

## ANEJO Nº 4

INFORME DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EFECTUADOS SOBRE SEIS MUESTRAS DE HORMIGÓN ENDURECIDO PROCEDENTES DE VIGUETAS DE LOS FORJADOS DEL INMUEBLE SITO EN LA C/ VOLCÁN FUJIYAMA (BLOQUE Nº 15) DE SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA (TENERIFE)

Peticionario: **EXCMO. AYTO. DE SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA**  
**GERENCIA DE URBANISMO**  
C/ Bencomo nº 16  
28201 SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA (Tenerife)

## INDICE

1. ANTECEDENTES .....	3
2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	4
2.1. ANÁLISIS QUÍMICO .....	5
2.2. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X .....	7
2.3. POROSIDAD Y DENSIDAD .....	9
2.4. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN .....	11
3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	13

ANEJO: ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

## 1. ANTECEDENTES

A solicitud de la GERENCIA DE URBANISMO del EXCMO. AYTO. DE SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA, el Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC) ha desarrollado un plan de actuación para el estudio de los daños observados en viguetas de los forjados del inmueble sito en la c/ Volcán Fujiyama (bloque nº 15) de San Cristóbal de La Laguna (Tenerife).

En fecha 18 de marzo de 2009 se recibieron en el Laboratorio Central de INTEMAC, seis muestras de hormigón endurecido en fragmentos, procedentes de viguetas de los forjados objeto de estudio, que fueron extraídas bajo la supervisión de personal técnico del Área de Rehabilitación y Patología de la Construcción de INTEMAC, e identificadas con las designaciones indicadas a continuación:

MUESTRA	DESCRIPCIÓN
M-1	Vigueta en techo de planta 4ª - Cuarto de baño 4º izq. (Bloque 15)
M-5	Vigueta en techo de planta 2ª - Salón 2º dcha. (Bloque 15)
M-6	Vigueta en techo de planta 3ª - Dormitorio 3º izq. (Bloque 15)
M-7	Vigueta en techo de planta baja - Zona izq. (próxima a portal) del local dcho.
M-8	Vigueta en techo de planta baja - Zona dcha. del local dcho.
M-11	Vigueta en techo de planta 3ª - Cuarto de baño 3º izq. (Bloque 15)

Sobre las muestras anteriormente mencionadas se ha procedido a la realización de las actividades indicadas seguidamente, de acuerdo con la solicitud efectuada por personal del Área de Rehabilitación y Patología de la Construcción de INTEMAC.

- Preparación, molturación, homogeneización y tamizado de las muestras recibidas
- Determinación del tipo de conglomerante, mediante análisis químico, según procedimiento interno M.2.01.06.Ed.7<sup>(\*)</sup> y UNE-EN 196-2:2006
- Análisis cualitativo de fases cristalinas mediante difracción de Rayos X<sup>(\*\*)</sup>
- Porosidad y densidad, según ASTM C-642:2006
- Determinación del frente de carbonatación con fenolftaleína, según UNE 112011:1994, y medición aproximada del pH, mediante disolución de material molturado de la muestra en etanol absoluto y tinción del sobrenadante con indicadores ácido-base

Los ensayos a que se refiere el presente informe han sido realizados en el Laboratorio Central de INTEMAC, situado en la C/ Bronce, 26 y 28, en Torrejón de Ardoz (Madrid), en el período comprendido entre el 23 de marzo y el 20 de abril de 2009.

## 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos citados en el apartado anterior, excepto los difractogramas de rayos X, que aparecen recogidos en el Anejo. Dichos resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas.

---

<sup>(\*)</sup> Manual de Instrucciones Técnicas de INTEMAC: M.2.01.06.Ed.7: Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico.

<sup>(\*\*)</sup> Ensayo efectuado por el Servicio de Rayos X del INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA JAUME ALMERA (ICTJA) del CSIC (Informes nº EX204099 a EX204104 de fecha 17/04/2009).

## 2.1. ANÁLISIS QUÍMICO

Se efectuó sobre muestra procesada en machacadora de mandíbulas y posteriormente molturada en mortero de ágata hasta tamaño de grano inferior a 80  $\mu\text{m}$ , homogeneizada y desecada a 105° C. Las determinaciones analíticas se realizaron de acuerdo con el método descrito en el procedimiento interno M.2.01.06.Ed.7, salvo la pérdida por calcinación y el contenido en trióxido de azufre, efectuados según norma UNE-EN 196-2:2006. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

### Muestra M-1: Vigüeta en techo de planta 4ª - Cuarto de baño 4º izq. (Bloque 15)

– Pérdida por calcinación (%) .....	6,90
– Sílice y residuo insoluble ( $\text{SiO}_2 + \text{RI}$ ) (%) .....	60,9
– Oxido de aluminio (III) ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%) .....	10,69
– Oxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%) .....	5,55
– Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) (%) .....	6,3
– Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) (%) .....	0,14

### Muestra M-5: Vigüeta en techo de planta 2ª - Salón 2º dcha. (Bloque 15)

– Pérdida por calcinación (%) .....	7,71
– Sílice y residuo insoluble ( $\text{SiO}_2 + \text{RI}$ ) (%) .....	59,7
– Oxido de aluminio (III) ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%) .....	11,72
– Oxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%) .....	5,26
– Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) (%) .....	7,4
– Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) (%) .....	0,12

**Muestra M-6: Vigüeta en techo de planta 3ª - Dormitorio 3º izq. (Bloque 15)**

- Pérdida por calcinación (%) .....	8,12
- Sílice y residuo insoluble (SiO <sub>2</sub> + RI) (%) .....	55,5
- Oxido de aluminio (III) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	12,35
- Oxido de hierro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	5,77
- Oxido de calcio (CaO) (%) .....	10,3
- Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (%) .....	0,11

**Muestra M-7: Vigüeta en techo de planta baja - Zona izq. (próxima a portal) del local dcho.**

- Pérdida por calcinación (%) .....	7,15
- Sílice y residuo insoluble (SiO <sub>2</sub> + RI) (%) .....	60,7
- Oxido de aluminio (III) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	11,11
- Oxido de hierro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	5,47
- Oxido de calcio (CaO) (%) .....	5,8
- Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (%) .....	0,16

**Muestra M-8: Vigüeta en techo de planta baja - Zona dcha. del local dcho.**

- Pérdida por calcinación (%) .....	8,65
- Sílice y residuo insoluble (SiO <sub>2</sub> + RI) (%) .....	61,4
- Oxido de aluminio (III) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	10,84
- Oxido de hierro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	6,04
- Oxido de calcio (CaO) (%) .....	6,5
- Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (%) .....	0,12

## Muestra M-11: Vigueta en techo de planta 3ª - Cuarto de baño 3º izq. (Bloque 15)

– Pérdida por calcinación (%) .....	8,59
– Sílice y residuo insoluble (SiO <sub>2</sub> + RI) (%) .....	60,1
– Oxido de aluminio (III) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	11,22
– Oxido de hierro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%) .....	5,68
– Oxido de calcio (CaO) (%) .....	6,6
– Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (%) .....	0,17

## 2.2. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se efectuó sobre muestra molturada y tamizada hasta separación y eliminación del árido grueso. La fracción fina resultante fue cribada cuidadosamente por el tamiz de 0,045 mm de luz de malla, para proceder a su enriquecimiento en conglomerante. El material enriquecido fue cuarteado y homogeneizado sin aplicar ningún tratamiento de secado.

Las muestras preparadas fueron remitidas al Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera (ICTJA) del CSIC, para proceder a su análisis cualitativo de fases cristalinas mediante difracción de Rayos X<sup>(\*)</sup>.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos, con el listado de los compuestos cristalinos obtenidos por Difracción de Rayos X de las sales analizadas, ordenados según la intensidad de los picos.

Los difractogramas correspondientes se adjuntan en el Anejo.

(\*) Ensayo efectuado por el Servicio de Rayos X del INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA JAUME ALMERA (ICTJA) del CSIC (Informes nº EX204099 a EX204104 de fecha 17/04/2009).

Muestra M-1:  
Vigueta en techo de planta 4ª.  
Cuarto de baño 4º izq.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$

Muestra M-5:  
Vigueta en techo de planta 2ª.  
Salón 2º dcha.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$

Muestra M-6:  
Vigueta en techo de planta 3ª.  
Dormitorio 3º izq.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$

Muestra M-7:  
Vigueta en techo de planta baja.  
Zona próxima a portal, local dcho.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$   
 Yeso -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Muestra M-8:  
Vigueta en techo de planta baja.  
Zona dcha. del local dcho.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$

Muestra M-11:  
Vigueta en techo de planta 3ª.  
Cuarto de baño 3º izq.

Aragonito -  $\text{CaCO}_3$   
 Calcita -  $\text{CaCO}_3$   
 Gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Bayerita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$   
 Augita -  $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Anortita -  $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$   
 Larnita -  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$   
 Cuarzo -  $\text{SiO}_2$



## 2.3. POROSIDAD Y DENSIDAD

Seguidamente se exponen los resultados de los ensayos de porosidad accesible al agua, absorción de agua y densidad aparente, efectuados siguiendo el procedimiento operatorio descrito en la norma ASTM C 642-2006<sup>(\*)</sup>.

### Muestra M-1: Vigüeta en techo de planta 4ª - Cuarto de baño 4º izq. (Bloque 15)

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	243,5
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	252,7
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	254,1
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	162,8
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	3,77
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>4,34</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,67</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,77
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,78
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>3,02</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>11,6</b>

### Muestra M-5: Vigüeta en techo de planta 2ª - Salón 2º dcha. (Bloque 15)

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	99,8
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	105,8
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	106,4
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	66,3
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	5,98
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>6,52</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,49</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,64
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,65
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,97</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>16,2</b>

(\*) Debido a la cantidad de material disponible no pudo ser efectuado el ensayo sobre fragmentos de material de aproximadamente 800 g por cada muestra, como recomienda el procedimiento de ensayo.

**Muestra M-6: Vigüeta en techo de planta 3ª - Dormitorio 3º izq. (Bloque 15)**

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	212,9
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	226,3
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	227,6
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	141,6
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	6,31
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>6,93</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,47</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,63
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,65
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,99</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>17,1</b>

**Muestra M-7: Vigüeta en techo de planta baja - Zona izq. (próxima a portal) local dcho.**

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	238,1
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	248,3
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	249,3
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	157,8
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	4,27
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>4,68</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,60</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,71
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,72
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,96</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>12,2</b>

**Muestra M-8: Vigüeta en techo de planta baja - Zona dcha. del local dcho.**

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	120,2
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	127,8
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	128,5
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	79,7
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	6,30
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>6,87</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,46</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,62
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,63
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,97</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>16,9</b>

**Muestra M-11: Vigüeta en techo de planta 3ª - Cuarto de baño 3º izq. (Bloque 15)**

Peso de la muestra desecada a 105°C (g) .....	148,7
Peso de la muestra saturada a 20°C, superficie seca (g) .....	155,4
Peso de la muestra hervida 5 horas, superficie seca (g) .....	156,1
Peso de la muestra hervida, sumergida en agua (g) .....	98,7
Absorción después de inmersión a 20°C (%) .....	4,48
<b>Absorción después de inmersión tras ebullición (%) .....</b>	<b>4,94</b>
<b>Peso unitario, seco (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,59</b>
Peso unitario, tras inmersión (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,71
Peso unitario, tras inmersión y ebullición (g/cm <sup>3</sup> ) .....	2,72
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) .....</b>	<b>2,97</b>
<b>Porosidad accesible al agua (%) .....</b>	<b>12,8</b>

**2.4. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN**

Las muestras seleccionadas para la realización de esta determinación fueron fragmentadas para obtener una cara de rotura perpendicular a las superficies de acabado exterior.

Sobre las caras de fractura resultantes, impregnadas con una disolución alcohólica de fenoltaleína, se determinó la profundidad de carbonatación mediante medida directa del espesor de la superficie incolora, según UNE 112011:1994.

El frente de carbonatación determinado en las seis muestras analizadas correspondía a la sección íntegra de la cara de fractura.

Debido a ello, y por tratarse de hormigón fabricado con cemento aluminoso, se procedió a preparar dos porciones de material molido de cada muestra, sobrantes del obtenido para la realización del análisis químico. Por cada porción se ha obtenido una alícuota en forma de extracto alcohólico de cada muestra mediante disolución y agitación durante 30 minutos en etanol absoluto (en proporción 1:10 en peso, material granular:etanol).

En una de las dos alícuotas de cada muestra, sobre el sobrenadante de cada extracto alcohólico se vertieron varias gotas de una disolución de 3-nitrofenol (al 0,3% en agua), indicador ácido-base que vira entre 6,6 y 8,6 uds. de pH de incoloro a amarillo.

En la otra alícuota, sobre el sobrenadante se vertieron varias gotas de una disolución de fenolftaleína (al 1% en etanol al 70%), indicador ácido-base que vira entre 8,2 y 9,8 uds. de pH de incoloro a violeta rojizo.

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos con los indicadores de pH en los extractos alcohólicos:

Muestra	Coloración del extracto con fenolftaleína	Coloración del extracto con 3-nitrofenol
M-1	Incoloro	Amarillo pálido
M-5	Incoloro	Amarillo pálido
M-6	Incoloro	Amarillo pálido
M-7	Incoloro	Amarillo pálido
M-8	Incoloro	Amarillo pálido
M-11	Incoloro	Amarillo pálido

De los valores obtenidos se deduce que el pH de la pasta de cemento hidratada se encuentra comprendido entre 7 y 8 uds.

### **3. INTERPRETACION DE RESULTADOS**

En los apartados anteriores se han expuesto los resultados obtenidos en los ensayos efectuados sobre seis muestras de hormigón extraídas de las viguetas objeto de estudio. Del análisis de los citados resultados pueden establecerse, entre otras, las consideraciones técnicas y comentarios siguientes:

En relación a los resultados del análisis químico, efectuado para determinar el tipo de conglomerante empleado en la fabricación del hormigón de las muestras objeto de estudio y la dosificación de cemento empleada, los valores obtenidos están referidos a la muestra sin enriquecer en conglomerante (polvo resultante del machaqueo, cuarteo, molienda, homogeneización y secado de la muestra original), tratada con ácido clorhídrico y cloruro amónico para obtener el extracto acuoso para análisis.

De los resultados obtenidos se deduce que en la fabricación del hormigón de las muestras de viguetas ensayadas se empleó cemento aluminoso como conglomerante.

Los valores obtenidos en los análisis efectuados por difracción de rayos X sobre las muestras enriquecidas en conglomerante, ponen de manifiesto que en la fabricación del hormigón se han empleado como áridos rocas ígneas plutónicas (augita y anortita).

El empleo como árido de anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), feldespatos de la familia de las plagioclasas, soluble en ácido, distorsiona el contenido de óxido de aluminio (III) ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) en los análisis químicos efectuados, incrementando estos parámetros (que habitualmente corresponderían únicamente al cemento) en función de la contribución ponderal de este tipo de árido, lo que no permite calcular el contenido de cemento en el hormigón a partir de los valores de los análisis químicos de las muestras.

La elevada densidad de los áridos empleados y la porosidad derivada de su origen volcánico, en especial la augita (con una densidad de  $3,4 \text{ kg/dm}^3$ ) distorsiona al alza los resultados de porosidad y densidad de estos hormigones, de modo que no resulta factible obtener información cualitativa sobre el proceso de conversión cristalina<sup>(\*)</sup> del cemento aluminoso a partir de los valores de porosidad obtenidos sobre las muestras.

El análisis por difracción de rayos X de las muestras analizadas pone de manifiesto la presencia de gibbsita y bayerita, lo que confirma la utilización de cemento aluminoso, pero en los difractogramas no se detectan fases correspondientes a los aluminatos cálcicos hexagonales, por lo que se puede deducir que el proceso de conversión cristalina se ha desarrollado de forma generalizada<sup>(\*\*)</sup>.

Tampoco se ha detectado la presencia de katoíta (aluminato tricálcico cúbico) originada por la transformación de los aluminatos hexagonales, lo cual suele ser habitual puesto que, normalmente, la katoíta se carbonata fácilmente, dado que una vez que los aluminatos se han transformado en la fase cúbica, el hormigón resulta mucho más poroso y accesible a una rápida carbonatación, lo que produce el descenso de pH y, por tanto, la pérdida de la reserva alcalina del hormigón. Este efecto, al quedar las armaduras despasivadas, posibilita su oxidación si las condiciones de humedad son las adecuadas para que se desencadenen los procesos de corrosión.

Las medidas de los extractos de las muestras objeto de estudio con indicadores de pH son significativas de que el hormigón ha perdido su reserva alcalina en todos los casos analizados, lo que confirma que la pasta de cemento se encuentra

---

<sup>(\*)</sup> La hidratación del cemento aluminoso da lugar a aluminatos cálcicos hidratados cristalizados en fases hexagonales, que pueden transformarse, por estabilidad termodinámica y por otros factores que lo favorecen (intrínsecos o de exposición ambiental), en aluminatos cálcicos cúbicos, muchos más estables. De igual modo, durante este proceso, el gel de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) formado inicialmente tiende a estabilizarse en forma de gibbsita cristalina ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

Este proceso de conversión cristalina de los aluminatos monocálcicos y bicálcicos hidratados hexagonales dando lugar a aluminatos tricálcicos cúbicos, lleva asociado una liberación de agua de cristalización, lo que supone un cambio en la microestructura de la pasta de cemento hidratado, que da lugar a un incremento importante de la porosidad del hormigón y a una merma significativa de su resistencia mecánica.

<sup>(\*\*)</sup> Para una identificación complementaria de las fases residuales presentes, obteniendo así datos adicionales sobre el grado de transformación de los aluminatos, se hubiera podido proceder al estudio de las muestras por análisis térmico diferencial, si bien los datos aportados hubieran sido meramente cualitativos.

carbonatada (a su vez se han detectado fases de carbonatos cálcicos en todas las muestras procesadas por difracción de rayos X).

Debido a ello, aunque tanto la conversión cristalina de los aluminatos cálcicos como la posterior carbonatación de la pasta de cemento se habrían producido en un grado similar en todas las muestras ensayadas, la corrosión de las armaduras se habrá visto acrecentada en aquellas localizaciones en las que las condiciones de humedad sean las más favorables para el desarrollo del proceso de oxidación, de modo que la extensión y magnitud de los daños por corrosión (superficie de las áreas afectadas, cuantificación de las pérdidas de sección del acero, desprendimientos del hormigón de recubrimiento de las armaduras ...) en unas u otras zonas serán principalmente función de su nivel de exposición.

Este informe consta de 15 páginas numeradas y selladas, y de un Anejo de 7 páginas.

Torrejón de Ardoz (Madrid), 24 de Abril de 2009.

EL JEFE DE LA SECCION DE  
ENSAYOS QUIMICOS

EL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE QUIMICA  
Y TECNOLOGIA DE LOS MATERIALES

Silvia Grandes Velasco  
Lda. en Ciencias Químicas

Pedro López Sánchez  
Ldo. en Ciencias Químicas

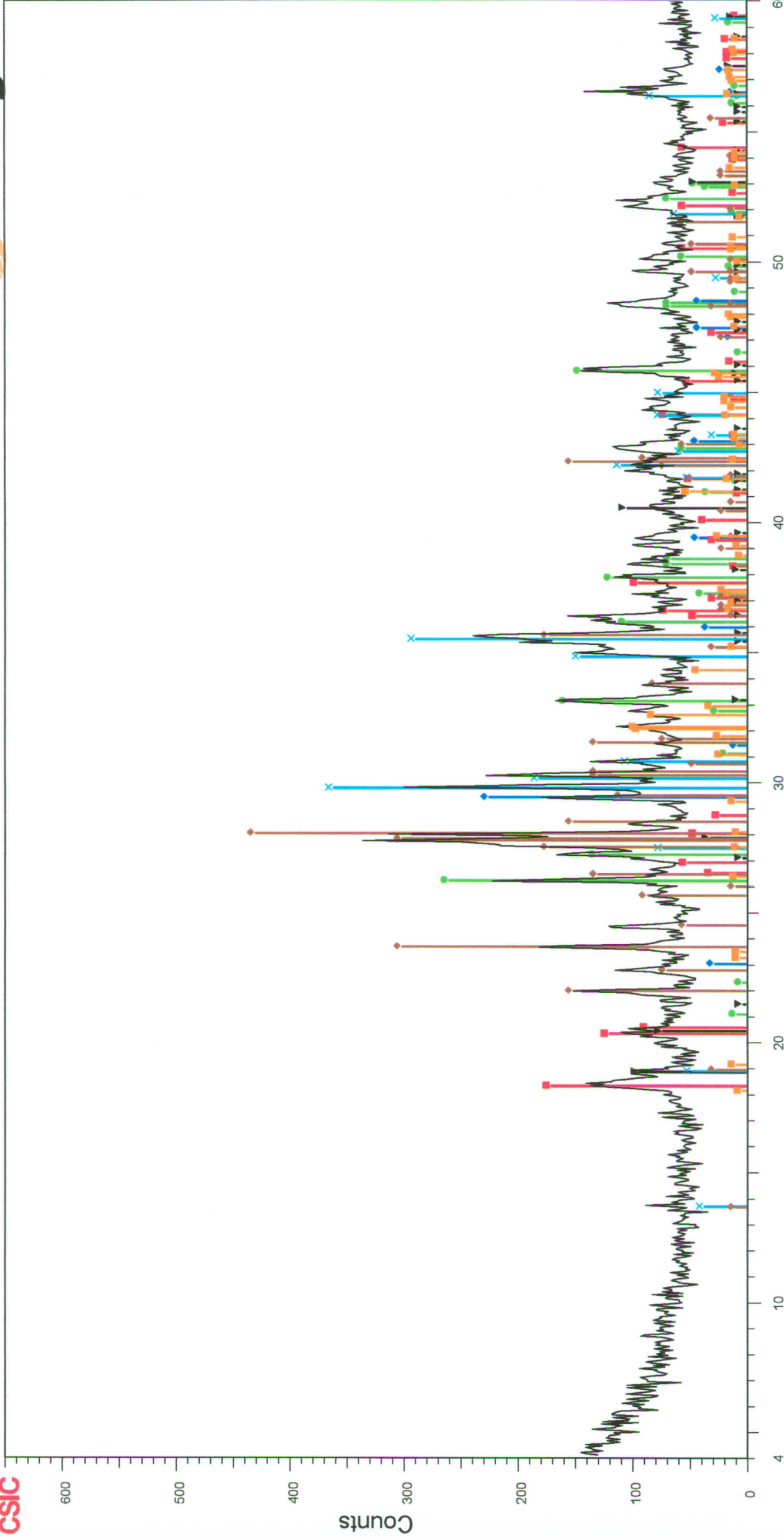
VºBº  
EL DIRECTOR DEL LABORATORIO  
CENTRAL

Jaime A. Fernández Gómez  
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos









## ANEXO

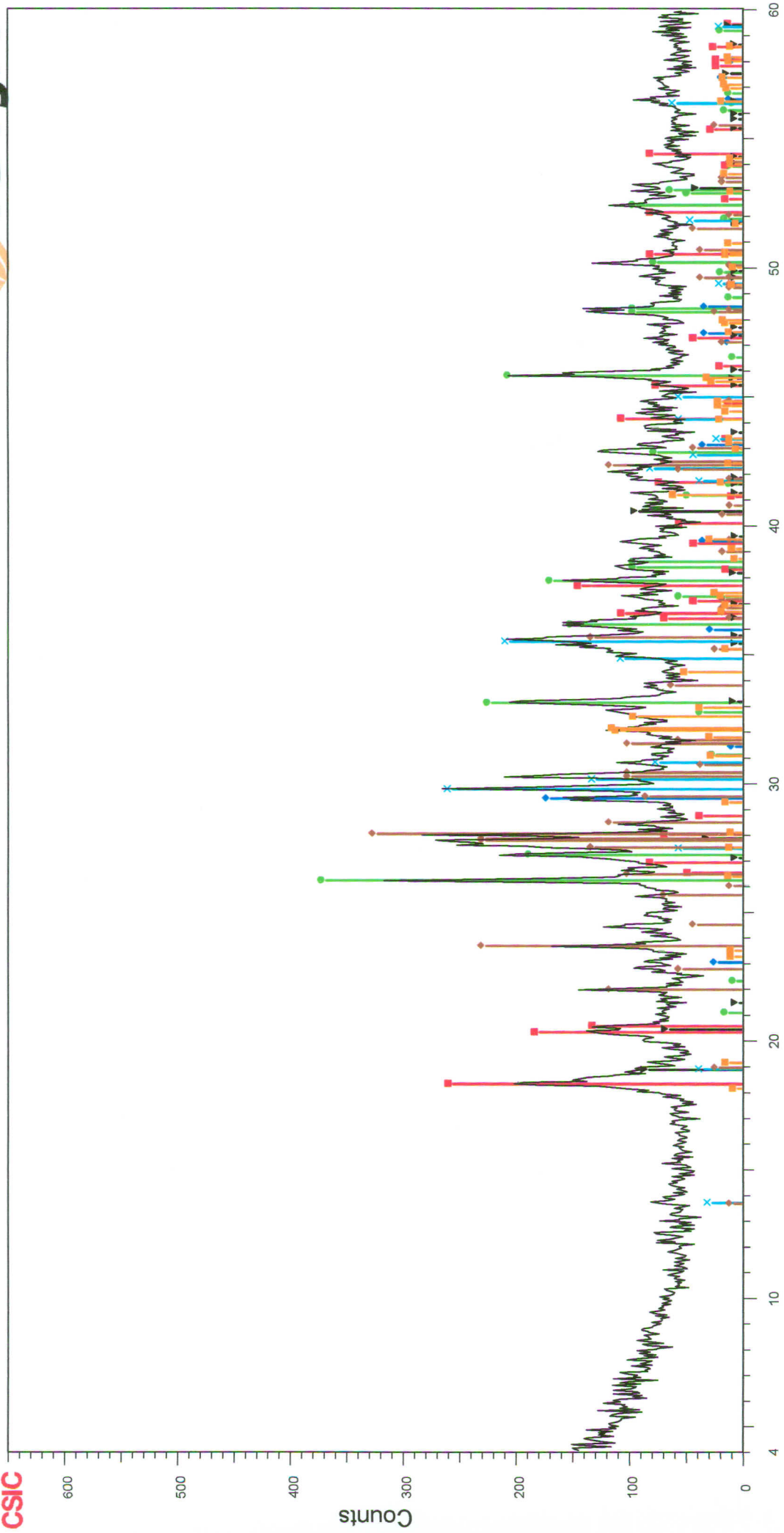
### ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X





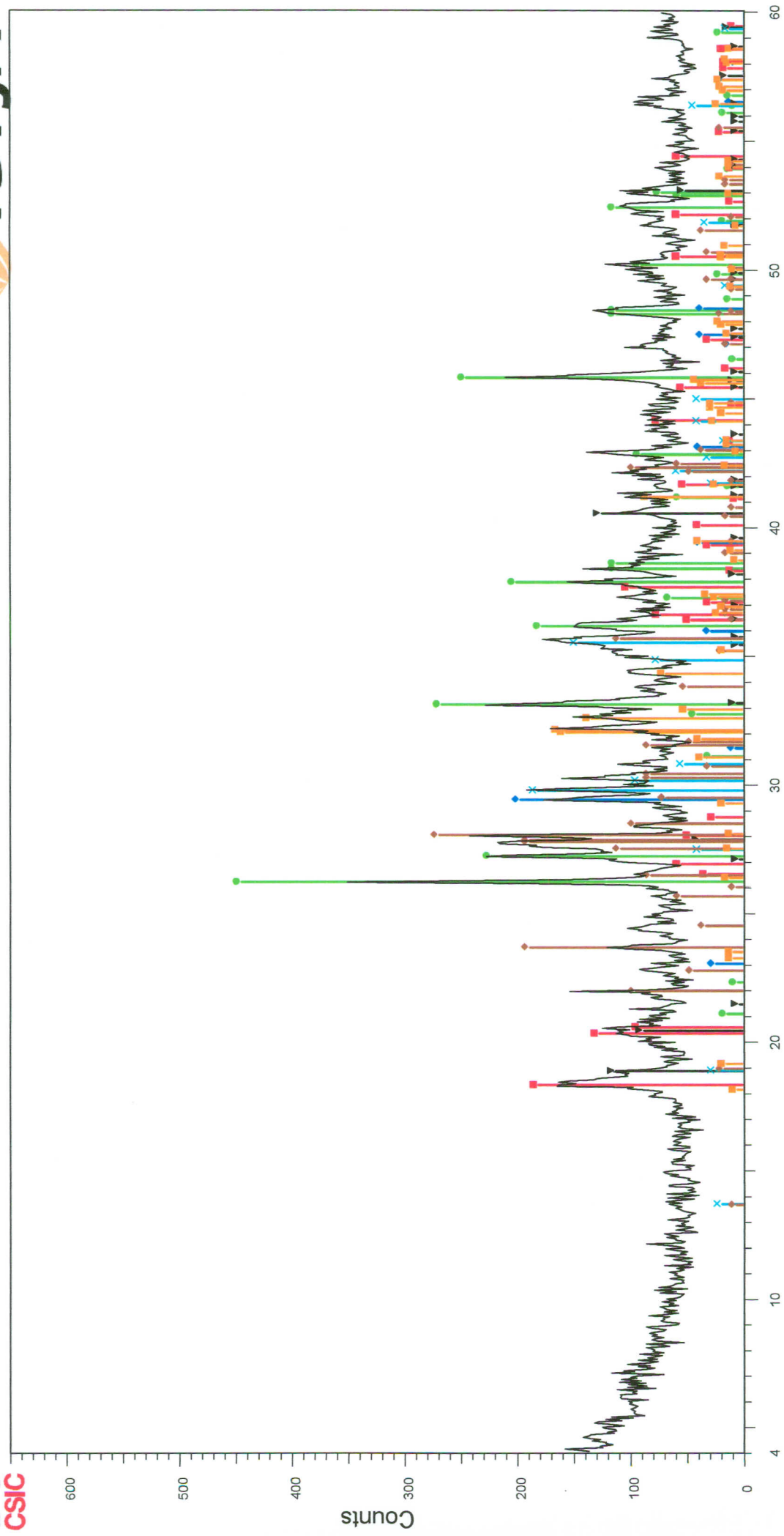
### 2 Theta

-  Internac. Ref. 471GV-1 - File: EX204099.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.052 ° - End: 60.045 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira
-  00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3
-  00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3
-  00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3
-  00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3
-  00-024-0201 (I) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6
-  00-018-1202 (I) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,Al)4O8
-  00-033-0302 (\*) - Larnite, syn - Ca2SiO4

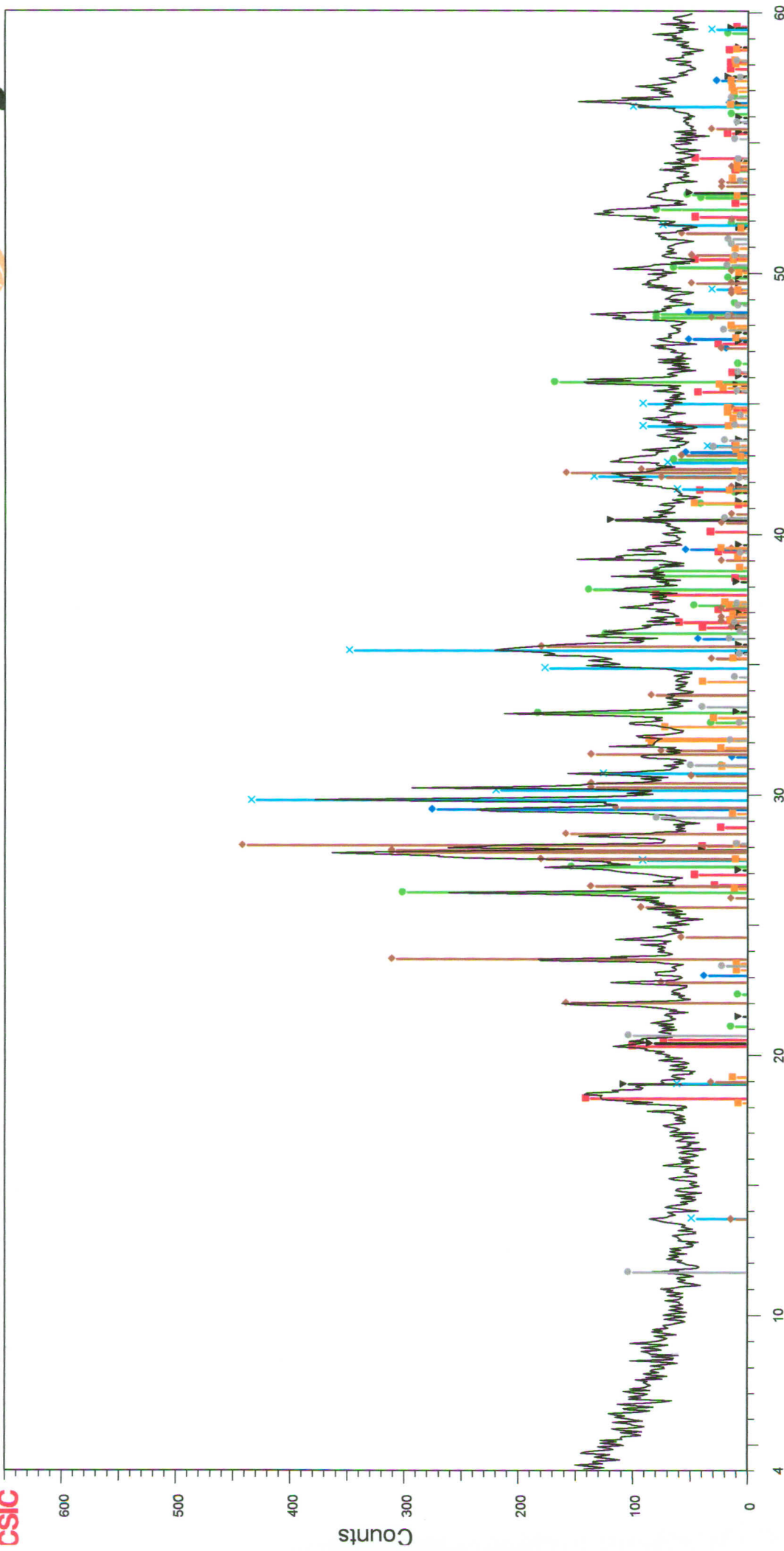


### 2 Theta

- ▣ Internac. Ref. 471GV-5 - File: EX204100.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira
- 00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3
- ◆ 00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3
- 00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3
- ▼ 00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3
- ⊠ 00-024-0201 (I) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6
- ◆ 00-018-1202 (I) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,AI)4O8
- 00-033-0302 (\*) - Larnite, syn - Ca2SiO4

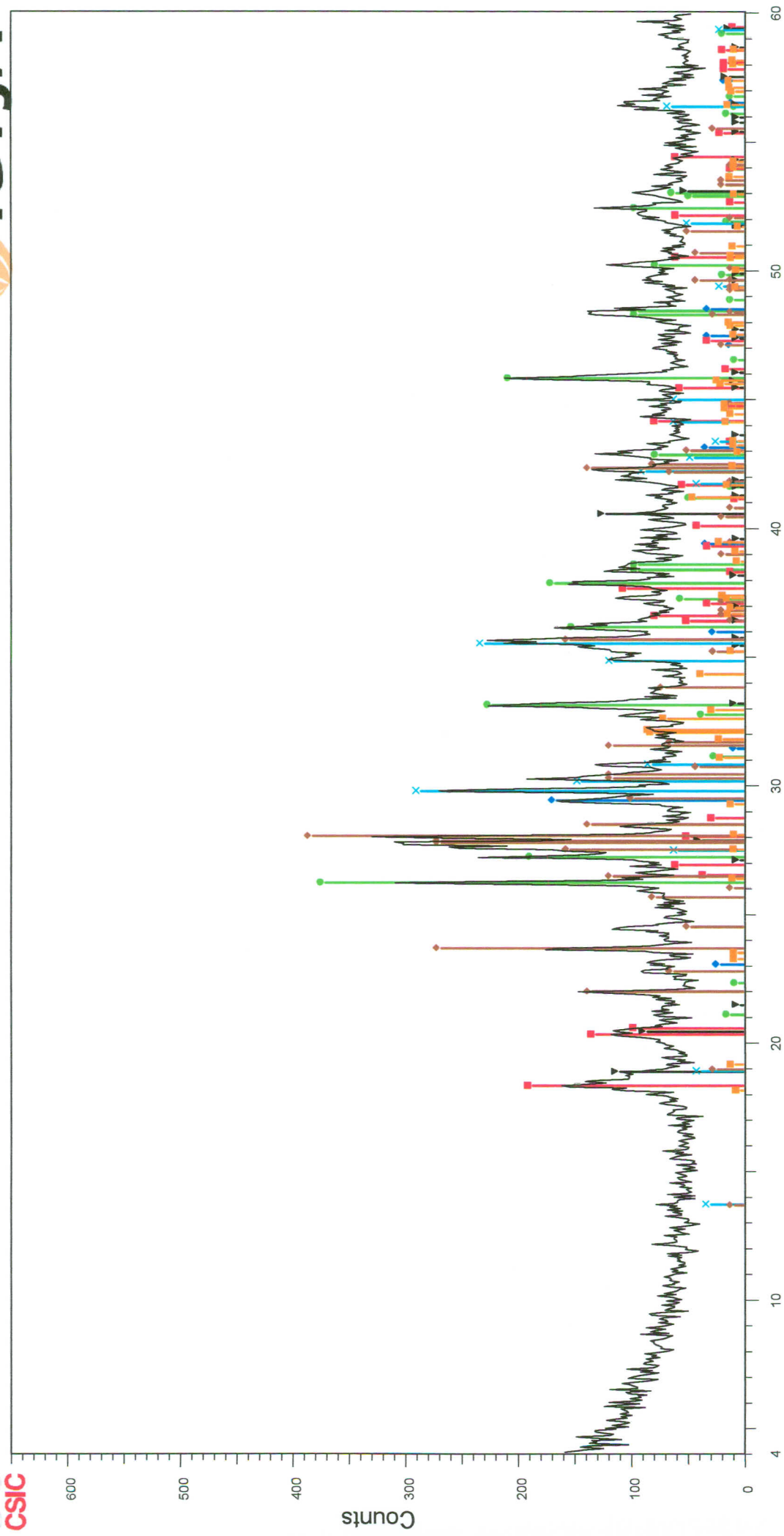


Intermac. Ref. 471GV-6 - File: EX204101.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira  
 00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3  
 00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3  
 00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3  
 00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3  
 00-024-0201 (I) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6  
 00-018-1202 (I) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,Al)4O8  
 00-033-0302 (\*) - Larnite, syn - Ca2SiO4

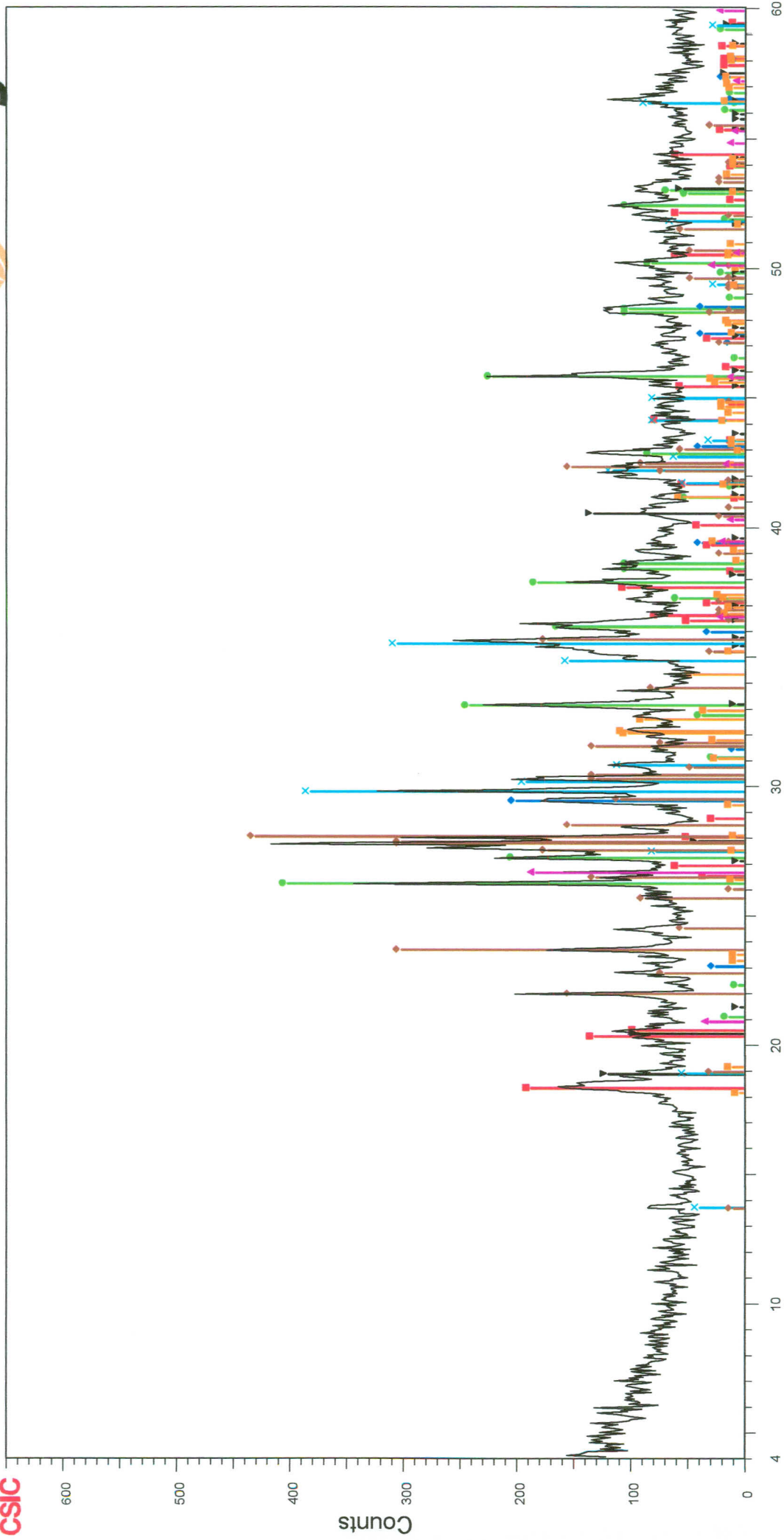


### 2 Theta

- ▬ Internac. Ref. 471GV-7 - File: EX204102.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira
- 00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3
- ◆ 00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3
- 00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3
- ▼ 00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3
- ⊠ 00-024-0201 (I) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6
- ◆ 00-018-1202 (I) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,Al)4O8
- 00-033-0302 (\*) - Lamite, syn - Ca2SiO4
- 00-033-0311 (\*) - Gypsum, syn - CaSO4·2H2O



Intermac. Ref. 471GV-8 - File: EX204103.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira  
 00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3  
 00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3  
 00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3  
 00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3  
 00-024-0201 (I) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6  
 00-018-1202 (I) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,Al)4O8  
 00-033-0302 (\*) - Larnite, syn - Ca2SiO4



- ▲ Internac. Ref. 471GV-11 - File: EX204104.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 4.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 6. s - Operator: Josep Elvira  
● 00-041-1475 (\*) - Aragonite - CaCO3  
◆ 00-005-0586 (\*) - Calcite, syn - CaCO3  
■ 00-033-0018 (l) - Gibbsite, syn - Al(OH)3  
▼ 00-020-0011 (l) - Bayerite, syn - Al(OH)3  
× 00-024-0201 (l) - Augite - Ca(Fe,Mg)Si2O6  
◆ 00-018-1202 (l) - Anorthite, Na-rich, intermediate - (Ca,Na)(Si,Al)4O8  
■ 00-033-0302 (\*) - Larnite, syn - Ca2SiO4  
▲ 00-046-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO2