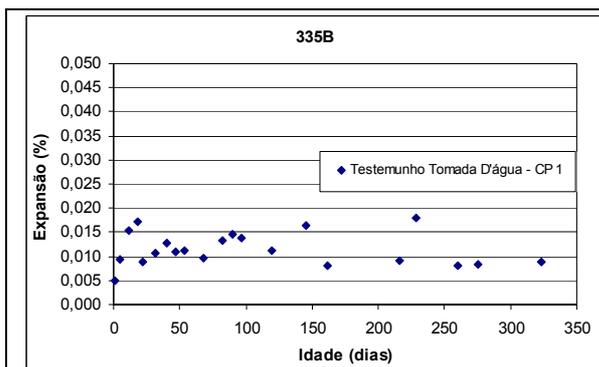


Figura 5.89. Gráfico de expansão do testemunho 335B

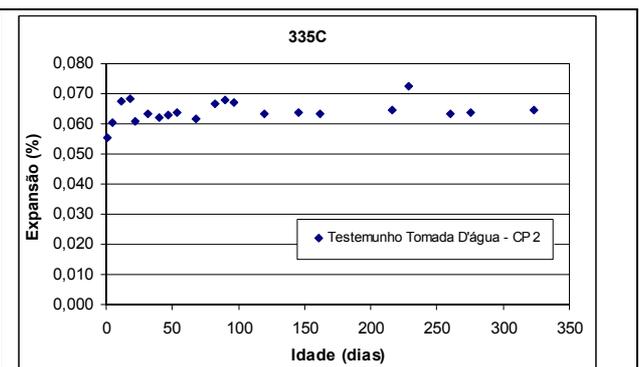


Figura 5.90. Gráfico de expansão do testemunho 335C

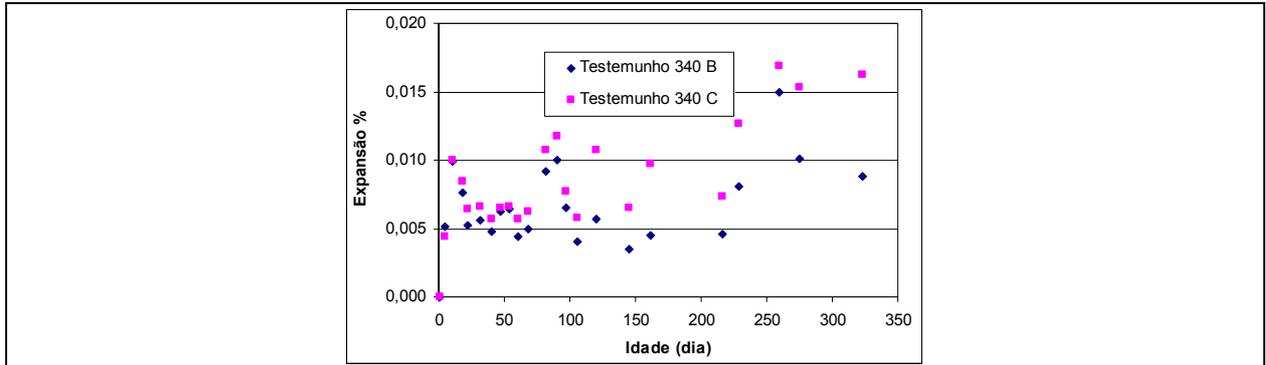


Figura 5.91. Gráfico de expansão dos testemunhos 340 B e C, da ombreira esquerda.

### 5.5.5. Método Químico Canadense (AAR 23.26-A)

A potencialidade das rochas para RAC que relaciona a razão  $\text{CaO} / \text{MgO}$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , proposta por Roger (1986), e normalizada na AAR 23 26 A (Figura 5.92), mostra a distribuição das rochas *in natura*, segundo a sua composição química.

Por esse método as rochas *in natura*: Calcilitito (286) e os Bio-calcilititos Dolomíticos (290 e 291) comportaram-se como potencialmente expansivos, sendo as rochas restantes, como não expansivas.

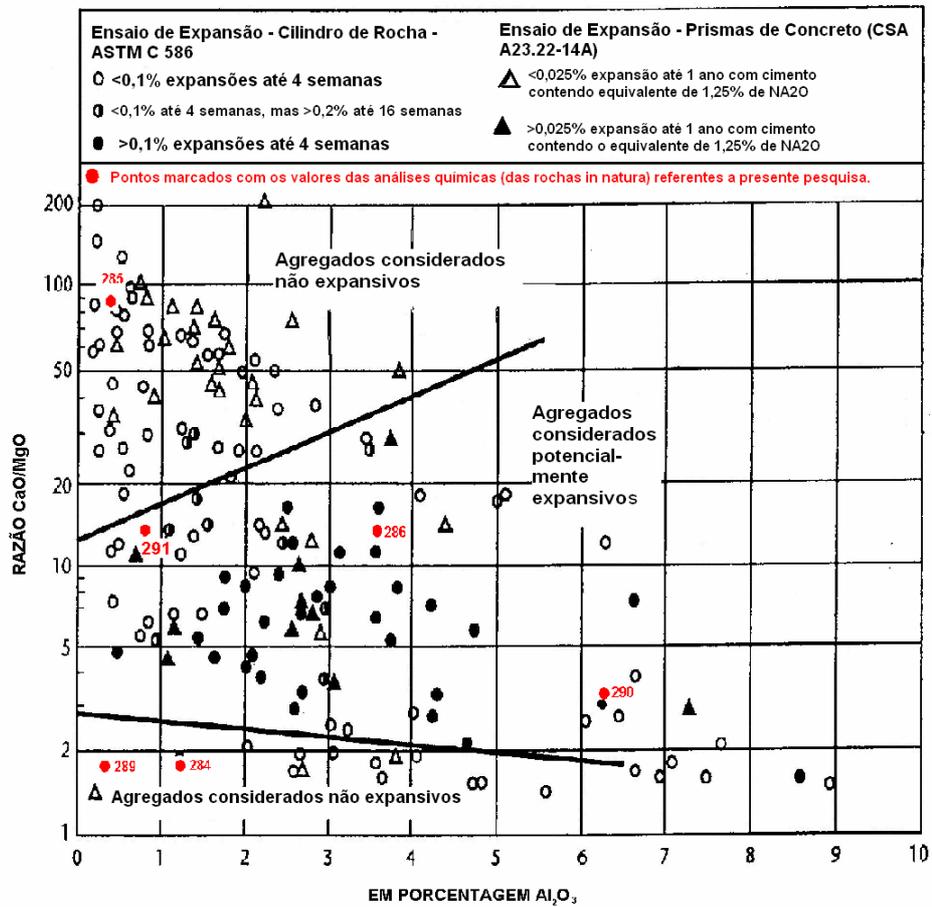


Figura 5.92 - Gráfico referente a razão CaO:MgO versus  $Al_2O_3$  utilizado pela norma AAR 23 26 A, com os resultados das análises químicas, das rochas *in natura*, inseridos.

## 5.6. Propriedades Mecânicas e Elásticas dos Concretos.

Os testemunhos de concreto extraídos da barragem estudada e os prismas de concreto moldados foram submetidos aos ensaios de resistência e deformação, com o objetivo de conhecer suas propriedades mecânicas e elásticas.

Na Tabela 5.13, e nas Figuras 5.93 e 5.94, estão apresentados e ilustrados os resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos moldados.

Tabela 5.13. Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade realizados nos prismas de concretos moldados.

Registro/ Tipo de Agregado	Idade (dia)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade GPa
284 P Agregado: Dolarenito muito fino	7	14,7	23,3
	28	19,5	30,9
	90	23,0	31,2
	180	23,7	42,1
285 P Agregado: Calcário Recristalizado	7	19,4	24,9
	28	25,5	32,7
	90	28,6	38,4
	180	29,6	42,3
286 P Agregado: Calcilutito	7	18,9	28,2
	28	26,0	36,2
	90	26,1	41,2
	180	25,3	45,0
289 P Agregado: Calcilutito	7	17,2	23,0
	28	18,9	19,8
	90	20,3	19,8
	180	24,5	26,6
290 P Agregado: Bio-calcilutito dolomítico	7	15,8	13,9
	28	21,4	16,7
	90	24,7	16,0
	180	25,6	26,2
291 P Agregado: Bio-calcilutito dolomítico	7	14,7	19,1
	28	24,8	20,7
	90	25,0	21,4
	180	24,7	31,3

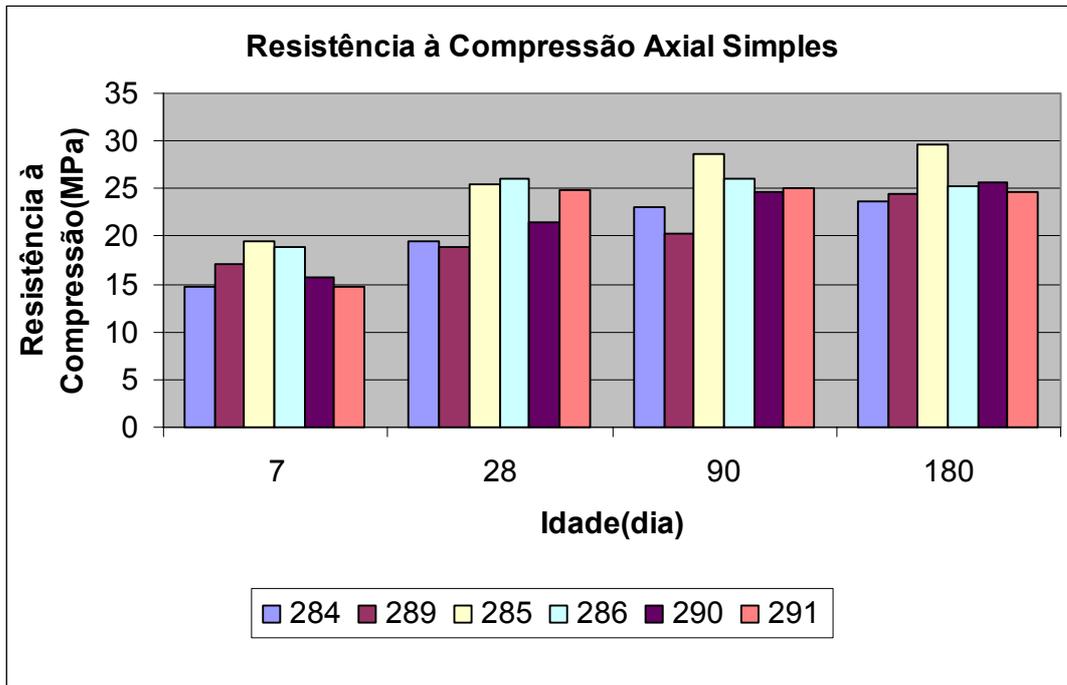


Figura 5.93. Gráfico referente ao ensaio de resistência à compressão dos prismas de concreto.

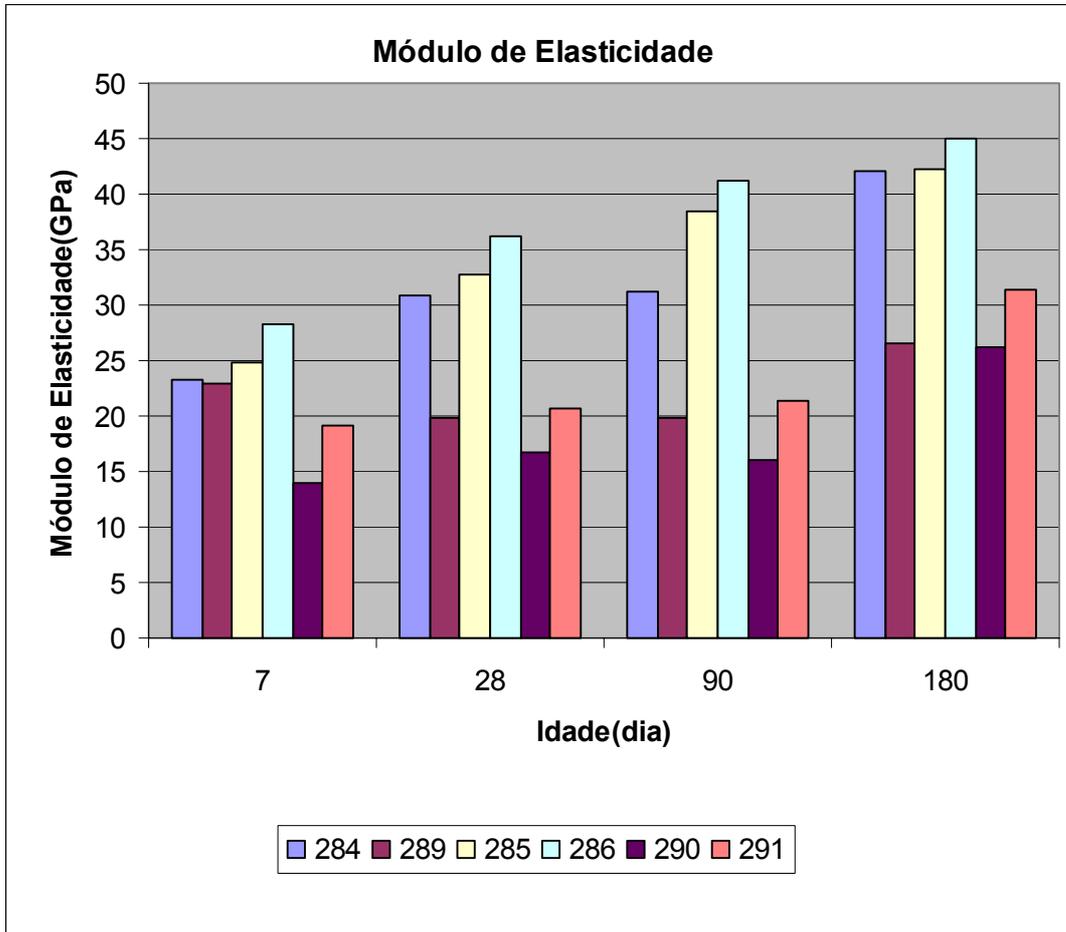


Figura 5.94. Gráfico referente ao ensaio de módulo de elasticidade dos prismas de concreto.

Como observado nos gráficos das Figuras 5.93 e 5.94, nota-se que a resistência, em todas as amostras ensaiadas, aumentou regularmente ao decorrer das idades, mostrando que não houve variação, o mesmo ocorreu para o módulo de elasticidade desses concretos, de uma maneira geral. Portanto, não há como relacionar com alguma reação deletéria do concreto ao longo das idades.

Na Tabela 5.14, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com os testemunhos de concreto extraídos da barragem estudada. Nas Figuras 5.95 e 5.96, estão comparados os resultados da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas de concretos, até a idade de 180 dias, com os testemunhos extraídos das estruturas da Galeria da Tomada d'água e da Ombreira Esquerda, da barragem estudada, com idade aproximada de 33 anos.

Tabela 5.14. Apresentação dos resultados de resistência e módulo de elasticidade dos testemunhos de concretos extraídos da barragem.

Registro/ Estrutura	Corpo -de- prova	Idade (ano)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à Tração Simples MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade			
						Tipo de Extensômetro	GPa		
335 E e F Galeria da Tomada d'água	1	33	2.458	0,73	25,4	Elétrico (EMIC)	27,2		
						Strain Gage	22,1		
	2		2.461		30,9	Elétrico (EMIC)	24,6		
						Strain Gage	22,1		
	3		-		-	-	-	Mecânico	24,3
								Elétrico (EMIC)	24,6
340 D e E Ombreira Esquerda	1	33	2.507	1,27	29,6	Elétrico (EMIC)	34,2		
						Strain Gage	40,6		
						Mecânico	46,3		
	2		2.518		36,4	Elétrico (EMIC)	34,9		
						Strain Gage	49,2		
						Mecânico	35,4		
	3		-		-	-	-	Elétrico (EMIC)	34,2
								Strain Gage	33,4
								Mecânico	34,1

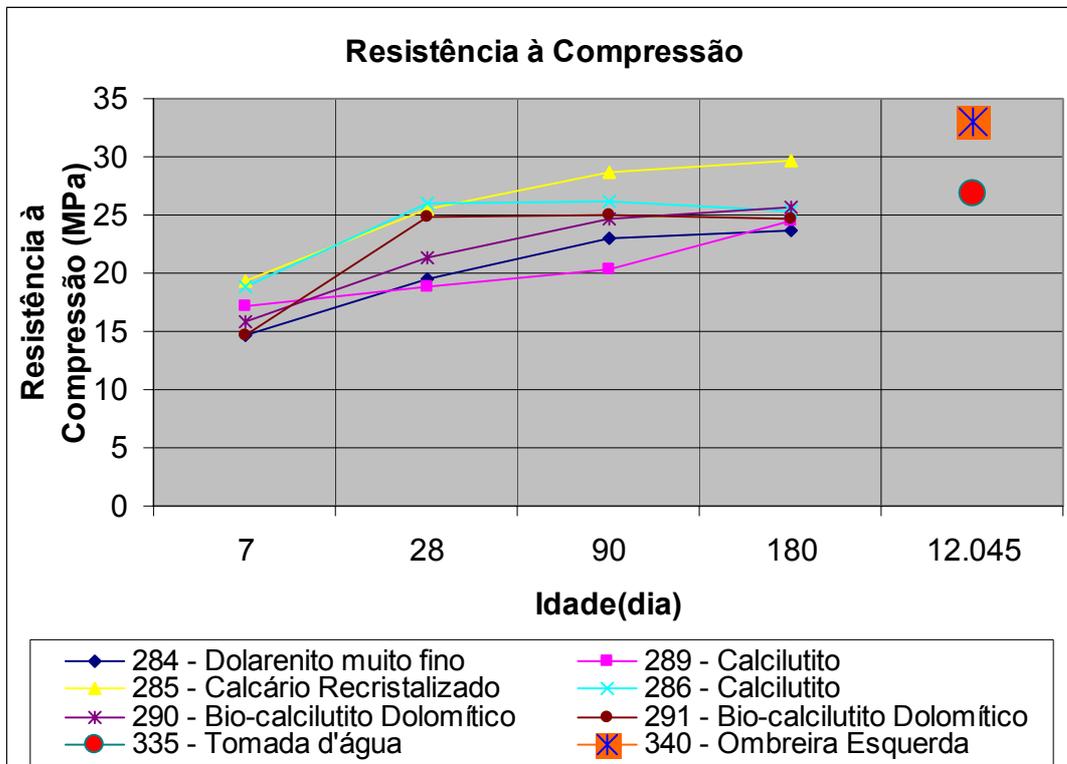


Figura 5.95 – Gráfico comparativo entre os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos prismas de concreto e dos testemunhos de concreto da barragem.

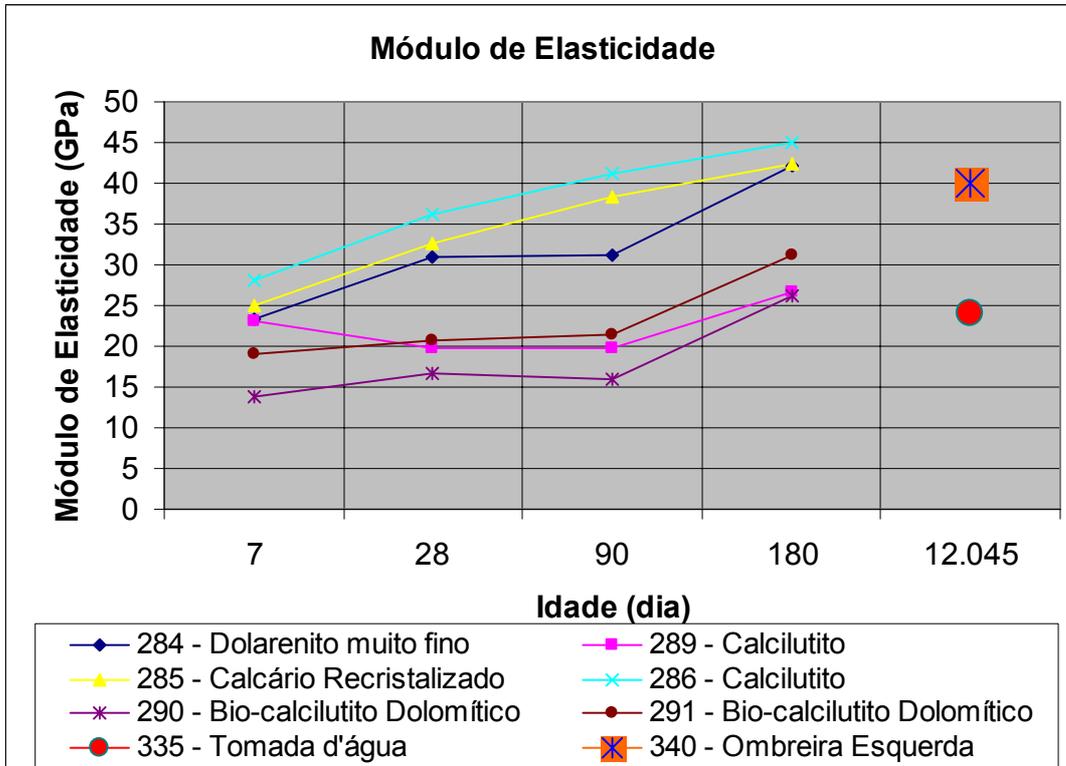


Figura 5.96 – Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos prismas de concreto com dos testemunhos de concreto da barragem.

É importante mencionar que nas situações normais, sem ataques deletérios, concretos moldados com cimentos comuns, sem adições, normalmente tendem a estabilizar o crescimento de resistência até 90 dias. Esse fato é notado para todos os prismas de concreto moldados, conforme Figura 5.95.

Nota-se que os testemunhos de concreto da barragem apresentaram resistência maior do que os prismas moldados, inclusive maior do que o prisma moldado com o agregado semelhante aos deles (286). Esse fato pode ser explicado pela possível densificação do concreto, provavelmente, devido a formação dos produtos da Reação álcali-agregado, que comatam os poros, levando ao ganho de resistência, esse tipo de comportamento foi verificado em Hasparyk (2005).

Em relação ao módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto extraídos da barragem, quando comparado com o prisma de concreto confeccionado com a rocha semelhante a

utilizada no concreto da barragem, observam-se menores valores, podendo a microfissuração interna ter sido causada eventualmente pela RAA (Hasparyk, 2005), sendo esta a principal causa dessa redução. Vale lembrar que a dosagem dos prismas de concreto moldados é semelhante à dos testemunhos de concreto extraídos da barragem e, apesar das idades distintas desses compósitos de cimento, este comportamento mostra a possível deterioração e influência nas propriedades do concreto analisado. Ainda, nota-se que o módulo do concreto da barragem extraído da galeria é menor do que da ombreira esquerda, e como é mencionado por alguns autores, sabe-se que a galeria é o ambiente mais favorável para ocorrer a RAA, uma vez que neste lugar a umidade é mais elevada.

### 5.7. Resistência à Compressão Uniaxial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial das rochas encontram-se na Tabela 5.15. O módulo de deformabilidade apresentado é a inclinação do trecho linear da curva *tensão x deformação axial*.

Tabela 5.15. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

AMOSTRA	Relação $h/\phi$	RUPTURA		MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	COEFICIENTE DE POISON
		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DEFORMAÇÃO AXIAL ( $\mu\epsilon$ )		
284 a	2,65	274,77	3153	106,00	0,26
284 b	2,69	285,83	4169	81,60	0,20
285 a	2,65	89,37	1844	64,00	0,31
285 b	2,08	102,08	2175	64,00	0,25
286 a	2,16	107,53	1726	-	-
286 b	2,08	72,30	1251	66,00	0,34
289 a	2,41	44,10	2400	18,00	0,22
289 b	2,54	53,33	4100	15,00	0,17
290 a	2,46	53,39	2563	21,00	0,18
290 b	2,30	79,81	3085	27,00	0,29
291 a	2,66	66,92	2506	30,00	0,16
291 b	2,65	54,34	1908	30,00	0,20

## VI - Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados no Capítulo V são aqui comentados, separadamente por amostra, de forma que todas as características, sendo elas químicas ou físicas, sejam interpretadas em conjunto, dando assim, entendimento ao comportamento das rochas estudadas, no que se refere à Reação álcali-agregado (RAA).

As constatações relativas a RAC realizadas por numerosos autores (Swenson, 1957; Hadley, 1961, Gillott, 1963, Sherwood e Newlon, 1964; Hansen, 1978; Poole & Sotiropoulos, 1978; Sims & Sotiropoulos, 1983; Dólar-Mantuani, 1983; Tang *et al*, 1986; Tang & Lu, 1987; Ozol, 1994; Mingshu & Min, 2004) foram sintetizadas pelo Comitê 221 do American Concrete Institute (ACI), em 1998.

Segundo este Comitê para se definir a existência da RAC várias feições macro e microscópicas devem ocorrer associadas. Como já citado no Capítulo II, na RAC o processo envolve desdolomitização formando novas fases minerais, definidas como calcita e brucita ou um silicato de magnésio de composição e estrutura mais complexa. Feições macroscópicas indicativas de RAC são fraturamento com a geração de fragmentos equidimensionais, bordas de reação, entre outras. Indicadores microscópicos incluem bordas de reação e microfraturamento., além da neoformação de carbonatos e minerais contendo magnésio.

As rochas potencialmente reativas para a RAC, segundo vários autores (Tang & Han, 1986; Gillott, 1963, Grattan-Bellew, 1981 a e b; Tong, 1994, Tong & Tang, 1995), apresentam feições texturais e composicionais amplamente variável, no entanto dentro de um certo intervalo de granulação, forma de cristais, relações de intercrescimento e assembléia mineralógica.

Em relação à textura, geralmente, apresentam romboedros de dolomita em uma matriz calcítica fina com maior ou menor contribuição de argilas e quartzo.

A mineralogia comumente abrange proporções similares de calcita e dolomita, além de argilominerais, particularmente expansivos, e grãos de quartzo de tamanho silte. Segundo

Ozol (1994), dados apresentados na literatura para rochas comprovadamente expansivas indicam valores de 5 a 49 % de resíduo insolúvel, ou seja, argilominerais e quartzo. Como citado na literatura (Gillott, 1963), calcários dolomíticos argilosos provenientes de Kingston, Canadá, altamente reativos, contêm 40 a 60% de dolomita ou calcita e cerca de 5 a 10% de resíduo ácido insolúvel.

Os experimentos de L. Tong & M. Tang (1995), citados no Capítulo II, mostraram que o grau da reação pode ser monitorado pela quantidade de dolomita consumida e produção de calcita nos cilindros com dolomita e pela quantidade de magnesita e brucita formadas nos cilindros com magnesita. Apesar de ser preferível adotar as mudanças da dolomita e magnesita através do monitoramento dos graus de reação nos cilindros, a identificação dos produtos de reação calcita e brucita se provaram tão bons quanto. O fator da quantidade de calcita ter sido maior do que a prevista pela desdolomitização, sugere que os produtos de hidratação do cimento (ex. portlandita) foram reagidos pelo  $\text{CO}_3^{2-}$  produzido na desdolomitização. Esta reação é conhecida como carbonatação do concreto, porém aqui induzida pelo produto da desdolomitização.

Tang & Lu, 1987, encontraram a brucita e/ou silicato de magnésio produzidos pela reação RAC num anel de 2 mm de espessura paralelamente orientados, esses cristais de 2,5 nm (com espaço entre eles) bordejam o romboedro euhedral de dolomita, que é a textura típica de rochas reativas. O cristal de brucita e/ou silicato de magnésio ocorrem bordejados por uma matriz com partículas de calcita e argilomineral. A calcita formada pelos romboedros desdolomitizados, encontra-se no interior dos mesmos. Os autores concluíram que a expansão ocorreu devido a combinação de vários processos:

- 1) A migração dos íons alcalinos e moléculas de água no interior do espaço restrito da matriz fina composta por calcita e argilominerais que bordejam os romboedros de dolomita.
- 2) Migração destes materiais citados acima nos romboedros de dolomita.
- 3) O crescimento e rearranjo dos produtos da desdolomitização, especialmente a brucita e silicatos de magnésio, ao redor dos romboedros de dolomita.

De acordo com estes experimentos, a presença de argilominerais não é necessária para a expansão neste local.

Abaixo são discutidos os resultados, separadamente, das amostras estudadas.

- Amostra 284 (Dolarenito muito fino)

A amostra 284, classificada como Dolarenito muito fino, segundo análise por DRX, tem a dolomita, como constituinte maior na amostra total e na fração argila. A calcita, a ilita e a saponita (mineral expansivo) são constituintes menores da amostra total. Na fração mais fina predominam a ilita e a saponita. O quartzo, como constituinte traço, só aparece na amostra total, indicando granulação maior que argila.

A análise química da amostra *in natura* apresenta a maior quantidade de MgO e perda ao fogo, devido a maior concentração de dolomita, comparativamente às demais amostras estudadas. O SiO<sub>2</sub> apresenta o menor valor dentre as amostras estudadas, enquanto o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tem valor relativamente baixo, quando comparado com as amostras 286 e 290, como mostrado no gráfico SiO<sub>2</sub> versus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (Figura 5.37B). As quantidades semelhantes destes óxidos sugerem que quase toda a sílica está contida nos argilominerais, concordando com a composição determinada por DRX.

Com exceção do ensaio do cilindro de rocha (ASTM C 586/92), que não foi realizado, esta rocha apresentou potencialidade a RAC, apenas segundo a ASTM C 1105/95. Entretanto, não foram encontrados produtos da reação através de nenhuma das técnicas utilizadas para a análise dos prismas de concreto e das barras de argamassa, como MEV, microscopia ótica e DRX. No entanto, na análise por DRX do agregado retirado do prisma, após o ensaio de expansão, não foi verificada a saponita (na fração argila), mas o quartzo ocorre na amostra total e na fração argila, como constituinte traço. Como se trata de análise de um fragmento este pode representar uma variação da composição do próprio agregado ou o quartzo pode resultar da contaminação com agregado miúdo. Entretanto, esta contaminação não explica o desaparecimento da saponita, que pode estar relacionada à variação local da rocha ou à sua transformação, ou seja, trata-se de uma reação.

Em lâmina delgada, na análise por microscopia ótica, a amostra não se apresenta fissurada nem com grandes perdas de material no contato agregado/argamassa. Mesmo contendo a mineralogia definida como propícia para a reação, não mostrou textura de rochas reativas, que

seria composta de romboédros de dolomita, com cerca de 40 a 50  $\mu\text{m}$ , distribuídos numa matriz microcristalina de calcita e argilas, conforme observado por Gillott (1963), entre outros autores (Tang & Han, 1986; Grattan-Bellew, 1981 a e b; Tong, 1994, Tong & Tang, 1995). Também não foi identificada variação da mineralogia, por MO, nas rochas após os ensaios de expansão nas barras de argamassa.

Considerando o gráfico de potencialidade da rocha para RAC (Figura 5.92), citado na norma AAR 23 26 A, a rocha 284 posiciona-se no campo inferior dos agregados considerados não expansivos. Apesar desta rocha ter acusado reatividade pelo método do prisma de concreto (ASTM C 1105/95), em todos os demais resultados obtidos pelas várias técnicas e ensaios utilizados neste estudo, a mesma mostra potencialmente não reativa. Contudo esta rocha deve ser empregada com ressalvas, sendo necessários ensaios adicionais, utilizando um outro tipo de cimento de forma a concluir sobre a sua potencialidade à RAA.

- Amostra 285 (Calcário Recristalizado)

A amostra 285, classificada como Calcário Recristalizado, através da DRX apresenta a seguinte composição da amostra total: calcita, como mineral principal, ilita como constituinte menor e dolomita, saponita e quartzo como traço. Este último presente apenas na amostra total sugerindo granulação silte. Esta amostra tem granulação mais grossa do que as outras estudadas e encontra-se totalmente recristalizada.

Pela análise química apresenta a maior quantidade de CaO e menor quantidade de MgO e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , em relação às outras amostras estudadas. No gráfico  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (Figura 5.37B) posiciona-se na mesma área que a rocha 284, sugerindo que quase a totalidade da sílica está combinada com alumina nos argilominerais. No diagrama de potencialidade da rocha para RAC (Figura 5.92), esta amostra, diferentemente das demais, situa-se no campo superior de agregados considerados não expansivos, apresentando elevada razão CaO / MgO. Salienta-se que composição química, com baixo MgO, aliada à mineralogia, apenas com traços de dolomita, direcionam para uma rocha não reativa para RAC. Além disso, a textura desta rocha não se enquadra naquelas sugeridas para materiais reativos.

Através das análises por microscopia ótica (MO) e DRX desta amostra, como agregado dos prismas de concreto e barra de argamassa, não foram observadas feições de RAA. No entanto, em amostra de mão, do prisma de concreto (ASTM C 1105/95), após ensaio de reatividade, foi encontrado um fragmento com uma borda de calcita no contato agregado/argamassa (Figura 5.27C). Embora a borda de calcita pudesse sugerir RAC, deve-se lembrar que apenas uma feição não pode ser tomada como evidência, e que neste caso, a referida borda parece ser uma característica do próprio agregado. Macroscopicamente e microscopicamente a rocha *in natura* utilizada como agregado apresenta veios de calcita cristalina, que podem estar eventualmente preservados na borda do agregado. Ainda, o resultado dessa rocha pelo método ASTM C 1105/95, não foi possível a sua avaliação.

Nas análises por MEV, tanto a barra de argamassa como o prisma de concreto, produzidos com este agregado, apresentam boa aderência entre agregado/argamassa, produtos hidratação normalmente encontrados, sendo que na barra de argamassa, encontrou-se produtos neoformados da reação álcali-sílica em alguns poros, apesar das expansões pelo método da ASTM C 1260/01, não terem acusado potencialidade deletéria, do ponto de vista da RAS.

Após os ensaios de expansão, não foram verificados indícios de reatividade pelo método ASTM C 586/92. Porém, pela análise de DRX do cilindro de rocha (minitestemunho), verificou-se a ausência das reflexões características da dolomita. A falta deste mineral pode estar relacionada a uma variação da rocha ou representar sua dissolução durante o ensaio, ou ser também explicada pelos resultados dos experimentos de L. Tong & M. Tang (1995).

A dissolução da dolomita, como citado na literatura, estaria relacionada à precipitação de calcita e uma fase mineral contendo Mg, que no caso desta amostra poderia estar ausente em função do baixo conteúdo de MgO. Como ficou demonstrado através desta discussão, não existem parâmetros suficientes para determinar que se trata de uma rocha potencialmente reativa.

- Amostra 286 (Calclutito)

Na amostra 286, classificada como calclutito, foram identificados por DRX na amostra total: calcita, como constituinte maior, dolomita, quartzo e argilominerais como constituintes traço.

Na fração argila, além do quartzo e dolomita, os argilominerais caracterizados são a clorita e a illita, como constituintes menores. Na amostra total, há uma sugestão da presença da saponita.

Por Microscopia ótica (MO), esta rocha apresenta granulação e recristalização muito finas, com muitos estilólitos marcados pela clorita. Estas feições texturais e mineralógicas não tem sido reportadas como potencialmente reativas. Como citado acima, segundo Ozol (1994), as rochas comprovadamente expansivas indicam valores de 5 a 49 % de resíduo insolúvel, ou seja, argilominerais e quartzo; e Gillott, (1963) calcários dolomíticos argilosos provenientes de Kingston, Canadá, altamente reativos, contêm 40 a 60% de dolomita ou calcita e cerca de 5 a 10% de resíduo ácido insolúvel.

Através dos resultados das análises químicas, esta rocha apresenta maior quantidade de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) em relação às outras amostras estudadas. O gráfico  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Figura 5.37B) mostra conteúdos elevados de ambos os óxidos, compatíveis com o conteúdo de argilominerais e quartzo determinados por DRX. No diagrama (Figura 5.92) de potencialidade para a RAC a rocha 286 posiciona-se na porção central do campo de agregados considerados potencialmente expansivos.

Na análise macroscópica das barras de argamassa foram observados materiais acastanhados exsudados na argamassa e poros preenchidos por material branco (Figuras 5.23 A e B). Porém na análise por MO, não foram encontrados produtos da reação, mas o contato agregado/argamassa não apresentava boa aderência. Já na análise por MEV foi encontrado, na barra de argamassa, produto neoformado de composição sílico-cálcico-alcálica, possivelmente, relacionado com a reação álcali-sílica. Ainda por esta técnica foram observados os produtos normalmente encontrados na hidratação do cimento, CH, C-S-H e etringita.

Em alguns fragmentos dos prismas de concreto, ASTM C 1105/95 (após ensaio de expansão) observam-se, microscopicamente, películas que circundam o contato agregado/argamassa e, eventualmente, atravessam tanto a argamassa como o agregado gráudo. Nos mesmos fragmentos observam-se também fissuras e pouca aderência no seu contato agregado/argamassa. Uma feição de destaque é a mudança na coloração da fase mineral que marca os estilólitos, ou seja, palhetas de clorita na rocha in natura, com coloração esverdeada, adquirem a coloração verde escuro a acastanhado, podendo esta variação estar relacionada

com uma mudança mineralógica. Nestes fragmentos não foram observadas mudanças nas bordas do contato agregado/argamassa. Porém, o resultado dessa rocha pelo método ASTM C 1105/95, não foi possível a sua avaliação.

Nas análises por DRX do agregado retirado do prisma de concreto observou-se que, além da presença de caolinita, a clorita, bem definida na amostra da rocha *in natura*, após o ensaio de Reatividade Potencial foi parcialmente substituída por saponita (esmectita). Esta substituição pode estar relacionada com a mudança de cor observada nas análises por MO, podendo ainda explicar a reatividade apresentada por esta amostra no ensaio da ASTM C 1260/01.

Os resultados das análises química do agregado do prisma de concreto mostram, em relação a rocha *in natura*, conteúdos maiores de SiO<sub>2</sub> e menores de CaO, embora essas diferenças não serem expressivas. A referida amostra apresentou potencialidade para a RAS, no ensaio de reatividade potencial – Método Acelerado (ASTM C 1260/01), porém no ensaio de expansão do cilindro de rocha (ASTM C 586/92) comportou-se como inócua.

Em função dos resultados apresentados pelas técnicas de ensaios e análises, esta amostra é reativa para RAS (Figura 5.80) e potencialmente expansiva para RAC, segundo resultados químicos. Outras feições indicativas da potencialidade reativa da rocha estão relacionadas à transformação da clorita para esmectita. Texturas e estruturas macro e microscópicas indicativas de RAC não foram observadas.

- Amostra 289 (Calcilutito)

A amostra 289, classificada como Calcilutito, através da DRX apresenta a seguinte composição da amostra total: calcita, como mineral principal, antigorita como constituinte menor e dolomita e saponita como traço. Na fração argila, a calcita e a antigorita aparecem como constituintes maiores, a dolomita como traço e a saponita como constituinte menor. Por MO, verificou granulação muito fina com porções de cristais submilimétricos de calcita recristalizada. Pela análise química esta rocha *in natura* apresentou conteúdos de sílica e MgO elevados, posicionando-se numa área isolada no gráfico SiO<sub>2</sub> versus MgO (Figura 5.37 C). As quantidades altas desses dois óxidos, aliados ao baixo conteúdo em alumina, sugerem que quase toda a sílica esteja combinada com o magnésio na formação da antigorita. A quantidade

de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) é a mais baixa em relação as outras rochas estudadas, provavelmente pela ausência de ilita e apenas traços de saponita.

A análise química realizada em alguns agregados retirados do prisma de concreto, após ensaio, mostra não houve variações em relação à amostra *in natura*.

No diagrama da Figura 5.92, esta amostra, posiciona-se no campo inferior dos agregados considerados não expansivos, semelhante a amostra 284, porém mais no canto inferior do gráfico. Salienta-se mesmo que a composição química apresentou alto teor de  $\text{MgO}$ , este magnésio está combinado com a presença da antigorita e que a dolomita aparece apenas como traços na DRX, em relação a mineralogia, esta rocha se enquadra como não reativa para RAC. Além disso, a textura desta rocha não se enquadra naquelas sugeridas para materiais reativos.

Por análise visual de alguns fragmentos dos prismas de concreto, após ensaio, notou-se uma faixa neoformada no contato agregado/argamassa. Este filme de material branco opaco seguido de material branco transparente a translúcido, de espessura maior em torno de 2,4 mm, no contato entre agregado/argamassa (Figuras 5.30 A a H), analisada por MEV, mostrou que a faixa translúcida, apresenta forma maciça, com as clivagens da calcita e tendência a formar hexágonos, indicando ser calcita (Figuras 5.66 e 5.67) e a faixa translúcida, apresentou-se como agulhas e composição Si, Mg e Ca (Figuras 5.63 a 5.65). Estes materiais foram confirmados por DRX, sendo o primeiro a calcita e o segundo como sepiolita (Anexo V), possivelmente poderia formar um outro argilomineral, expansivo ou não. Estes produtos são indicativos de RAC.

Por MO, nos fragmentos da argamassa, após ensaio de expansão (ASTM C 1260/01), foram observadas, localmente, bordas de reação entre o agregado e a argamassa (Figuras 5.25 A e B), evidenciadas principalmente pela diferença de coloração nas proximidades do contato. Esta feição pode vir a constituir produtos de RAA, já que indica uma transformação no agregado sob influência da argamassa. E nos prismas de concreto (ASTM C 1105/95), após ensaio de expansão, foram observadas fissuras e material neoformado arrancado durante a preparação.

Porém, esta rocha que apresentou, por MEV e DRX, os produtos formados pela RAC e por MO feições que sugerem a ocorrência da reação, comportou-se como inócua em todos os ensaios de expansão, exceto pelo método ASTM C 1105/95.

Esta discordância nos resultados confirma o que foi citado pelo Comitê 221, que apenas uma feição ou um resultado não é definitivo para o estabelecimento da RAC.

Mesmo pelo ensaio de expansão do cilindro de rocha (ASTM C 586/92), esta rocha comportou-se como inócua. Pela análise por DRX, da amostra após o ensaio, mostrou variações consideráveis, quando comparada com a rocha *in natura*, as intensidades de reflexões do quartzo e da esmectita aumentaram e da dolomita e da antigorita diminuíram. Estas alterações mostram que houve mudança na mineralogia, talvez devido à alguma reação.

No ensaio de expansão, baseado pela ASTM C 1105/95, esta rocha apresenta tendência a expansão e análise por DRX de alguns dos agregados retirados dos prismas de concreto, mostrou que a antigorita, que na rocha *in natura* apresentou-se como constituinte menor na amostra total, passou a constituinte maior na amostra correspondente. Porém, esses resultados têm que ser vistos com cautela, pois a representatividade da amostra é menor quanto retirado do prisma de concreto e também, lembrando que a mesma sofreu abrasão quando britada.

No ensaio de reatividade potencial – método acelerado (ASTM C 1260/01), esta rocha comportou-se como inócua e em nos fragmento analisado por MEV, tanto das barras de argamassa como nos prismas de concreto, não foram encontrados produtos da reação RAS.

Em função da discordância dos resultados apresentados pelas técnicas de ensaios e análises, esta amostra tem que ser utilizada com grandes ressalvas, pois mesmo apresentar-se como inócua pela ASTM C 1260/01, ASTM C 586/92, norma canadense - AAR 23 26 A e não apresentar a mineralogia e a textura propícias para RAC, foi a rocha que apresentou seguramente os produtos gerados por esta reação, além da tendência a expansão pelo ensaio ASTM C 1105/95.

- Amostra 290 (Bio-Calculutito Dolomítico)

A amostra 290, classificada como Bio-Calculutito Dolomítico, através da DRX apresenta a seguinte mineralogia da amostra total: calcita, como mineral principal, dolomita e quartzo como constituintes menores e saponita como traço. Na fração argila, a calcita, dolomita e quartzo não mudam em relação a amostra total e aparece ilita como traço e a saponita não ocorre.

Esta amostra apresentou a mineralogia e a textura propícia para RAC, indicada por calcita milimétrica envolvendo a dolomita, que se apresenta em pequenos romboedros bem formados dispersos. Pela análise química, desta rocha *in natura*, apresentou a maior quantidade de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e menor quantidade de perda ao fogo em relação as outras amostras estudadas. Nos gráficos apresentados no Capítulo V, item 5.3.1, esta amostra é que se apresentou irregular em relação as outras estudadas, não agrupando-se com nenhuma dessas amostras nas áreas dos gráficos.

A análise química realizada em alguns agregados retirados do prisma de concreto, após ensaio, mostra que o conteúdo em sílica e em álcalis aumentou, quanto em cálcio, magnésio e PF são mais baixos. A primeira variação pode ser interpretada como contaminação com o agregado miúdo e pasta, e a segunda pode ser pela amostragem, sendo esta mais pontual e/ou por alguma reação destes minerais, a diminuição da perda ao fogo (PF) está relacionada com a diminuição destes minerais.

No diagrama de potencialidade, norma canadense, AAR 23 26 A, da rocha para RAC (Figura 5.92), esta amostra, posiciona-se no campo inferior direito dos agregados considerados potencialmente expansivos.

Como era de se esperar, esta rocha apresentou, por MEV, MO e DRX feições que sugerem a RAC. Por análise macroscópica e por lupa foram evidenciadas fissuras nas barras de argamassa, após ensaio de expansão e nos fragmentos dos prismas de concreto, após 150 dias de expansão, bordas reação no agregado, evidenciadas em função da coloração dos fragmentos (Figuras 5.32 B a E) e deposição de material cristalino esbranquiçado, possivelmente carbonato, formando bolsões irregulares (Figuras 5.32 A e F), além de poros

parcialmente preenchidos, na argamassa e filmes descontínuos, de coloração esbranquiçada, porém de difícil observação, no contato agregado/argamassa são vistos.

Por MO realizadas nas barras de argamassa apresentam muito fissuradas (Figuras 5.26 A e B) e estas fissuras e poros encontram-se parcialmente preenchidos por material neoforado, porém não foram identificados devido às dimensões submicroscópicas. Ainda por MO, os prismas de concreto também se apresentaram fissurados, com o contato agregado/argamassa pouco aderido, poros preenchidos e mostram feições, como películas, que podem ser relacionadas a RAA. A disposição irregular dessas películas (Figuras 5.33 A a D), por vezes cortando tanto o agregado como a argamassa, sugere que se trata de neoformação de material.

Essas películas podem ou não ser relacionadas a produtos neoforados em função de RAA. Porém, devido as dimensões submicroscópicas, microscopia ótica não é possível afirmar que exista material ali depositado e que trata-se de produto relacionado a RAA. Assim, essas porções foram selecionadas e analisadas por MEV, entretanto a análise não foi satisfatória, não foi possível a identificação destes produtos, pois, provavelmente, os mesmos estavam envolvidos com a resina de impregnação, dificultando a análise.

Por MEV, a amostra do prisma de concreto não apresenta boa aderência no contato agregado/argamassa (Figura 5.49), mostrando pouca coesão da argamassa e presença de material pulverulento, porém não apresentou produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas, típicos de RAS.

Pelo ensaio de expansão do cilindro de rocha (ASTM C 586/92), esta rocha comportou-se como reativa e pela análise por DRX, da amostra após o ensaio, mostrou variações consideráveis, quando comparada com a rocha *in natura*, as intensidades de reflexões do quartzo diminuíram e da esmectita aumentaram. O pico correspondente da dolomita desapareceu, o que pode ser explicado pelos resultados dos experimentos de L. Tong & M. Tang (1995) citados acima, porém não se pode deixar de salientar que a falta deste mineral pode estar relacionada a uma variação da rocha e que porcentagens abaixo de 1% não são observadas por DRX.

No ensaio de expansão, baseado pela ASTM C 1105/95, não foi possível a sua avaliação, como citado no Capítulo V, item 5.5.3, em função do comportamento apresentado, porém,

com alta expansão nos primeiros meses de ensaio. A análise por DRX de alguns dos agregados retirados dos prismas de concreto, mostrou que a ilita que só ocorria como traço na fração argila, da amostra *in natura*, passa a ser constituinte menor e na amostra total, a caolinita, inexistente na amostra *in natura*, aparece como traço. Podendo ser uma contaminação pelo agregado miúdo ou uma alteração mineralógica, mas lembrando que para as análises realizadas nas britas retiradas dos prismas, a amostragem fica mais pontual.

No ensaio de reatividade potencial – método acelerado (ASTM C 1260/01), esta rocha comportou-se como reativa e em nos fragmentos analisados por MEV, destas barras de argamassa, foram encontrados produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas, que sugerem o gel da reação álcali-sílica - RAS.

Assim, através da análise dos resultados citados acima, esta rocha pode apresentar RAA quando aplicadas como agregado no concreto.

- Amostra 291 (Bio-Calculutito Dolomítico)

A amostra 291, classificada como Bio-calculutito Dolomítico, assemelha-se em vários parâmetros com a amostra 290. Através da DRX apresenta a seguinte mineralogia da amostra total: calcita, como mineral principal, dolomita como constituinte menor e quartzo e saponita como traço. Na fração argila, a calcita e a saponita são constituintes maiores e dolomita e quartzo são traços, a ilita não aparece em nenhuma fração.

Como a amostra 290, esta também apresentou a mineralogia e a textura propícias para RAC, indicada por calcita milimétrica envolvendo a dolomita, que se apresenta em pequenos romboedros bem formados dispersos. Pela análise química, desta rocha *in natura*, apresentou menor quantidade de SiO<sub>2</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Na<sub>2</sub>O e maior de CaO e PF, do que a 290. Nos gráficos apresentados no capítulo V, item 5.3.1, esta amostra apresentou relação com a amostra 285 em todos os gráficos, com a amostra 286, nos gráficos SiO<sub>2</sub> versus MgO e CaO versus MgO; com a amostra 284, nos gráficos SiO<sub>2</sub> versus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO + MgO versus PF.

A análise química realizada em alguns agregados retirados do prisma de concreto, ASTM C 1105/95, após ensaio de expansão, foi semelhante à da amostra 290P, porém essa rocha (291) sugere expansão, como citado no Capítulo V, item 5.3.3.

No diagrama de potencialidade, norma canadense, AAR 23 26 A, da rocha para RAC (Figura 5.92), esta amostra, posiciona-se no campo superior esquerdo dos agregados considerados potencialmente expansivos.

Pelas análises macroscópicas das barras de argamassa, moldadas com esta rocha (britadas na fração areia), apresentaram-se muito fissuradas (Figura 5.22) e nos prismas de concreto observou-se a deposição de material cristalino esbranquiçado, provavelmente calcita, entre a argamassa e o agregado (Figuras 5.35 A e B), além da presença de bordas de reação (Figura 5.35 D), e poros parcialmente preenchidos (Figuras 5.35 C, E e F).

As análises por MEV, MO e DRX também mostraram feições que sugerem a RAC. Por MO realizadas nas barras de argamassa apresentam muito fissuradas (Figuras 5.26 B e C) e estas fissuras e poros encontram-se parcialmente preenchidos por material neoformado, como citado na amostra 290, porém, também não foi possível a sua identificação, devido às dimensões submicroscópicas. Microscopicamente, os prismas de concreto também se apresentaram fissurados, com o contato agregado/argamassa pouco aderido, poros preenchidos e mostram feições, como películas, que podem ser relacionadas a RAA. Estas películas cortam o agregado e a argamassa, e estão associadas a borda de reação, principalmente no agregado, evidenciadas através da diferença de coloração. A ocorrência conjunta das duas feições acima descritas sugere que efetivamente trata-se de alteração/reação e não retirada de material durante a confecção da lâmina (Figuras 5.36 A a J). Além disso, foi verificada, também, a presença de poros parcialmente preenchidos (Figuras 5.36 I e J).

Como na amostra 290, essas películas por terem dimensões submicroscópicas, a microscopia ótica não é possível afirmar que tipo de produto ocorre neste local. Assim, essas porções foram selecionadas e analisadas por MEV, entretanto a análise não foi satisfatória e, não foi possível a identificação destes produtos, pois, provavelmente, os mesmos estavam envolvidos com a resina de impregnação, dificultando a análise.

Entretanto, pelas análises por MEV, os fragmentos analisados dos prismas de concreto apresentaram boa aderência no contato agregado/argamassa, e não apresentou produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas. Porém, foi analisado o fragmento citado acima, de calcita no contato agregado/argamassa (Figura 5.77), que sugere produto formado pela RAC. Como já citado anteriormente.

Pelo ensaio de expansão do cilindro de rocha (ASTM C 586/92), esta rocha comportou-se como reativa, pela análise, por DRX, da amostra após o ensaio, mostrou variações consideráveis, quando comparada com a rocha *in natura*, as intensidades de reflexões do quartzo diminuíram. O pico correspondente da dolomita desapareceu, como citado na amostra 290, este fato pode ser explicado pelos resultados dos experimentos de L. Tong & M. Tang (1995) citados acima, porém não pode deixar de salientar que a falta deste mineral pode estar relacionada a uma variação da rocha e que porcentagens abaixo de 1% não são observadas por DRX. Porém, as reflexões muito baixas nas posições de  $d \sim 4,75\text{\AA}$  e  $\sim 2,36\text{\AA}$  (não observadas na amostra *in natura*) sugerem a formação da brucita, que pode ter se formado devido a reação de desdolomitização (que pode ser marcada pelo desaparecimento dos picos da dolomita).

A análise por DRX de alguns dos agregados retirados dos prismas de concreto, mostrou apenas que a dolomita na amostra total aparece como componente maior e na amostra *in natura*, aparece como menor. Porém, não significativa esta alteração, pois as análises são realizadas em britas retiradas dos prismas, tornando-se assim, a amostragem pontual e não representativa do todo.

No ensaio de reatividade potencial – método acelerado (ASTM C 1260/01), esta rocha comportou-se como reativa e em nos fragmentos analisados por MEV, destas barras de argamassa, foram encontrados produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas, que sugerem o gel da reação álcali-sílica - RAS.

Assim como a amostra 290, esta amostra (291), através da análise dos resultados citados acima, pode apresentar RAC quando aplicadas como agregado no concreto.

- Testemunhos da Barragem

Foram extraídos 5 testemunhos de concreto da galeria da Tomada d'água e 6 testemunhos da ombreira esquerda. Em cada estrutura os testemunhos foram extraídos muito próximos um do outro, com espaço entre 20 a 30 cm. Como citado no Capítulo III, no item 3.2, os testemunhos, além da sua caracterização e verificação de possível RAA, serviram também como referência para comparação com prismas de concreto moldados. Para estes prismas usou-se o mesmo traço utilizado no concreto da barragem, associado com os tipos de rochas carbonáticas mencionadas acima.

Após análise macroscópica, foram escolhidos fragmentos para serem estudados pelas técnicas citadas acima e os resultados serão discutidos separadamente.

As britas escolhidas para serem analisadas por MO, foram classificadas como: as de granulação média (calcarenito) a fina (calclutito), além de raros fragmentos de calcirrudito, constituído por intraclastos arredondados de calclutito. A maioria encontra-se mais ou menos recristalizada, com cristais submilimétricos, ocasionalmente milimétricos, anhédricos, com aspecto turvo em luz transmitida. Já nas britas de calclutito, nota-se a orientação dos grãos e dos microcristais segundo o acamamento, mas esta orientação não é notada nos calcarenitos. Fraturas preenchidas por calcita e estilólitos são comumente encontradas.

O agregado miúdo (areia) é composto, principalmente, por quartzo (mono, policristalino e criptocristalino), freqüentemente com extinção ondulante alta (ângulo maior que 25°), e subordinadamente por fragmentos de calcário, fragmentos de micas (em geral muscovita, ou constituinte de rocha metapelítica), material opaco e o feldspato muito raro. A argamassa encontra-se acastanhada, com poros e poucas fissuras, no geral o contato agregado/argamassa é bem aderido, exceto na amostra 335 A. Foram evidenciadas em todas as amostras analisadas algumas películas (Figuras 5.15 A e B) no contato entre agregado/argamassa, o que sugere presença de RAA.

Através da DRX apresenta a seguinte mineralogia da amostra total (335 A): calcita, como mineral principal, dolomita, quartzo e saponita como constituintes menores e ilita e caolinita, como traço. Na fração argila, a calcita continua como constituinte maior, ilita, caolinita e

saponita como menor, a dolomita e o quartzo não aparecem. Na amostra 335 D, na amostra total, a ilita é constituinte menor; a dolomita, o quartzo, a saponita e a caolinita são traços. A caolinita pode ter aparecido devido a contribuição do agregado miúdo. Reflexões muito baixas em  $d \sim 4,75\text{\AA}$  poderiam sugerir a presença de brucita, entretanto, estas reflexões são também associadas à caolinita, que é claramente registrada no difratograma.

Este agregado graúdo assemelha-se à rocha 286 tanto pela análise química, por MO e por DRX e o fato desta rocha, após ser submetida ao ensaio de expansão do prisma de concreto (ASTM C 1105/95), ter sofrido a alteração da clorita, presente originalmente, para a esmectita, possivelmente a saponita, encontrada no agregado do testemunho de rocha, por DRX, como citado acima, provavelmente, a saponita encontrada nas britas retiradas dos testemunhos de concreto da barragem, sofreram o mesmo processo. E como pelas análises por MEV, dos fragmentos dos testemunhos da barragem, encontrou-se muitos produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas, que sugerem o produto neoforado da reação álcali-silica – RAS, provavelmente, pode-se correlacionar esta potencialidade para RAS como a citada para a rocha 286.

Porém não foram evidenciados produtos da RAC, por MEV, apenas os produtos normais de hidratação, produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas e etringita. A presença deste último mineral, normalmente, está relacionada aos primeiros momentos da hidratação do cimento, entretanto, neste caso se comportou como produto tardio, devendo esta questão ser esclarecida em outros estudos. Todos os fragmentos analisados apresentaram pouca aderência entre o contato agregado/argamassa, porém a argamassa comportou-se como coesa. Os fragmentos do testemunho 335 A foram os que apresentaram maior ocorrência de produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas, tanto nos poros como nos contatos agregado/argamassa. Por ensaio de expansão residual todos os testemunhos apresentaram tendência em expansão.

Pelas propriedades mecânicas e elásticas do concreto da barragem, concluiu-se que a resistência à compressão é maior neste último, do que nos prismas moldados, podendo ser atribuída a possível densificação do concreto, provavelmente, devido a formação dos produtos da Reação álcali-agregado, que comatam os poros, levando ao ganho de resistência. Entretanto, para o módulo de elasticidade dos testemunhos de concreto extraídos da barragem, quando comparado com o prisma de concreto confeccionado com a rocha semelhante a

utilizada no concreto da barragem, observam-se menores valores, podendo a microfissuração interna ter sido causada eventualmente pela RAA, sendo esta a principal causa dessa redução. Vale lembrar que a dosagem dos prismas de concreto moldados é semelhante à dos testemunhos de concreto extraídos da barragem e, apesar das idades distintas desses compósitos de cimento, este comportamento mostra a possível deterioração e influência nas propriedades do concreto analisado.

Ainda, nota-se que o módulo do concreto da barragem extraído da galeria é menor do que da ombreira esquerda, que pode ser explicado por, aparentemente, a galeria ser o ambiente mais favorável para ocorrer a RAA, uma vez que neste lugar a umidade é constante. Adicionalmente, os testemunhos de concreto 335 foram os que apresentaram maior quantidade em produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas, relacionados a RAS, que pode confirmar essa diminuição do módulo.

Os testemunhos de concreto das duas estruturas são muito similares. A diferença dos testemunhos concreto 340 A com os 335 A e D está na mineralogia, no último, a dolomita aparece como traço e no lugar da saponita, tem-se a clorita; e a ilita e a caolinita não aparecem fração total do testemunho 340 A. Porém estas diferenças são muito insignificantes, ainda que como as análises foram realizadas em britas retiradas do concreto, a análise pode se tornar pontual e não geral.

- **Comparação Entre os Resultados dos Ensaios de Reatividade**

Como visto pelos resultados dos ensaios e das análises, as rochas não mostraram resultados sistemáticos, sendo, portanto necessária a execução de uma análise mineralógica, textural, estrutural de detalhe, além da verificação da potencialidade da rocha quanto a RAA e a interpretação desses resultados em associação. Mostrando que, apenas o uso dos ensaios e análises indicados por normas existentes não possibilitaram resultados consistentes. Além disso, pode-se dizer que o emprego apenas de uma metodologia na avaliação da rocha pode traduzir em resultados nem sempre confiáveis como observado no presente estudo, uma vez que nem sempre os comportamentos verificados são coerentes e compatíveis.

Assim, de uma maneira geral, verifica-se a importância em se testar todas as metodologias disponíveis, uma vez que o uso indevido de uma rocha, a partir da conclusão apenas de um método de ensaio, pode fornecer um resultado falso-negativo e ocasionar vários problemas à estrutura de concreto no futuro.

Na Tabela 6.1 apresenta-se um resumo do comportamento das rochas frente a RAA, seja do tipo RAS ou RAC, a partir dos métodos de ensaio de reatividade investigados.

Tabela 6.1 - Tabela conclusiva sobre os ensaios de RAA realizados.

Litotipo	Id.	Tipo de investigação			
		RAS	RAC		
		ASTM C-1260	ASTM C-586	ASTM C-1105 <sup>2</sup>	AAR-23-26A
Dolarenito muito fino	284	I	--	R	I
Calcário Recristalizado	285	I	I	--	I
Calcilutito	286	R	I	--	R
Calcilutito	289	I	I	R	I
Bio-calcilutito Dolomítico	290	R	R	--	R
Bio-calcilutito Dolomítico	291	R	R	R	R

Nota 1 - R - Reativo; I – Inócuo, -- (não apresenta resultado).

Nota 2 - A reatividade pela RAC foi observada já aos 90 dias, uma vez que superou o limite de 0,015%.

Algumas rochas não foram avaliadas pela ASTM C-1105.

Observa-se que as rochas, Bio-calcilutito Dolomítico, apresentam potencialidade reativa tanto do tipo RAS como RAC, sendo confirmadas por todos os métodos investigados. Além de confirmado pelas análises MO e MEV, como presença de bordas de reação e produtos neoformados tanto para RAC e RAS.

Já um dos Calcilutitos investigados, o 286, mostra desenvolvimento da RAS pelo método da ASTM C-1260 e da RAC pelo método químico, enquanto que, o outro Calcilutito (289), acusa apenas desenvolvimento da RAC, e somente por uma metodologia (ASTM C-1105/95), da mesma forma que ocorre para o Dolarenito muito fino (284). Já o Calcário Recristalizado (285) não mostra potencialidade reativa por nenhum dos métodos empregados, apesar de apresentar, por MEV, raros pontos com produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas, na barra de argamassa, após ensaio, que podem ser associados ao produto neoformado da reação álcali-sílica;

Assim, verifica-se que existem algumas incompatibilidades entre os métodos de investigação da RAC, onde para algumas rochas (284 e 289) a ASTM C-586/92 (apenas para a amostra 289) e método canadense indicam comportamento inócuo e já a ASTM C-1105/95,

comportamento reativo. Além de que, a amostra 289 apresentou por MEV e DRX, produtos neoformados em vários fragmentos dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade. Sendo esses produtos, borda de calcita e silicato de magnésio (sepiolita), entre agregado/argamassa e na própria argamassa.

## *VIII – Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas*

As conclusões aqui apresentadas referem-se aos resultados das análises e ensaios para verificação da potencialidade à Reação Álcali-Agregado (RAA), de rochas carbonáticas provenientes de diversas pedreiras e do agregado do concreto da barragem. Mais que confirmar o conhecimento já exemplificado na literatura clássica ou justificar orientações de normas, o trabalho evidenciou processos e produtos da RAA, além de avaliar procedimentos analíticos e de ensaios. Após análise e discussão dos resultados, como mostrado no Capítulo VII, pode-se concluir que:

### 1- Conhecimentos confirmados sobre RAC:

- A reação é diagnosticada pela existência de várias feições macro e microscópicas associadas: fraturas, bordas de reação, microfraturamento, neoformação de carbonatos e de minerais contendo magnésio.
- A textura das rochas potencialmente reativas se caracteriza pela matriz calcítica fina com argilas e quartzo, contendo romboedros de dolomita.
- Rochas provenientes de uma mesma pedreira mostram variações significativas de composição e textura, tendo como resultados diferentes comportamentos sob ensaios, justificando a importância dos critérios de amostragem.
- Alguns minerais silicáticos, que normalmente ocorrerem em rochas carbonáticas, podem contribuir com a RAS, além da RAC.

### 2- Processos e produtos de Reações Álcali-Agregado:

- Para a identificação dos produtos neoformados foi utilizada a combinação de várias técnicas analíticas: análises macroscópica, geoquímica, por microscopia ótica e

eletrônica, por difração de raios-X. A comparação dos resultados dessas análises embasou a compreensão do comportamento das amostras nos ensaios de expansão.

- A clorita, que ocorre nos estilólitos do calcilutito da amostra 286, quando submetida aos ensaios de expansão transformou-se em esmectita, um argilomineral expansivo. Neste caso, embora ocorrendo em rocha carbonática, a expansão deve-se à reação álcali-silicato (RAS).
- Para os testemunhos da barragem, a RAA também é atribuída reação álcali-silicato, favorecida pelos silicatos presentes na rocha carbonática, utilizada como agregado.
- A sepiolita (amostra 289 - Calcilutito), produto de neoformação, é atribuída à disponibilidade de Mg, proveniente do argilomineral magnésiano – antigorita. Considerando que tanto a antigorita, quanto a sepiolita são silicatos, as reações ocorridas têm a participação da sílica, não sendo exclusivamente dos minerais carbonáticos. Portanto, a presença de argilominerais e silicatos de magnésio, podem causar ou acelerar a RAC.
- A análise por DRX do minitestemunho da rocha 291 (Bio-calcilutito Dolomítico), após ensaio de reatividade, sugeriu a presença de brucita. Essa amostra comportou-se reativa quando submetida a todos os ensaios de reatividade (ASTM C 1260/01, ASTM C 586/92 e ASTM C 1105/95), além de se posicionar no campo superior esquerdo dos agregados considerados potencialmente expansivos, no diagrama de potencialidade (AAR 23 26 A).
- Das amostras estudadas, os ensaios de expansão (ASTM C 1260/01, ASTM C 586/92 e AAR 23 26 A) indicaram que não são potencialmente reativas, em nenhum deles, as amostras:

-285 (Calcário Recristalizado), cuja composição mineral é calcita, dolomita, quartzo, illita e saponita com mosaico de calcita, onde estão imersos cristais poiquilíticos maiores,

tendo apresentado como produto neoformado, em apenas um fragmento do prisma de concreto, após ensaio de reatividade, uma borda de calcita, entre agregado/argamassa, além de raros pontos com produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas, na barra de argamassa, após ensaio, que podem ser associados ao gel da reação álcali-silica;

-289 (Calcilutito), cuja composição mineral é calcita, dolomita, saponita e antigorita, com granulação muito fina, parcialmente obliterada pela recristalização de cristais submilimétricos de calcita, tendo apresentado como produto neoformado em vários fragmentos dos prismas de concreto, após ensaio de reatividade, borda de calcita e silicato de magnésio (sepiolita), entre agregado/argamassa e na própria argamassa. Essa rocha comportou-se como reativa pelo ensaio ASTM C 1105/95, justificando a presença desses produtos neoformados da RAC;

-284 (Dolarenito muito fino, não foi ensaiada pela ASTM C 586/92), cuja composição mineral é dolomita, calcita, quartzo, ilita e saponita, com cristais, em geral alongados, orientados, aparentemente com acamamento, marcado também por cristais maiores de dolomita. Os argilominerais são comuns nos níveis mais finos, associados aos cristais de quartzo, não apresentou nenhum produto neoformado, apesar desta rocha ter se comportado como reativa pela ASTM C 1105/95.

- Das amostras estudadas, os ensaios de expansão (ASTM C 1260/01, ASTM C 586/92 e AAR 23 26 A) indicaram como potencialmente reativas, em pelo menos um deles:

-290 (Bio-calcilutito Dolomítico), cuja composição mineral é calcita, dolomita, quartzo, ilita e saponita, a calcita ocorre como cristal submilimétrico, enquanto a dolomita apresenta-se em pequenos romboedros bem formados dispersos na matriz fina, tendo apresentado como produto neoformado bolsões irregulares de calcita, nos prismas de concreto, após ensaio de reatividade e produtos com composição sílico-cálcico-alcalinas, na barra de argamassa, após ensaio, que podem ser associados ao gel da reação álcali-silica;

-291 (Bio-calcilutito Dolomítico), difere da amostra 290 apenas na falta da ilita e os produtos neoformados foram bordas de calcita entre agregado/argamassa e comportou-se como reativa pela ASTM C 1105/95;

-286 (Calcilutito, comportou-se como inócua pela ASTM C 586/92), cuja composição mineral é calcita, dolomita, quartzo, ilita e clorita, com granulação muito fina, com recristalização fina, contem raros cristais de calcita dispersos e feições de deformação destacadas por estilolitos, tendo apresentado como produto neoformado produtos com composição sílico-cálcico-alcálicas, na barra de argamassa, após ensaio, que podem ser associados ao gel da reação álcali-silica.

- Uma outra forma que pode auxiliar na identificação da possível presença da RAC é pelo monitorado da quantidade de dolomita consumida e produção de calcita nas rochas analisadas, por DRX, após serem submetidas aos ensaios de expansão.
- A cristalinidade dos minerais, principalmente, quartzo criptocristalino e argilominerais interferem na reação.

### 3- Outras constatações:

- As rochas não mostraram resultados sistemáticos, sendo, portanto necessária a execução de uma análise mineralógica, textural, estrutural de detalhe, além da verificação da potencialidade da rocha quanto a RAA e a interpretação desses resultados em associação. O uso apenas dos ensaios e análises indicados por normas existentes não possibilitou resultados compatíveis em alguns casos.
- A presença de sulfeto nas rochas carbonáticas, quando utilizadas como britas em concretos, tem que ser levada em consideração, pois podem contribuir na deterioração do mesmo, a partir de sua oxidação e geração de outros produtos neoformados expansivos.

- Utilizar extensômetros no interior dos corpos-de-prova de concreto moldados, pode não ser eficaz, pois como são muito sensíveis, as expansões elevadas e rápidas podem danificar os mesmos, impossibilitando a leitura da variação de comprimento do concreto, em idades mais avançadas.

Sugestões para novas pesquisas:

- ✓ Utilizar outros tipos de rochas (sedimentares, metamórficas e ígneas), contendo minerais carbonáticos, em quantidades conhecidas, na sua composição e testar a potencialidade das mesmas à RAC.
- ✓ Submeter as rochas provenientes de Kingston, Ontário – Canadá, que é a rocha reativa padrão para o estudo da RAC, à todas técnicas utilizadas nesse trabalho, inclusive com cimentos e traços dos concretos semelhantes, e comparar com os resultados encontrados com as rochas dessa pesquisa.
- ✓ Quando submeter os concretos moldados aos ensaios de expansão, realizar as leituras dos corpos-de-prova, através dos pinos (aço inox) fixados nas suas extremidades.

ASTM STP. 169/1956. Significance of tests and properties of concrete and concrete aggregates, a resume of present information on the significance of the properties of concrete and concrete aggregates and the test by which they are studied and determined. Philadelphia.

ASTM STP.169A/1966. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

ASTM STP.169B/1978. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

Andriolo, F. R. 1997. Relato geral – Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto. Goiânia – GO, Brasil, novembro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739/1994: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

NBR 5744/1989: Cimento Portland: determinação de resíduo insolúvel – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

NBR 5745/1989: Cimento Portland: determinação de anidrido sulfúrico– Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

NBR 5747/1989: Cimento Portland: determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro

NBR 5752/1992: Materiais Pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro.

NBR 7215/1996: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro.

NBR 7217/1987: Agregados – Determinação da composição Granulométrica. Rio de Janeiro.

NBR 7219/1987: Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro.

NBR 7227/1989: Cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro.

NBR 8522/2003: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidades e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro

NBR 8809/1985: Cimento Portland: determinação do calor de hidratação a partir do calor de dissolução. Rio de Janeiro.

NBR 9937/1987: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro.

NBR 9941/1987: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro.

NBR 10340/1988: Agregados – Avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas com os álcalis de cimento - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

NBR 11581/1991: Cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro.

NBR NM 11-2/2004: Cimento Portland – Análise química – determinação de óxidos principais por complexometria – Parte 2 – Método ABNT.

NBR NM 16/2004: Cimento Portland – Análise química – determinação de anidrido sulfúrico.

NBR NM 18/2004: Cimento Portland: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro.

NBR NM 22/2004: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos – Análise química – Método de Britagem.

NBR NM 23/2001: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

NBR NM 30/2001: Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro.

NBR NM 76/1998: Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro.

Biczok, I. 1972. Corrosion y proteccion del hormigon. Bilbao/España: Ediciones Urmo. Trad. de Emilio J. d'Ocon Asensi, p.275-280.

Bulletin 79 - Álkali-aggregate reaction in concrete dams - Review and Recommendations. Paris: CIGB/ICOLD, 1991.

Charlwood, R. G.; Solymar, Z. V. 1995. Long-term management of AAR - affected structure - an international perspective. Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Chattanooga, Tennessee - USA, USCOLD, pp. 19 – 55

Diamond, S. 1975. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions. Cement and Concrete Research, v.5, pp. 329-345.

Diamond, S. 1989. ASR: Another look at mechanisms. In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), 8., 1989, Kyoto. *Proceedings...* Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi & M. Kawamura, pp. 83-94.

Dolar-Mantuani, L. 1983 - Handbook of concrete aggregates: A petrographic and technological evaluation. New Jersey, Ed. Noyes Publications, pp. 96 - 112.

Faria A. 1995. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João da Aliança - Alto Paraíso de Goiás. UnB. Tese de Doutorado 201p.

- Folk R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. In: Classification of Carbonate Rocks (ed. W.E. Ham), American Association of Petroleum Geologists Memoir 1; pp.62-84.
- Fontoura, J. T. F. 1997. Tema I: Investigações sobre RAA. In: Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relatório Técnico do Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, pp. 65-70.
- Gillott, J. E. 1963. Petrology of Dolomitic Limestones, Kingston, Ontario, Canada. Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 74, pp. 759-778.
- Gillott, J. E. 1964. Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate rock reaction. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 1, n. 2, pp. 121-145.
- Gitahy, H. S. 1963. O problema dos agregados para concretos da barragem de Jupia. IPT – São Paulo.
- Grattan-Bellew, P. E. 1981a. Canadian experiences of alkali expansivity in concrete. Proceeding, 5<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Capetown, South Africa, S252/6, pp. 11.
- Grattan-Bellew, P. E. 1981b. A review of test methods for alkali-expansivity in concrete aggregate. Proceeding, 5<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Capetown, South Africa, S252/9, pp. 13.
- Hadley, D.W. 1961. Alkali reactivity of carbonate rocks: expansion and dedolomitization. Highway Research Board, Proc., 40: 462-474.
- Hansen, W.C. 1944. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete. A.C.I., Proc., 40: 213-227, Jan. 1944.
- Hasparyk, N. P.; Armelin, J. L.; Bittencourt, R. M.; Pacelli de Andrade, W. 1998. Investigação da reação álcali-agregado em testemunhos de concreto através de microscopia eletrônica de varredura. In: Congresso de Engenharia Civil, 2., Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora:UFJF, pp. 437-446.
- Hasparyk, N. P. 1999. Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás - UFG, 257 p.
- Hasparyk, N. P. 2005. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese de Doutorado - UFRGS, PPGEC, 326 p.
- Heijnen, W. N. M; Larbi, J. A; Siemes, A. J. M. 1996. Alkali-silica reaction in the Netherlands. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, agosto/ 1996.
- Hobbs, D. W. 1988. Alkali-silica reaction in concrete. London: Thomas Telford, 183p.

- Kihara, Y. 1986. Reação álcali-agregado - aspectos mineralógicos. In: I Simpósio Nacional de Agregados. São Paulo. Anais... São Paulo: Escola Politécnica da Usp, 1986. p. 127-138.
- Kihara, Y. 1993. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, v. 1, pp. 319-337.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M (eds.). 1994. Concreto - estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ed. Pini.
- Mei, L. 2003. Lithium hydroxide and alkali-aggregate reaction. Ph. D thesis. Nanjing University of Technology, June.
- Oberholster, R. E. & Davis, G. 1986. An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. *Cement and Concrete Research*, vol. 16, pp. 181 - 189.
- Ozol, M. A. 1994. Alkali-carbonate rock reaction. In: Klieger, P., Lamond, J. F. Significance of test and properties of concrete and concrete-making materials (ASTM/STP 169C). Philadelphia, ASTM, 1994. pp.372-387.
- Pacelli, W. A. 1997. Tema II: Casos históricos – barragens e outras estruturas. In: Relatório Final – Panorama Brasileiro e Relatório Técnico do Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia. *Anais...*Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997, pp. 81 - 91.
- Pacelli, W. A. & Fontoura, J. T. F. 1986. Visita técnica às barragens Chickamauga, Hiwassee e Fontana. Goiânia, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A., maio/1996 (Relatório Interno DCT.T.1.029.96-R0).
- Paulon, V. A. 1981. Reação álcali-agregado em concreto. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da USP, São Paulo. 114p.
- Poole, A. B. & Sotiropoulos, P. 1978. Influence of alkalis with dolomite and quartz in experiment concrete system. *Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on the Effects of Alkali in Concrete and Cement*, Purdue University, pp. 163-179.
- Relatório Final, 1999 - Panorama brasileiro e relato técnico do Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia: CBGB/ FURNAS.
- Ramezaniapour, A. A. 2003. Comparative study to evaluate the reactivity of aggregates. 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC).
- Rodrigues, E. P. 1994. Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo.
- Roger, C. A. 1986. Evaluation of potential for expansion and cracking of concrete caused by the alkali-carbonate reaction. *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 8, Nº 1, pp 13-23.

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 221. *ACI 221.1R-98*. 1998. State-of-the-art: Report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: *American Concrete Institute*, p.1-31.

AAR 23.26-A/2004: Determination of potential alkali-carbonate reactivity of quarried carbonate rocks by chemical composition, CSA Standard on AAR, Canada.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C.114/1997: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken.

ASTM C.151/2000: Standard test method for autoclave expansion of Portland cement. West Conshohocken.

ASTM C.157/1993: Length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia.

ASTM C.227/1990: Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (Mortar-Bar Method). Philadelphia.

ASTM C.295/1990: Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. West Conshohocken.

ASTM C.511/1995: Specification for moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes. Philadelphia.

ASTM C.1260/2001: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken.

ASTM C.1105/1995: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-carbonate rock reaction. West Conshohocken.

ASTM C.586/1992: Standard test method for potential alkali reactivity of carbonate rock for concrete aggregates (Rock Cylinder Method). West Conshohocken.

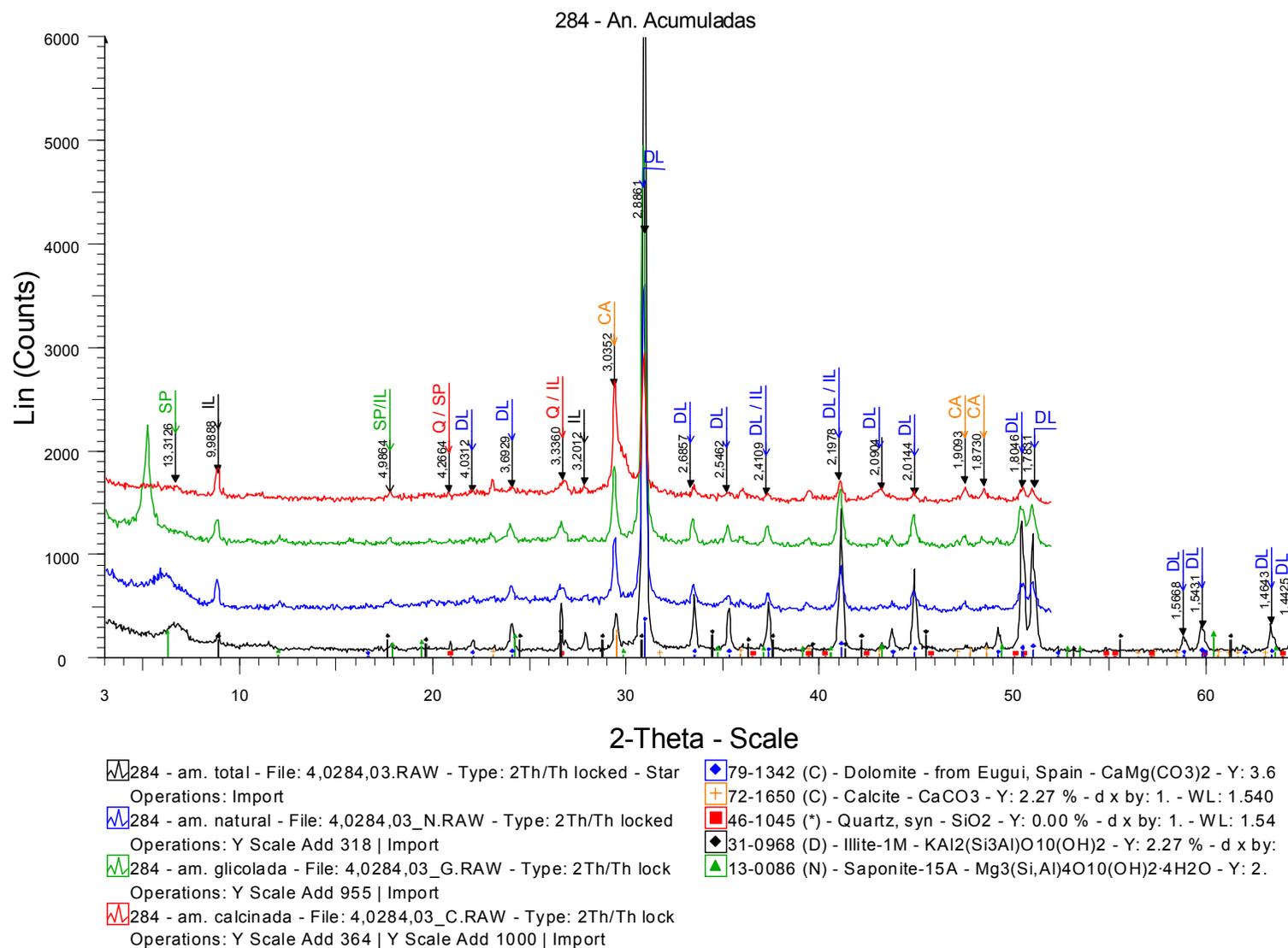
ASTM D.2938/1995. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.

ASTM D.4543/2001: Standard practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. West Conshohocken.

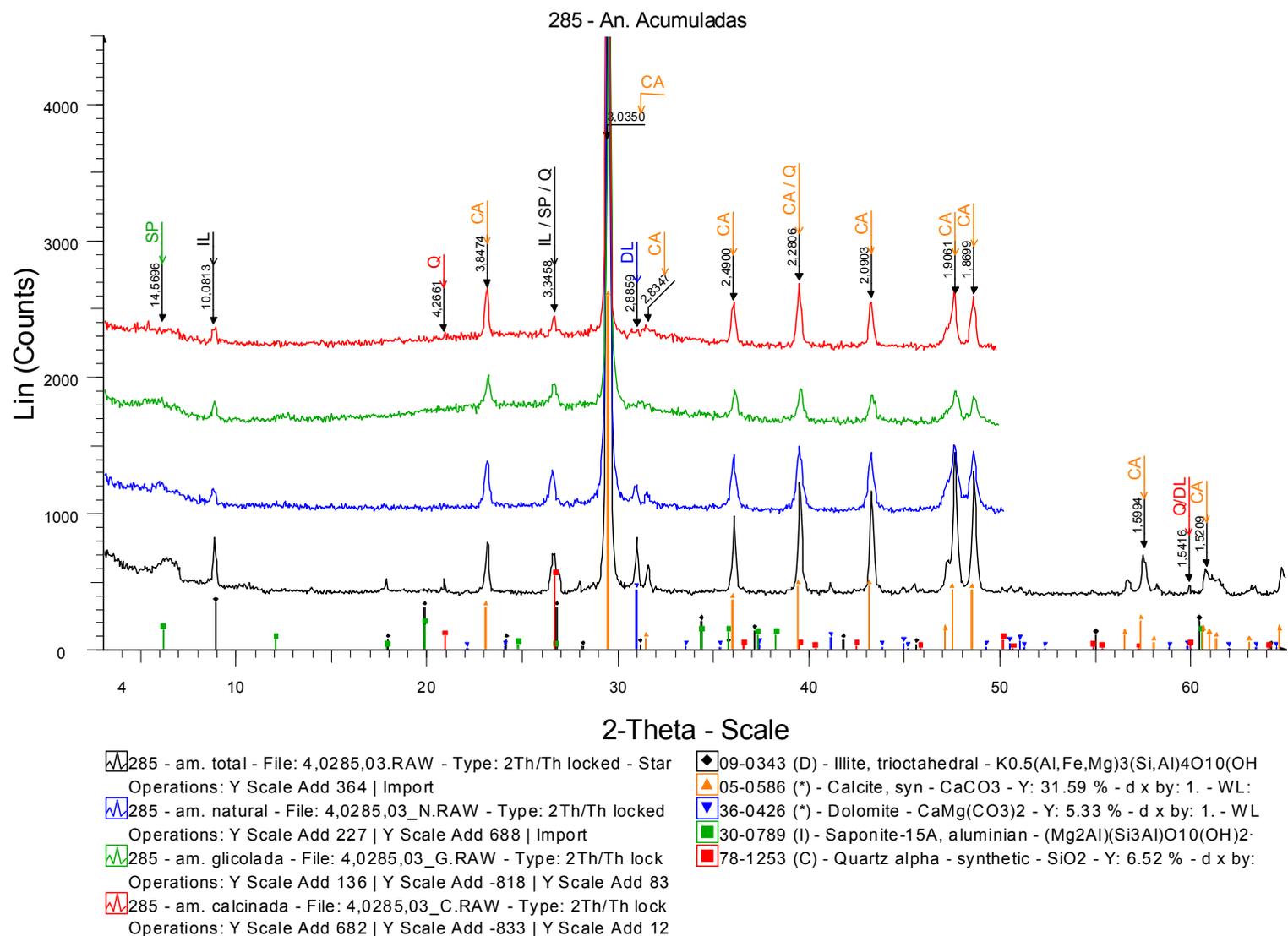
ASTM STP. 22/1935. Report on significance of tests on concrete and concrete aggregate.

ASTM STP. 22-A/1943. Report on significance of tests of concrete and concrete aggregate.

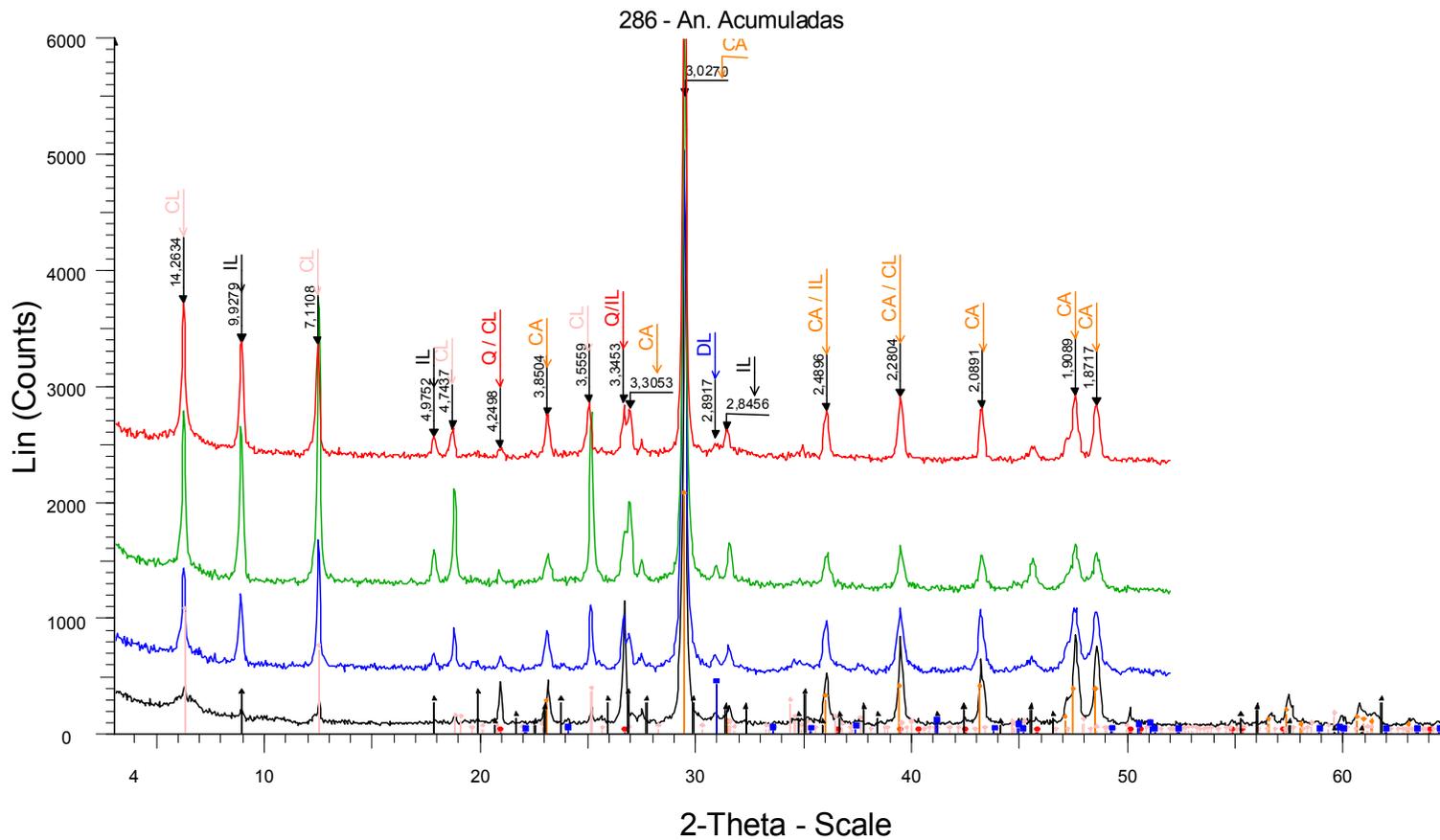
- Sherwood, W. C; Newlon JR., H. H. 1964. Studies on the mechanisms of alkali-carbonate reaction: chemical reactions. Washington, D.C., Highway Research Record, 1964. P. 41-56. (Number 45).
- Sims, I. & Sotiropoulos, P. 1983. Standard alkali-reactivity testing of carbonate rocks from the Middle East and North Africa. Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Alkali in Concrete, Practice and Research, Copenhagen, pp. 336-350.
- Stanton, T. E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781-1811.
- Stievenard-Gireaud, D. 1987. Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons. Paris: LCPC. 104p.
- Swenson, E. G. 1957. A reactive aggregate undetected by ASTM Test. Bulletin n. 226, American Society for Testing and Materials, pp. 48-51.
- Taylor, H.F.W. 1990. Cement chemistry. London. Academic Press.
- Tong, L. & Tang, M. 1995. Correlation between reaction and expansion of alkali-carbonate reaction. *Cement and Concrete Research*. V. 25; pp. 470-476.
- Tong, L. 1994. Alkali-carbonate reaction. Nanjing Institute of Chemical Technology.
- Tang, M. & Min, D. 2004. Progress on the studies of alkali-carbonate reaction. Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate in Concrete, Beijing, China. V. 1; pp 51-59.
- Tang, M.; Liu, Z.; Han, S. 1986. Mechanism of alkali-carbonate reaction. *Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference, 1986*, P. E. Grattan-Bellew, Ed., Noyes Publications, Park Riedge, NJ, 1987.
- Tang, M. & Lu, Y. 1987. Rapid method for determining the alkali reactivity of carbonate rock. *Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference, 1986*, P. E. Grattan-Bellew, Ed., Noyes Publications, Park Riedge, NJ, 1987, pp. 286-287.
- Tucker, M.E. 1981. *Sedimentary petrology: An Introduction*. Blackwell Scientific Publications, London, 252p.
- Veiga, F. N., Gonçalves, I. N., Armelin, J. L., Hasparyk, N. P, 1997. Reação Álcali-Agregado: A utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado Em Estruturas de Concret, Goiânia, novembro de 1997, Anais. pp 13-20.



Difratograma 1. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 284.

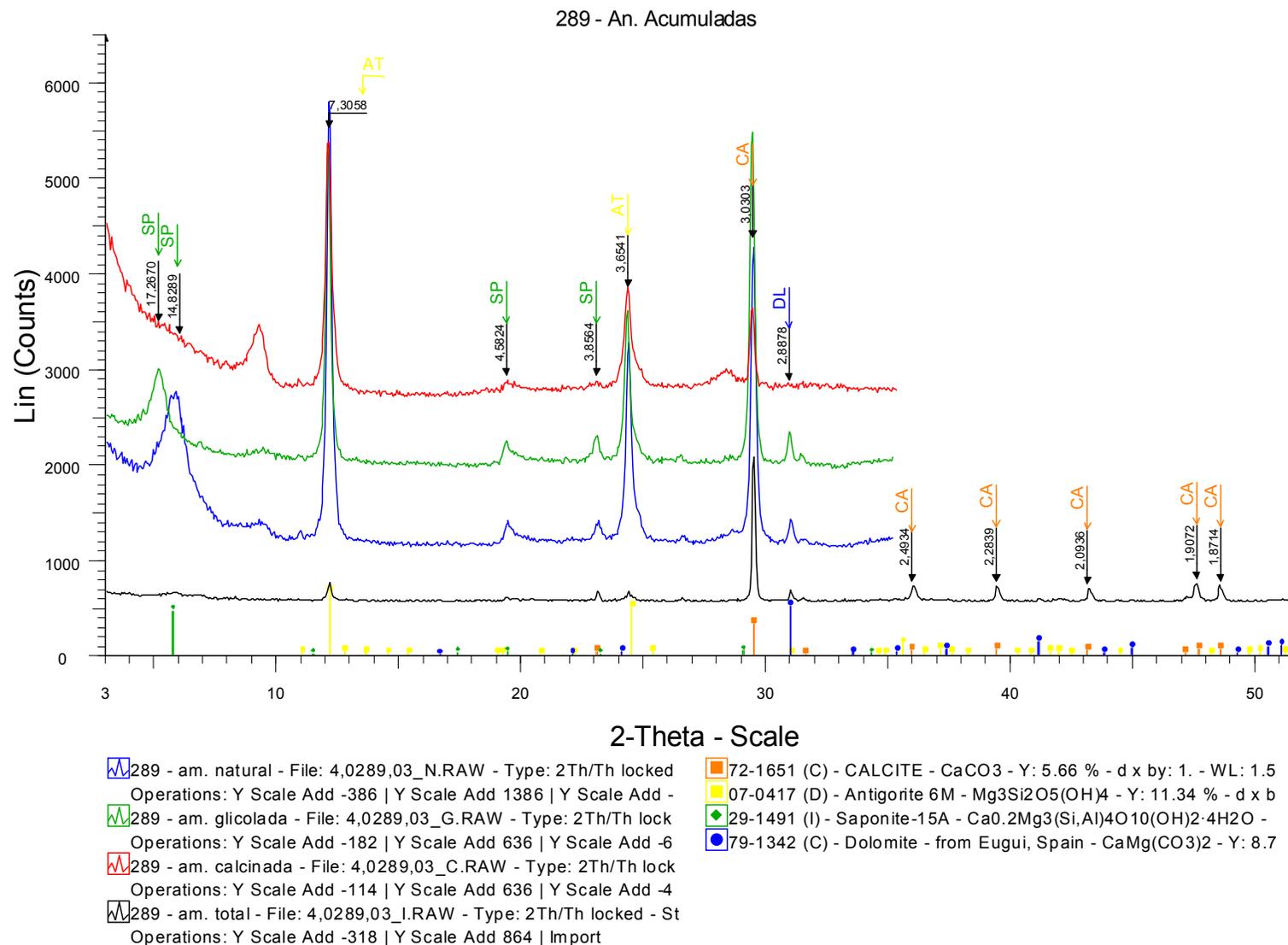


Difratograma 2. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 285.

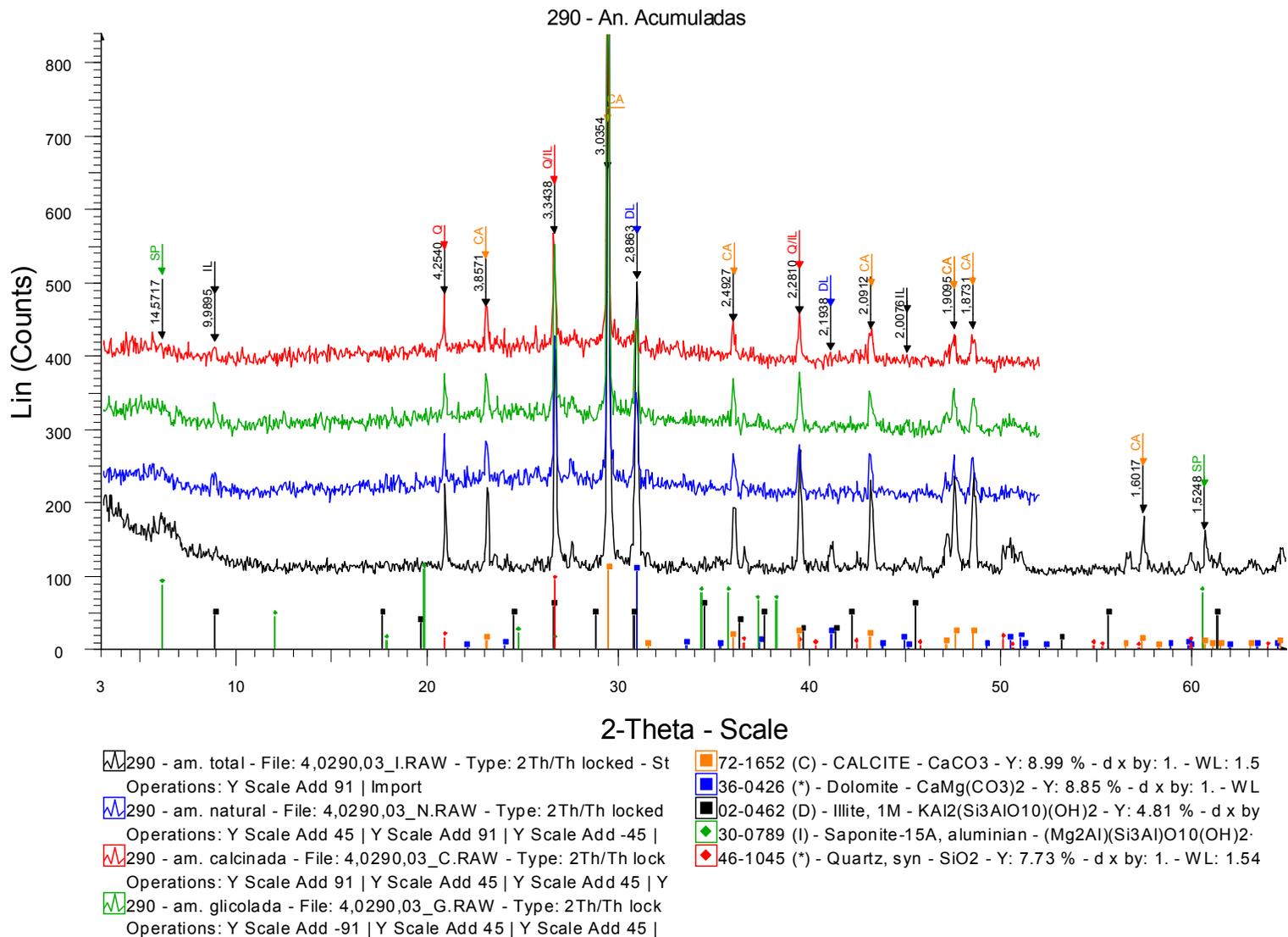


- 286 - am. total - File: 4,0286,03.RAW - Type: 2Th/Th locked - Star Operations: Import  
■ 286 - am. natural - File: 4,0286,03\_N.RAW - Type: 2Th/Th locked Operations: Y Scale Add -250 | Y Scale Add 625 | Import  
■ 286 - am. glicolada - File: 4,0286,03\_G.RAW - Type: 2Th/Th lock Operations: Y Scale Add -364 | Y Scale Add -563 | Y Scale Add 1  
■ 286 - am. calcinada - File: 4,0286,03\_C.RAW - Type: 2Th/Th lock Operations: Y Scale Add 318 | Y Scale Add 1000 | Y Scale Add -5
- 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 0.00 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
◆ 05-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO<sub>3</sub> - Y: 28.31 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
■ 36-0426 (\*) - Dolomite - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 5.79 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
◆ 72-1234 (C) - Chlorite - Mg<sub>2.5</sub>Fe<sub>1.65</sub>Al<sub>1.5</sub>Si<sub>2.2</sub>Al<sub>1.8</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub> - Y: 4.55 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
▲ 02-0056 (D) - Illite - KAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.55 % - d x by: 1. - WL: 1.54

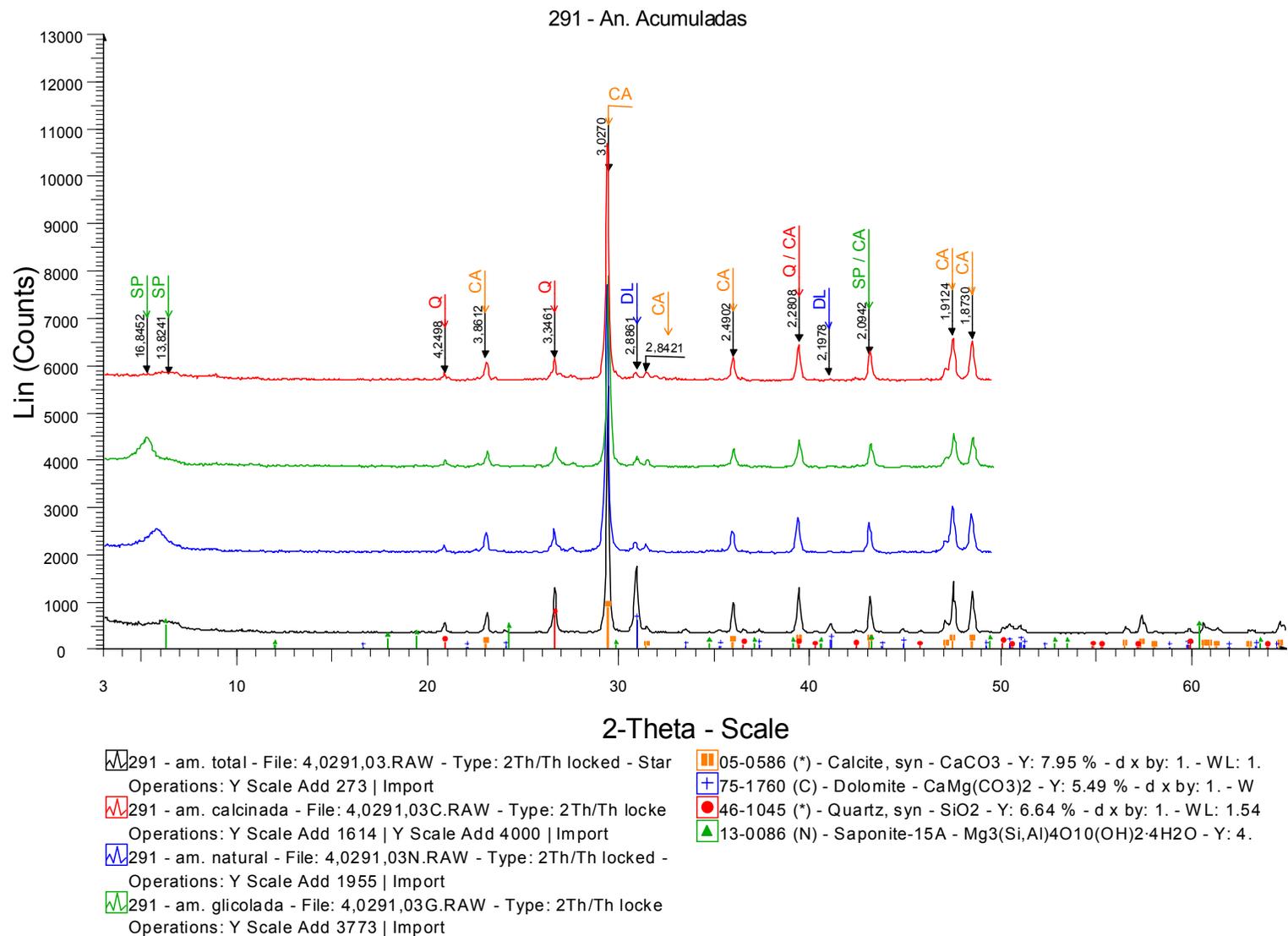
Difratograma 3. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 286.



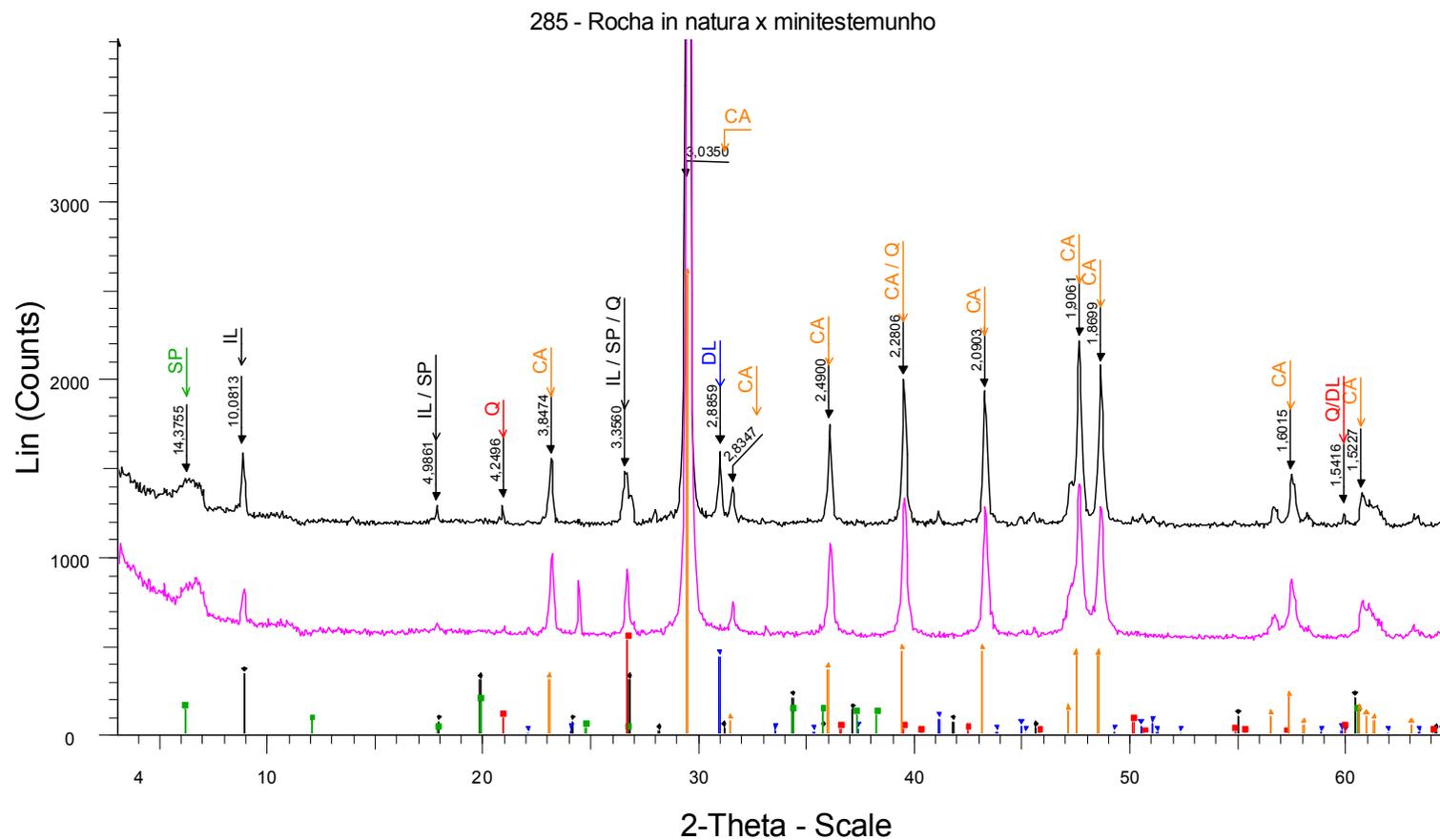
Difratograma 4. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 290.



Difratograma 5. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 290.

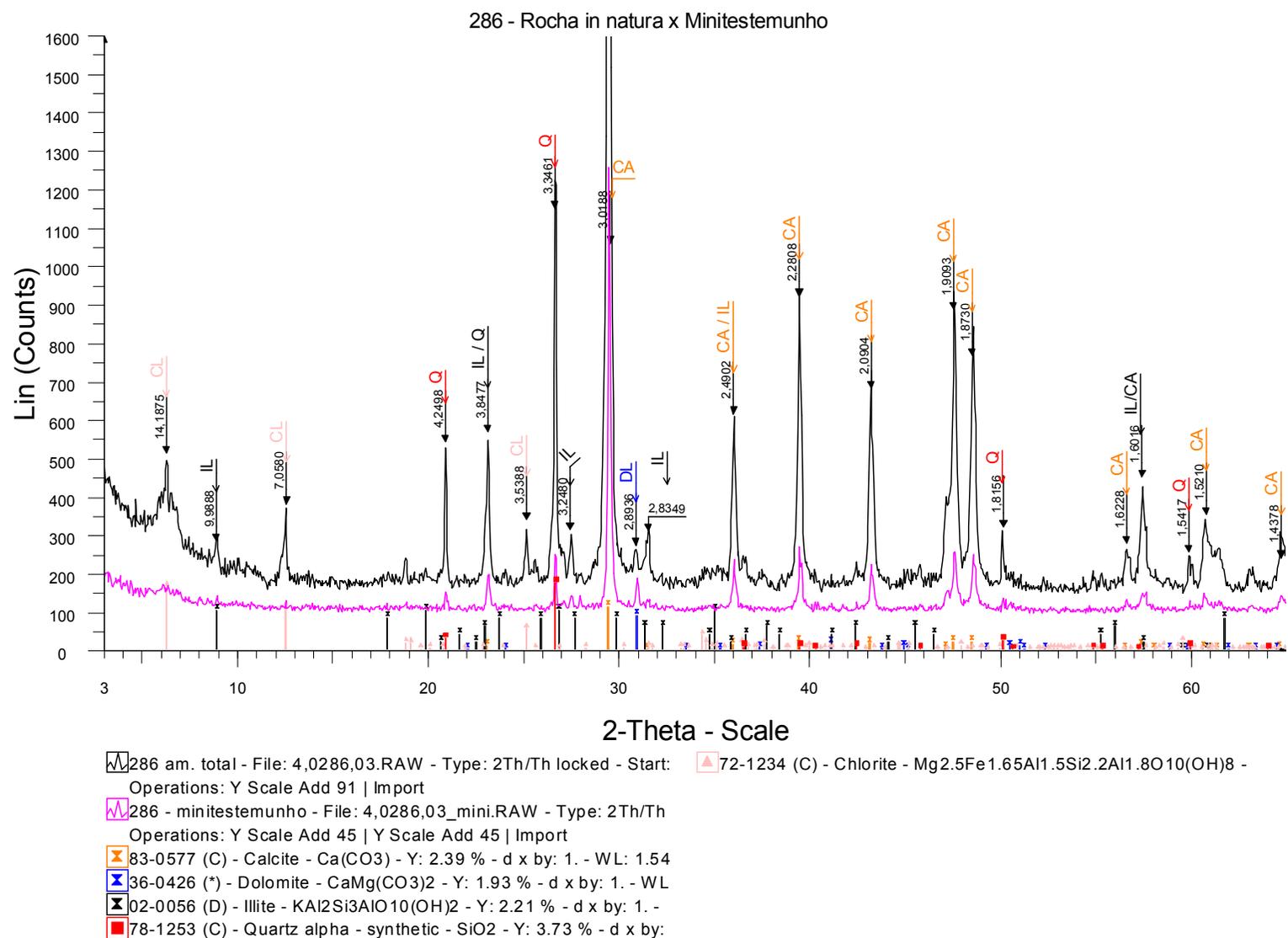


Difratograma 6. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha *in natura* 291.

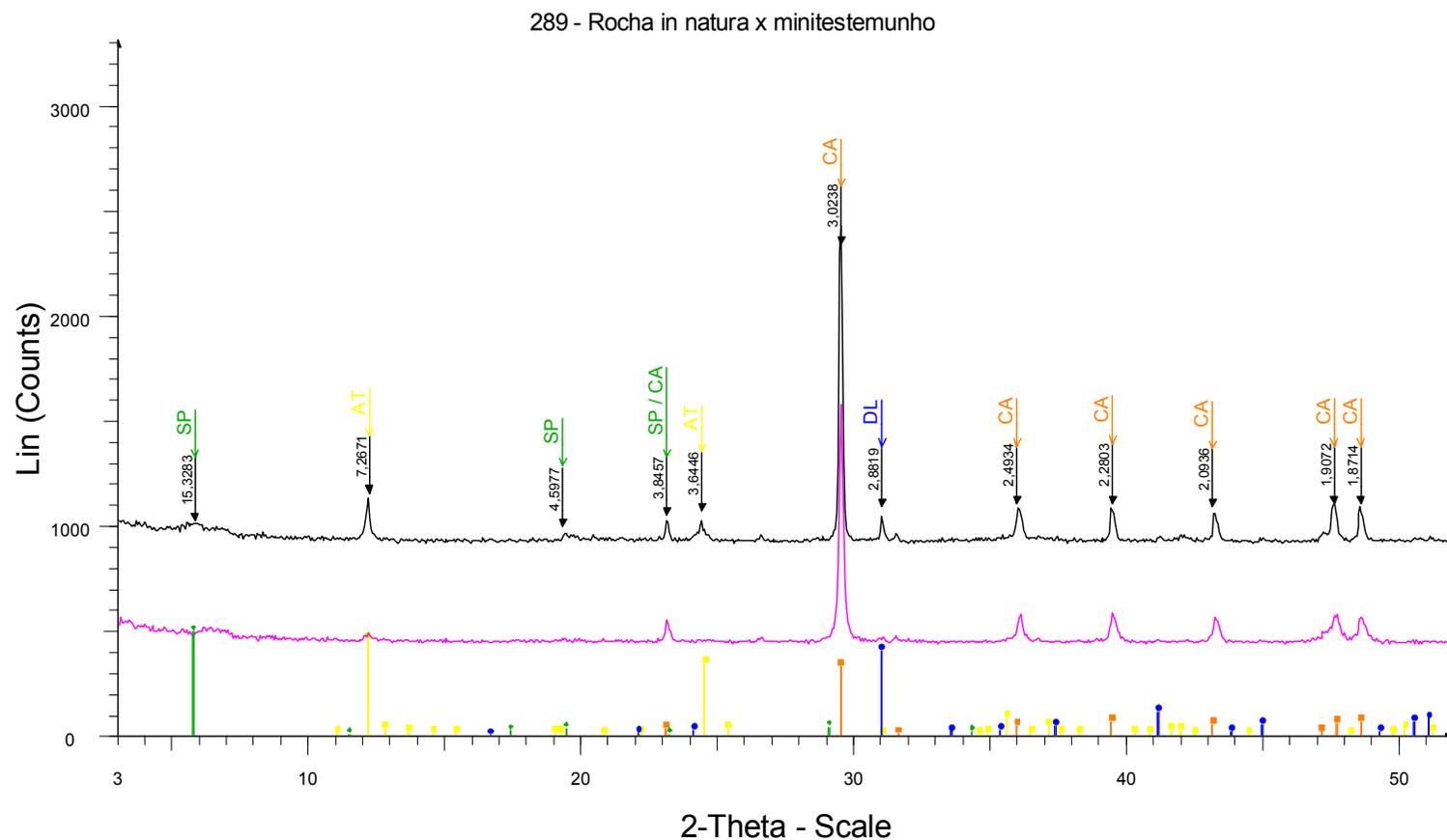


- ▬ 285 - am. total - File: 4,0285,03.RAW - Type: 2Th/Th locked - Star  
 Operations: Y Scale Add 182 | Y Scale Add 591 | Y Scale Add 36
- ▬ 285 - minitestemunho - File: 4,0285,03\_mini.RAW - Type: 2Th/Th  
 Operations: Y Scale Add 182 | Y Scale Add 318 | Import
- ◆ 09-0343 (D) - Illite, trioctahedral -  $K_0.5(Al,Fe,Mg)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)$
- ▲ 05-0586 (\*) - Calcite, syn -  $CaCO_3$  - Y: 28.87 % - d x by: 1. - WL:
- ▼ 36-0426 (\*) - Dolomite -  $CaMg(CO_3)_2$  - Y: 4.87 % - d x by: 1. - WL:
- 30-0789 (I) - Saponite-15A, aluminian -  $(Mg_2Al)(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
- 78-1253 (C) - Quartz alpha - synthetic -  $SiO_2$  - Y: 5.96 % - d x by:

Difratograma 7. Comparação entre as análises totais das rochas *in natura* e do minitestemunho (após ensaio de reatividade) da amostra 285.

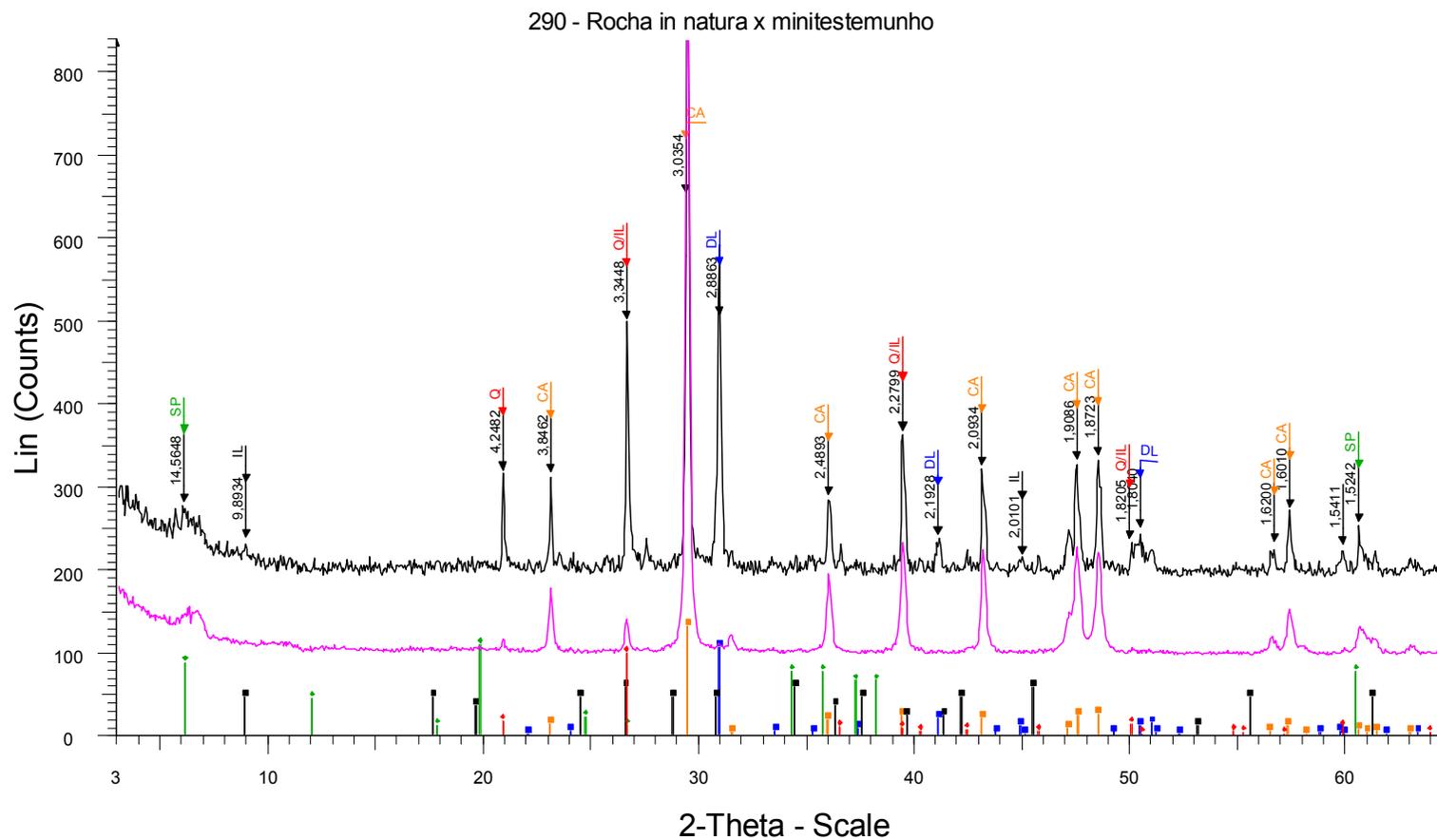


Difratograma 8. Comparação entre as análises totais das rochas *in natura* e do minitestemunho (após ensaio de reatividade) da amostra 286.



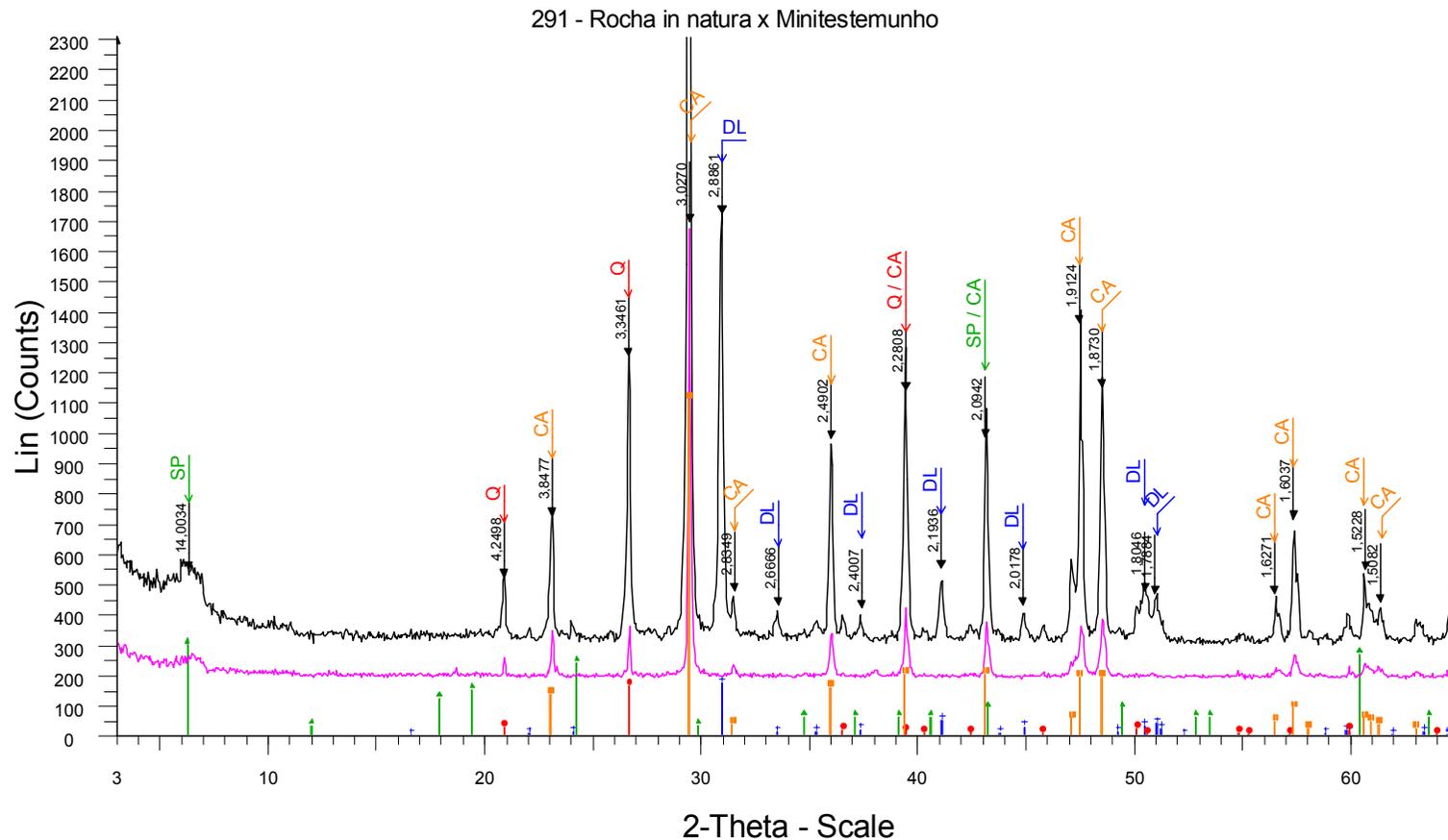
289 - am. total - File: 4,0289,03\_I.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25  
 Operations: Y Scale Add 364 | Y Scale Add -318 | Y Scale Add 864 | Import  
 289 - minitestemunho - File: 4,0289,03\_mini.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s -  
 Operations: Y Scale Add 432 | Import  
 72-1651 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 13.52 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/Ic PDF 3.2 - S-Q 8.4 %  
 07-0417 (D) - Antigorite 6M - Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - Y: 18.80 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Monoclinic - I/Ic PDF 1. - S-Q 37.7 %  
 29-1491 (I) - Saponite-15A - Ca<sub>0.2</sub>Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 20.33 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/Ic PDF 1. - S-Q 40.  
 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 16.48 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/Ic PDF 2.5 - S-Q 13.

Difratograma 9. Comparação entre as análises totais das rochas *in natura* e do minitestemunho (após ensaio de reatividade) da amostra 289.



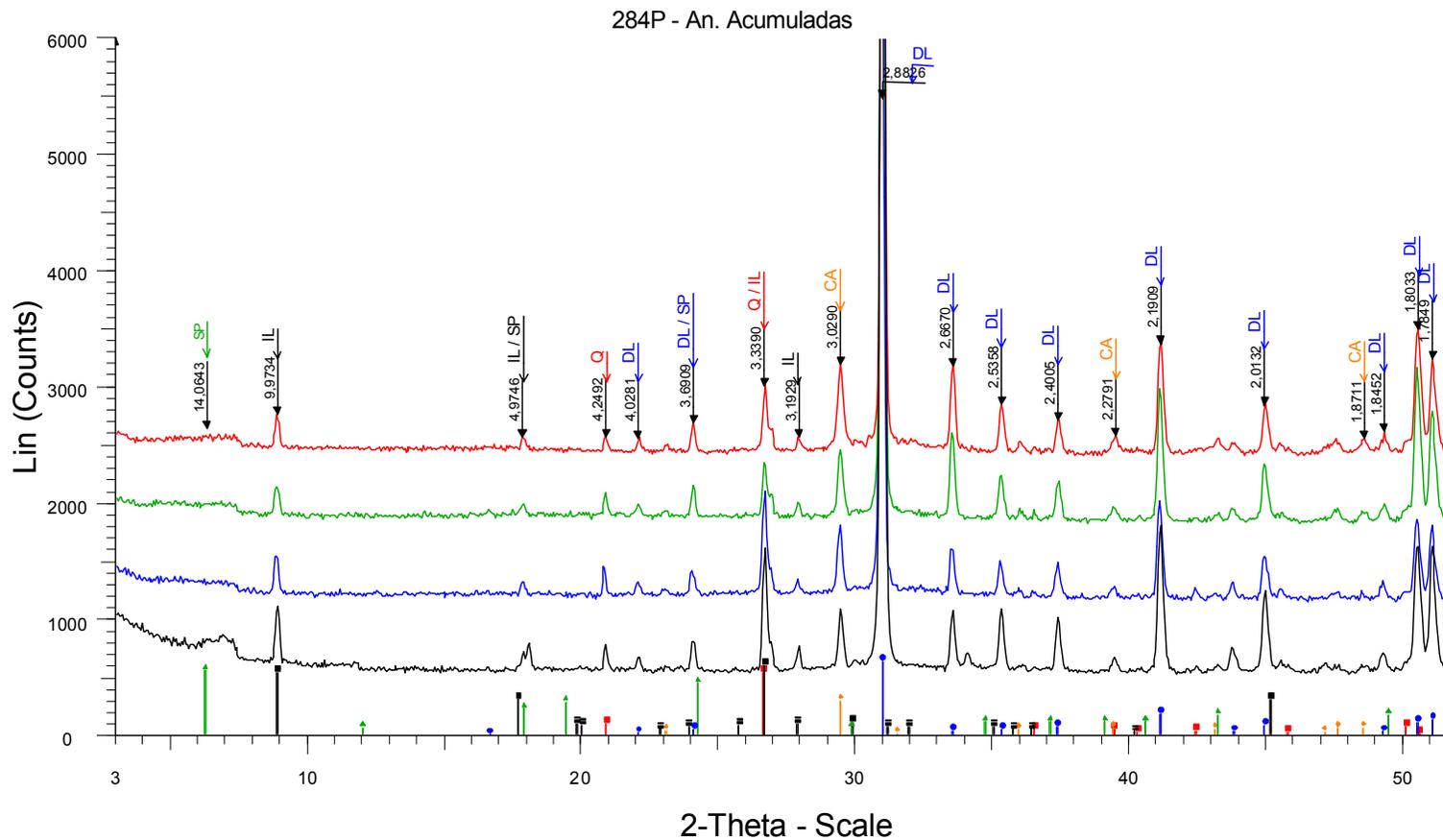
- ▣ 290 - am. total - File: 4,0290,03\_I.RAW - Type: 2Th/Th locked - St ▣ 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 7.63 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
 Operations: Y Scale Add 91 | Y Scale Add 91 | Import
- ▣ 290 - minitestemunho - File: 4,0290,03 - mini.RAW - Type: 2Th/T  
 Operations: Y Scale Add 91 | Y Scale Mul 0.364 | Y Scale Mul 0.
- ▣ 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 10.21 % - d x by: 1. - WL: 1.
- ▣ 36-0426 (\*) - Dolomite - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 8.22 % - d x by: 1. - WL
- ▣ 02-0462 (D) - Illite, 1M - KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.47 % - d x by
- ▣ 30-0789 (I) - Saponite-15A, aluminian - (Mg<sub>2</sub>Al)(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>

Difratograma 10. Comparação entre as análises totais das rochas *in natura* e do minitestemunho (após ensaio de reatividade) da amostra 290.



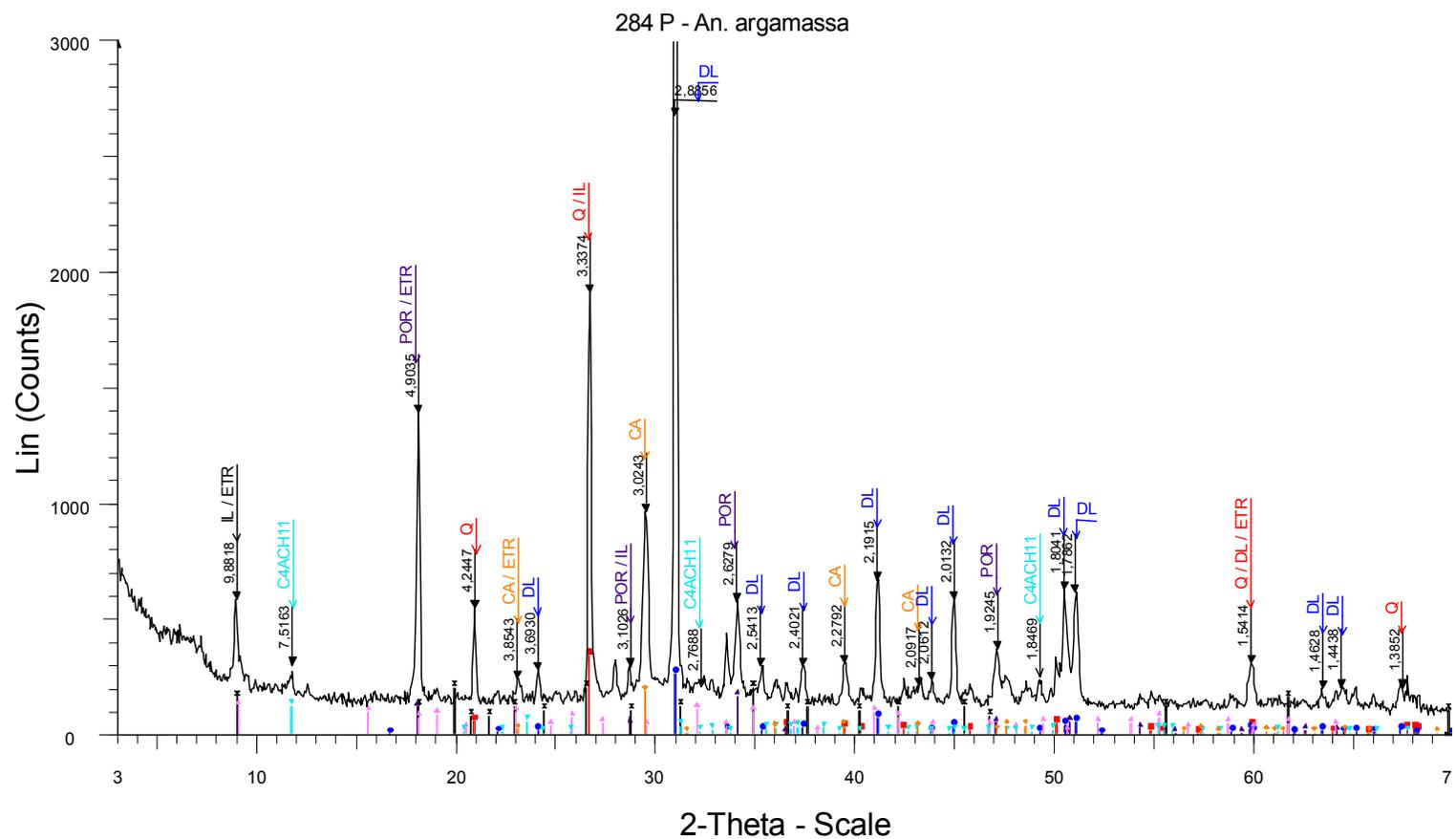
- ▭ 291 - am. total - File: 4,0291,03.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C  
 Operations: Y Scale Add 273 | Import
- ▭ 291 - minitestemunho - File: 4,0291,03\_Mini.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s -  
 Operations: Y Scale Add -500 | Y Scale Add 1 | Y Scale Add 682 | Import
- ▭ 05-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO<sub>3</sub> - Y: 20.00 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/lc PDF 2. - S-Q 57.1 %
- + 75-1760 (C) - Dolomite - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 3.08 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/lc PDF 2.4 - S-Q 7.3 %
- 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 2.95 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/lc PDF 3.4 - S-Q 4.9 %
- ▲ 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 5.37 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/lc PDF 1. - S-Q 30.7 %

Difratograma 11. Comparação entre as análises totais das rochas *in natura* e do minitestemunho (após ensaio de reatividade) da amostra 291.



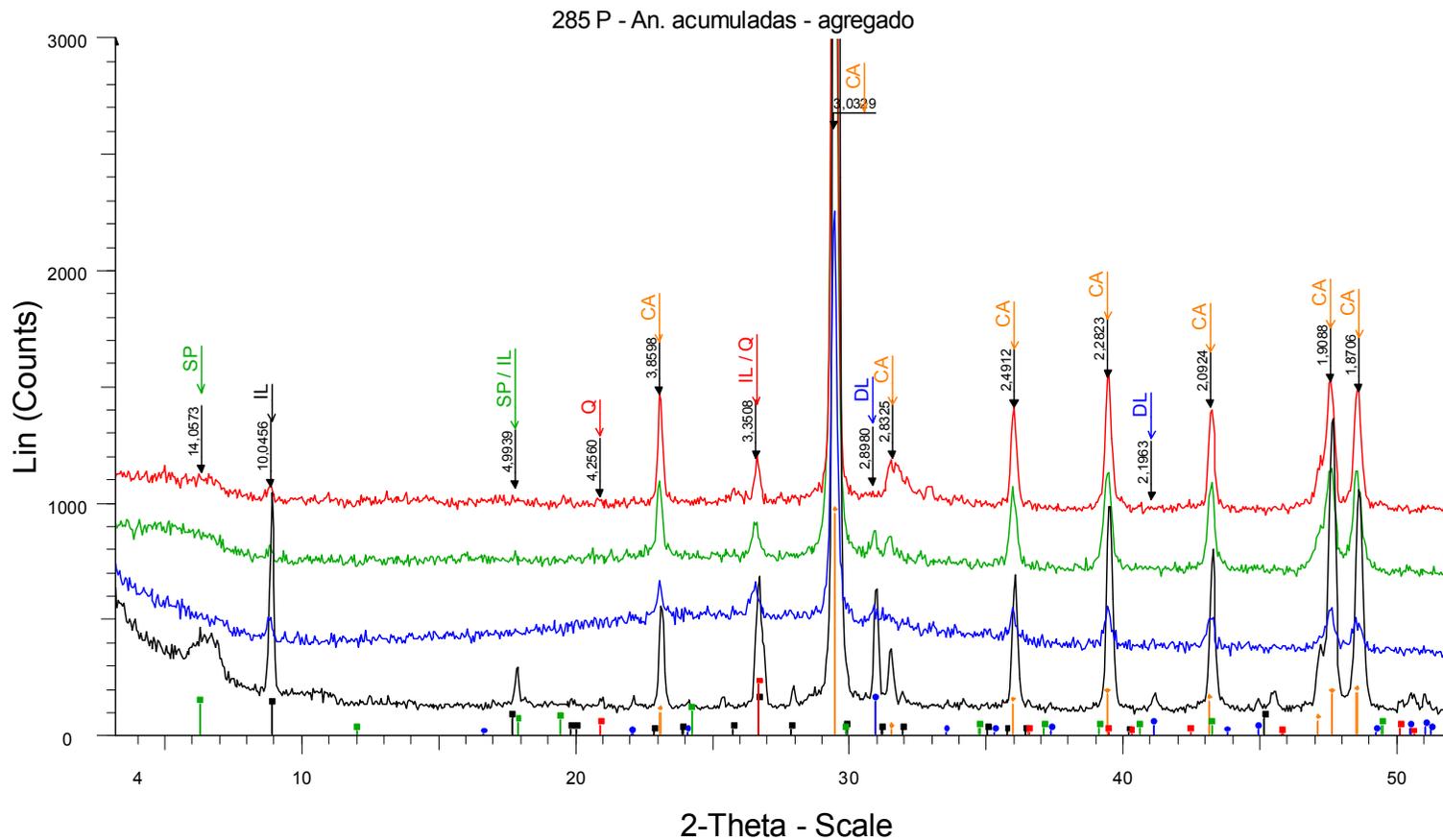
- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">▭</span> 284P - am. natural - File: E12601_n.raw - Type: 2Th/Th locked - S<br/>Operations: Y Scale Add 409   Y Scale Add 364   Y Scale Add 27</li> <li><span style="color: green;">▭</span> 284P- am. glicolada - File: E12601_g.raw - Type: 2Th/Th locked -<br/>Operations: Y Scale Add 409   Y Scale Add 318   Y Scale Add -81</li> <li><span style="color: red;">▭</span> 284P - am. calcinada - File: E12601_c.raw - Type: 2Th/Th locked<br/>Operations: Y Scale Add -909   Y Scale Add 1636   Y Scale Add 1</li> <li><span style="color: black;">▭</span> 284 P - agregado - File: E12601_agregado.RAW - Type: 2Th/Th I<br/>Operations: Y Scale Add 455   Import</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">▭</span> 46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 4.43 % - d x by: 1. - WL: 1.54</li> <li><span style="color: orange;">▭</span> 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 2.37 % - d x by: 1. - WL: 1.5</li> <li><span style="color: blue;">▭</span> 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 5.2</li> <li><span style="color: black;">▭</span> 26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.92 % - d</li> <li><span style="color: green;">▭</span> 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 4.</li> </ul> |
|--|--|

Difratograma 18. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 284P, após ensaio de reatividade.



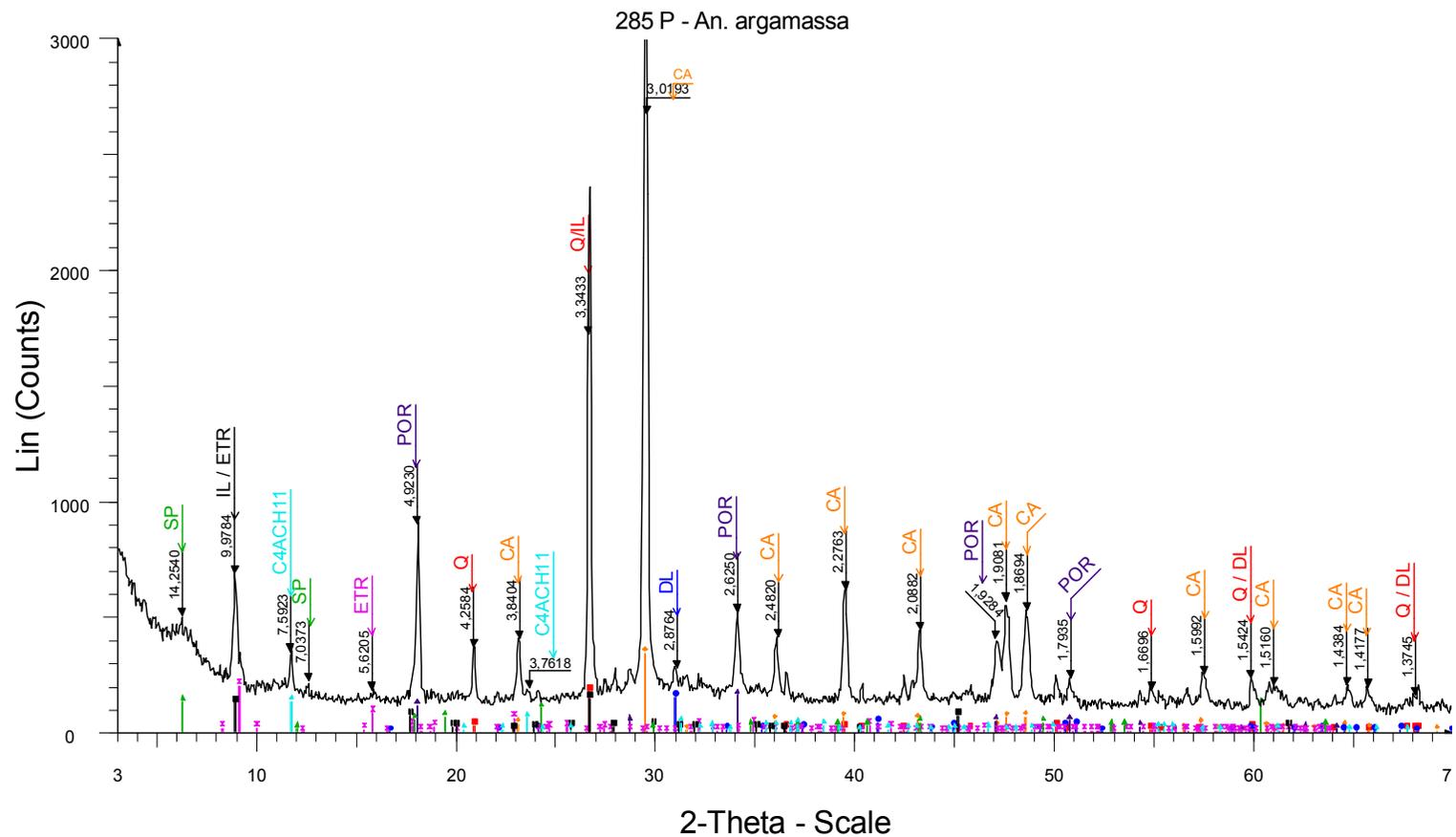
- ▲ 284 P - argamassa - File: E12601\_argamassa.RAW - Type: 2Th/ ▼ 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate - Ca4  
 Operations: Import  
■ 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 6.51 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
◆ 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 3.51 % - d x by: 1. - WL: 1.5  
● 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 4.9  
▲ 44-1481 (D) - Portlandite, syn - Ca(OH)<sub>2</sub> - Y: 3.10 % - d x by: 1. -  
⊠ 09-0334 (D) - Illite 2M1 - K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H<sub>2</sub>O - Y: 3.80 % - d  
▲ 02-0059 (D) - Ettringite - Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>·26H<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6C

Difratograma 19. Análise total da argamassa do prisma de concreto 284 P, após ensaio de reatividade.



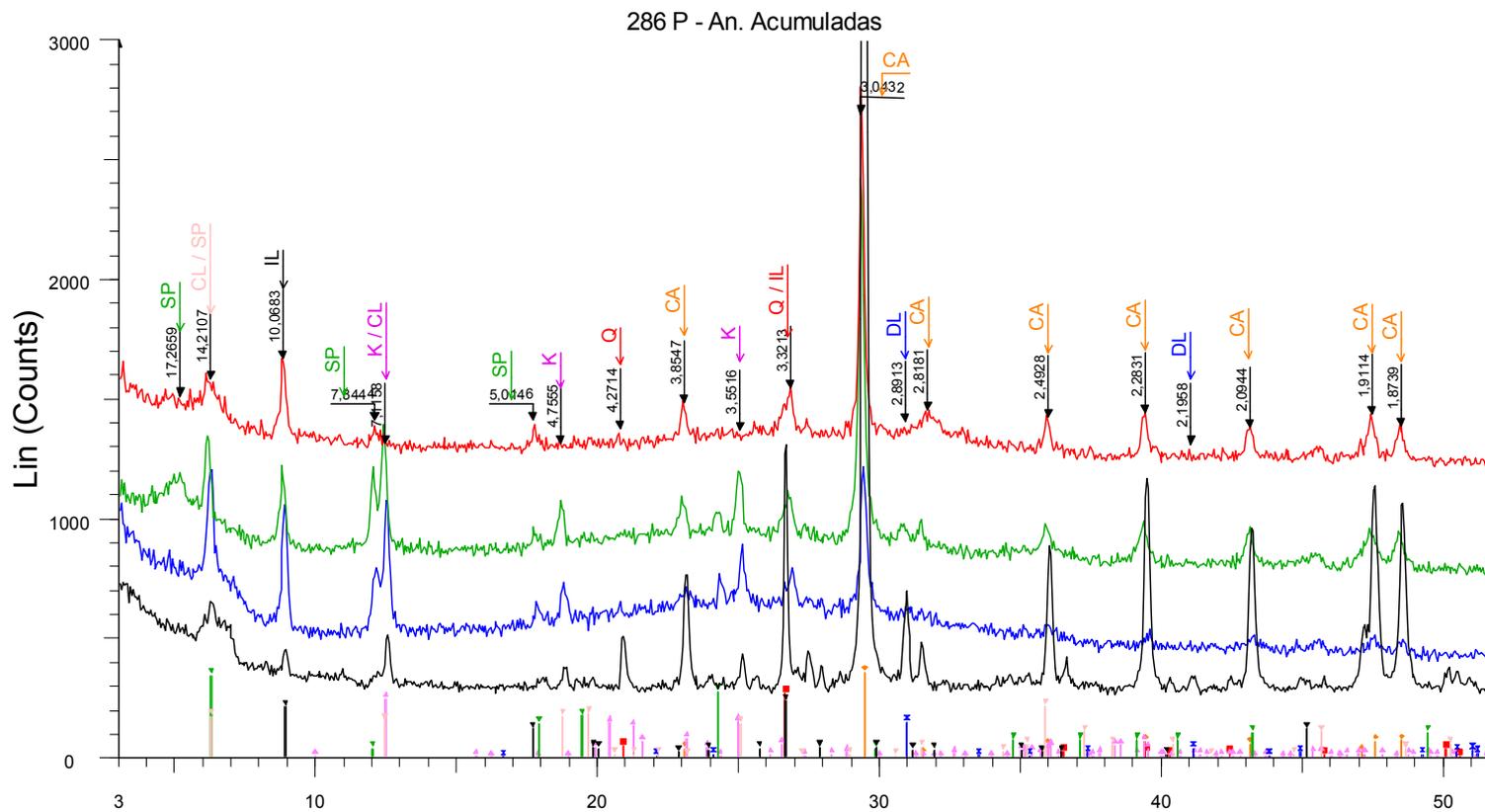
- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">▭</span> 285 P - am. natural - File: E12627_n.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add 273   Y Scale Add -45   Import</li> <li><span style="color: green;">▭</span> 285 P - am. glicolada - File: E12627_g.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add 136   Y Scale Add -364   Y Scale Add 81</li> <li><span style="color: red;">▭</span> 285 P - am. calcinada - File: E12627_c.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add -455   Y Scale Add 909   Y Scale Add 40</li> <li><span style="color: blue;">▭</span> 285 P - agregado - File: E12627_agregado.RAW - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add -182   Y Scale Add 227   Import</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: black;">▭</span> 26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H3O)Al2Si3AlO10(OH)2 - Y: 1.50 % - d</li> <li><span style="color: orange;">◆</span> 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO3 - Y: 10.07 % - d x by: 1. - WL: 1.</li> <li><span style="color: blue;">●</span> 75-1758 (C) - Dolomite - CaMg(CO3)2 - Y: 1.50 % - d x by: 1. - W</li> <li><span style="color: green;">▭</span> 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg3(Si,Al)4O10(OH)2·4H2O - Y: 1.</li> <li><span style="color: red;">▭</span> 78-1253 (C) - Quartz alpha - synthetic - SiO2 - Y: 2.27 % - d x by:</li> </ul> |
|---|---|

Difratograma 20. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 285P, após ensaio de reatividade.



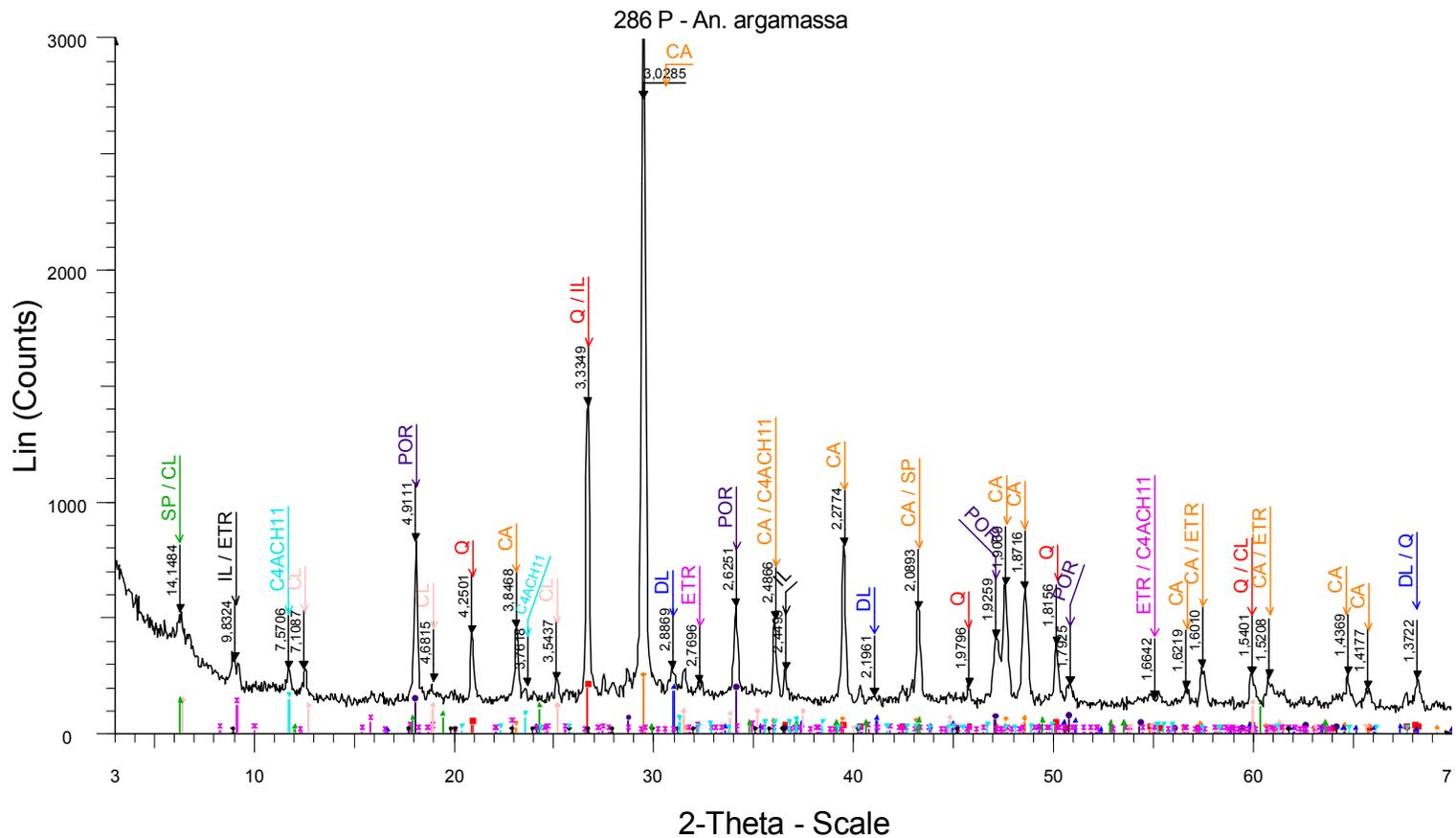
- 285 P - argamassa - File: E12627\_argamassa.RAW - Type: 2Th/  
 Operations: Import
- ▲ 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 3.
  - ▲ 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate - Ca4
  - 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 4.79 % - d x by: 1. - WL: 1.54
  - ◆ 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 9.40 % - d x by: 1. - WL: 1.5
  - 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 4.1
  - ▲ 44-1481 (D) - Portlandite, syn - Ca(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.40 % - d x by: 1. -
  - ✕ 72-0646 (C) - Ettringite - Ca<sub>6</sub>(Al(OH)<sub>6</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>26</sub> - Y: 5.58
  - 26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 3.95 % - d

Difratograma 21. Análise total da argamassa do prisma de concreto 285 P, após ensaio de reatividade.



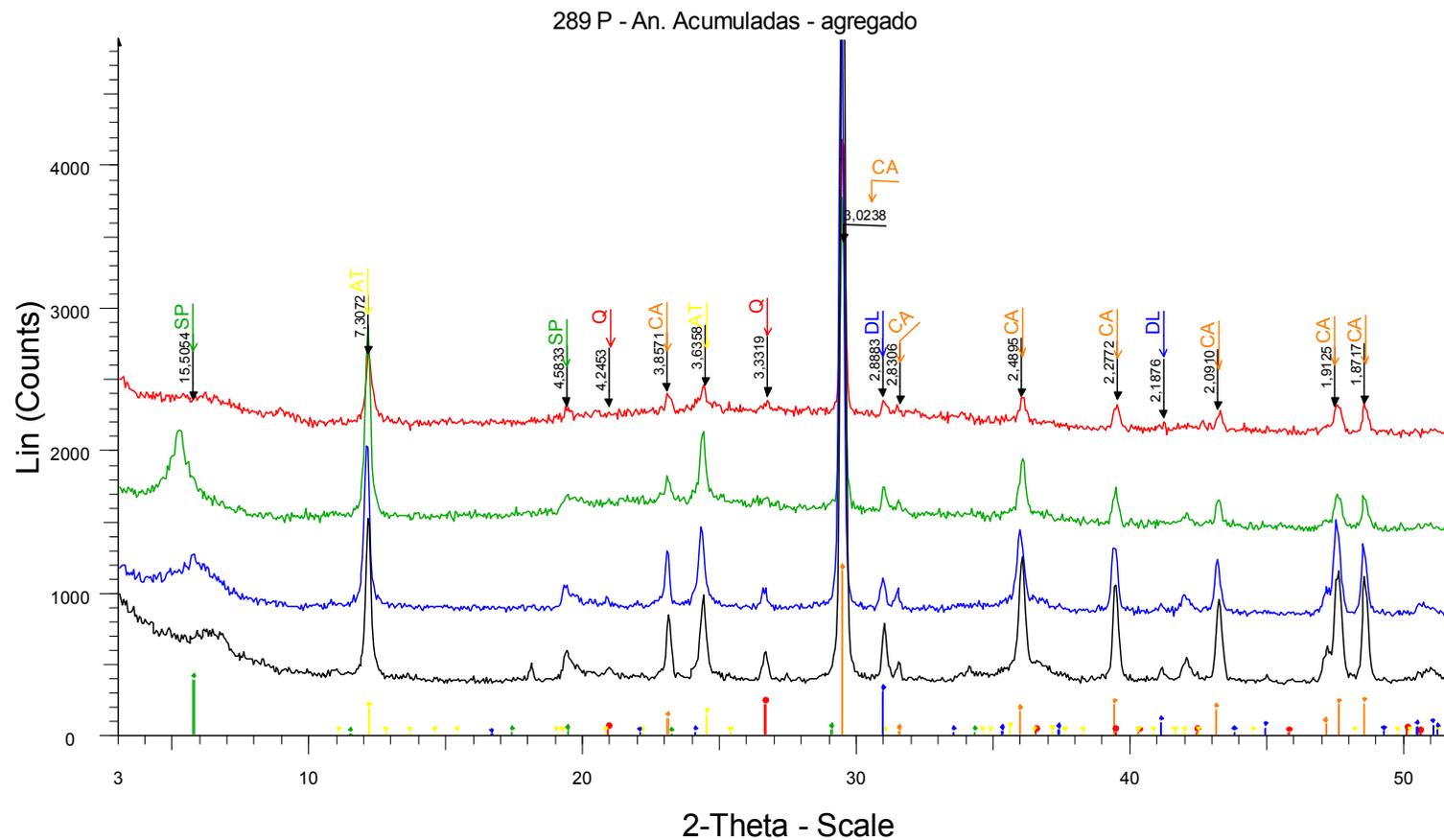
- ▣ 286 P - am. natural - File: E12628\_n.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add 364 | Y Scale Add -91 | Import
- ▣ 286 P - am. glicolada - File: E12628\_g.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add 182 | Y Scale Add -273 | Y Scale Add 72
- ▣ 286 P - am. calcinada - File: E12628\_c.raw - Type: 2Th/Th locked - Operations: Y Scale Add -364 | Y Scale Add 1091 | Y Scale Add 3
- ▣ 286 P - agregado - File: E12628\_agregado.RAW - Type: 2Th/Th I - Operations: Y Scale Add 182 | Import
- ▣ 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 5.58 % - d x by: 1. - WL: 1.5
- ▣ 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 4.22 % - d x by: 1. - WL: 1.54
- ▣ 78-2110 (C) - Kaolinite - from Keokuk, Iowa - Al<sub>4</sub>(OH)<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>) -
- ▣ 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 5.
- ▣ 26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 3.65 % - d
- ▣ 75-1656 (C) - Dolomite - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 2.27 % - d x by: 1. - W
- ▣ 13-0003 (D) - Chlorite - Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(O)<sub>8</sub> - Y: 3.31 % - d x b

Difratograma 22. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 286P, após ensaio de reatividade.



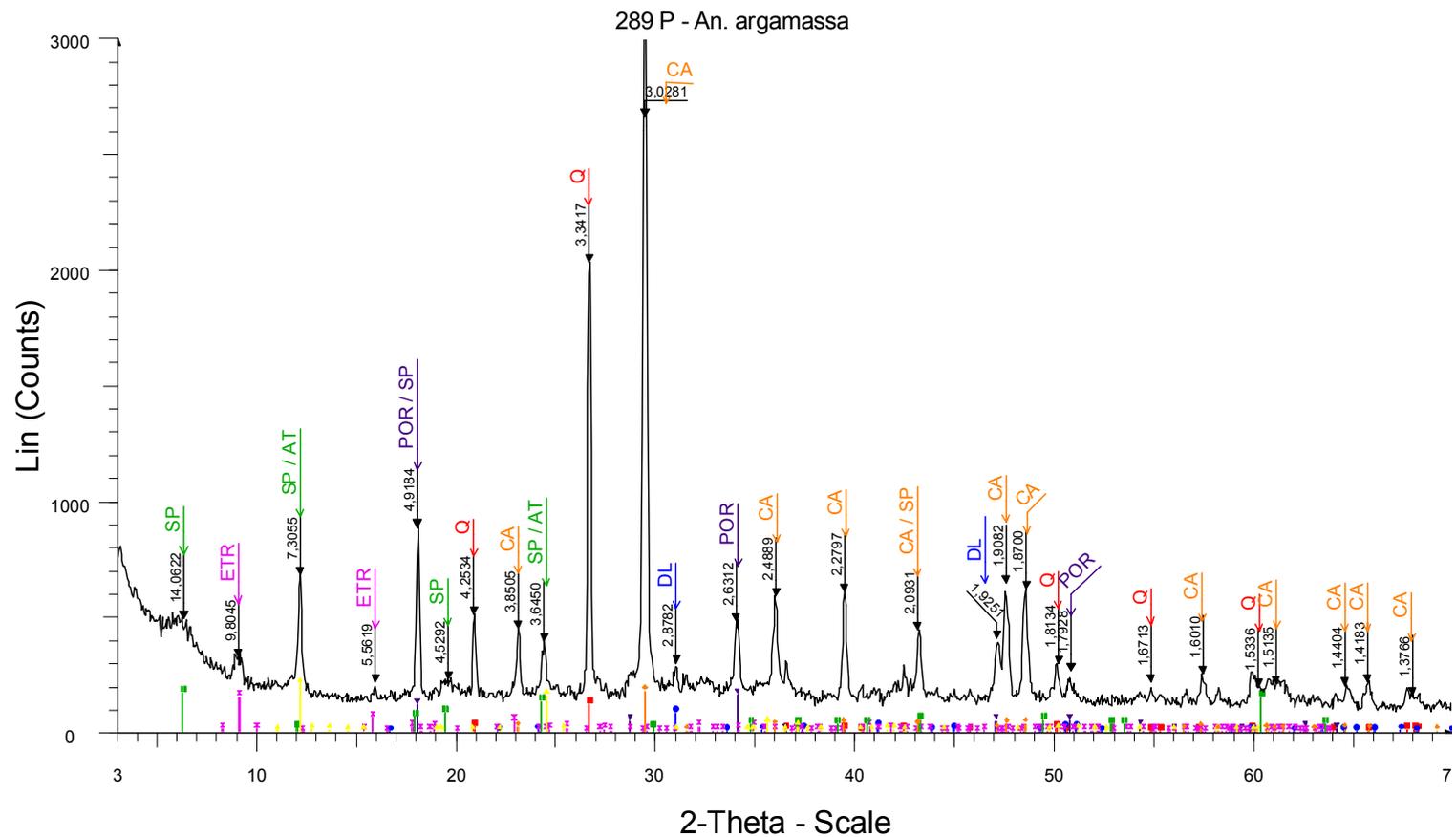
- 286 P - argamassa - File: E12628\_argamassa.RAW - Type: 2Th/  
 Operations: Import
- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">■</span> 46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 5.24 % - d x by: 1. - WL: 1.54</li> <li><span style="color: orange;">◆</span> 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 6.32 % - d x by: 1. - WL: 1.5</li> <li><span style="color: purple;">●</span> 44-1481 (D) - Portlandite, syn - Ca(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.96 % - d x by: 1. -</li> <li><span style="color: blue;">▲</span> 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 4.9</li> <li><span style="color: cyan;">▼</span> 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate - Ca4</li> <li><span style="color: magenta;">✕</span> 72-0646 (C) - Ettringite - Ca<sub>6</sub>(Al(OH)<sub>6</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>26</sub> - Y: 3.21</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: pink;">◇</span> 02-0028 (D) - Chlorite - (Mg,Fe)5(Al,Si)5O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub> - Y: 3.39 % - d</li> <li><span style="color: black;">◆</span> 26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 0.00 % - d</li> <li><span style="color: green;">▲</span> 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 3.</li> </ul> |
|--|--|

Difratograma 23. Análise total da argamassa do prisma de concreto 286 P, após ensaio de reatividade.



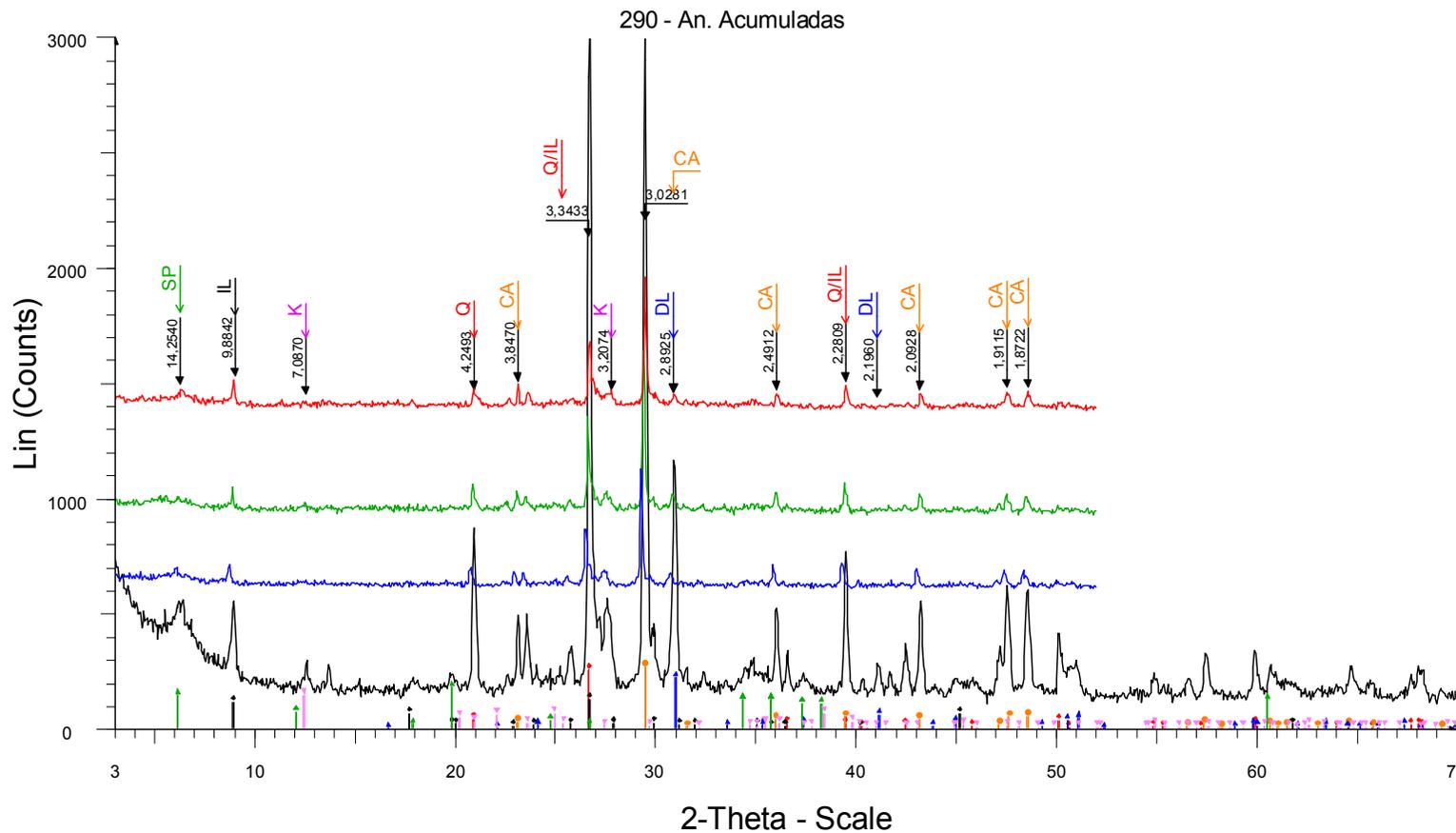
- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">▮</span> 289P - am. calcinada - File: E12604_c.raw - Type: 2Th/Th locked<br/>Operations: Y Scale Add 364   Y Scale Add 477   Y Scale Add 72</li> <li><span style="color: green;">▮</span> 289P - am. gicolada - File: E12604_g.raw - Type: 2Th/Th locked<br/>Operations: Y Scale Add 364   Y Scale Add 477   Y Scale Add -54</li> <li><span style="color: blue;">▮</span> 289P - am. natural - File: E12604_n.raw - Type: 2Th/Th locked -<br/>Operations: Y Scale Add 727   Import</li> <li><span style="color: black;">▮</span> 289P - agregado - File: E12604_agregado.RAW - Type: 2Th/Th I<br/>Operations: Y Scale Add 273   Import</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: orange;">▮</span> 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 18.84 % - d x by: 1. - WL: 1.</li> <li><span style="color: red;">●</span> 46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 3.50 % - d x by: 1. - WL: 1.54</li> <li><span style="color: blue;">▮</span> 75-1758 (C) - Dolomite - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 4.93 % - d x by: 1. - W</li> <li><span style="color: yellow;">▮</span> 07-0417 (D) - Antigorite 6M - Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - Y: 2.93 % - d x by</li> <li><span style="color: green;">▮</span> 29-1491 (I) - Saponite-15A - Ca<sub>0.2</sub>Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O -</li> </ul> |
|--|--|

Difratograma 24. Análises total, natural, gicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 289P, após ensaio de reatividade.



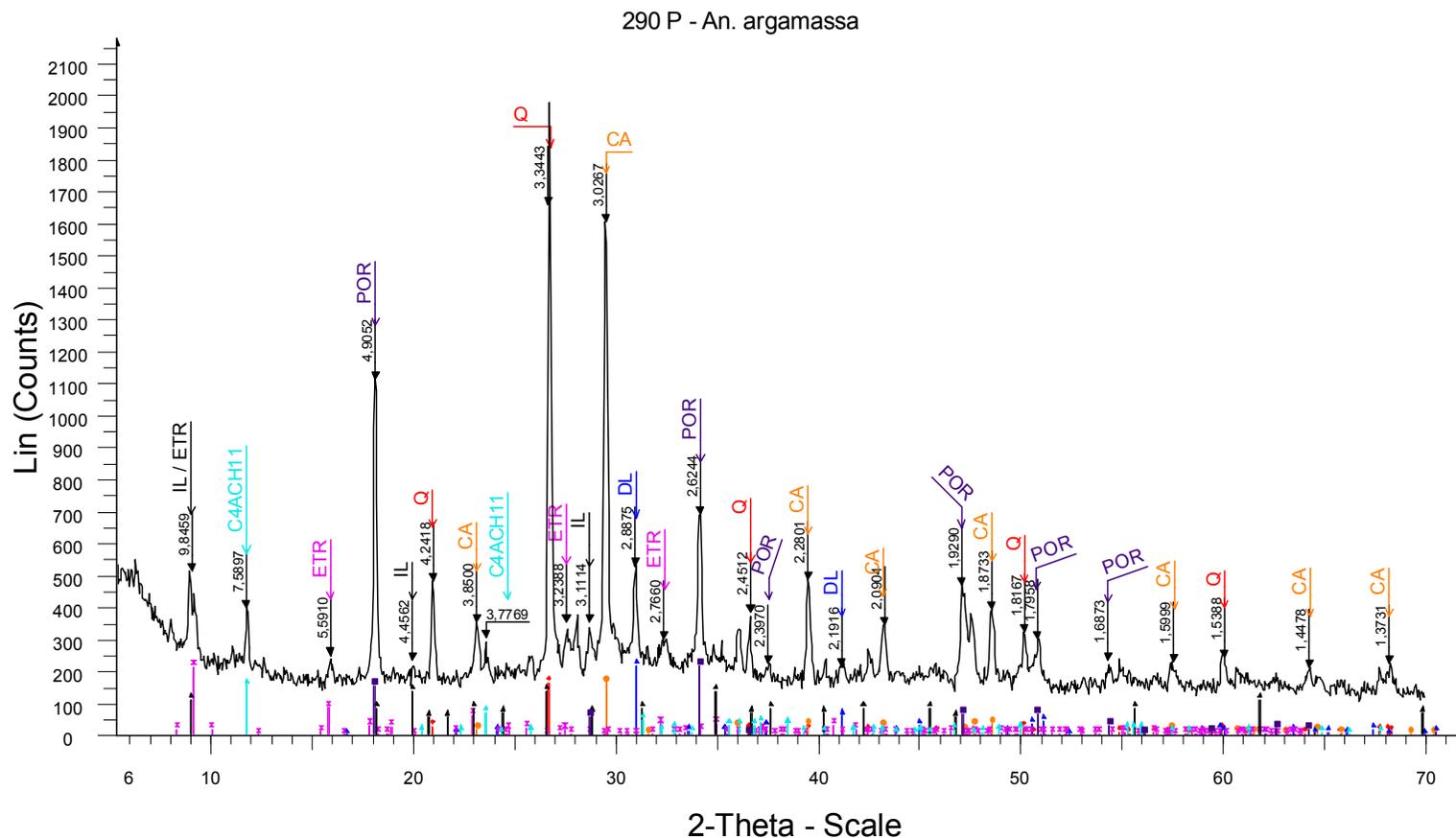
- 289 P - argamassa - File: E12604\_argamassa.RAW - Type: 2Th/ ▲ 07-0417 (D) - Antigorite 6M - Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - Y: 5.64 % - d x by  
 Operations: Import  
■ 46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 3.25 % - d x by: 1. - WL: 1.54  
◆ 72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 4.73 % - d x by: 1. - WL: 1.5  
● 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 2.2  
▼ 44-1481 (D) - Portlandite, syn - Ca(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.34 % - d x by: 1. -  
✱ 72-0646 (C) - Ettringite - Ca<sub>6</sub>(Al(OH)<sub>6</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>26</sub> - Y: 4.13  
■ 13-0086 (N) - Saponite-15A - Mg<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O - Y: 4.

Difratograma 25. Análise total da argamassa do prisma de concreto 289 P, após ensaio de reatividade.



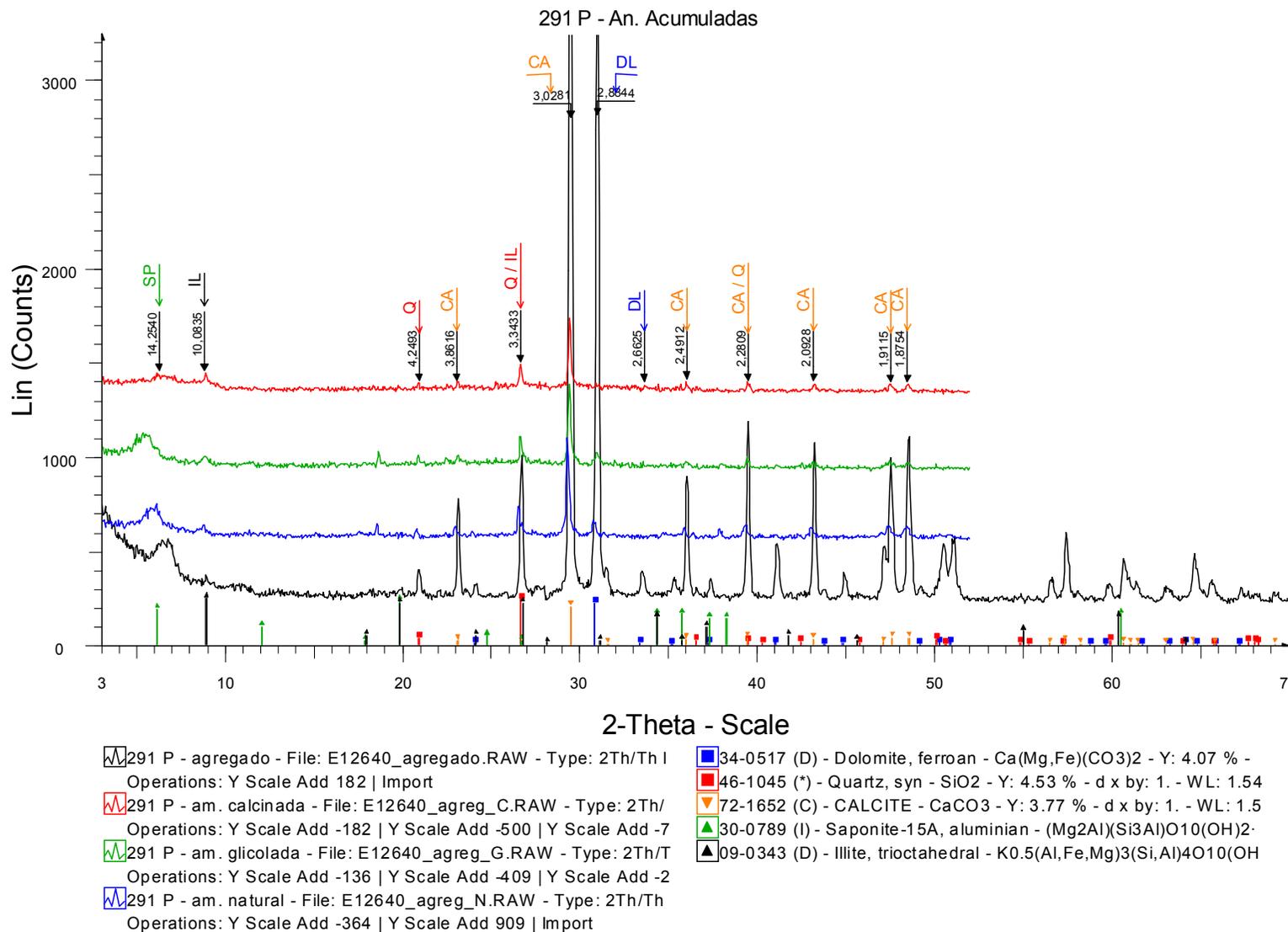
- |  |   |
|--|---|
| <p>290 - am. total - File: E12639_agregado.RAW - Type: 2Th/Th lock<br/>Operations: Import</p> <p>290 - am. calcinada - File: E12639_agreg_C.RAW - Type: 2Th/Th<br/>Operations: Y Scale Add -455   Y Scale Add -545   Y Scale Add -1</p> <p>290 - am. glicolada - File: E12639_agreg_G.RAW - Type: 2Th/Th<br/>Operations: Y Scale Add -455   Y Scale Add -364   Y Scale Add -1</p> <p>290 - am. natural - File: E12639_agreg_N.RAW - Type: 2Th/Th lo<br/>Operations: Y Scale Add -273   Y Scale Add -318   Y Scale Add -9</p> | <p>46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 8.12 % - d x by: 1. - WL: 1.54</p> <p>72-1652 (C) - CALCITE - CaCO<sub>3</sub> - Y: 8.62 % - d x by: 1. - WL: 1.5</p> <p>79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain - CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - Y: 7.1</p> <p>26-0911 (I) - Illite-2M1 - (K,H<sub>3</sub>O)Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 4.06 % - d</p> <p>30-0789 (I) - Saponite-15A, aluminian - (Mg<sub>2</sub>Al)(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·</p> <p>75-0938 (C) - Kaolinite - Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> - Y: 4.55 % - d x by: 1. -</p> |
|--|---|

Difratograma 26. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 290P, após ensaio de reatividade.

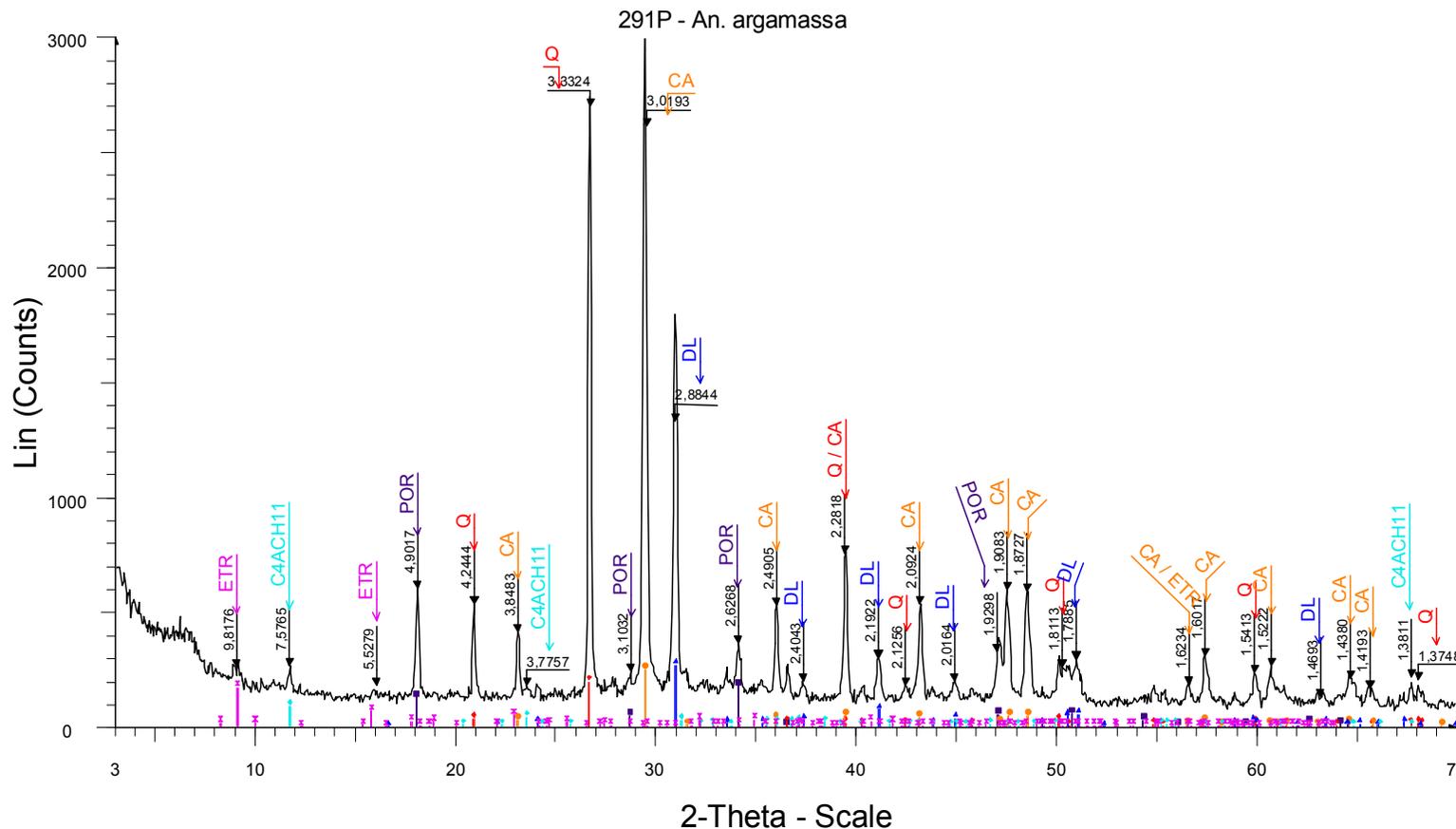


- ▲ 290 P - argamassa - File: E12639\_argamassa.RAW - Type: 2Th/ ▲ 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate - Ca4  
 Operations: Import
- 44-1481 (D) - Portlandite, syn -  $\text{Ca(OH)}_2$  - Y: 10.82 % - d x by: 1. -
  - ◆ 46-1045 (\*) - Quartz, syn -  $\text{SiO}_2$  - Y: 8.22 % - d x by: 1. - WL: 1.54
  - 72-1652 (C) - CALCITE -  $\text{CaCO}_3$  - Y: 8.26 % - d x by: 1. - WL: 1.5
  - ▲ 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain -  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  - Y: 10.
  - ✱ 72-0646 (C) - Ettringite -  $\text{Ca}_6(\text{Al(OH)}_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$  - Y: 10.65
  - ▲ 09-0334 (D) - Illite 2M1 - K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H<sub>2</sub>O - Y: 6.82 % - d

Difratograma 27. Análise total da argamassa do prisma de concreto 291 P, após ensaio de reatividade.

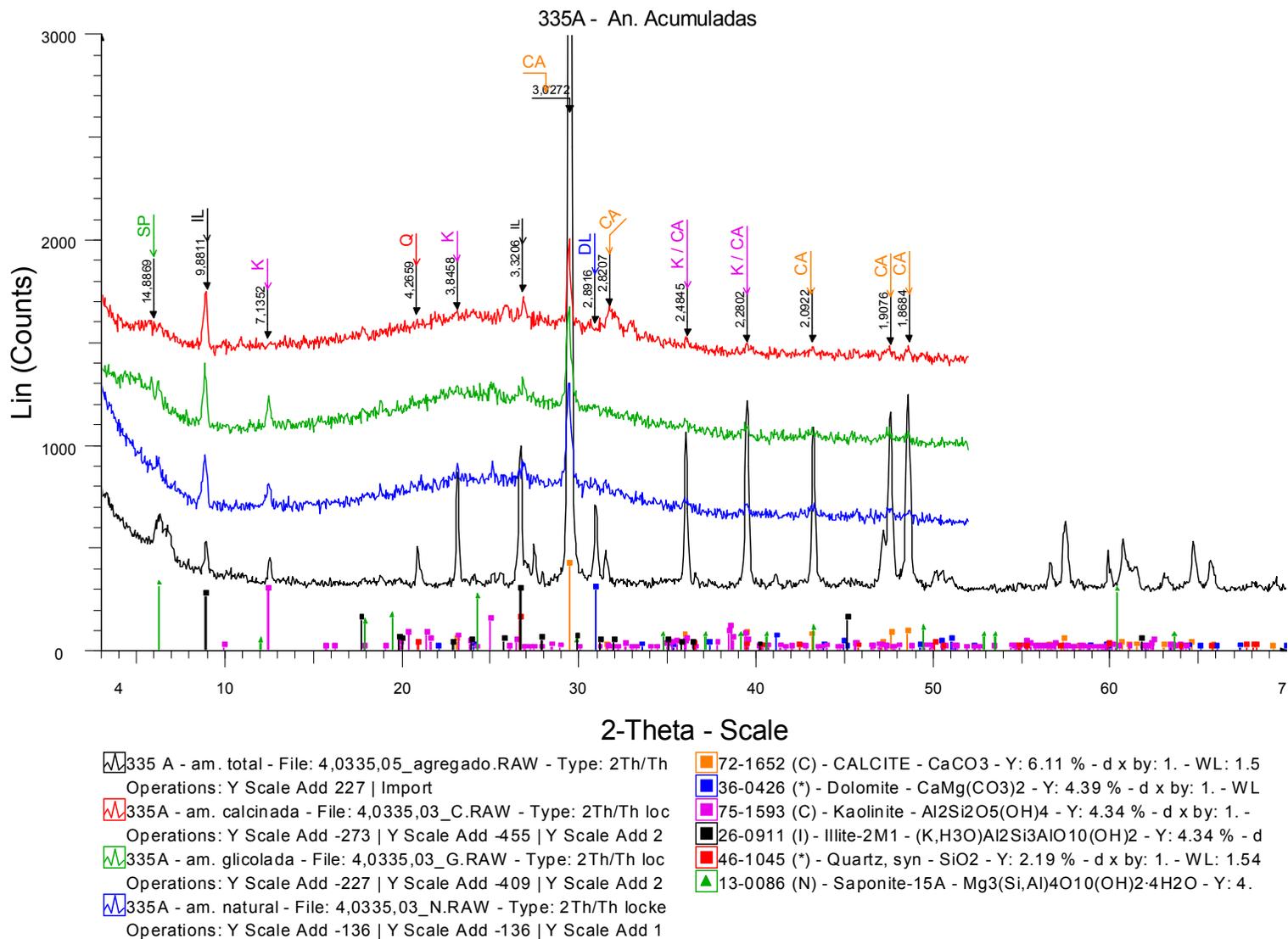


Difratograma 28. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do prisma de concreto 291P, após ensaio de reatividade.

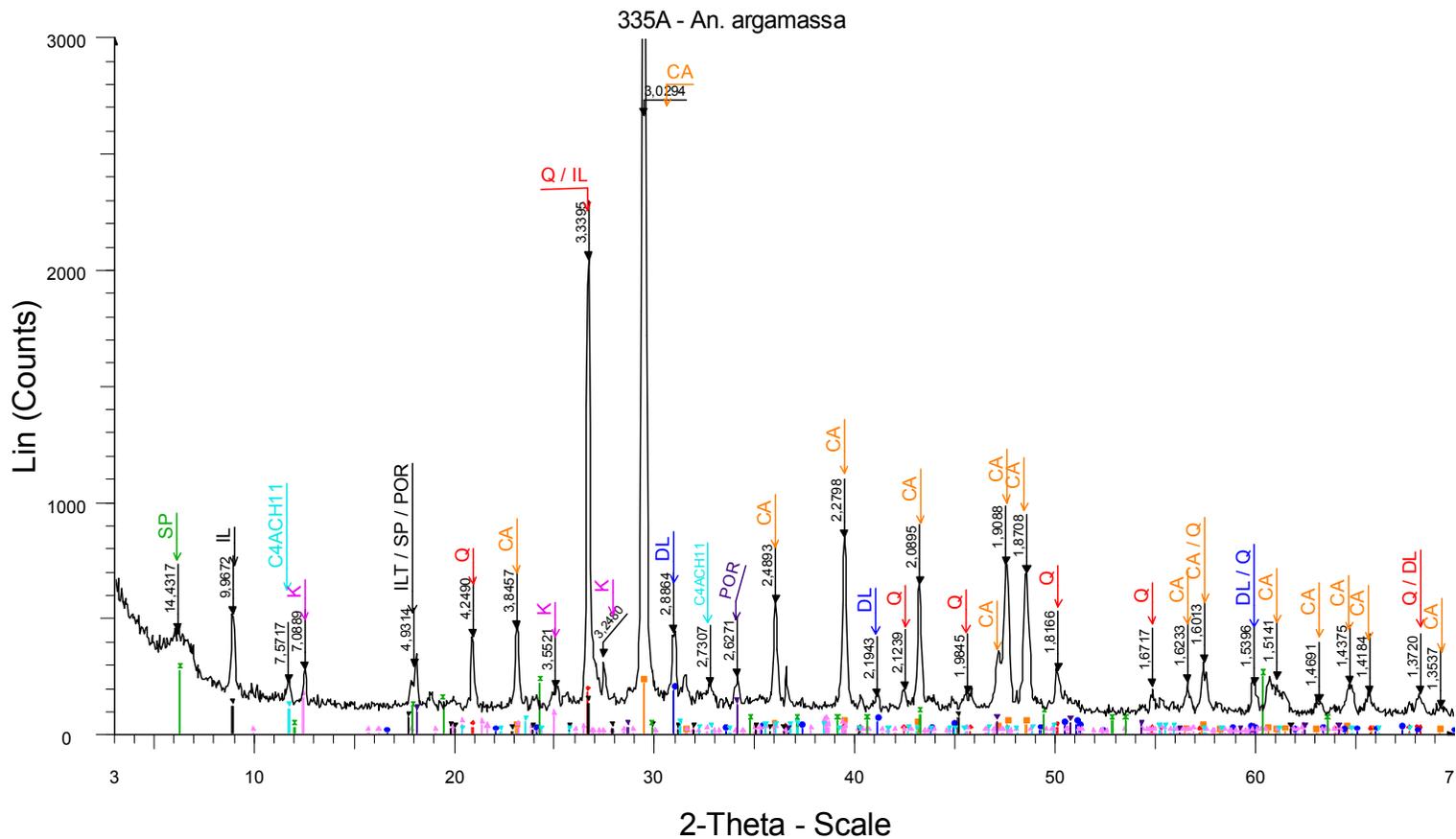


- 291 P - argamassa - File: E12640\_argamassa.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s  
 Operations: Import
- 44-1481 (D) - Portlandite, syn -  $\text{Ca(OH)}_2$  - Y: 5.62 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/lc PDF 2.9 - S-Q 13.3 %
  - ◆ 46-1045 (\*) - Quartz, syn -  $\text{SiO}_2$  - Y: 6.20 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/lc PDF 3.4 - S-Q 12.4 %
  - 72-1652 (C) - CALCITE -  $\text{CaCO}_3$  - Y: 7.84 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/lc PDF 3.2 - S-Q 16.8 %
  - ▲ 79-1342 (C) - Dolomite - from Eugui, Spain -  $\text{CaMg(CO}_3)_2$  - Y: 8.45 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Rhombohedral - I/lc PDF 2.5 - S-Q 22.9
  - ◆ 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate -  $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}/3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  - Y: 2.72 % - d x by: 1. - W
  - ✕ 72-0646 (C) - Ettringite -  $\text{Ca}_6(\text{Al(OH)}_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$  - Y: 5.33 % - d x by: 1. - WL: 1.54056 - Hexagonal - I/lc PDF 2.3 - S-Q 16.1 %

Difratograma 29. Análise total da argamassa do prisma de concreto 291 P, após ensaio de reatividade.

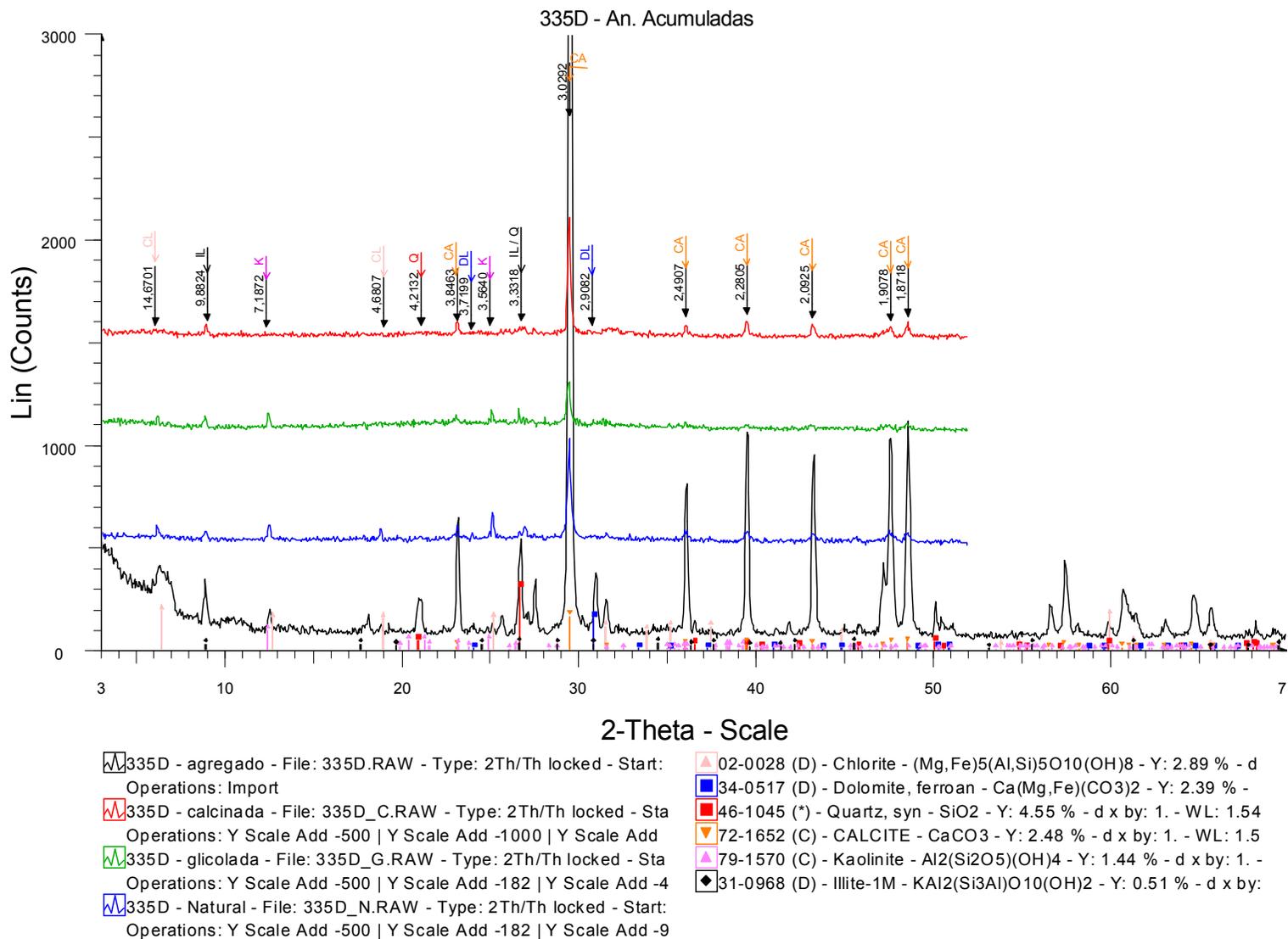


Difratograma 12. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do testemunho de concreto 335 A, da barragem.

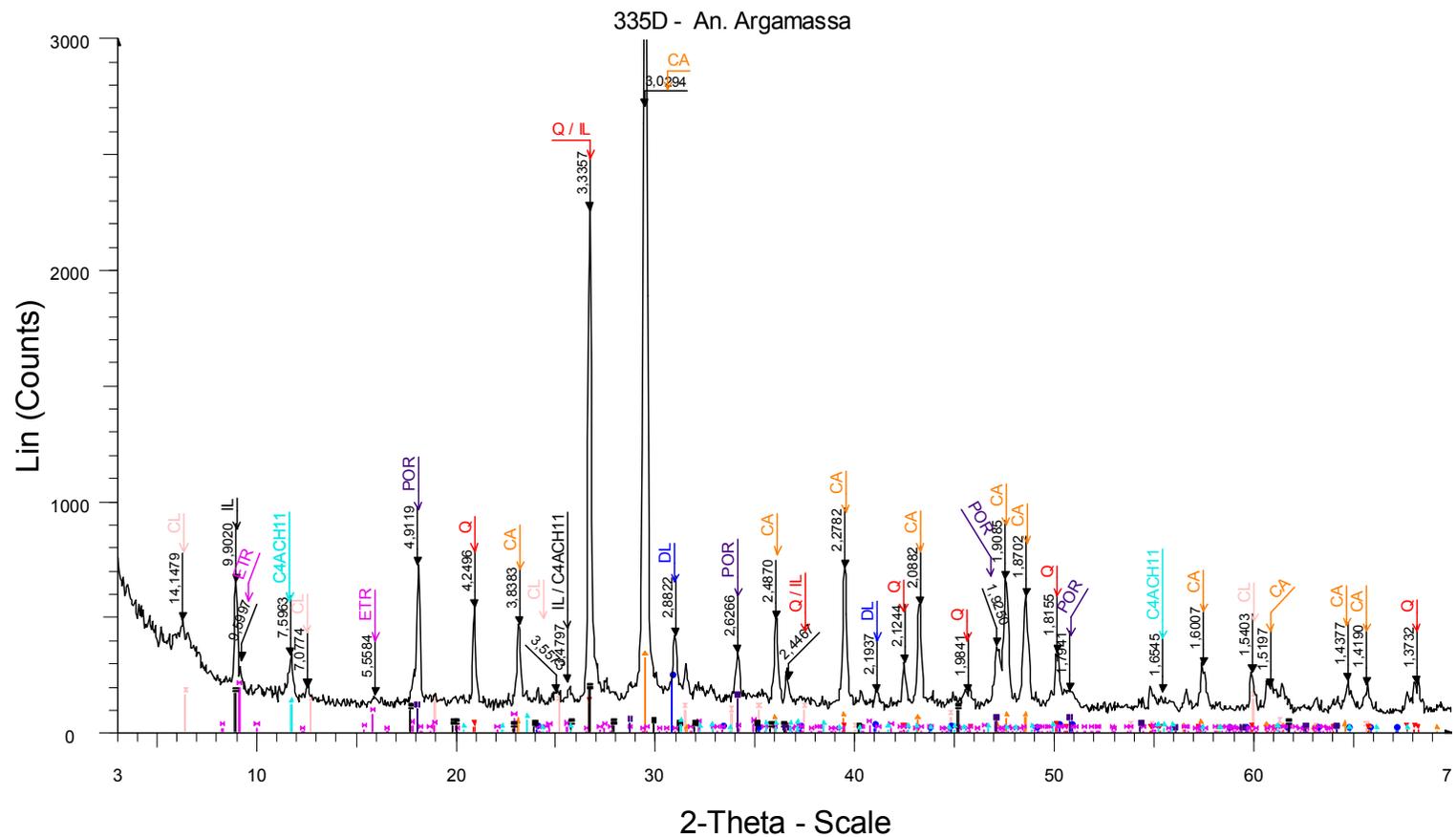


- 335A - argamassa - File: 4,0335,05\_argamassa.RAW - Type: 2Th  
 Operations: Import
- 72-1652 (C) - CALCITE -  $\text{CaCO}_3$  - Y: 4.55 % - d x by: 1. - WL: 1.5
  - 46-1045 (\*) - Quartz, syn -  $\text{SiO}_2$  - Y: 3.72 % - d x by: 1. - WL: 1.54
  - 75-1763 (C) - Dolomite -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  - Y: 3.93 % - d x by: 1. - W
  - 75-1593 (C) - Kaolinite -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  - Y: 3.31 % - d x by: 1. -
  - 26-0911 (I) - Illite-2M1 -  $(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$  - Y: 2.79 % - d
  - 04-0733 (I) - Portlandite, syn -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - Y: 2.63 % - d x by: 1. -
  - 13-0086 (N) - Saponite-15A -  $\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  - Y: 5.
  - 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate - Ca4

Difratograma 13. Análise total da argamassa do testemunho de concreto 335 A, da barragem.

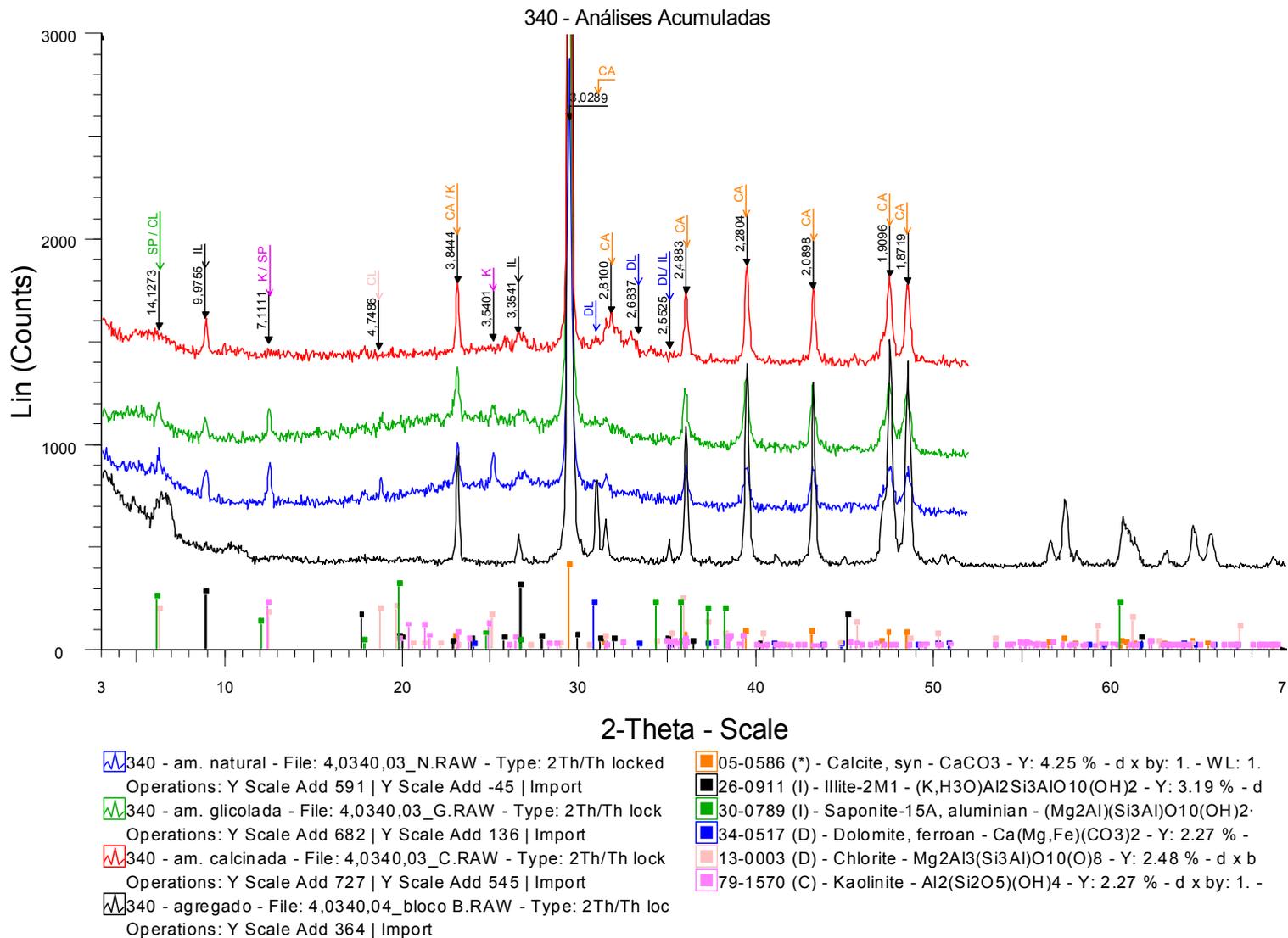


Difratograma 14. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do testemunho de concreto 335 D, da barragem.

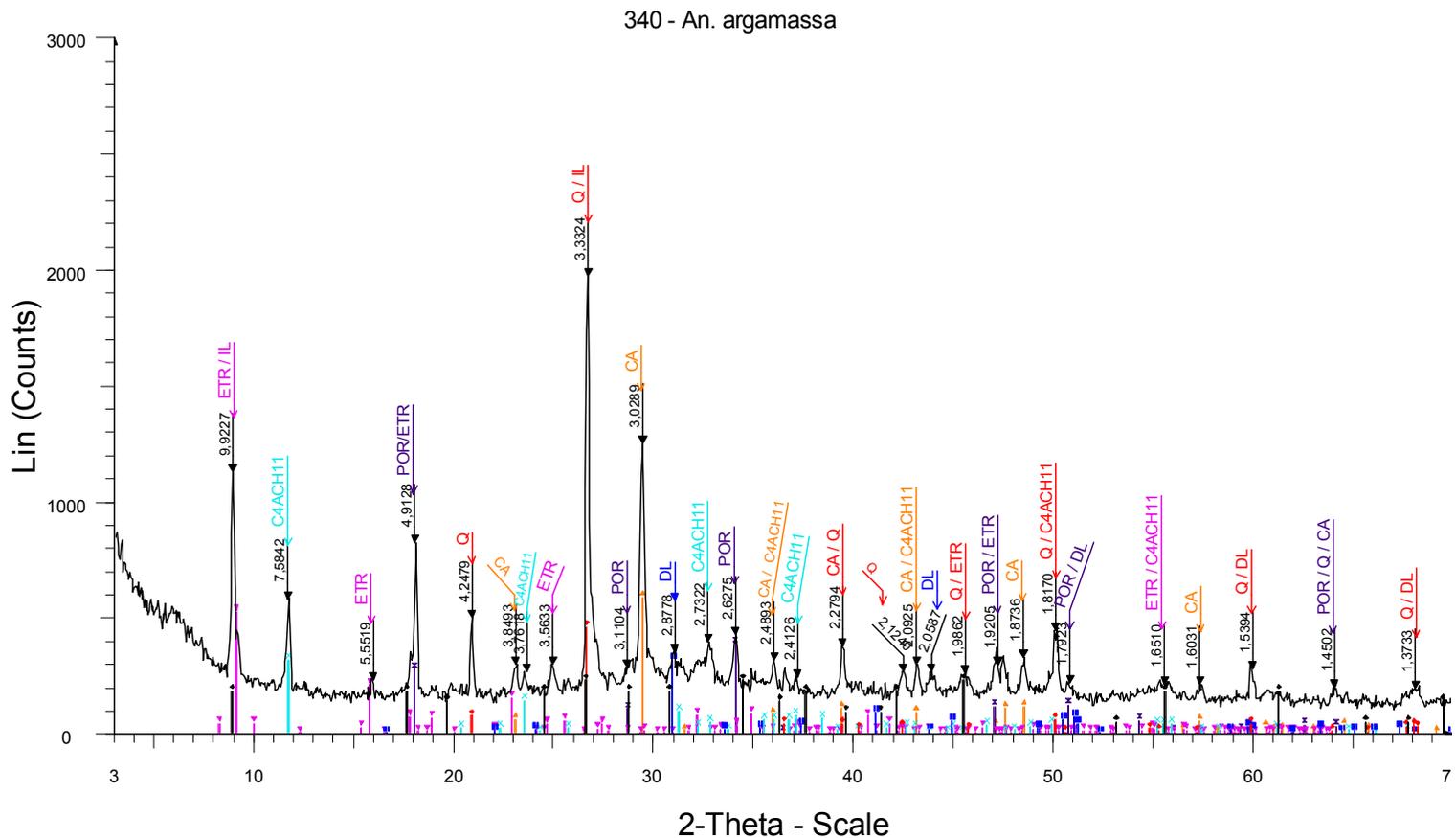


- 335D - argamassa - File: 335D\_argamassa.RAW - Type: 2Th/Th I Operations: Import
- 02-0028 (D) - Chlorite -  $(\text{Mg,Fe})_5(\text{Al,Si})_5\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  - Y: 3.75 % - d
- 34-0517 (D) - Dolomite, ferroan -  $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$  - Y: 5.37 % -
- 72-1652 (C) - CALCITE -  $\text{CaCO}_3$  - Y: 7.51 % - d x by: 1. - WL: 1.5
- 46-1045 (\*) - Quartz, syn -  $\text{SiO}_2$  - Y: 2.74 % - d x by: 1. - WL: 1.54
- 72-0646 (C) - Ettringite -  $\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$  - Y: 4.55
- 26-0911 (I) - Illite-2M1 -  $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$  - Y: 4.27 % - d
- 44-1481 (D) - Portlandite, syn -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - Y: 3.31 % - d x by: 1. -
- 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate -  $\text{Ca}_4$

Difratograma 15. Análise total da argamassa do testemunho de concreto 335 D, da barragem.

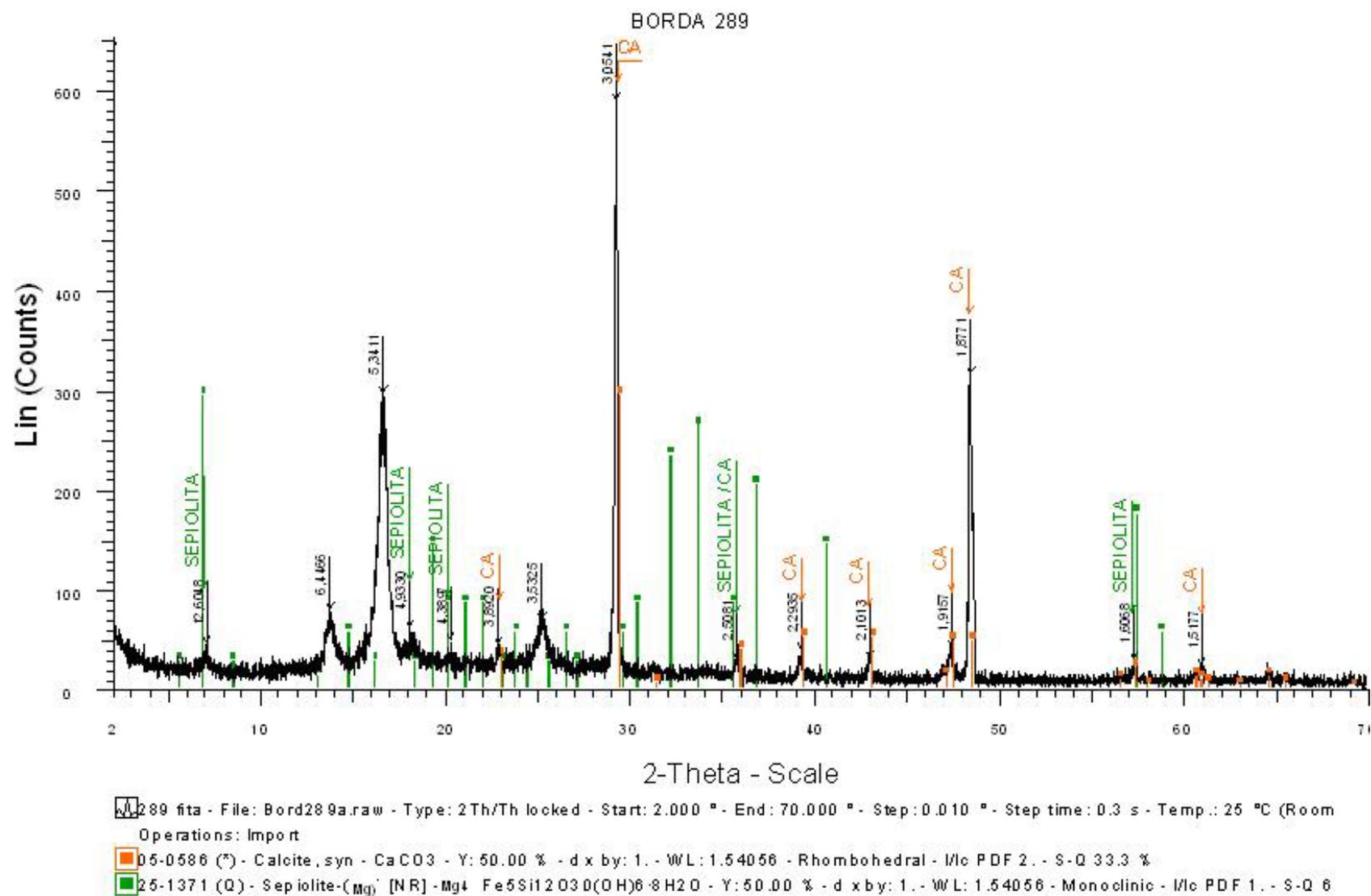


Difratograma 16. Análises total, natural, glicolada e calcinada da rocha (agregado) do testemunho de concreto 340 A, da barragem.



- 340 - Argamassa - File: 4,0340,04\_Bloco B\_argamassa.RAW - Ty ◆ 31-0968 (D) - Illite-1M -  $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$  - Y: 11.36 % - d x b  
 Operations: Import
- ▲ 72-1652 (C) - CALCITE -  $CaCO_3$  - Y: 29.55 % - d x by: 1. - WL: 1.
  - ✕ 44-1481 (D) - Portlandite, syn -  $Ca(OH)_2$  - Y: 19.32 % - d x by: 1. -
  - ▼ 72-0646 (C) - Ettringite -  $Ca_6(Al(OH)_6)_2(SO_4)_3(H_2O)_{26}$  - Y: 26.36
  - ⊗ 14-0083 (D) - Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate -  $Ca_4$
  - 75-1763 (C) - Dolomite -  $CaMg(CO_3)_2$  - Y: 15.91 % - d x by: 1. -
  - ◆ 46-1045 (\*) - Quartz, syn -  $SiO_2$  - Y: 23.14 % - d x by: 1. - WL: 1.5

Difratograma 17. Análise total da argamassa do testemunho de concreto 340 A, da barragem.



Difratograma 30. Análise total do produto neoformado, encontrado na borda do prisma de concreto 289P, após ensaio de reatividade.