

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 983 126**

51 Int. Cl.:

B28C 7/02 (2006.01)

C04B 40/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.11.2015 PCT/CA2015/051220**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.06.2016 WO16082030**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.11.2015 E 15862209 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2024 EP 3224012**

54 Título: **Método para carbonatar una mezcla de hormigón y aparato para la adición de dióxido de carbono**

30 Prioridad:

24.11.2014 US 201462083784 P
01.12.2014 US 201462086024 P
23.12.2014 US 201462096018 P
10.04.2015 US 201562146103 P
30.04.2015 US 201514701456
12.05.2015 US 201562160350 P
22.05.2015 US 201562165670 P
13.10.2015 US 201562240843 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.10.2024

73 Titular/es:

CARBONCURE TECHNOLOGIES INC. (100.0%)
161 Joseph Zatzman Drive
Dartmouth, Nova Scotia B3B 1M7, CA

72 Inventor/es:

MONKMAN, GEORGE SEAN;
CAIL, KEVIN;
SANDBERG, PAUL J.;
MACDONALD, MARK;
BROWN, JOSHUA JEREMY y
FORGERON, DEAN PAUL

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 983 126 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para carbonatar una mezcla de hormigón y aparato para la adición de dióxido de carbono

5 **Antecedentes**

Las mezclas de cemento, tales como las mezclas de hormigón, se utilizan en multitud de composiciones y procedimientos en todo el mundo. Además, los gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono, son una preocupación creciente en todo el mundo. Existe la necesidad de un método y composiciones para poner en contacto mezclas de cemento con dióxido de carbono y para mezclas de cemento que contengan dióxido de carbono incorporado y productos de carbonatación.

Sumario de la invención

15 En un aspecto, la invención proporciona un método.

La invención proporciona un método para carbonatar una mezcla de hormigón que comprende un tipo de cemento que comprende administrar una dosis de dióxido de carbono a la mezcla de hormigón mientras se mezcla en una mezcladora, en donde la administración del dióxido de carbono comienza en los 3 min siguientes al inicio del mezclado de la mezcla de hormigón, en donde la duración de la administración del dióxido de carbono es menor o igual a 5 min, en donde la dosis de dióxido de carbono es del 0,01-1,0 % en peso de cemento (pdc), en donde el dióxido de carbono se administra como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso, y en donde el flujo del dióxido de carbono sólido y gaseoso se modula para ralentizar el flujo, de modo que las partículas de dióxido de carbono sólido se aglomeren en partículas más grandes. En ciertas realizaciones, la administración del dióxido de carbono comienza en el minuto siguiente al inicio del mezclado de la mezcla de hormigón. La mezcladora puede ser cualquier mezcladora adecuada, tal como una mezcladora estacionaria o una mezcladora transportable; en ciertas realizaciones, la mezcladora comprende una mezcladora transportable, por ejemplo, un tambor de un camión hormigonera. En ciertas realizaciones, la dosis de dióxido de carbono se basa en pruebas previas de una pluralidad de dosis de dióxido de carbono en una pluralidad de mezclas de prueba, en donde las mezclas de prueba comprenden el tipo de cemento de la mezcla de hormigón, por ejemplo, se pueden utilizar al menos tres dosis de prueba de dióxido de carbono en las pruebas previas. En ciertas realizaciones, la pluralidad de dosis de dióxido de carbono utilizadas en las pruebas previas son todas del 0,01-1,0 % en pdc. El dióxido de carbono puede administrarse a través de un conducto a la superficie del hormigón de la mezcla, por ejemplo, un conducto situado a una media de 5-200 cm de la superficie del hormigón de la mezcla. En la invención, el dióxido de carbono se administra como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso.

En otro aspecto, la invención proporciona aparatos. En particular, la invención proporciona un aparato para la adición de dióxido de carbono a una mezcla que comprende cemento hidráulico mediante el método descrito anteriormente, en donde el dióxido de carbono comprende una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso, comprendiendo el aparato: (i) una mezcladora para mezclar la mezcla de cemento; (ii) un sistema para administrar el dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento, en donde el sistema comprende un conducto que conecta operativamente la fuente y la mezcladora, un sistema dosificador para dosificar el flujo de dióxido de carbono en el conducto, y una válvula regulable para ajustar el caudal; en donde el conducto tiene un diámetro ampliado o tiene un codo capaz de modular el flujo de la mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso ralentizando la velocidad del flujo, de modo que las partículas de dióxido de carbono sólido puedan aglomerarse en partículas más grandes antes de entrar en contacto con la mezcla de cemento.

La invención se define en las reivindicaciones. Cualquier aspecto, realización y ejemplo de la presente divulgación que no esté dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas se proporciona únicamente con fines ilustrativos.

Breve descripción de los dibujos

Las nuevas características de la invención se exponen con particularidad en las reivindicaciones adjuntas. Se obtendrá una mejor comprensión de las características y ventajas de la presente invención haciendo referencia a la siguiente descripción detallada que expone realizaciones ilustrativas, en la que se utilizan los principios de la invención, y los dibujos adjuntos de los cuales:

La **FIGURA 1** proporciona una vista esquemática de una mezcladora estacionaria con un aparato para proporcionar dióxido de carbono a una mezcla de cemento hidráulico durante el mezclado.

La **FIGURA 2** proporciona una vista esquemática de una mezcladora móvil (camión hormigonera) provista de un sistema de administración de dióxido de carbono desmontable para administrar dióxido de carbono al hormigón de la mezcla.

La **FIGURA 3** proporciona una vista esquemática de una mezcladora móvil (camión hormigonera) provista de un sistema de administración de dióxido de carbono adjunto para administrar dióxido de carbono al hormigón de la mezcla.

La **FIGURA 4** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en diferentes dosis.

- 5 La **FIGURA 5** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en diferentes dosis y con diferentes contenidos de agua.

La **FIGURA 6** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en diferentes dosis.

- 10 La **FIGURA 7** muestra las resistencias a la compresión a los 14 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en diferentes dosis.

- 15 La **FIGURA 8** muestra las resistencias a la compresión a los 28 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en diferentes dosis.

La **FIGURA 9** muestra las resistencias a la compresión a los 7, 14 y 28 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono con dos contenidos de agua diferentes.

- 20 La **FIGURA 10** muestra las resistencias a la compresión a los 7 y 28 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en dos dosis diferentes y con dos contenidos de agua diferentes.

La **FIGURA 11** muestra las resistencias a la compresión a 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en dos dosis diferentes y con un mayor contenido de agua.

- 25 La **FIGURA 12** muestra las resistencias a la compresión a 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en dos dosis diferentes y con un mayor contenido de agua.

- 30 La **FIGURA 13** muestra las resistencias a la compresión a 7 días del hormigón preparado a partir de mezclas húmedas expuestas a dióxido de carbono en dos dosis diferentes y con un mayor contenido de agua.

La **FIGURA 14** muestra el asentamiento de mezclas húmedas de hormigón expuestas a dióxido de carbono en dos dosis diferentes y con cinco contenidos de agua diferentes.

- 35 La **FIGURA 15** proporciona una ilustración gráfica del asentamiento en diferentes momentos tras la llegada del camión para lotes de hormigón carbonatado preparados en una operación de premezclado.

- 40 La **FIGURA 16** proporciona una ilustración gráfica del desarrollo de la resistencia a la compresión en hormigón carbonatado preparado en una operación de premezclado, en comparación con el control, hormigón no carbonatado, a los 3, 7, 28 o 56 días.

La **FIGURA 17A** proporciona una ilustración gráfica de las pruebas de penetración de cloruro Rapid

- 45 La **FIGURA 17B** proporciona una ilustración gráfica de las pruebas de resistencia a la flexión en hormigón carbonatado preparado en una operación de premezclado en comparación con el control, hormigón no carbonatado.

La **FIGURA 18** proporciona una ilustración gráfica de las resistencias a la compresión a los 1, 7, 28 y 56 días para hormigones preparados en una operación de premezclado con un 0, 0,5 o 1,0 % en pdc de dióxido de carbono administrado al hormigón.

- 50 La **FIGURA 19** proporciona una ilustración gráfica de las resistencias a la compresión a los 1, 7, 28 y 56 días para hormigones preparados en una operación de premezclado con un 0, 1,0 o 1,5 % en pdc de dióxido de carbono administrado al hormigón, y un 0,05 % de aditivo de gluconato de sodio añadido al lote de 1,5 %.

- 55 La **FIGURA 20** proporciona una ilustración gráfica de la masa del cilindro para cilindros de volumen constante (densidad), un sustituto para la resistencia a la compresión, en hormigón moldeado en seco preparado como no carbonatado o carbonatado durante 1 o 2 min, con la adición de aditivo de gluconato de sodio en diferentes concentraciones.

- 60 La **FIGURA 21** proporciona una ilustración gráfica de la masa del cilindro para cilindros de volumen constante (densidad), un sustituto para la resistencia a la compresión, en hormigón moldeado en seco preparado como no carbonatado o carbonatado durante 90 s a 50 LPM con adición de aditivo de gluconato de sodio al 0,24, 0,30, 0,36 o 0,42 % en pdc.

- 65 La **FIGURA 22** proporciona una ilustración gráfica de la masa del cilindro para cilindros de volumen constante (densidad), un sustituto para la resistencia a la compresión, en hormigón moldeado en seco preparado como no

carbonatado o carbonatado durante 90 s a 50 LPM con adición de aditivo de gluconato de sodio al 0,30 o 0,42 % en pdc.

- 5 La **FIGURA 23** proporciona una ilustración gráfica de la masa del cilindro para cilindros de volumen constante (densidad), un sustituto para la resistencia a la compresión, en hormigón moldeado en seco preparado como no carbonatado o carbonatado durante 90 s a 50 LPM con adición de aditivo de gluconato de sodio al 0,30 o 0,42 % en pdc. Todas las muestras incluían los aditivos Rainbloc y Procast, añadiéndose a una muestra al 0,30 % Procast después de la administración de dióxido de carbono.
- 10 La **FIGURA 24** proporciona una ilustración gráfica del asentamiento, con respecto a un control sin tratar, en mezclas de mortero carbonatado tratadas con glucoheptonato de sodio, fructosa o gluconato de sodio a diferentes concentraciones.
- 15 La **FIGURA 25** proporciona una ilustración gráfica de los efectos sobre el asentamiento de la adición de fructosa o gluconato de sodio a una mezcla de mortero antes, durante o después de la carbonatación.
- 20 La **FIGURA 26** proporciona una ilustración gráfica de los efectos sobre la resistencia a la compresión a las 24 horas, en comparación con el control no carbonatado, de un preparado de mortero carbonatado al que se añadió gluconato de sodio antes o después de la carbonatación a unas dosis del 0, 0,025, 0,05 y 0,75 %.
- 25 La **FIGURA 27** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de la temperatura de los materiales sobre la tasa de captación de dióxido de carbono en una mezcla de mortero. Las temperaturas eran de 7 °C, 15 °C y 25 °C.
- La **FIGURA 28** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de los gases calientes o fríos, o del hielo seco, sobre la captación de dióxido de carbono en un sistema de pasta de cemento.
- La **FIGURA 29** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de los plastificantes y el hidróxido de calcio sobre la resistencia a la compresión a las 24 horas en mezclas de mortero carbonatadas y no carbonatadas.
- 30 La **FIGURA 30** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de CaO, NaOH, Ca(NO₂)₂ y CaCl₂ sobre la resistencia a la compresión a las 24 horas en una mezcla de mortero carbonatado y no carbonatado.
- 35 La **FIGURA 31** proporciona una ilustración gráfica del efecto de la adición de dióxido de carbono antes o después de la adición de un arrastrador de aire sobre la densidad del mortero.
- La **FIGURA 32** proporciona una tabla que muestra los resultados de las pruebas de captación de dióxido de carbono, resistencia a la compresión, absorción de agua y densidad para bloques producidos en una operación de premoldeo en seco con carbonatación en la mezcladora, la tolva de carga o ambos, en una mezcla en bloque estándar.
- 40 La **FIGURA 33** es una ilustración gráfica de los efectos de la dosis de gluconato de sodio sobre las resistencias a la compresión a los 7, 28 y 56 días de los bloques carbonatados producidos en una operación de moldeo en seco, con diferentes dosis de gluconato de sodio, en comparación con el control no carbonatado.
- 45 La **FIGURA 34** proporciona una tabla que muestra los resultados de las pruebas de captación de dióxido de carbono, resistencia a la compresión, absorción de agua y densidad para bloques producidos en una operación de moldeo por premoldeo en seco con carbonatación en la mezcladora en una mezcla de bloques de piedra caliza.
- La **FIGURA 35** proporciona una tabla que muestra los resultados de las pruebas de captación de dióxido de carbono, resistencia a la compresión, absorción de agua y densidad para bloques producidos en una operación de moldeo por premoldeo en seco con carbonatación en la mezcladora en una mezcla de bloques ligeros.
- 50 La **FIGURA 36** proporciona una ilustración gráfica de las resistencias a la compresión a los 7, 28 y 56 días de bloques ligeros producidos en una operación de premoldeo en seco con carbonatación y diferentes dosis de gluconato de sodio.
- 55 La **FIGURA 37** proporciona una tabla que muestra los resultados de las pruebas de captación de dióxido de carbono, resistencia a la compresión, absorción de agua y densidad para bloques producidos en una operación de premoldeo en seco con carbonatación en la mezcladora en una mezcla de bloques de arenisca.
- 60 La **FIGURA 38** proporciona una ilustración gráfica de las resistencias a la compresión a los 7, 28 y 56 días de bloques de arenisca producidos en una operación de premoldeo en seco con carbonatación y diferentes dosis de gluconato de sodio.
- 65 La **FIGURA 39** proporciona una ilustración gráfica de la relación entre la dosis óptima de gluconato de sodio y el contenido de cemento en los bloques moldeados en seco carbonatados.

La **FIGURA 40** proporciona una ilustración gráfica de la resistencia a la compresión y la densidad de bloques premoldeados de peso medio carbonatados y no carbonatados, con o sin tratamiento con un 0,25 % de gluconato de sodio.

5 La **FIGURA 41** proporciona una tabla de resultados de pruebas de terceros en bloques de peso medio producidos en una operación de premoldeo como no carbonatados, carbonatados y carbonatados + 0,25 % de gluconato de sodio, como resistencia, absorción y contracción.

10 La **FIGURA 42** proporciona una ilustración gráfica del efecto del tipo de cemento sobre la captación de dióxido de carbono en una mezcla de mortero.

La **FIGURA 43** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de la temperatura de los materiales sobre el asentamiento, en relación con el control, en mezclas de mortero carbonatado. Las temperaturas eran de 7 °C, 15 °C y 25 °C.

15 La **FIGURA 44** proporciona una ilustración gráfica del efecto de la relación a/c sobre la captación de dióxido de carbono en una mezcla de mortero.

20 La **FIGURA 45** proporciona una ilustración gráfica del efecto de la relación a/c sobre la captación de dióxido de carbono en una mezcla de mortero.

La **FIGURA 46** proporciona una ilustración gráfica del efecto de la relación a/c sobre la captación de dióxido de carbono en una mezcla de hormigón.

25 La **FIGURA 47** proporciona una ilustración gráfica de la relación entre la captación de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura en una mezcla de mortero con distintas a/c.

30 La **FIGURA 48** proporciona una ilustración gráfica de la relación entre la captación de dióxido de carbono y el aumento de temperatura en mezclas de mortero preparadas a partir de cementos de Holcim GU, Lafarge Quebec y Lehigh, a una a/c de 0,5.

La **FIGURA 49** proporciona una ilustración gráfica de los efectos del gluconato de sodio al 0, 0,1 % o 0,2 %, añadido después de la carbonatación a una mezcla de hormigón durante el asentamiento a los 1, 10 y 20 min.

35 La **FIGURA 50** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de la fructosa sobre el asentamiento inicial de la mezcla de hormigón carbonatado.

40 La **FIGURA 51** proporciona una ilustración gráfica de los efectos de la fructosa sobre la resistencia a la compresión a las 24 horas y 7 días en una mezcla de hormigón carbonatado.

La **FIGURA 52** proporciona una ilustración gráfica de la relación entre la superficie y la resistencia a la compresión a las 24 horas de morteros carbonatados producidos con diferentes cementos.

45 La **FIGURA 53** proporciona una ilustración gráfica de la dosificación de dióxido de carbono (línea superior), la captación de dióxido de carbono (segunda línea desde arriba) y el dióxido de carbono detectado en dos sensores (dos líneas inferiores) en una operación de mezclado de premoldeo donde el flujo de dióxido de carbono se ajustó en función del dióxido de carbono detectado por los sensores.

50 La **FIGURA 54** muestra curvas de calorimetría isotérmica en morteros preparados con cemento Holcim GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

La **FIGURA 55** muestra la evolución total del calor en diferentes puntos temporales en morteros preparados con cemento Holcim GU carbonatado a niveles bajos de carbonatación.

55 La **FIGURA 56** muestra el fraguado, representado por las lecturas del penetrómetro, en morteros preparados con cemento Holcim GU carbonatado a un bajo nivel de carbonatación.

La **FIGURA 57** muestra curvas de calorimetría isotérmica en morteros preparados con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

60 La **FIGURA 58** muestra las resistencias a la compresión a las 8 y 24 horas en morteros preparados con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

65 La **FIGURA 59** muestra curvas de calorimetría isotérmica en hormigón preparado con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

La **FIGURA 60** muestra curvas de energía calorimétrica en hormigón preparado con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

5 La **FIGURA 61** muestra las resistencias a la compresión a las 8 y 12 horas en hormigón preparado con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

La **FIGURA 62** muestra el fraguado, representado por las lecturas del penetrómetro, en morteros preparados con cemento Lafarge Brookfield GU carbonatado a un bajo nivel de carbonatación.

10 La **FIGURA 63** muestra las resistencias a la compresión a las 8 y 12 horas en hormigón preparado con cemento St. Mary's Bowmanville GU carbonatado a bajos niveles de carbonatación.

15 La **FIGURA 64** muestra las resistencias a la compresión a las 12 horas de hormigón carbonatado a diferentes dosis bajas de carbonatación.

La **FIGURA 65** muestra las resistencias a la compresión a las 16 horas de hormigón carbonatado a diferentes dosis bajas de carbonatación

20 La **FIGURA 66** muestra las resistencias a la compresión a las 24 horas de hormigón carbonatado a diferentes dosis bajas de carbonatación.

La **FIGURA 67** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días de hormigón carbonatado a diferentes dosis bajas de carbonatación.

25 La **FIGURA 68** muestra la captación de dióxido de carbono del hormigón de mezcla seca a diferentes dosis de gluconato de sodio.

30 La **FIGURA 69** muestra la masa del cilindro compactado (un sustituto para la densidad) relacionada con la dosis de gluconato de sodio en el hormigón de mezcla seca carbonatado y no carbonatado.

La **FIGURA 70** muestra los datos de la FIGURA 69 normalizados con respecto al control.

35 La **FIGURA 71** muestra la energía liberada en 6 horas en relación con la dosis de gluconato de sodio en hormigón de mezcla seca carbonatado y no carbonatado.

La **FIGURA 72** muestra los datos de la FIGURA 71 normalizados con respecto al control.

40 La **FIGURA 73** muestra las tasas de captación de CO₂ en morteros preparados con la adición de CaO, NaOH o CaCl₂ o sin aditivo.

La **FIGURA 74** muestra un resumen de los datos de calorimetría de morteros preparados con y sin la adición de CaO y expuestos a dióxido de carbono durante diferentes periodos de tiempo mientras se mezclan, así como la captación de dióxido de carbono.

45 La **FIGURA 75** muestra la comparación relativa de la energía liberada por las mezclas de mortero sin la adición de CaO sometidas a carbonatación, en comparación con el control no carbonatado.

50 La **FIGURA 76** muestra una comparación relativa de la energía liberada por las mezclas de mortero dopadas con CaO expuestas a dióxido de carbono durante diferentes tiempos, en comparación con las mezclas de mortero sin CaO añadido expuestas a dióxido de carbono durante los mismos periodos de tiempo.

La **FIGURA 77A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1, -2 y -3 del Ejemplo 28, y del control sin carbonatar, potencia frente al tiempo.

55 La **FIGURA 77B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1, -2 y -3 del Ejemplo 28, y del control sin carbonatar, energía frente al tiempo.

60 La **FIGURA 78A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-4, -5 y -6 del Ejemplo 28, y del control sin carbonatar, potencia frente al tiempo.

La **FIGURA 78B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-4, -5 y -6 del Ejemplo 28, y del control sin carbonatar.

65 La **FIGURA 79A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1, -2 y -3 del Ejemplo 29, y del control sin carbonatar, potencia frente al tiempo.

- La **FIGURA 79B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1, -2 y -3 del Ejemplo 29, y del control sin carbonatar.
- 5 La **FIGURA 80A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-5 y -6 del Ejemplo 29, y del control sin carbonatar, potencia frente al tiempo.
- La **FIGURA 80B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-5 y -6 del Ejemplo 29, y del control sin carbonatar.
- 10 La **FIGURA 81** muestra las resistencias a la compresión a las 24 horas para el control y tres dosis diferentes de dióxido de carbono del primer día del ensayo del Ejemplo 30.
- La **FIGURA 82** muestra las resistencias a la compresión a los 3 días para el control y tres dosis diferentes de dióxido de carbono del primer día del ensayo del Ejemplo 30.
- 15 La **FIGURA 83** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días para el control y tres dosis diferentes de dióxido de carbono del primer día del ensayo del Ejemplo 30.
- La **FIGURA 84** muestra las resistencias a la compresión a los 28 días para el control y tres dosis diferentes de dióxido de carbono del primer día del ensayo del Ejemplo 30.
- 20 La **FIGURA 85** muestra las resistencias a la compresión a los 56 días para el control y tres dosis diferentes de dióxido de carbono del primer día del ensayo del Ejemplo 30.
- 25 La **FIGURA 86A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1 (1402), -2 (1403), y -3 (1404) del primer día del ensayo del Ejemplo 30, y el control no carbonatado (1401), potencia frente al tiempo.
- La **FIGURA 86B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1 (1402), -2 (1403), y -3 (1404) del primer día del ensayo del Ejemplo 30, y el control no carbonatado (1401), energía frente al tiempo.
- 30 La **FIGURA 87** muestra las resistencias a la compresión a las 24 horas para el control y una dosis de dióxido de carbono del segundo día del ensayo del Ejemplo 30.
- La **FIGURA 88** muestra las resistencias a la compresión a los 3 días para el control y una dosis de dióxido de carbono del segundo día del ensayo del Ejemplo 30.
- 35 La **FIGURA 89** muestra las resistencias a la compresión a los 7 días para el control y una dosis de dióxido de carbono del segundo día del ensayo del Ejemplo 30.
- La **FIGURA 90** muestra las resistencias a la compresión a los 28 días para el control y una dosis de dióxido de carbono del segundo día del ensayo del Ejemplo 30.
- 40 La **FIGURA 91** muestra las resistencias a la compresión a los 56 días para el control y una dosis de dióxido de carbono del segundo día del ensayo del Ejemplo 30.
- 45 La **FIGURA 92A** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1 y -2 del segundo día del ensayo del Ejemplo 30, y los controles no carbonatados 1 y 2, potencia frente al tiempo.
- La **FIGURA 92B** muestra los datos de calorimetría de las mezclas CO₂-1 y -2 del segundo día del ensayo del Ejemplo 30, y los controles no carbonatados 1 y 2, energía frente al tiempo.
- 50 La **FIGURA 93A** muestra los datos de calorimetría para las tres dosis de dióxido de carbono del Ejemplo 31, y el control no carbonatado, potencia frente al tiempo.
- 55 La **FIGURA 93B** muestra los datos de calorimetría para las tres dosis de dióxido de carbono del Ejemplo 31, y el control no carbonatado, energía frente al tiempo.
- La **FIGURA 94A** muestra los datos de calorimetría para las dos dosis de dióxido de carbono del Ejemplo 32, y el control no carbonatado, potencia frente al tiempo.
- 60 La **FIGURA 94B** muestra los datos de calorimetría para las dos dosis de dióxido de carbono del Ejemplo 32, y el control no carbonatado, energía frente al tiempo.
- La **FIGURA 95** muestra las curvas de calorimetría de 5 morteros con distintos niveles de captación de CO₂ (1 muestra antes de la carbonatación seguida de 5 rondas de carbonatación, cada una durante 2 min a 0,15 LPM) del Ejemplo 33.
- 65

La **FIGURA 96** muestra la energía total liberada 4 horas después del mezclado para los 4 niveles de carbonatación diferentes del Ejemplo 33, en comparación con el control no carbonatado.

- 5 La **FIGURA 97** muestra la energía total liberada 8 horas después del mezclado para los 4 niveles de carbonatación diferentes del Ejemplo 33, en comparación con el control no carbonatado.

La **FIGURA 98** muestra la energía total liberada 12 horas después del mezclado para los 4 niveles de carbonatación diferentes del Ejemplo 33, en comparación con el control no carbonatado.

- 10 La **FIGURA 99** muestra la energía total liberada 16 horas después del mezclado para los 4 niveles de carbonatación diferentes del Ejemplo 33, en comparación con el control no carbonatado.

- 15 La **FIGURA 100** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con agua de mezcla carbonatada frente a agua de mezcla no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 34.

La **FIGURA 101** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con agua de mezcla carbonatada frente a agua de mezcla no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 34.

- 20 La **FIGURA 102** muestra los resultados de una mezcla de cemento Argos + Venture FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 25 La **FIGURA 103** resultados de una mezcla de cemento Cemex + Venture FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 30 La **FIGURA 104** muestra los resultados de una mezcla de cemento Holcim + Venture FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 35 La **FIGURA 105** muestra los resultados de una mezcla de cemento Titan Roanoake + Venture FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

La **FIGURA 106** muestra los resultados de una mezcla de cemento Argos + SEFA FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 40 La **FIGURA 107** muestra los resultados de una mezcla de cemento Cemex + SEFA FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 45 La **FIGURA 108** muestra los resultados de una mezcla de cemento Holcim + SEFA FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 50 La **FIGURA 109** muestra los resultados de una mezcla de cemento Titan Roanoake + SEFA FA en tres condiciones de carbonatación diferentes, en tres momentos diferentes, como el calor total liberado en relación con una mezcla de control no carbonatada, como se describe en el Ejemplo 35.

- 55 La **FIGURA 110** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con una mezcla 80/20 de cemento Roanoake y cenizas volantes de clase F de Trenton, carbonatada durante 2, 4 o 6 min, como se describe en el Ejemplo 36.

La **FIGURA 111** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con una mezcla 80/20 de cemento Roanoake y cenizas volantes de clase F de Trenton, carbonatada durante 2, 4 o 6 min, como se describe en el Ejemplo 36.

- 60 La **FIGURA 112** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con una mezcla 80/20 de cemento STMB y cenizas volantes clase F de Trenton, carbonatada durante 2, 4 o 6 min, como se describe en el Ejemplo 36.

- 65 La **FIGURA 113** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con una mezcla 80/20 de cemento STMB y cenizas volantes clase F de Trenton, carbonatada durante 2, 4 o 6 min, como se describe en el Ejemplo 36.

La **FIGURA 114** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y tres dosis diferentes de bicarbonato de sodio, como se describe en el Ejemplo 37.

- 5 La **FIGURA 115** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y tres dosis diferentes de bicarbonato de sodio, como se describe en el Ejemplo 37.

La **FIGURA 116** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y tres dosis diferentes de bicarbonato de sodio, como se describe en el Ejemplo 37.

- 10 La **FIGURA 117** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y tres dosis diferentes de bicarbonato de sodio, como se describe en el Ejemplo 37.

- 15 La **FIGURA 118** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y dos tiempos diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- 20 La **FIGURA 119** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y dos tiempos diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- 25 La **FIGURA 120** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y dos tiempos diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- La **FIGURA 121** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y dos tiempos diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- 30 La **FIGURA 122** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y 5 duraciones diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- 35 La **FIGURA 123** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y 5 duraciones diferentes para la adición de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el Ejemplo 38.

- 40 La **FIGURA 124** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y un agua de lavado sintética carbonatada, filtrada o sin filtrar, como se describe en el Ejemplo 39.

- La **FIGURA 125** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y un agua de lavado sintética carbonatada, filtrada o sin filtrar, como se describe en el Ejemplo 39.

- 45 La **FIGURA 126** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 5 y 10 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- La **FIGURA 127** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 5 y 10 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- 50 La **FIGURA 128** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 10 y 15 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- 55 La **FIGURA 129** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento LAFB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 10 y 15 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

La **FIGURA 130** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 5 y 10 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- 60 La **FIGURA 131** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 5 y 10 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- La **FIGURA 132** muestra la calorimetría como potencia frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha con un cemento STMB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 10 y 15 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

- 65 La **FIGURA 133** muestra la calorimetría como energía liberada frente al tiempo para una mezcla de mortero hecha

con un cemento STMB y carbonatada durante 2, 4 o 6 min, a entre 10 y 15 °C, como se describe en el Ejemplo 40.

La **FIGURA 134** muestra la posición a la que apunta la varilla para la administración del dióxido de carbono en el tambor de un camión hormigonera, en la segunda aleta del camión, en la parte inferior del tambor.

La **FIGURA 135** muestra un sistema extensible para suministrar dióxido de carbono, tal como dióxido de carbono gaseoso y sólido derivado de dióxido de carbono líquido, al tambor de un camión hormigonera, donde el sistema está acoplado a un manguito flexible que administra los materiales al tambor del camión.

La **FIGURA 136** muestra el sistema de la Figura 135 en las posiciones replegada y extendida.

La **FIGURA 137** muestra una micrografía electrónica como se describe en el Ejemplo 41.

La **FIGURA 138** muestra la concentración de silicio poroso en mezclas de cemento carbonatadas a diferentes niveles de carbonatación a los 8 min y a los 30 min de la carbonatación.

La **FIGURA 139** muestra las curvas de potencia para las mezclas carbonatadas de la Figura 138.

La **FIGURA 140** muestra el efecto de la carbonatación sobre el fraguado inicial en mezclas de cemento preparadas con dos tipos diferentes de cemento.

La **FIGURA 141** muestra el efecto de la carbonatación sobre el fraguado final en mezclas de cemento preparadas con dos tipos diferentes de cemento.

La **FIGURA 142** muestra la resistencia a la compresión a las 24 horas de las mezclas de mortero carbonatado en comparación con las mezclas de mortero de control (no carbonatado), donde el único ligante era el cemento.

La **FIGURA 143** muestra la resistencia a la compresión a las 24 horas de las mezclas de mortero carbonatado en comparación con las mezclas de mortero de control (no carbonatado), donde el ligante era cemento y cenizas volantes de clase C.

La **FIGURA 144** muestra los resultados de la resistencia a la compresión a los 1, 3, 7 y 28 días de las muestras de 12 ensayos industriales diferentes de carbonatación de mezclas de hormigón.

La **FIGURA 145** muestra los resultados de asentamiento de las muestras en 12 ensayos industriales diferentes de carbonatación de mezclas de hormigón.

La **FIGURA 146** muestra los resultados de aire de las muestras en 12 ensayos industriales diferentes de carbonatación de mezclas de hormigón.

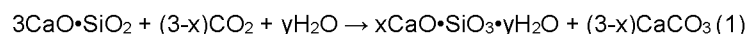
La **FIGURA 147** proporciona una ilustración esquemática de un camión volumétrico de hormigón típico

Descripción detallada

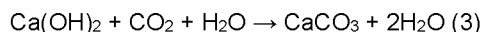
I. Introducción

Las emisiones de dióxido de carbono están reconocidas como un problema importante relacionado con la producción de cemento y el uso del hormigón como material de construcción. Se calcula que el 5 % de las emisiones anuales de CO₂ en todo el mundo son atribuibles a la producción de cemento. La industria ha reconocido previamente una serie de enfoques para reducir la intensidad de las emisiones del cemento producido y utilizado. Es probable que las mejoras más significativas en eficiencia y sustitución del cemento ya se conozcan y estén disponibles. Las futuras mejoras en las emisiones serán probablemente progresivas. Se buscan enfoques innovadores que puedan formar parte de una estrategia de cartera. Por tanto, también habrá que buscar otros enfoques.

Un método potencial consiste en convertir el dióxido de carbono capturado en productos de hormigón. El mecanismo de la carbonatación del cemento recién hidratado se estudió sistemáticamente en los años 70 en la Universidad de Illinois. Se demostró que las principales fases del cemento, el silicato tricálcico y el silicato dicálcico, reaccionan con el dióxido de carbono en presencia de agua para formar carbonato de calcio y gel de hidrato de silicato de calcio, tal como se muestra en las ecuaciones 1 y 2:



Además, cualquier hidróxido de calcio libre presente en la pasta de cemento se hidratará rápidamente y reaccionará con el dióxido de carbono, como se muestra en la ecuación 3:



Las reacciones de carbonatación son exotérmicas. La reacción se produce en estado acuoso cuando los iones Ca^{2+} de las fases cementosas se encuentran con los iones CO_3^{2-} del gas aplicado. Los calores de la reacción de carbonatación para las principales fases de silicato de calcio son de 347 kJ/mol para el C3S y de 184 kJ/mol para el β -C2S y de 74 kJ/mol para el Ca(OH)_2 .

Cuando los silicatos de calcio se carbonatan, se entiende que el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) que se forma está entremezclado con el CaCO_3 . La formación del gel C-S-H se produce incluso en un caso ideal de β -C2S y C3S expuestos a un 100 % de CO_2 a 1 atm, dada la observación de que la cantidad de carbonato que se forma no se corresponde exactamente con la cantidad de silicato de calcio que interviene en la reacción.

La reacción del dióxido de carbono con una microestructura de hormigón maduro se reconoce convencionalmente como un problema de durabilidad debido a efectos tales como la retracción, la reducción del pH de la solución de los poros y la corrosión inducida por la carbonatación. Por el contrario, una reacción de carbonatación integrada en la producción de hormigón hace reaccionar el CO_2 con el cemento recién hidratado, en lugar de las fases de hidratación presentes en el hormigón maduro, y no tiene los mismos efectos. En cambio, en virtud de la adición de CO_2 gaseoso al hormigón recién mezclado, se prevé que los productos de la reacción del carbonato que se formen *in situ* sean de escala nanométrica y se distribuyan homogéneamente.

"Mezcla de cemento", como se utiliza el término en el presente documento, incluye una mezcla de un ligante de cemento, por ejemplo, un cemento hidráulico, tal como un cemento Portland, y agua; en algunos casos, la "mezcla de cemento" incluye un ligante de cemento mezclado con áridos, tales como un mortero (también denominado lechada, dependiendo de su consistencia), en el que el árido es un árido fino; u "hormigón", que incluye un agregado grueso, la invención proporciona un método y un aparato para la producción de una mezcla de cemento (hormigón) que contiene cemento, tal como cemento Portland, tratado con dióxido de carbono. Como se utiliza en el presente documento, la expresión "dióxido de carbono" se refiere al dióxido de carbono en estado gaseoso, sólido, líquido o supercrítico donde el dióxido de carbono está en una concentración superior a su concentración en la atmósfera; se apreciará que en las condiciones ordinarias de producción de mezclas de cemento (mezclas de hormigón), la mezcla está expuesta al aire atmosférico, que contiene cantidades menores de dióxido de carbono. La presente invención se refiere a la producción de mezclas de cemento que están expuestas a dióxido de carbono en una concentración superior a las concentraciones atmosféricas.

Las operaciones de mezcla de cemento se realizan habitualmente para proporcionar mezclas de cemento (hormigón) para usar en diversas aplicaciones, la más común de las cuales es como material de construcción. Dichas operaciones incluyen operaciones de premoldeo, en las que se forma una estructura de hormigón en un molde a partir de la mezcla de cemento y se somete a un cierto grado de endurecimiento antes de su transporte y uso en una ubicación distinta a la ubicación del mezclado, y operaciones de premezclado, en las que los ingredientes del hormigón se suministran en una ubicación y generalmente se mezclan en una mezcladora transportable, tal como el tambor de un camión hormigonero, y se transportan a una segunda ubicación, donde se usa la mezcla húmeda, normalmente por vertido o bombeo en un molde provisional. Las operaciones de premoldeo pueden ser una operación de moldeo en seco o de moldeo en húmedo, mientras que las operaciones de premezclado se moldean en húmedo. Cualquier otra operación en la que se produzca una mezcla de hormigón en una mezcladora y se exponga a dióxido de carbono durante el mezclado también está sujeta al método de la invención.

Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, cuando la mezcla de cemento (hormigón) se expone al dióxido de carbono, el dióxido de carbono se disuelve primero en el agua de mezcla y a continuación forma especies intermedias, antes de precipitar como una especie estable o metaestable, por ejemplo, carbonato de calcio. A medida que las especies carbonatadas se eliminan de la solución, más dióxido de carbono puede disolverse en el agua. En ciertas realizaciones, el agua de mezcla contiene dióxido de carbono antes de su exposición al ligante de cemento. Todos estos procesos están englobados en el término "carbonatación" de la mezcla de cemento, según se usa esta expresión en el presente documento.

El documento EP 3 013 544 A1 describe composiciones y métodos dirigidos a la carbonatación de una mezcla de cemento durante el mezclado. La carbonatación puede controlarse mediante uno o más mecanismos de retroalimentación para ajustar la administración del dióxido de carbono en función de una o más características de la mezcla o de otros aspectos de la operación de mezclado.

El documento US 5.232.496 A describe un proceso para producir una pasta. En un aspecto, el proceso comprende dejar que el cemento hidráulico y el agua se mezclen lo suficiente como para alcanzar el equilibrio de curado temprano, exponiendo el agua de mezcla y el material cementoso a una fuente de carbono seleccionada del grupo que consiste en CO_2 , CO, sales de carbonato y las mezclas de los mismos, y dejando a continuación que la mezcla resultante alcance de nuevo el equilibrio de curado temprano.

II. Componentes

La presente invención proporciona un método para preparar una mezcla que contiene cemento, poniendo en contacto una mezcla de un ligante de cemento, por ejemplo, cemento hidráulico y agua, y, opcionalmente, otros componentes tales como un árido (una "mezcla de cemento", u "hormigón" por ejemplo, una "mezcla de cemento hidráulico") con dióxido de carbono durante alguna parte del mezclado de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. De acuerdo con la presente invención, la mezcla que contiene cemento es una mezcla de hormigón.

En ciertos aspectos de la divulgación, se utiliza un cemento hidráulico. La expresión "cemento hidráulico", como se utiliza en el presente documento, incluye una composición que fragua y se endurece tras combinarse con agua o con una solución donde el disolvente es agua, por ejemplo, una solución de aditivo. Tras el endurecimiento, las composiciones conservan su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Una característica importante es que los hidratos formados a partir de los constituyentes del cemento al reaccionar con el agua son esencialmente insolubles en agua. El cemento hidráulico utilizado puede ser cualquier cemento hidráulico capaz de formar productos de reacción con dióxido de carbono. El cemento hidráulico utilizado más habitualmente se basa en el cemento Portland. El cemento Portland se fabrica principalmente a partir de piedra caliza, ciertos minerales arcillosos y yeso, en un proceso a alta temperatura que expulsa el dióxido de carbono y combina químicamente los ingredientes primarios en nuevos compuestos. En ciertos aspectos de la divulgación, el cemento hidráulico de la mezcla de cemento hidráulico está parcial o totalmente compuesto por cemento Portland.

Una "mezcla de cemento hidráulico", como se utiliza el término en el presente documento, incluye una mezcla que contiene al menos un cemento hidráulico y agua. Puede haber presentes componentes adicionales, tales como áridos, aditivos y similares. De acuerdo con la presente invención, la mezcla de cemento hidráulico es una mezcla de hormigón, es decir, una mezcla de cemento hidráulico, tal como cemento Portland, agua y áridos, opcionalmente incluyendo también un aditivo.

El método de la presente invención se caracteriza por poner en contacto dióxido de carbono con un ligante de cemento húmedo, por ejemplo, cemento hidráulico, en una mezcladora en cualquier fase del mezclado, tal como durante el mezclado del cemento con agua, o durante el mezclado del cemento humedecido con otros materiales, o ambos. El cemento puede ser cualquier cemento, por ejemplo, cemento hidráulico capaz de producir productos de reacción con dióxido de carbono. Por ejemplo, en ciertas realizaciones el cemento incluye, o es sustancialmente todo, cemento Portland, como se entiende generalmente ese término en la técnica. El cemento se combina en la mezcladora con otros materiales, tales como áridos, para formar hormigón. El dióxido de carbono se puede añadir antes, durante o después de la adición de los otros materiales además del cemento y el agua.

En ciertas realizaciones, el contacto del dióxido de carbono con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, puede producirse cuando se ha añadido parte pero no toda el agua, o cuando se ha añadido parte pero no todo el cemento, o ambas. Por ejemplo, en una realización, se añade una primera alícuota de agua a la mezcla de cemento o de agregados de cemento, para producir una mezcla de cemento o cemento y agregado que contenga agua en una cierta relación agua/cemento (a/c) o intervalo de relaciones a/c. En algunos casos, uno o más componentes de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, tales como los áridos, puede estar lo suficientemente húmedos como para que suministren suficiente agua para que la mezcla pueda entrar en contacto con el dióxido de carbono. Junto con, o después de, la adición del agua, se introduce dióxido de carbono en la mezcla, mientras la mezcla se mezcla en una mezcladora.

El dióxido de carbono puede ser de cualquier pureza y/o forma adecuada para entrar en contacto con el cemento, por ejemplo, cemento hidráulico durante el mezclado para formar productos de reacción, siempre que la dosis de dióxido de carbono administrada a la mezcla de hormigón sea del 0,01-1,0 % en peso de cemento, y que el dióxido de carbono se administre como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso. Como se describe, el dióxido de carbono es al menos superior a la concentración de dióxido de carbono atmosférico. Por ejemplo, el dióxido de carbono puede ser líquido, gaseoso, sólido o supercrítico, o cualquier combinación de los mismos. El dióxido de carbono se administra a la mezcla de hormigón como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso, aunque puede estar almacenado antes del contacto en cualquier forma conveniente, por ejemplo, en forma líquida. Una parte o la totalidad del dióxido de carbono puede estar en forma líquida y administrarse al cemento o a la mezcla de cemento (hormigón), por ejemplo, de tal manera que se forme una mezcla de dióxido de carbono gaseoso y sólido; la corriente de dióxido de carbono líquido puede ajustarse mediante, por ejemplo, la selección del caudal y/o del orificio para conseguir la relación deseada de dióxido de carbono gaseoso y sólido, tal como una relación de aproximadamente 1:1, o dentro de un intervalo de relaciones. De acuerdo con la presente invención, el dióxido de carbono se administra como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso. El dióxido de carbono también puede ser de cualquier pureza adecuada para entrar en contacto con el cemento o la mezcla de cemento (hormigón), por ejemplo, cemento hidráulico durante el mezclado en unas condiciones de contacto especificadas para formar productos de reacción. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono tiene una pureza superior al 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 o 99 %. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono tiene una pureza superior al 95 %. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono tiene una pureza superior al 99 %. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono tiene una pureza del 20-100 %, o del 30-100 %, o del 40-100 %, o del 50-100 %, o del 60-100 %, o del 70-100 %, o del 80-100 %, o del 90-100 %, o del 95-100 %, o del 98-100 %, o del 99-100 %. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono tiene una pureza del 70-100 %. En cierta realización, el dióxido de carbono tiene una pureza del 90-100 %. En cierta realización, el dióxido de

carbono tiene una pureza del 95-100 %. Las impurezas del dióxido de carbono pueden ser cualquier impureza que no interfiera sustancialmente en la reacción del dióxido de carbono con la mezcla de cemento húmedo, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. Las fuentes comerciales de dióxido de carbono de pureza adecuada son bien conocidas.

El dióxido de carbono, por ejemplo, el dióxido de carbono gaseoso, líquido o sólido, puede ser dióxido de carbono de alta pureza suministrado comercialmente. En este caso, el dióxido de carbono comercial, por ejemplo, gas, líquido o sólido, puede proceder de un proveedor que procese los gases de combustión gastados u otros residuos de dióxido de carbono, de modo que se secuestre el dióxido de carbono en la mezcla de cemento, por ejemplo, la mezcla de cemento hidráulico secuestra el dióxido de carbono que, de otro modo, sería una emisión de gases de efecto invernadero.

Además, dado que la carbonatación de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de hormigón, a menudo produce una mejora de la resistencia en comparación con la mezcla no carbonatada, se puede utilizar menos cemento en la producción de un hormigón que tenga la misma resistencia. En algunos casos, la cantidad de dióxido de carbono absorbido es modesta, pero si se puede obtener un beneficio coherente de resistencia, entonces existe una motivación para optimizar el proceso y reducir el contenido de cemento. Por ejemplo, en general, los productores de mampostería no tienen ninguna motivación interna o externa para fabricar un producto que tenga una resistencia del 119 % del producto convencional. Más bien, se puede obtener una ganancia económica utilizando un diseño de mezcla que contenga menos cemento y consiga, mediante la ayuda del proceso de carbonatación, un 100 % de la resistencia del producto no carbonatado. Un diseño reducido de la mezcla de cemento tendría además claros beneficios medioambientales, dado que el clínker de cemento Portland suele tener un CO_2 incorporado del orden de 866 kg de CO_2 /tonelada de clínker. Si se eliminara el 5 % del cemento del diseño de la mezcla de bloques (aproximadamente 333 kg/m³), el ahorro de emisiones sería de aproximadamente 14 kg/m³ de hormigón antes de incluir cualquier compensación neta relacionada con la absorción de CO_2 . Por tanto, se divulga una composición de hormigón carbonatado que comprende una cantidad de cemento que es menor que la cantidad de cemento necesaria en una composición de hormigón no carbonatado del mismo o sustancialmente el mismo diseño de mezcla, por ejemplo, al menos un 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 17, 20, 25, 30, 40 o 50 % menos de cemento, pero con una resistencia, por ejemplo, resistencia a la compresión, que está dentro del 20, 15, 10, 5, 3, 2 o 1 % de la resistencia a la compresión de la mezcla de hormigón no carbonatado en un momento o momentos dados tras el mezclado, tal como 24 horas, 2 días, 7 días, 14 días, 21 días, 56 días o 91 días, o una combinación de los mismos. Estos tiempos son meramente ilustrativos y puede utilizarse cualquier tiempo o combinación de tiempos que ofrezca información significativa sobre la resistencia de la mezcla en relación con su uso previsto. Dichas composiciones suponen un ahorro neto de emisiones de CO_2 que incluye la cantidad de dióxido de carbono captada por la composición y la cantidad de emisión de dióxido de carbono evitada porque se necesita menos cemento en la producción de la composición. Por ejemplo, el ahorro neto de emisiones puede ser de al menos 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125 o 150 kg de CO_2 /m³ de hormigón para el hormigón carbonatado en comparación con el hormigón no carbonatado. El hormigón puede estar en forma de un objeto premoldeado, tal como un bloque, una tubería, un ladrillo, una baldosa o similar; el hormigón puede estar en forma de hormigón premezclado que se vierte en moldes en una obra. La carbonatación del hormigón puede producir nanocristales de carbonato de calcio como se describe en cualquier otro sitio del presente documento. También se puede conseguir un ahorro sustancial de costes disminuyendo la cantidad de cemento para una mezcla de hormigón dada sin sacrificar la resistencia.

El dióxido de carbono se pone en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, durante el mezclado por cualquier vía adecuada, tal como sobre una parte o la totalidad de la superficie de la mezcla de cemento del mezclado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, bajo la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, o cualquier combinación de los mismos. En ciertas realizaciones donde el hormigón se mezcla en un primer recipiente y se introduce a continuación en un segundo recipiente, tal como en una instalación de procesamiento por lotes de premezclado, donde el hormigón se mezcla primero en una mezcladora y a continuación se transfiere al tambor de un camión hormigonera, el dióxido de carbono se introduce en el segundo recipiente antes de introducir en ese recipiente el hormigón premezclado. Adicionalmente, el hormigón puede entrar en contacto con el dióxido de carbono mientras se transfiere del primer recipiente de mezclado al segundo. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce en el segundo recipiente como una mezcla de gas y sólido; por ejemplo, el dióxido de carbono puede suministrarse en un conducto como dióxido de carbono líquido y al salir por una abertura u orificio del conducto, convertirse en dióxido de carbono sólido y gaseoso, como se describe en cualquier otro sitio del presente documento; la corriente de dióxido de carbono gaseoso y sólido puede dirigirse al segundo recipiente antes de introducir el hormigón, y/o dirigirse a la corriente de hormigón introducida en el segundo recipiente. Ya que es ventajoso disponer de una mayor cantidad de dióxido de carbono sólido para evitar el escape de dióxido de carbono gaseoso a la atmósfera, las condiciones de la introducción pueden ajustarse para conseguir una elevada relación de dióxido de carbono sólido respecto al gaseoso. Por ejemplo, en una operación de premezclado, el hormigón suele mezclarse en una mezcladora en el lugar de procesamiento por lotes y verse en los tambores de los camiones hormigonera para su transporte a la obra. El hormigón sigue mezclándose en el tambor del camión hormigonera. Se puede introducir dióxido de carbono en el tambor del camión hormigonera, por ejemplo, como dióxido de carbono gaseoso y sólido formado a partir de dióxido de carbono líquido, antes de verter el hormigón desde la mezcladora al tambor.

En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se pone en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, mezcla de cemento hidráulico durante el mezclado por contacto con la superficie de la mezcla de cemento del mezclado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, se cree que el dióxido de carbono que entra en contacto con la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, la mezcla de cemento hidráulico, se disuelve y/o reacciona en el agua, y a continuación es incorporada bajo la superficie mediante el proceso de mezclado, que expone a continuación diferentes mezclas de cemento, por ejemplo, mezcla de cemento, que se van a poner en contacto, y que este proceso continúa mientras el cemento hidráulico humedecido esté expuesto al dióxido de carbono. Se apreciará que el proceso de disolución y/o de reacción puede continuar después de que se detenga el flujo de dióxido de carbono, ya que es probable que quede dióxido de carbono en la mezcla de gas en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. En las realizaciones en las que se utiliza dióxido de carbono líquido para producir dióxido de carbono gaseoso y sólido, el dióxido de carbono sólido sublimará y seguirá aportando dióxido de carbono gaseoso a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, después de que haya cesado el flujo de dióxido de carbono líquido. Esto es particularmente útil en las operaciones con camiones hormigonera, donde puede haber un tiempo insuficiente en la instalación de procesamiento por lotes para permitir la captación de la cantidad deseada de dióxido de carbono; el uso de dióxido de carbono líquido, que se convierte en dióxido de carbono gaseoso y sólido, permite administrar más dióxido de carbono a la mezcla incluso después de que el camión abandone la instalación de procesamiento por lotes.

En particular, en una operación de premezclado, el hormigón puede mezclarse en una mezcladora estacionaria, a continuación, se transfiere al tambor del camión hormigonera, o bien los componentes del hormigón pueden administrarse al tambor del camión hormigonera, y el mezclado de los componentes para proporcionar hormigón se produce en el tambor. En el primer caso, el dióxido de carbono puede administrarse a la mezcladora estacionaria y, en tal caso, la administración puede ser similar o idéntica a la utilizada en, por ejemplo, una operación de premoldeo, es decir, el dióxido de carbono se administra a través de un conducto que se abre a la mezcladora y administra el dióxido de carbono a la superficie del hormigón de la mezcla. El dióxido de carbono puede ser cualquier forma, como se describe en el presente documento; en ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se administra como un líquido que, al salir de la abertura del conducto, se convierte en un sólido y un gas, como se describe en el presente documento. Puede conseguirse una mayor carbonatación del hormigón, si se desea, mediante la administración de dióxido de carbono adicional al tambor del camión hormigonera después de que se le haya administrado el hormigón. Como alternativa, puede administrarse todo el dióxido de carbono al tambor del camión hormigonera; este será claramente el caso si la mezcla del hormigón se produce en el tambor. En este caso, se necesita un sistema de administración de dióxido de carbono al tambor del camión hormigonera.

El dióxido de carbono puede administrarse después de introducir los componentes de la mezcla de hormigón en el tambor; por ejemplo, en algunas operaciones de premezclado, el camión se traslada a un bastidor de lavado donde se lava antes de salir del almacén. Cuando se utiliza dicho sistema de administración, el posicionamiento del conducto para el dióxido de carbono, denominado también varilla o lanza en el presente documento, para que la abertura esté en una posición y postura dadas con respecto al tambor, puede ser importante; un aspecto de algunas realizaciones de la invención es el posicionamiento de la varilla, y/o el aparato para hacerlo, para facilitar la mezcla eficaz del dióxido de carbono gaseoso y sólido con la mezcla de cemento a medida que gira el tambor. Se puede utilizar cualquier método y/o aparato de posicionamiento adecuado para optimizar la eficiencia de la captación del dióxido de carbono en el cemento de mezcla, siempre que posicione la varilla de manera que proporcione una captación eficiente del dióxido de carbono, por ejemplo, colocando la varilla de forma que la abertura esté dirigida a un punto donde una onda de hormigón creada por las aletas del tambor de la hormigonera se pliegue sobre la mezcla; sin pretender quedar ligados a teoría alguna, se piensa que la onda que se pliega sobre la aleta incorpora inmediatamente el dióxido de carbono sólido dentro de la mezcla de cemento, de modo que libera dióxido de carbono gaseoso por sublimación en la mezcla y no en el aire, como lo haría si estuviera en la superficie de la mezcla. En la Figura 134 se muestra un posicionamiento ilustrativo, donde la varilla apunta a la segunda aleta del tambor del camión, en la parte inferior de la aleta. En un camión hormigonera que transporta una carga completa, la abertura de la varilla puede estar muy cerca de la superficie del hormigón de la mezcla, como se describe a continuación, para facilitar el flujo direccional de la mezcla de dióxido de carbono hacia la zona adecuada. Una parte o la totalidad de la varilla puede estar hecha de un material flexible, de modo que si una aleta u otra parte del tambor golpea la varilla, ésta se flexione y, a continuación, vuelva a su posición original.

En la presente invención, en la que el dióxido de carbono se dirige como una mezcla de sólido/gas a una mezcladora, tal como a un camión hormigonera o a una mezcladora estacionaria, se modula el flujo de dióxido de carbono, por ejemplo, se ralentiza, para que las partículas sólidas de dióxido de carbono puedan aglomerarse en partículas más grandes antes de entrar en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico tal como hormigón, en la mezcladora. Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, se cree que al permitir que se formen conglomerados más grandes, la tasa de sublimación se ralentiza y es más probable que el dióxido de carbono gaseoso liberado sea captado por la mezcla de cemento en lugar de escapar a la atmósfera.

Un método para modular el flujo de la mezcla de dióxido de carbono sólido/gaseoso es ampliar el diámetro del conducto por el que fluye la mezcla de sólido/gas, y/o introducir un codo en el conducto. Tanto el aumento del diámetro como el codo del conducto sirven para reducir la velocidad; sin embargo, en ciertas realizaciones se utiliza únicamente un aumento del diámetro; en ciertas realizaciones, se utiliza únicamente un codo. Se puede utilizar cualquier proceso de

aumento de tamaño adecuado, con o sin un codo, siempre que la velocidad de flujo de la mezcla de dióxido de carbono gaseoso/sólido se ralentice lo suficiente para proporcionar la aglomeración deseada de partículas sólidas antes de entrar en contacto con la mezcla de cemento; en general, se prefiere que la velocidad siga siendo lo suficientemente alta como para que el dióxido de carbono sólido no se adhiera al interior del conducto.

5 Un diámetro mayor, con o sin un codo, también puede utilizarse para un conducto utilizado para administrar una mezcla de dióxido de carbono gaseoso/sólido a una mezcladora no estacionaria, por ejemplo, un camión hormigonera. El aumento del diámetro del conducto puede ser cualquier aumento que produzca la aglomeración deseada del dióxido de carbono sólido, preferentemente con poca o ninguna acumulación de dióxido de carbono sólido en el conducto.

10 Se apreciará que pueden utilizarse otros sistemas de posicionamiento de un conducto para la administración de dióxido de carbono a un camión hormigonera, tales como los sistemas en donde el conducto, o la lanza, se fija a un soporte y se posiciona en el tambor del camión sin estar fijado temporalmente al camión. Para ver descripciones de sistemas ilustrativos, véase, por ejemplo, la Publicación de Solicitud Patente de EE.UU. n.º 2014/0216303 y la Patente de EE.UU. n.º 8.235.576.

15 En las realizaciones en las que el dióxido de carbono entra en contacto con la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, el flujo de dióxido de carbono puede ser dirigido desde una abertura o pluralidad de aberturas (por ejemplo, una abertura del colector o conducto) que se encuentre al menos a 5, 10, 20, 30, 20 40, 50, 60, 70, 80, 90 o 100 cm de la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, mezcla de cemento hidráulico, durante el flujo de dióxido de carbono, en promedio, dado que la superficie de la mezcla se moverá con el mezclado, y/o a no más de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 170 o 200 cm de la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, mezcla de cemento hidráulico, durante el flujo de dióxido de carbono, en promedio. En ciertas realizaciones, la abertura está a 5-100 cm de la superficie, en promedio, tal como 5-60 cm, por ejemplo, 5-40 cm.

25 El dióxido de carbono puede ponerse en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, de forma que esté presente durante el mezclado mediante cualquier sistema o aparato adecuado. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono gaseoso o líquido se suministra a través de uno o más conductos que contienen una o más aberturas situadas para suministrar el dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento del mezclado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. El conducto y la abertura pueden ser tan simples como un tubo, por ejemplo, un tubo flexible con un extremo abierto. El conducto puede ser lo suficientemente flexible como para permitir el movimiento de diferentes componentes de la mezcla de cemento, por ejemplo, el aparato hidráulico de mezclado del cemento, la abertura del conducto, y similares, y/o lo suficientemente flexible como para añadirse a un sistema existente como renovación. Por otra parte, el conducto puede ser lo suficientemente rígido, o estar fijado, o 35 ambas cosas, para asegurar que no interfiere con ninguna parte móvil de la mezcla de cemento, por ejemplo, el aparato hidráulico de mezclado del cemento. En ciertas realizaciones, parte del conducto puede utilizarse para suministrar otros ingredientes a la mezcla de cemento, por ejemplo, agua, y estar configurado de forma que el otro ingrediente o el dióxido de carbono fluyan a través del conducto, por ejemplo, mediante un empalme en T.

40 En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono sale del conducto o conductos a través de uno o más colectores que comprenden una pluralidad de aberturas. La abertura o aberturas pueden posicionarse de forma que se reduzca o se elimine la obstrucción de la abertura con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. El colector está conectado generalmente a través del conducto a al menos una válvula de suministro de fluidos (gas o líquido), que gobierna el flujo de fluido presurizado entre una fuente de dióxido de carbono, por ejemplo, un suministro 45 de gas o líquido presurizado, y el colector. En algunas realizaciones, la válvula de suministro de fluido puede incluir una o más válvulas de compuerta que permitan la incorporación de equipos de calibración, por ejemplo, uno o más caudalímetros máscicos.

50 La masa de dióxido de carbono aportada a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, a través del conducto o conductos puede controlarse mediante un controlador del flujo máscico, que puede modular la válvula de suministro de fluido, por ejemplo, cerrar la válvula para detener el suministro de fluido de dióxido de carbono (líquido o gas).

55 El dióxido de carbono se suministra desde una fuente de dióxido de carbono, tal como, en el caso de un dióxido de carbono gaseoso, un tanque presurizado lleno de un gas rico en dióxido de carbono, y un regulador de presión. El tanque puede volver a llenarse cuando esté casi vacío o mantenerse lleno mediante un compresor. El regulador puede reducir la presión del tanque hasta una presión de alimentación máxima. La presión de alimentación máxima puede ser superior a la atmosférica, pero inferior a la presión del flujo del gas supercrítico. La presión de alimentación puede estar, por ejemplo, en un intervalo de 120 a 875 kPa. Puede añadirse una válvula disipadora de presión para proteger 60 los componentes de la fuente de dióxido de carbono. El dióxido de carbono suministrado por la fuente de dióxido de carbono puede estar aproximadamente a la temperatura ambiente, o puede estar enfriado o calentado según se desee. En ciertas realizaciones, parte o la totalidad del dióxido de carbono se suministra en forma líquida. En este caso, el líquido sigue siendo líquido en el almacenamiento y en el movimiento hacia la mezcladora, y cuando se libera en la mezcladora forma una mezcla que comprende dióxido de carbono sólido y gaseoso. Se pueden utilizar uno o más 65 sensores de presión; por ejemplo, para el sistema de boquillas, para controlar la formación de hielo seco entre la boquilla y el solenoide, así como para confirmar que se mantiene la presión previa al solenoide para garantizar que la

línea permanece líquida.

El dióxido de carbono puede introducirse en la mezcladora de forma que entre en contacto con la mezcla de cemento hidráulico antes, durante o después de la adición de agua, o cualquier combinación de los mismos, siempre que esté presente durante alguna parte del mezclado de una parte o de toda la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce durante una cierta fase o fases de mezclado. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce en una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, durante el mezclado en una sola fase. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce durante una fase de adición de agua, seguido de una segunda fase de adición de agua. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce en una porción de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, seguido de la adición de una o más porciones adicionales de mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico.

En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se introduce en una primera fase de mezcla de agua en la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, a continuación, después de esta fase, se añade agua adicional sin dióxido de carbono. Por ejemplo, puede añadirse agua a una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, una mezcla de cemento Portland, hasta que se consiga una relación a/c deseada, a continuación se puede poner en contacto con el dióxido de carbono durante el mezclado de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, durante un cierto tiempo a un cierto caudal o caudales (o como se dirija mediante retroalimentación, descrita más adelante en el presente documento), a continuación, después de que el flujo de dióxido de carbono se haya detenido, se puede añadir agua adicional en una o más fases adicionales para alcanzar un contenido deseado de a/c, o una fluidez deseada, en la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. Las mezclas de cemento contienen áridos, y se apreciará que los áridos disponibles pueden tener ya un cierto contenido de agua y que es necesario añadir poca o ninguna agua adicional para conseguir la relación a/c deseada para la primera fase y que, en algunos entornos, puede que no sea posible alcanzar la relación a/c deseada porque los áridos pueden estar demasiado húmedos, en cuyo caso se consigue la relación a/c más cercana a la óptima. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,5, o menor de 0,4, o menor de 0,3, o menor de 0,2, o menor de 0,18, o menor de 0,16, o menor de 0,14, o menor de 0,12, o menor de 0,10, o menor de 0,08, o menor de 0,06. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,4. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,3.

En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,2. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,18. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es menor de 0,14. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,04-0,5, o 0,04-0,4, o 0,04-0,3, o 0,04-0,2, o 0,04-0,18, o 0,04-0,16, o 0,04-0,14, o 0,04-0,12, o 0,04-0,10, o 0,04-0,08. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,06-0,5, o 0,06-0,4, o 0,06-0,3, o 0,06-0,24, o 0,06-0,22, o 0,06-0,2, o 0,06-0,18, o 0,06-0,16, o 0,06-0,14, o 0,06-0,12, o 0,06-0,10, o 0,06-0,08. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,08-0,5, o 0,08-0,4, o 0,08-0,3, o 0,08-0,24, o 0,08-0,22, o 0,08-0,2, o 0,08-0,18, o 0,08-0,16, o 0,08-0,14, o 0,08-0,12, o 0,08-0,10. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,06-0,3. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,06-0,2. En ciertas realizaciones, la relación a/c para la primera fase es de 0,08-0,2. La adición de agua adicional en fases posteriores a la primera fase, cuando, en general, no se introduce más dióxido de carbono, puede hacerse para conseguir una cierta relación a/c final, o para conseguir una cierta fluidez. Por ejemplo, para un camión hormigonera, se añade una cierta cantidad de agua a la mezcla en el lugar de producción de la premezcla, a continuación se podrá añadir más agua en el lugar de trabajo para conseguir una fluidez adecuada en el lugar de trabajo. La fluidez se puede medir mediante cualquier método adecuado, por ejemplo, la conocida prueba de asentamiento.

En algunas realizaciones, el dióxido de carbono se añade durante el mezclado a una parte de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en una fase, a continuación, se añaden porciones adicionales de materiales, por ejemplo, más mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en una o más fases adicionales.

La mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso se introduce en la mezcla de cemento del mezclado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, en la primera fase del mezclado, a un cierto caudal y durante una cierta duración para conseguir una exposición total al dióxido de carbono. El caudal y la duración dependerán, por ejemplo, de la pureza del dióxido de carbono gaseoso, del tamaño total del lote para la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y del nivel deseado de carbonatación de la mezcla. Se puede utilizar un sistema dosificador y una válvula o válvulas ajustables en uno o más conductos para controlar y ajustar los caudales. En algunos casos, la duración del flujo de dióxido de carbono para proporcionar la exposición es igual o menor de un tiempo máximo, tal como igual o menor de 5, 4, 3, 2 o un minuto. En particular, la duración del flujo de dióxido de carbono es menor o igual a 5 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es menor o igual a 4 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es menor o igual a 3 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es menor o igual a 2 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es menor o igual a 1 min. En algunos casos, la duración del flujo de dióxido de carbono para proporcionar la exposición está dentro de un intervalo de tiempos, tales como 0,5-5 min, o 0,5-4 min, o 0,5-3 min, o 0,5-2 min, o 0,5-1 min, o 1-5 min, o 1-4 min, o 1-3 min, o 1-2 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de

dióxido de carbono es de 0,5-5 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 0,5-4 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 0,5-3 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 1-5 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 1-4 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 1-3 min. En ciertas realizaciones, la duración del flujo de dióxido de carbono es de 1-2 min.

El caudal y la duración del flujo pueden fijarse o ajustarse para conseguir el nivel de carbonatación deseado, medido en peso de cemento (pdc). Se apreciará que el nivel preciso de carbonatación dependerá de las características de una mezcla y una operación de mezclado dadas. La dosis de dióxido de carbono es del 0,01-1,0 % en peso de cemento (pdc), y el nivel de carbonatación puede ser superior al 0,5 % en pdc. El nivel de carbonatación puede determinarse mediante cualquier método adecuado, tal como por el método convencional de análisis de combustión, por ejemplo, calentando la muestra y cuantificando la composición del gas desprendido. Puede utilizarse un instrumento tal como Eltra CS-800 (KR Analytical, Cheshire, Reino Unido) o un instrumento de LECO (LECO Corporation, St. Joseph, Michigan).

Se apreciará que el nivel de carbonatación también depende de la eficiencia de la carbonatación, y que inevitablemente parte del dióxido de carbono administrado a la mezcla de cemento de mezcla se perderá en la atmósfera; por tanto, la cantidad real de dióxido de carbono administrada puede ajustarse tomando como base la eficiencia prevista de la carbonatación. Por tanto, para el nivel de carbonatación deseado, puede añadirse un factor apropiado para determinar la cantidad de dióxido de carbono que debe administrarse como una dosis a la mezcla de cemento; por ejemplo, si la eficiencia esperada es del 50 % y el nivel de carbonatación deseado es del 1 % en pdc, entonces habría que administrar a la mezcla una dosis del 2 % en pdc. En la presente invención, la dosis de dióxido de carbono es del 0,01-1,0 % en peso de cemento (pdc).

Carbonatación a dosis bajas

En ciertas realizaciones, se utiliza un nivel de carbonatación relativamente bajo, por ejemplo, un nivel de carbonatación menor del 1 %, 0,8 %, 0,7 %, 0,6 %, 0,5 %, 0,4 %, 0,3 %, 0,2 %, 0,1 % o 0,05 % en pdc. Se ha descubierto que ciertas propiedades, por ejemplo, el desarrollo temprano de la resistencia y el fraguado, pueden acelerarse en las mezclas de cemento, tales como las mezclas de cemento hidráulico, que están expuestas a unos niveles relativamente bajos de dióxido de carbono durante el mezclado. Es posible que, en algunos casos, la exposición puede ser lo suficientemente baja como para que el grado de carbonatación no sea mensurablemente superior al de una mezcla de cemento similar que no haya sido expuesta al dióxido de carbono; no obstante, la exposición puede dar lugar a las propiedades mejoradas deseadas. Por tanto, en ciertas realizaciones, la mezcla de cemento de mezcla se expone a una cierta dosis relativamente baja de dióxido de carbono (en algunos casos, independientemente del valor de carbonatación final); en este sentido, el dióxido de carbono se utiliza como un aditivo cuya concentración final en la mezcla de cemento no es importante, sino más bien sus efectos sobre las propiedades de la mezcla. En ciertas realizaciones, la mezcla puede exponerse a una dosis de dióxido de carbono no superior al 1 %, 0,8 %, 0,7 %, 0,6 %, 0,5 %, 0,4 %, 0,3 %, 0,2 %, 0,1 % o 0,05 % en pdc, y/o al menos 0,01, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 %, tal como una dosis del 0,01-1 %, 0,01-0,8 %, 0,01-0,6 %, 0,01-0,5 %, 0,01-0,4 %, 0,01-0,3 %, 0,01-0,2 % o 0,01-0,1 % en pdc, o una dosis del 0,02-1 %, 0,02-0,8 %, 0,02-0,6 %, 0,02-0,5 %, 0,02-0,4 %, 0,02-0,3 %, 0,02-0,2 % o 0,02-0,1 % en pdc, o una dosis del 0,04-1 %, 0,04-0,8 %, 0,04-0,6 %, 0,04-0,5 %, 0,04-0,4 %, 0,04-0,3 %, 0,04-0,2 % o 0,04-0,1 % en pdc, o una dosis del 0,06-1 %, 0,06-0,8 %, 0,06-0,6 %, 0,06-0,5 %, 0,06-0,4 %, 0,06-0,3 %, 0,06-0,2 % o 0,06-0,1 % en pdc, o una dosis del 0,1-1 %, 0,1-0,8 %, 0,1-0,6 %, 0,1-0,5 %, 0,1-0,4 %, 0,1-0,3 % o 0,1-0,2 % en pdc. La elección del nivel de exposición dependerá de factores tales como la eficiencia de la carbonatación en el proceso utilizado, el grado de modulación de una o más propiedades deseadas (por ejemplo, desarrollo temprano de la resistencia o fraguado temprano), el tipo de operación (por ejemplo, moldeo en seco frente a moldeo en húmedo) y el tipo de cemento, ya que diferentes tipos de cemento pueden producir mezclas con diferentes grados de modulación con una exposición dada a dióxido de carbono. Si se utiliza un cemento o un tipo de mezcla desconocidos, se pueden realizar trabajos preliminares para encontrar una o dosis de dióxido de carbono diferentes adecuadas para producir los resultados deseados. Especialmente en el caso del desarrollo acelerado de la resistencia y/o del fraguado, el uso de una dosis apropiada de dióxido de carbono puede permitir que el trabajo progrese más rápidamente, por ejemplo, los vertidos verticales pueden ascender más rápidamente, las superficies pueden acabarse antes, los moldes pueden retirarse antes, y similares.

Adaptación de la carbonatación a la mezcla y a las condiciones del lugar

En todos los ajustes de dosificación, por ejemplo, a dosis bajas, la dosis elegida para una mezcla dada, así como las condiciones de dosificación, por ejemplo, para producir un aumento deseado de la resistencia o del fraguado tempranos, o para producir un aumento óptimo de la resistencia o del fraguado tempranos, puede depender de la mezcla y especialmente del cemento utilizado en la mezcla, así como las condiciones sobre el terreno donde se producen realmente la dosificación y el uso. Los cementos utilizados en las mezclas se producen generalmente a nivel local y varían de una ubicación geográfica a otra, y la química particular de un cemento puede determinar si se beneficiará o no de la carbonatación, así como los parámetros de dosificación óptimos, tales como la dosis global, el momento de la adición de dióxido de carbono, la tasa de adición y similares. Otros componentes de una mezcla particular, por ejemplo, un MCS tal como cenizas volantes o escoria, también pueden proporcionar una o más especies

reactivas que también influyen en la carbonatación. Véase, por ejemplo, el Ejemplo 45.

Los cementos que son adecuados para la carbonatación (con respecto al fraguado acelerado y/o al desarrollo temprano de la resistencia) pueden identificarse fácilmente, y/o seleccionarse una o unas dosis, así como el momento de la dosificación, a partir de las curvas de isocalorimetría utilizando cualquier procedimiento adecuado, tal como un procedimiento en el que se produce una pasta de cemento, mortero u hormigón utilizando el cemento que se está probando. También pueden someterse a prueba los aditivos, por separado o como parte de un protocolo global, para determinar sus efectos sobre la trabajabilidad y otras características deseadas, así como las dosis óptimas.

Un procedimiento ilustrativo es como sigue:

1. Preparar una muestra "control-control" sin carbonatación ni aditivos.
 2. Preparar una muestra de control sin carbonatación ni aditivos para obtener la trabajabilidad "de control" deseada, si se usa aditivo.
 3. Rampa de dosificación de la captación de CO₂: Preparar una o más muestras carbonatadas con dosis de CO₂ cada vez mayores. Puede incluirse un aditivo químico para restaurar la trabajabilidad, y/o para mejorar el desarrollo temprano de la resistencia. Los propios aditivos pueden optimizarse preparando muestras carbonatadas con una dosis fija de CO₂ y un tipo y dosificación variables de aditivos (por ejemplo, comparar gluconato frente a fructosa, antes y después del CO₂, con dispersante)
 4. Representar gráficamente el caudal de potencia/calor de cada mezcla en función del tiempo
 5. Representar gráficamente el caudal integrado de potencia/calor, energía/calor de hidratación, en función del tiempo, excluyendo la exoterma inicial que se produce antes del inicio del pico de hidratación principal en el gráfico de flujo de calor. Véase la norma ASTM C 1679 para la definición del pico de hidratación principal.
- Las siguientes características del diagrama de flujo térmico y del calor de hidratación son indicativas de un desarrollo acelerado del fraguado o de una resistencia temprana:
- a) Si el inicio del pico de hidratación principal en el gráfico de potencia / flujo de calor se produce antes para una mezcla carbonatada, esto indica un fraguado acelerado y un desarrollo temprano de la resistencia
 - b) Si la energía/calor de hidratación de una mezcla carbonatada supera el calor de hidratación de la mezcla de control, esto indica una resistencia temprana continuamente superior durante el tiempo en que el calor de hidratación se mantiene por encima del control.
 - c) Si se obtienen los resultados de varias dosificaciones diferentes de CO₂ y/o de aditivos, entonces se pueden utilizar los resultados no sólo para identificar los cementos que responden favorablemente a la carbonatación, sino también para "marcar" la captación de CO₂ y la dosis de aditivo óptimas para dicho cemento con respecto al desarrollo de las propiedades mecánicas en un curado temprano.

La información obtenida es especialmente útil para evaluar cementos aptos para la carbonatación en aplicaciones de premoldeo y en cualquier otra aplicación en la que el fraguado acelerado y la resistencia temprana sean valiosos. Opcionalmente, se pueden preparar muestras para probar el desarrollo de la resistencia, para verificar los resultados de la calorimetría. En general, se utilizan aditivos para restaurar la trabajabilidad con el fin de generar muestras bien compactadas con datos de resistencia fiables. Las dosis de dióxido de carbono y, opcionalmente, los tipos y dosis de aditivo, para una mezcla dada, pueden determinarse de este modo de forma rápida y eficaz, a continuación, la dosis determinada en la prueba se utiliza en la carbonatación real.

En la carbonatación a dosis bajas, tal como en todas las mezclas de cemento, por ejemplo, hormigón, carbonatación, pueden manipularse diversos factores para producir uno resultados óptimos o deseados. Éstos pueden incluir uno o más de: tiempo tras el inicio del mezclado en el que se aplica el dióxido de carbono; número de dosis de dióxido de carbono; velocidad a la que se suministra el dióxido de carbono a la cámara de mezcla; forma del dióxido de carbono (gas, sólido y/o disuelto en agua); y similares. Se dice que la mezcla ha comenzado al añadir la primera alícuota de agua a la mezcla que contiene cemento. Se apreciará que, en ciertos casos, los componentes de una mezcla de hormigón, por ejemplo, los áridos, pueden estar húmedos, y que "el agua de la primera mezcla" puede ser el agua del árido. El dióxido de carbono puede suministrarse a una mezcla antes de la primera adición de agua, por ejemplo, inundando una cámara o un espacio de cabeza con dióxido de carbono antes de la adición de agua, pero en este caso se considera que la aplicación de dióxido de carbono se produce cuando se añade la primera agua, ya que prácticamente no se producirá ninguna reacción hasta que el dióxido de carbono se disuelva en el agua de mezcla.

En ciertas operaciones, por ejemplo, operaciones de premoldeo, hay poca flexibilidad en cuanto al momento en que se añade el dióxido de carbono al hormigón de mezcla, ya que los tiempos de mezcla suelen ser muy cortos y el hormigón se suele utilizar muy rápidamente tras el mezclado. En estas operaciones, la adición de dióxido de carbono al hormigón de mezcla suele comenzar simultáneamente con el inicio del mezclado o en unos segundos o, como máximo, minutos desde el inicio del mezclado. En otras operaciones, por ejemplo, operaciones de premezclado, hay varios momentos en los que se puede añadir el dióxido de carbono al hormigón de mezcla. El dióxido de carbono se puede añadir durante el procesamiento por lotes, que puede producirse tanto en una mezcladora fija como en el tambor del camión hormigonero; en este caso, el dióxido de carbono entra en contacto con el cemento en hidratación en un momento muy próximo al inicio del mezclado, como es el presente caso. Algunas operaciones de premezclado incluyen una o más operaciones adicionales después del procesamiento por lotes pero antes de que el camión haya salido de la instalación de procesamiento por lotes, por ejemplo, una estación de lavado para lavar el camión después

del procesamiento por lotes, y en estas operaciones puede añadirse adicionalmente dióxido de carbono en la instalación de procesamiento por lotes después del procesamiento por lotes, por ejemplo, en una estación de lavado, que implicará la adición de dióxido de carbono en un momento varios minutos después de que comience el mezclado. Adicionalmente, el dióxido de carbono puede añadirse en la obra después de que el hormigón haya sido transportado, y en estos casos, la adición de dióxido de carbono se añadirá al hormigón de mezcla en un momento hasta varias horas después de que comience el mezclado. Se puede utilizar cualquier combinación adecuada de estos enfoques.

Por tanto, en ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se aplica a la mezcla a los 0 min, es decir, el dióxido de carbono está presente en la cámara de mezcla cuando se suministra la primera agua de mezcla, o el suministro del dióxido de carbono a la cámara de mezcla comienza cuando se aplica la primera agua de mezcla, o ambas cosas. En ciertas realizaciones, el dióxido de carbono se aplica al menos 0, 1, 5, 10, 20, 30, 40, o 50 s, o 1, o 2 min después de comenzar el mezclado, y/o no más de 1, o 2 min después de comenzar el mezclado. Específicamente, en la presente invención, la administración del dióxido de carbono comienza en los 3 min siguientes al inicio del mezclado de la mezcla de hormigón. La duración de la administración de dióxido de carbono puede ser menor o igual a 5, 4, 3, 2 o 1 min, o menor o igual a 50, 40 o 30 s, y/o mayor o igual a 5, 10, 20, 30, 40 o 50 s, o mayor o igual a 1, 2, 3, 4 o 5 min. En ciertas realizaciones, la duración de la administración de dióxido de carbono es de 5 segundos a 5 min. En ciertas realizaciones, la duración de la administración de dióxido de carbono es de 10 segundos a 4 min. En ciertas realizaciones, la duración de la administración de dióxido de carbono es de 20 segundos a 3 min. En ciertas realizaciones, la administración del dióxido de carbono comienza no más de 1 min después de que comience el mezclado. Por ejemplo, en el caso del dióxido de carbono suministrado a una mezcla de hormigón en un camión hormigonero, los componentes de la mezcla, incluyendo al menos parte del agua de mezcla, pueden añadirse al camión, y puede ser deseable que la adición de dióxido de carbono no comience hasta al menos 2 min o más después de que comience el mezclado. Dicha adición podría producirse, por ejemplo, en una estación de lavado, donde el conductor se detiene para lavar el camión antes de iniciar la entrega; el camión suele estar parado en la estación de lavado durante al menos 5-10 min, y se puede utilizar un sistema de suministro de dióxido de carbono *in situ* para administrar dióxido de carbono al tambor del camión durante la parada en la estación de lavado. Una parte o la totalidad de la dosis de dióxido de carbono puede administrarse de esta manera, por ejemplo, administrando dióxido de carbono al camión a través de la línea de agua (aunque puede utilizarse cualquier vía adecuada); en las realizaciones donde hay una fuente de dióxido de carbono acoplada al camión, puede haber algún mecanismo que recuerde al conductor que debe desacoplarla antes de partir, tal como una alarma. Adicionalmente, el momento deseable para la adición del dióxido de carbono a la mezcla puede ser más tarde en el tiempo de mezcla, tal como, por ejemplo, en un momento en el que el camión está normalmente de camino a la obra, o en la obra. En este caso, se puede acoplar al camión una fuente portátil de dióxido de carbono, con valvulería y tuberías adecuadas, para administrar una o más dosis de dióxido de carbono en el tambor del camión en un momento posterior. Puede incluirse en el sistema un controlador, que puede ser autónomo o activarse a distancia y que puede enviar señales a un lugar lejano sobre la dosificación y otra información, de modo que la dosificación comience en un momento predeterminado tras el inicio del mezclado y continúe durante un tiempo predeterminado, o continúe hasta que se detecte alguna característica o características predeterminadas de la mezcla de hormigón. La fuente de dióxido de carbono puede ser tan simple como un tanque presurizado de dióxido de carbono gaseoso, que puede rellenarse periódicamente, por ejemplo, cuando el camión regresa al lugar de procesamiento por lotes, para garantizar un suministro suficiente de dióxido de carbono para cualquier ronda de carbonatación posterior, por ejemplo, sin necesidad de determinar los niveles de dióxido de carbono en el tanque. En estas realizaciones, parte o toda la carbonatación puede producirse en la obra, por ejemplo, tomando como base la determinación de una o más características del hormigón.

La velocidad de administración del dióxido de carbono puede ser cualquiera que se desee, y la tasa puede controlarse. Puede que se desee una velocidad de administración más lenta, especialmente en operaciones de mezcla en húmedo tales como las de premezclado, donde se sabe que una mayor relación a/c ralentiza la carbonatación en comparación con las operaciones de menor a/c, por ejemplo, algunas operaciones de premoledo. Un ejemplo para controlar la velocidad de administración es dividir la dosis total de dióxido de carbono en dos o más dosis más pequeñas. Por tanto, la dosis de dióxido de carbono puede administrarse como una sola dosis o como múltiples dosis, por ejemplo, como al menos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 o 10 dosis, y/o no más de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15 o 20 dosis; tal como 2-10 dosis o de 2-5 dosis. Cada dosis puede ser de igual tamaño que las demás o diferente, y el intervalo entre las dosis puede ser igual o no, según se desee. El número y el tamaño exactos de las dosis pueden estar predeterminados, o pueden venir dictados por una o más características de la mezcla que se controlen. El dióxido de carbono puede estar en cualquier forma adecuada, tal como gas, o una mezcla de gas/sólido.

Además, o como alternativa, para unas velocidades de administración más lentas donde se controla la velocidad, el dióxido de carbono gaseoso puede suministrarse a una velocidad controlada y relativamente lenta. Por tanto, en algunas realizaciones, el dióxido de carbono se administra, al menos en parte, como un gas a una velocidad controlada, donde la velocidad puede ser no superior a 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 u 800 SLPM (litros estándar por minuto), y o no menor de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 o 900 SLPM. Por ejemplo, en un camión hormigonero de camino a una obra, el dióxido de carbono puede administrarse a una velocidad tal que se administre la dosis completa mientras el camión está en tránsito, por ejemplo, mediante un sistema dosificación portátil como se ha descrito anteriormente, durante un periodo de muchos minutos o incluso una hora o más, por ejemplo, a una velocidad de 100 a 600 SLPM, o incluso a velocidades inferiores. La velocidad de administración puede ser constante, o puede variar según un

programa predeterminado, o según lo dicten una o más características de la mezcla de hormigón que se controlen. Pueden utilizarse tanto dosis divididas como dosis a tasa controlada, según se desee o lo dicten la mezcla particular y los requisitos del trabajo.

- 5 El método de la invención permite unos niveles muy elevados de eficiencia de captación del dióxido de carbono en el hormigón de mezcla, donde la eficiencia de captación es la relación entre el dióxido de carbono que permanece en el hormigón de mezcla como productos de reacción estables y la cantidad total de dióxido de carbono a la que está expuesto el hormigón de mezcla. En ciertas realizaciones, la eficiencia de captación de dióxido de carbono es de al menos un 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 96, 97, 98, 99 o 99 %, o un 40-100, 50-100, 60-100, 70-100, 80-100, 90-100, 40-99, 50-99, 60-99, 70-99, 80-99 o 90-99 %.

A. Aditivos

- 15 Los aditivos se utilizan a menudo en la mezcla de cemento, por ejemplo, mezclas de cemento hidráulico, tales como las mezclas de hormigón, para transmitir las propiedades deseadas a la mezcla. Los aditivos son composiciones que se añaden a una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico tal como el hormigón, para dotarla de unas características deseables que no se obtienen con la mezcla de cemento básico, por ejemplo, mezclas de cemento hidráulico, tales como mezclas de hormigón, o para modificar las propiedades de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es decir, hormigón, para hacerlo más fácilmente utilizable o más adecuado para un fin particular o para reducir costes. Un aditivo es cualquier material o composición, aparte del cemento hidráulico, áridos y agua, que se utiliza como componente de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, tal como el hormigón o el mortero, para mejorar alguna característica o reducir su coste. En algunos casos, la mezcla de cemento deseada, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, las características de rendimiento del hormigón pueden lograrse únicamente mediante el uso de un aditivo. En algunos casos, el uso de un aditivo permite utilizar métodos o diseños de construcción menos costosos, cuyo ahorro puede compensar con creces el coste del aditivo.

- 30 En ciertas realizaciones, la mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, hormigón, puede presentar unas características mejoradas en comparación con la misma mezcla que no fue expuesta a dióxido de carbono. Esto puede depender del tipo de cemento utilizado en la mezcla de cemento carbonatado y/o de la dosis de dióxido de carbono utilizada y de la carbonatación final conseguida. En este sentido, el propio dióxido de carbono puede actuar como aditivo. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, la mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de hormigón, tiene unas propiedades superiores tales como mayor resistencia, tal como una mayor resistencia a los 1, 7 o 28 días, por ejemplo, una resistencia al menos un 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30 o 40 % mayor que la mezcla de hormigón no carbonatado a 1, 7 o 28 días. En general en el presente documento, "resistencia" se refiere a la resistencia a la compresión, tal como se entiende generalmente ese término en la técnica. En ciertas realizaciones, la mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, hormigón, puede mostrar un fraguado acelerado en comparación con la mezcla no carbonatada, tal como un tiempo más rápido hasta el fraguado inicial (por ejemplo, medición penetrométrica de 3,45 MPa (500 psi) según la norma ASTM C403) o un tiempo más rápido hasta el fraguado final (por ejemplo, medición penetrométrica de 27,28 MPa (4000 psi) según la norma ASTM C403), o ambos, tal como, por ejemplo, menos del 95, 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50, 40, 30 o 20 % del tiempo de fraguado inicial o final en comparación con la mezcla no carbonatada. Una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, las mezclas de cemento hidráulico, también pueden proporcionar mezclas finales de hormigón que tengan una menor absorción de agua en comparación con las no carbonatadas, tal como al menos un 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30 o 40 % menos de absorción de agua. La mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es decir, hormigón, también puede producir un producto final de menor densidad pero con una resistencia comparable al no carbonatado, tal como al menos un 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30 o 40 % menos de densidad con una resistencia a la compresión dentro del 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15 o 20 % del no carbonatado, por ejemplo, al menos un 5 % menos de densidad con una resistencia a la compresión dentro del 2 %.

- 50 Sin embargo, dependiendo del diseño de la mezcla, la mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es decir, hormigón, puede, alternativamente o además, presentar unas propiedades que se desea modular, tal como mediante la adición de un aditivo. Por ejemplo, una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico para usar en una operación de moldeo en húmedo puede tener unas características de trabajabilidad/fluidez que no sean las óptimas para una operación de moldeo en húmedo sin la adición de un aditivo u otra manipulación de la mezcla, por ejemplo, la adición de agua adicional. Como otro ejemplo, las mezclas carbonatadas pueden tener características de resistencia, por ejemplo, resistencia a la compresión en uno o más puntos temporales, que no son óptimas sin la adición de un aditivo u otra manipulación de la mezcla. En algunos casos, el diseño de la mezcla ya exigirá un aditivo, cuyo efecto sobre las propiedades de la mezcla puede verse afectado por la carbonatación, requiriendo la coordinación del momento de la aditivación en relación con la adición de dióxido de carbono, u otra manipulación. Además, puede utilizarse un aditivo para modular uno o más aspectos de la propia carbonatación, por ejemplo, para aumentar la tasa de captación del dióxido de carbono.

- 65 El hormigón puede utilizarse en operaciones de moldeo en húmedo, tal como en ciertas operaciones de premoldeo o en camiones hormigonera que transportan el hormigón a una ubicación de la obra donde se utiliza, por ejemplo, se vierte en moldes o se utiliza de otro modo en la obra, o en operaciones de moldeo en seco, que son operaciones de

premoldeo. En el caso de una operación de moldeo en húmedo, la fluidez del hormigón debe mantenerse a un nivel compatible con su uso en la operación, por ejemplo, en el caso de un camión hormigonera, en la obra; mientras que para una operación de moldeo en seco es deseable un hormigón que no fluya (asentamiento cero). Tanto en las operaciones de moldeo en seco como en las de moldeo en húmedo, la resistencia, por ejemplo, la resistencia a la compresión, es importante, tanto a corto plazo, para que el hormigón se pueda mantener en pie, por ejemplo, se puedan retirar los moldes, manipular los objetos moldeados, etc., en el menor tiempo posible, como a largo plazo, para que se alcance la resistencia final requerida. La fluidez de una mezcla puede evaluarse midiendo el asentamiento; la resistencia puede evaluarse mediante una o más pruebas de resistencia, tales como la resistencia a la compresión. Otras propiedades que pueden verse afectadas por la carbonatación; en algunos casos el efecto es positivo, pero si el efecto es negativo, se corrige mediante el uso de uno o más aditivos. Dichas propiedades incluyen la contracción y la absorción de agua.

En ciertos casos, carbonatación de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, puede afectar a la fluidez de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es decir, una mezcla de hormigón, para ser utilizada en una operación de moldeo en húmedo, tal como en un camión hormigonera que transporta la mezcla a una obra. Por tanto, en ciertas realizaciones en las que se produce una mezcla carbonatada (tal como para su uso con un camión hormigonera), pueden añadirse uno o más aditivos para modular la fluidez de la mezcla carbonatada, bien antes, durante o después de la carbonatación, o cualquier combinación de los mismos, de modo que esté dentro de un cierto porcentaje de la fluidez de la misma mezcla sin carbonatación, o de una cierta fluidez predeterminada. La adición de dióxido de carbono, componentes de la mezcla, por ejemplo, mezcla de hormigón, y/o de componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o de una cierta fluidez predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final esté dentro del 20 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 20 % de una fluidez deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final esté dentro del 10 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 10 % de una fluidez deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final esté dentro del 5 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 5 % de una fluidez deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final esté dentro del 2 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 2 % de una fluidez deseada predeterminada. Se puede utilizar cualquier método de medición adecuado para determinar la fluidez, tal como la conocida prueba de asentamiento. Se puede usar cualquier aditivo adecuado, como se describe en el presente documento, tales como hidratos de carbono o derivados de hidratos de carbono, por ejemplo, fructosa, sacarosa, glucosa, glucoheptonato de sodio o gluconato de sodio, tal como glucoheptonato de sodio o gluconato de sodio.

En ciertas realizaciones, pueden añadirse uno o más aditivos para modular la mezcla de modo que pueda conseguirse una resistencia deseada, ya sea una resistencia temprana, una resistencia tardía o ambas. La resistencia de la mezcla de cemento carbonatado puede depender del diseño de la mezcla, por tanto, aunque con algunos diseños de mezcla la carbonatación puede aumentar la resistencia en uno o más puntos temporales, en otros diseños de mezcla la carbonatación puede disminuir la resistencia en uno o más puntos temporales. Véanse los Ejemplos de varios diseños de mezcla en los que la carbonatación aumentó o disminuyó la resistencia en uno o más puntos temporales. En algunos casos, la carbonatación disminuye la resistencia en uno o más puntos temporales y se desea devolver la resistencia en el punto temporal dentro de un cierto límite aceptable. En ciertos casos, se añaden uno o más aditivos para aumentar la resistencia más allá de la observada en el hormigón no carbonatado de la misma densidad. Esto se puede hacer, por ejemplo, para producir un hormigón ligero con una resistencia comparable a la del hormigón no carbonatado, más denso. En otros casos, uno o más aditivos añadidos a un cemento carbonatado provocan o agravan la pérdida de resistencia y se desea recuperar dicha pérdida. Por tanto, en ciertas realizaciones se añade un aditivo a la mezcla carbonatada, bien antes, durante o después de la carbonatación, o una combinación de los mismos, en unas condiciones tales que la mezcla carbonatada presente resistencia, por ejemplo, resistencia a la compresión a los 1, 7, 28 y/o 56 días, dentro de un porcentaje deseado de la resistencia de la misma mezcla sin carbonatación, o de una resistencia predeterminada, por ejemplo, dentro del 50, 40, 30, 20, 15, 12, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 %. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia en un punto temporal dado de la mezcla final esté dentro del 20 % de la resistencia que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 20 % de una resistencia deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia en un punto temporal dado de la mezcla final esté dentro del 10 % de la resistencia que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 10 % de una resistencia deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia en un punto temporal dado de la mezcla final esté dentro del 5 % de la resistencia que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 5 % de

una resistencia deseada predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, los componentes de la mezcla y/o de componentes adicionales tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia en un punto temporal dado de la mezcla final esté dentro del 2 % de la resistencia que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 2 % de una resistencia deseada predeterminada. En ciertas realizaciones la resistencia es una resistencia a la compresión. Puede utilizarse cualquier método adecuado para probar la resistencia, tal como la resistencia a la flexión o a la compresión, siempre que se utilice la misma prueba para las muestras con y sin carbonatación. Puede utilizarse cualquier aditivo adecuado para conseguir las resistencias deseadas, tales como los aditivos descritos en el presente documento.

Otras propiedades, tales como la absorción de agua, la contracción, la permeabilidad al cloruro, y similares, también pueden probarse y ajustarse de manera similar, y en porcentajes similares, en cuanto a fluidez y/o contracción.

Se apreciará que puede utilizarse más de un aditivo, por ejemplo, 2, 3, 4, 5 o más de 5 aditivos. Por ejemplo, ciertos aditivos tienen efectos deseables sobre la fluidez pero indeseables sobre el desarrollo de la resistencia; cuando se usa un aditivo de este tipo, también puede utilizarse un segundo aditivo que acelere el desarrollo de la resistencia.

Puede utilizarse cualquier aditivo adecuado que tenga el efecto deseado sobre la propiedad o propiedades del cemento carbonatado que se desean modificar. La TABLA 1 enumera clases y ejemplos ilustrativos de aditivos que pueden utilizarse, por ejemplo, para modular los efectos de la carbonatación.

TABLA 1
Aditivos para usar con cemento carbonatado

Clase química	Subclase	Aplicación del cemento	Ejemplos
Sacáridos	Azúcares	Retardante	Fructosa, glucosa, sacarosa
	Ácidos/bases de azúcar	Retardante	Gluconato de sodio, glucoheptonato de sodio
Polímeros orgánicos	Policarboxílico Éteres Sulfonatado	Plastificante	Muchas marcas comerciales
	Naftaleno	Plastificante	Muchas marcas comerciales
	Formaldehído Sulfonatado	Plastificante	Muchas marcas comerciales
	Melamina formaldehído Lignosulfonatos	Plastificante	Muchas marcas comerciales
Sales inorgánicas	Alcalinotérreo	Acelerante	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$
	Que contiene metal Que contiene metal alcalino	Acelerante	NaCl , KOH
	Que contiene carbonato	-	NaHCO_3 , Na_2CO_3
Alcanolaminas	Alcanolaminas terciarias	Acelerantes/aditivos de trituración	Trietanolamina, Triisopropilamina
Fosfonatos		Retardantes	Ácido nitrilotrimetilfosfónico, ácido 2-fosfonobutan-1,2,4-tricarboxílico
Tensioactivos	Resinas Vinsol, tensioactivos sintéticos	Agentes de arrastre de aire	Muchas marcas comerciales
Agentes quelantes	Diferentes químicas	Retardantes	EDTA, Ácido cítrico, ácido nitrilotriacético

En ciertas realizaciones, se añade uno o más aditivos a una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, antes, durante o después de la carbonatación de la mezcla, o a combinación de los mismos, donde el aditivo es un retardante del fraguado, un plastificante, un acelerante o un agente de arrastre de aire. Cuando se desea modular la fluidez, son útiles los retardantes del fraguado y los plastificantes. Cuando se desea modular el desarrollo de la resistencia, son útiles los acelerantes. Si se desea aumentar la tasa de captación de dióxido de carbono, ciertos agentes de arrastre de aire pueden ser útiles.

Algunos retardantes del fraguado incluyen hidratos de carbono, es decir, sacáridos, tales como azúcares, por ejemplo, fructosa, glucosa y sacarosa, y ácidos/bases de azúcar y sus sales, tales como gluconato de sodio y glucoheptonato de sodio; fosfonatos, tales como ácido nitrilotrimetilfosfónico, ácido 2-fosfonobutan-1,2,4-tricarboxílico; y agentes quelantes, tales como EDTA, ácido cítrico y ácido nitrilotriacético. Otros sacáridos y mezclas que contienen sacáridos incluyen las melazas y el jarabe de maíz. En ciertas realizaciones, el aditivo es gluconato de sodio. Otros aditivos

ilustrativos que pueden utilizarse como retardantes del fraguado incluyen sulfato de sodio, ácido cítrico, BASF Pozzolith XR, sílice firme, sílice coloidal, hidroxietilcelulosa, hidroxipropilcelulosa, cenizas volantes (como se definen en la norma ASTM C618), aceites minerales (tal como nafténico ligero), arcilla hectorita, polioxialquilenos, gomas naturales, o mezclas de los mismos, superplastificantes de policarboxilato, naftaleno HRWR (reductor de agua de alta gama). Algunos retardantes del fraguado adicionales que pueden utilizarse incluyen, pero sin limitación, un compuesto de oxiboro, lignina, un ácido polifosfónico, un ácido carboxílico, un ácido hidroxicarboxílico, ácido policarboxílico, ácido carboxílico hidroxilado, tal como ácido fumárico, itacónico, malónico, bórax, glucónico y tartárico, lignosulfonatos, ácido ascórbico, ácido isoascórbico, copolímero de ácido sulfónico y ácido acrílico, y sus sales correspondientes, polihidroxisilano, poliácridamida. Algunos ejemplos ilustrativos de retardantes se exponen en las Patentes de EE.UU. N.ºs 5.427.617 y 5.203.919.

Algunos acelerantes incluyen compuestos que contienen calcio, tales como CaO , $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, estearato de calcio o CaCl_2 , y compuestos que contengan magnesio, tales como hidróxido de magnesio, óxido de magnesio, cloruro de magnesio o nitrato de magnesio. Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, se cree que, en el caso de un cemento carbonatado, el compuesto de calcio o de magnesio añadido puede proporcionar calcio o magnesio libre para reaccionar con el dióxido de carbono, proporcionando un sumidero para el dióxido de carbono que ahorre el calcio de la mezcla de cemento, o proporcionando una ubicación de carbonatación diferente al del calcio del cemento, o ambas cosas, preservando así el desarrollo temprano de la resistencia. En ciertas realizaciones, se puede añadir CaO (cal) a la mezcla, o se puede preferir un cemento con alto contenido en cal libre para la mezcla. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, el contenido de cal libre (CaO) del cemento utilizado en una mezcla de cemento particular, tal como mortero u hormigón, puede aumentarse mediante la adición de CaO a la mezcla, generalmente antes de que la mezcla se exponga al dióxido de carbono, tal como mediante la adición de un 0,01-50 %, o un 0,01-10 %, o un 0,01-5 %, o un 0,01-3 %, o un 0,01-2 %, o un 0,01-1 % de CaO , o un 0,1-50 %, o un 0,1-10 %, o un 0,1-5 %, o un 0,1-3 %, o un 0,1-2 %, o un 0,1-1 %, o un 0,2-50 %, o un 0,2-10 %, o un 0,2-5 %, o un 0,2-3 %, o un 0,2-2 % de CaO , o un 0,2-1 %, o un 0,5-50 %, o un 0,5-10 %, o un 0,5-5 %, o un 0,5-3 %, o un 0,5-2 % de CaO , o un 0,5-1 % de CaO en pdc. Como alternativa, puede añadirse CaO para que el contenido global de CaO de la mezcla de cemento alcance el nivel deseado, tal como un 0,5-10 %, o un 0,5-5 %, o un 0,5-3 %, o un 0,5-2 %, o un 0,5-1,5 %, o al menos un 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,2, 2,5, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0, 7,0, 8,0, 9,0, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % o 50 % CaO en pdc. Por lo general, el CaO añadido también aumentará la tasa de captación de dióxido de carbono por la mezcla durante el mezclado, permitiendo así una mayor captación de dióxido de carbono durante un tiempo de exposición dado, o un menor tiempo de exposición para alcanzar un nivel de captación dado. Otros acelerantes del fraguado incluyen, pero sin limitación, una sal de nitrato o de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio; una sal de nitrito o de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio; un tiocianato de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio; una alcanolamina; un tiosulfato de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio; un hidróxido de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio; una sal de un ácido carboxílico de un metal alcalino, un metal alcalinotérreo o aluminio (preferentemente formiato de calcio); una polihidroxialquilamina; una sal de haluro de un metal alcalino o alcalinotérreo (por ejemplo, cloruro).

El aditivo o aditivos pueden añadirse en cualquier porcentaje final adecuado (pdc), tal como en el intervalo del 0,01-0,5 %, o del 0,01-0,3 %, o del 0,01-0,2 %, o del 0,01-0,1 %, o del 0,01-1,0 %, o del 0,01-0,05 %, o del 0,05 % al 5 %, o del 0,05 % al 1 %, o del 0,05 % al 0,5 %, o del 0,1 % al 1 %, o del 0,1 % al 0,8 %, o del 0,1 % al 0,7 % por peso de cemento. El aditivo puede añadirse en un porcentaje final superior al 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,1, 0,15, 0,2, 0,3, 0,4 o 0,5 %; en ciertos casos, también menos del 5, 4, 3, 2, 1, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1, 0,09, 0,08, 0,07, 0,06, 0,05, 0,04, 0,03, o 0,02 %.

Se ha observado que el momento de la adición de un aditivo dado en relación con la carbonatación de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, puede alterar los efectos del aditivo sobre las propiedades de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, los efectos sobre la fluidez o la resistencia. Por ejemplo, en ciertos diseños de mezcla, la adición de gluconato de sodio tras la carbonatación restablece la fluidez a los niveles deseados, pero puede afectar negativamente al desarrollo temprano de la resistencia; mientras que la adición de gluconato de sodio antes de la carbonatación mantiene el desarrollo temprano de la resistencia pero no restablece óptimamente la fluidez. Como otro ejemplo, en diseños de mezclas en los que se desea un arrastrador de aire, se ha comprobado que si el arrastrador de aire se añade antes de la carbonatación, la densidad de la mezcla aumenta en comparación con si el arrastrador de aire se añade después de la carbonatación. Por tanto, el aditivo o aditivos pueden añadirse antes, durante o después de la carbonatación de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, o cualquier combinación de los mismos. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, el aditivo se añade después de la carbonatación; en otras realizaciones, el aditivo se añade antes de la carbonatación; en otras realizaciones más, el aditivo se añade en dos dosis divididas, una antes de la carbonatación y otra durante y/o después de la carbonatación. Será evidente que si se utiliza más de un aditivo, uno puede añadirse en un momento mientras que otro se añade en otro momento, por ejemplo, en una mezcla en la que se utiliza un arrastrador de aire y también se añade gluconato de sodio para afectar a la fluidez, el gluconato de sodio puede añadirse en dosis divididas, una antes de la carbonatación y otra durante/después de la carbonatación, y el arrastrador de aire puede añadirse después de la carbonatación. Esto último es únicamente ilustrativo, y puede utilizarse cualquier combinación adecuada de aditivos y tiempos para conseguir el efecto o efectos deseados.

Se ha observado que los efectos de la carbonatación y de los aditivos en la mezcla de cemento carbonatado, por

ejemplo, mezclas de cemento hidráulico, son muy específicos de la mezcla. En algunos casos, la carbonatación mejora realmente las propiedades de una mezcla, especialmente en situaciones de moldeo en seco en las que la fluidez no es un problema y no se requiere ningún aditivo. En otros casos, especialmente en situaciones de moldeo en húmedo en las que la fluidez es un problema, pueden ser necesarios uno o más aditivos para restaurar una o más propiedades de la mezcla. Si se añade o no aditivo, y/o qué cantidad se añade, a un lote dado puede determinarse mediante pruebas previas de la mezcla para determinar las propiedades de la mezcla carbonatada y los efectos de un aditivo dado. En algunos casos, el aditivo y/o la cantidad pueden predecirse tomando como base pruebas anteriores, o las propiedades del cemento utilizado en la mezcla, o en consideraciones teóricas. Se ha descubierto que los distintos cementos tienen propiedades diferentes al carbonatarse y también reaccionan de forma diferente a un aditivo dado, y la invención incluye el uso de una biblioteca de datos sobre diferentes tipos de cemento y aditivos para predecir un aditivo/cantidad deseados para un diseño de mezcla, que puede ser una mezcla igual o similar a una mezcla de la biblioteca, o una nueva mezcla cuyas propiedades puedan predecirse a partir de la biblioteca. Además, para un lote dado, la reología (fluidez) puede controlarse durante la carbonatación del lote y el momento exacto y/o la cantidad de aditivo añadida a ese lote particular, o a lotes posteriores, puede ajustarse tomando como base la información obtenida. Puede utilizarse una combinación del valor predicho para el tipo, el momento y/o la cantidad de aditivo, y la modificación del valor tomando como base mediciones en tiempo real en un lote o lotes dados.

En ciertas realizaciones, a una mezcla de cemento se añade un aditivo que comprende un hidrato de carbono o un derivado de un hidrato de carbono, por ejemplo, un mezcla de cemento hidráulico, antes, durante y/o después de la carbonatación de la mezcla, o una combinación de los mismos. En ciertas realizaciones, el aditivo se añade después de la carbonatación de la mezcla de cemento, por ejemplo, un mezcla de cemento hidráulico, o durante y después de la carbonatación. La carbonatación puede realizarse como se describe en el presente documento, por ejemplo, administrando dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, durante el mezclado. El hidrato de carbono o el derivado puede ser cualquier hidrato de carbono como se describe en el presente documento, por ejemplo, sacarosa, fructosa, glucoheptonato de sodio o gluconato de sodio. En ciertas realizaciones, el hidrato de carbono es gluconato de sodio. El hidrato de carbono o el derivado, por ejemplo, gluconato de sodio, puede utilizarse en una concentración adecuada; en algunos casos, la concentración es mayor del 0,01 %, 0,015 %, 0,02 %, 0,025 %, 0,03 %, 0,035 %, 0,04 %, 0,05 %, 0,06 %, 0,07 %, 0,08 %, 0,09 %, 0,1 %, 0,15 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 % o 0,5 % en pdc. La concentración también puede ser menor del 2, 1,5, 1, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2 o 0,1 %. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, el gluconato de sodio se utiliza como aditivo en una dosis de entre el 0,01 y el 1 % en pdc, o entre el 0,01 y el 0,8 %, o entre el 0,01 y el 0,5 %, o entre el 0,01 y el 0,4 % en pdc, o entre el 0,01 y el 0,3 %, o entre el 0,01 y el 0,2 % en pdc, o entre el 0,01 y el 0,1 %, o entre el 0,01 y el 0,05 %, o entre el 0,03 y el 1 % en pdc, o entre el 0,03 y el 0,8 %, o entre el 0,03 y el 0,5 %, o entre el 0,03 y el 0,4 % en pdc, o entre el 0,03 y el 0,3 %, o entre el 0,03 y el 0,2 % en pdc, o entre el 0,03 y el 0,1 %, o entre el 0,03 y el 0,08 %, o entre el 0,05 y el 1 % en pdc, o entre el 0,05 y el 0,8 %, o entre el 0,05 y el 0,5 %, o entre el 0,05 y el 0,4 % en pdc, o entre el 0,05 y el 0,3 %, o entre el 0,05 y el 0,2 % en pdc, o entre el 0,05 y el 0,1 %, o entre el 0,05 y el 0,08 %, o entre el 0,1 y el 1 % en pdc, o entre el 0,1 y el 0,8 %, o entre el 0,1 y el 0,5 %, o entre el 0,1 y el 0,4 % en pdc, o entre el 0,1 y el 0,3 %, o entre el 0,1 y el 0,2 % en pdc. El gluconato de sodio se puede añadir antes, durante o después de la carbonatación de la mezcla, o cualquier combinación de los mismos, y pueden añadirse como una, dos, tres, cuatro o más de cuatro dosis divididas. El hidrato de carbono o el derivado puede añadirse en dos o más dosis, tal como una dosis antes de la carbonatación y una dosis durante y/o después de la carbonatación. En ciertas realizaciones, se utiliza estearato de calcio como aditivo.

En ciertas realizaciones, también se utiliza un segundo aditivo, tal como una cualquiera de los aditivos descritos en el presente documento. En ciertas realizaciones, el segundo aditivo es un acelerante de la resistencia. En ciertas realizaciones, también se utiliza un tercer aditivo, tal como una cualquiera de los aditivos descritos en el presente documento. En ciertas realizaciones, también se utiliza un cuarto aditivo, tal como una cualquiera de los aditivos descritos en el presente documento.

En ciertas realizaciones, se utiliza un aditivo que modula la formación de carbonato de calcio de modo que se favorece una o más formas polimorfas en comparación con la mezcla sin el aditivo, por ejemplo, modula la formación de carbonato de calcio amorfo, por ejemplo, aragonito o calcita. Algunos aditivos ilustrativos de este tipo incluyen polímeros orgánicos tales como poliacrilato y éter de policarboxilato, ésteres de fosfato tales como éster de hidroxiaminofosfato, fosfonato y ácidos fosfónicos tales como nitrilotri(ácido metilfosfónico), ácido 2-fosfonobutan-1,2,4-tricarboxílico, quelantes, tales como gluconato de sodio, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y ácido cítrico, o tensioactivos, tales como estearato de calcio.

Otros aditivos útiles en el método de la invención se describen en la Patente de EE.UU. n.º 7.735.274.

B. Materiales cementosos suplementarios y sustitutos del cemento

En ciertas realizaciones, se añaden a la mezcla uno o más materiales cementosos suplementarios (MCS) y/o sustitutos del cemento en la fase apropiada para el MCS o el sustituto del cemento en particular. En ciertas realizaciones, se utiliza un MCS. Puede utilizarse cualquier MCS o sustituto del cemento adecuado; algunos MCS ilustrativos incluyen escoria de alto horno, cenizas volantes, vapor de sílice, puzolanas naturales (tales como metacaolín, esquisto calcinado, arcilla calcinada, vidrio volcánico, ceniza volcánica zeolítica o tobas volcánicas, ceniza de cáscara de arroz,

tierra de diatomeas y esquisto calcinado), y residuos de vidrio. Otros sustitutos del cemento incluyen piedra caliza de relleno, plástico reciclado/de desecho, neumáticos de desecho, cenizas de residuos sólidos urbanos, cenizas de madera, polvo de horno de cemento, arena de fundición, y similares. En ciertas realizaciones, a la mezcla se añade un MCS y/o un sustituto del cemento en una cantidad que proporcione un 0,1-50 %, o un 1-50 %, o un 5-50 %, o un 10-50 %, o un 20-50 %, o un 1-40 %, o un 5-40 %, o un 10-50 %, o un 20-40 % en pdc. En ciertas realizaciones, se utiliza un MCS y el MCS son cenizas volantes, escoria, vapor de sílice o una puzolana natural. En cierta realización, el MCS es cenizas volantes. En ciertas realizaciones, el MCS es escoria.

Es bien sabido que la adición de un MCS tal como las cenizas volantes o la escoria a una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de hormigón, puede retrasar el desarrollo temprano de la resistencia; de hecho, cuando hace suficiente frío, el uso de MCS en mezclas se ve restringido porque el desarrollo temprano de la resistencia se retrasa lo suficiente como para hacer problemático el uso de la mezcla. Además, la cantidad máxima de MCS que puede añadirse a una mezcla puede verse limitada por su efecto sobre el desarrollo temprano de la resistencia. Los presentes inventores han descubierto que cuando se añaden incluso dosis muy bajas de dióxido de carbono a una mezcla de hormigón que contiene MCS, se puede acelerar el desarrollo temprano de la resistencia y, por lo tanto, se podría permitir el uso de estas mezclas en circunstancias en las que de otro modo no podrían utilizarse, por ejemplo, en tiempo frío o en mayores cantidades, ampliando por tanto la utilidad de dichas mezclas, tal como ampliando la temporada útil de dichas mezclas o aumentando la proporción de MCS en una mezcla determinada, o ambas cosas.

C. Mecanismos de control

Los métodos y aparatos descritos en el presente documento pueden incluir uno o más mecanismos de control, por ejemplo, mecanismos de control automáticos, para modular uno o más aspectos de la operación de mezclado y carbonatación, tal como para modular el contacto de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, con dióxido de carbono y/u otros componentes, tales como uno o más aditivos o agua, así como otros aspectos del funcionamiento de la mezcladora, tales como los requisitos de seguridad de los trabajadores, el enfriamiento de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y similares. Se apreciará que la modulación puede conseguirse mediante operadores humanos que controlen las válvulas necesarias, y similares, para conseguir una exposición deseada al dióxido de carbono y/u otra característica de la mezcla de cemento carbonatado, pero en general se emplean mecanismos de control automáticos. El control puede basarse en cualquier parámetro adecuado, tal como la retroalimentación relativa a una o más características de la operación de mezclado, el momento, que puede ser un momento predeterminado, o una combinación de los mismos.

Los sistemas y mecanismos de control pueden aplicarse a una mezcladora estacionaria de una planta de premoldeo de hormigón o a otra instalación central de mezclado. Como alternativa, puede aplicarse a un camión hormigonera que facilita la mezcla mediante la rotación de su tambor. La operación de mezclado puede ser una operación de moldeo en seco o en húmedo; por ejemplo, el camión hormigonera será un moldeo en húmedo, mientras que el premoldeo puede ser un moldeo en húmedo o un moldeo en seco.

Una forma sencilla de control se basa únicamente en el tiempo. Por tanto, en ciertas realizaciones, los métodos incluyen la modulación del flujo de dióxido de carbono a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, según cierta cronología. La cronología puede estar controlada por un controlador conectado a una mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato de mezclado de cemento hidráulico, y que detecta cuándo el aparato ha iniciado o detenido una fase de funcionamiento, y que modula el flujo de dióxido de carbono en consecuencia, por ejemplo, inicia o detiene el flujo. Por tanto, en ciertas realizaciones, el flujo de dióxido de carbono se inicia cuando uno o más componentes de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se han depositado en una mezcladora, continúa durante un tiempo predeterminado a un cierto caudal predeterminado, y a continuación se detiene. La fase de funcionamiento de la mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato de mezclado de cemento hidráulico, puede determinarse mediante la programación del controlador o de otro controlador al que el controlador esté conectado operativamente, o puede determinarse mediante uno o más sensores que controlen las posiciones de los componentes del aparato, el flujo y similares, o una combinación de los mismos.

Normalmente, sin embargo, los sistemas y mecanismos de control incluyen mecanismos de retroalimentación donde una o más características de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico y/o el aparato o su entorno, se controlan mediante uno o más sensores, que transmiten la información a un controlador que determina si uno o más parámetros de la operación de mezclado requieren modulación y, si es así, envía el resultado adecuado a uno o más accionadores para llevar a cabo la modulación requerida. El controlador puede aprender de las condiciones de un lote para ajustar la programación de lotes posteriores de características de mezclado similares o iguales para optimizar la eficiencia y las características deseadas de la mezcla.

Para conseguir una eficiencia deseada de captación de dióxido de carbono en la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, para garantizar las características deseadas, tales como las características de flujo, la resistencia y el aspecto, y/o para garantizar la seguridad de los trabajadores, se pueden controlar diferentes aspectos de la operación de mezclado, la mezcladora, la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y el entorno de la mezcladora, la información de control procesada y los ajustes realizados en uno o más aspectos de la operación de mezclado para conseguir el resultado deseado. Por tanto, en ciertas realizaciones, se

pueden utilizar uno o más sensores para proporcionar información a un controlador sobre diferentes condiciones relacionadas con las características deseadas; el controlador procesa la información y la compara con los parámetros predeterminados de funcionamiento y, si es necesario introducir correcciones en el proceso, a continuación, el controlador envía el resultado a uno o más accionadores para que el sistema vuelva a la condición deseada.

Por tanto, se divulgan métodos y aparatos para producir una mezcla de cemento carbonatada, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico que incluye un sistema de control que incluye al menos un sensor seleccionado del grupo que consiste en un sensor de dióxido de carbono, un sensor de temperatura, un sensor reológico y un sensor de humedad. En ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que incluye un sistema de control que incluye al menos dos sensores seleccionados del grupo que consiste en un sensor de dióxido de carbono, un sensor de temperatura, un sensor reológico y un sensor de humedad. En ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico que incluye un sistema de control que incluye al menos tres sensores seleccionados del grupo que consiste en un sensor de dióxido de carbono, un sensor de temperatura, un sensor reológico y un sensor de humedad. En ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico que incluye un sistema de control que incluye un sensor de dióxido de carbono, un sensor de temperatura, un sensor reológico y un sensor de humedad. Los métodos y aparatos pueden incluir además uno o más accionadores para ajustar algún aspecto de la operación de mezclado, por ejemplo, el flujo de dióxido de carbono a la mezcladora o el flujo de aditivo a la mezcladora, y un controlador que recibe señales del sensor o sensores, las procesa para determinar si es necesaria la modulación de la operación de mezclado, y, si es así, transmite una señal a un accionador o accionadores para llevar a cabo la modulación.

Accionadores

El accionador o accionadores pueden ser, por ejemplo, una o más válvulas, tales como una electroválvula, en uno o más conductos que suministran un componente, tal como dióxido de carbono, a la mezcladora, como se describe en cualquier otro sitio del presente documento. Un accionador para la administración de CO₂ puede ser, por ejemplo, un colector de administración con, por ejemplo, un sensor de temperatura del gas, un manómetro de la presión del gas, una válvula de control moduladora, un solenoide de apertura/cierre y un conjunto de placa de orificio. Todos estos componentes pueden combinarse en una unidad singular, es decir, un controlador del flujo. En ciertas realizaciones, además o alternativamente, se puede utilizar un sistema de administración de gas, uno o más accionadores para controlar la administración de agua de mezcla carbonatada, como se describe en el presente documento. Dichos accionadores pueden incluir, por ejemplo, accionadores para controlar la carga de agua de mezcla con dióxido de carbono y/o accionadores para controlar la administración de agua cargada de dióxido de carbono a la mezcladora. De forma similar, un accionador que controla la administración de agua a la mezcla puede estar bajo el control del controlador, como puede ser un accionador que controle la administración de uno o más aditivos a la mezcla. Además, un accionador puede incluir un interruptor de relé conectado a la fuente de alimentación del colector de polvo para apagar el colector de polvo de la mezcladora durante la administración de CO₂ (si fuera necesario). En general, la modulación de la exposición al dióxido de carbono será un aumento o una disminución de la exposición, tal como una disminución del caudal de dióxido de carbono gaseoso a la mezcladora. En ciertas realizaciones, la modulación detiene el flujo de dióxido de carbono gaseoso a la mezcladora.

Por tanto, en ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico que incluye un sistema de control que incluye al menos un accionador para controlar al menos una acción seleccionada del grupo que consiste en un flujo de dióxido de carbono a la mezcladora, el caudal de agua a la mezcladora y caudal de aditivo a la mezcladora. En ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que incluye un sistema de control que incluye al menos dos accionadores para controlar al menos dos acciones seleccionadas del grupo que consiste en un flujo de dióxido de carbono a la mezcladora, el caudal de agua a la mezcladora y caudal de aditivo a la mezcladora. En ciertas realizaciones, la invención proporciona un método o un aparato para producir una mezcla de cemento carbonatado, por ejemplo, una mezcla hidráulica de cemento, que incluye un sistema de control que incluye un accionador para controlar el flujo de dióxido de carbono a la mezcladora, un accionador para controlar el flujo de agua a la mezcladora y un accionador para controlar el caudal de aditivo a la mezcladora.

También pueden utilizarse, según sea apropiado, otros accionadores, tales como los que controlan uno o más aspectos de la producción de cemento hidráulico, tales como el momento de la mezcla, la administración de refrigerantes tales como hielo o nitrógeno líquido, la activación de una alarma, y similares.

Controlador

Los sistemas de control utilizados en los métodos y aparatos pueden incluir un controlador que recibe información de uno o más sensores, la procesa comparándola con los valores preestablecidos para conseguir el resultado deseado, y, según sea necesario, envía los resultados a los uno o más accionadores para mover el sistema hacia el resultado deseado.

El controlador puede ser, por ejemplo, un circuito electrónico o un controlador lógico programable, situados *in situ* con la mezcladora o fuera de la obra, por ejemplo, como parte de una red de trabajo. Por ejemplo, el controlador puede ser un controlador lógico programable (PLC) con una interfaz hombre-máquina (IHM), por ejemplo, una pantalla táctil y un ordenador de telemetría incorporado. El controlador puede estar integrado en el controlador global de la mezcladora o puede ser una unidad independiente que reciba información del controlador de la mezcladora, según sea apropiado.

En las **Figuras 1, 2 y 3** se ilustran mezcladoras y sistemas de control ilustrativos. La **Figura 1** muestra una mezcladora planetaria estacionaria, por ejemplo, para usar en una operación de premoldeo. La báscula de cemento 1 incluye un sensor de masa que envía datos relativos a la masa de cemento dispensada desde el silo de cemento 2 al controlador 10. El sensor de proximidad 3 detecta cuándo se libera cemento a la mezcladora y envía una señal al controlador; como alternativa, el controlador de la mezcla (no mostrado) puede enviar una señal al controlador 10 cuando se libera el cemento. La administración del CO₂ puede comenzar antes o después de la liberación. Los sensores de CO₂ 8 y 9 están situados en zonas de fuga fuera de la mezcladora y envían señales sobre el contenido de CO₂ atmosférico al controlador 10. Además, el sensor de temperatura 6 envía señales relativas a la temperatura de la mezcla de hormigón al controlador 10. Pueden utilizarse sensores adicionales, tales como sensores de humedad y de reología, o sensores de CO₂ adicionales en zonas de trabajo en las proximidades de la mezcladora (no se muestran), que envían señales adicionales al controlador. El controlador 10 procesa las señales y envía el resultado a un accionador 11 para controlar la administración de CO₂ desde un suministro de CO₂ 13 a través de un conducto hasta la entrada de la mezcladora de gas de CO₂ 7, donde entra en el espacio de cabeza de la mezcladora 4 y entra en contacto con el hormigón de mezcla 5. Por ejemplo, en un caso básico, el controlador 10 puede enviar una señal al accionador 11 para que abra una válvula para la administración de CO₂ al recibir una información del sensor de proximidad 3 que indique que se ha administrado cemento a la mezcladora, y enviar una señal al accionador 11 para que cierre la válvula al recibir una información de uno o más de los sensores de CO₂ 8 y 9 o del sensor de temperatura 6 que indique que se ha logrado la administración deseada de CO₂ a la mezcladora, o la captación de CO₂ en el hormigón. El controlador puede enviar el resultado a accionadores adicionales, tales como un accionador para controlar la adición de agua o un accionador que controle la adición de aditivos (no mostrados). Puede utilizarse un sistema opcional de telemetría 12 para transmitir información relativa al lote a una ubicación central para su uso, por ejemplo, para almacenar los datos para utilizarlos en lotes futuros y/o utilizarlos para modificar las mismas mezclas o mezclas similares en otras ubicaciones.

Las **Figuras 2 y 3** muestran una mezcladora de cemento móvil, en este caso, un camión hormigonera. La **Figura 2** muestra un camión hormigonera 1 con un sistema de administración de dióxido de carbono desmontable. El dióxido de carbono se suministra desde un suministro de dióxido de carbono 8 a través de un conducto acoplable a un conducto del camión 2 en una junta 4. El controlador 6 controla el suministro del dióxido de carbono al tambor del camión 2 a través de un accionador 5. Los sensores, tales como los de CO₂, pueden estar situados en zonas de fuga fuera y/o dentro del tambor 2 y enviar señales sobre el contenido de CO₂ atmosférico al controlador 6. Además, uno o más sensores de temperatura pueden enviar señales relativas a la temperatura de la mezcla de hormigón al controlador 6. Pueden utilizarse sensores adicionales, tales como sensores de humedad y de reología, o sensores de CO₂ adicionales en zonas de trabajo en las proximidades de la mezcladora (no se muestran), que envían señales adicionales al controlador. Los controladores envían una señal al accionador (por ejemplo, la válvula) 5 para controlar la adición de dióxido de carbono al tambor 2. El controlador puede controlar otros accionadores, tales como para controlar la adición de un aditivo al tambor 2. Puede utilizarse un sistema opcional de telemetría 7 para transmitir información relativa al lote a una ubicación central para su uso, por ejemplo, para almacenar los datos para utilizarlos en lotes futuros y/o utilizarlos para modificar las mismas mezclas o mezclas similares en otras ubicaciones. La **Figura 3** muestra un camión hormigonera con un sistema de administración de dióxido de carbono acoplado que viaja con el camión 1. Esto puede ser útil para, por ejemplo, optimizar la exposición de la mezcla de cemento al dióxido de carbono. El dióxido de carbono se suministra desde un suministro de dióxido de carbono 7 a través de un conducto 3 acoplable al camión y que administra dióxido de carbono al tambor del camión 2. El controlador 5 controla el suministro del dióxido de carbono al tambor del camión 2 a través de un accionador 4. Los sensores, tales como los de CO₂, pueden estar situados en zonas de fuga fuera y/o dentro del tambor 2 y enviar señales sobre el contenido de CO₂ atmosférico al controlador 5. Además, uno o más sensores de temperatura pueden enviar señales relativas a la temperatura de la mezcla de hormigón al controlador 5. Pueden utilizarse sensores adicionales, tales como sensores de humedad y de reología, o sensores de CO₂ adicionales en zonas de trabajo en las proximidades de la mezcladora (no se muestran), que envían señales adicionales al controlador. Los controladores envían una señal al accionador (por ejemplo, la válvula) 4 para controlar la adición de dióxido de carbono al tambor 2. El controlador puede controlar otros accionadores, tales como para controlar la adición de un aditivo al tambor 2. Puede utilizarse un sistema opcional de telemetría 6 para transmitir información relativa al lote a una ubicación central para su uso, por ejemplo, para almacenar los datos para utilizarlos en lotes futuros y/o utilizarlos para modificar las mismas mezclas o mezclas similares en otras ubicaciones. En cierta realización, el controlador 5 está situado a distancia del camión y recibe las señales del sistema de telemetría, y transmite señales que son recibidas y sobre las que actúa el accionador 4.

D. Mezcladoras

La mezcladora en la que el dióxido de carbono entra en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla

de cemento hidráulico, durante el mezclado puede ser cualquier mezcladora adecuada. La mezcladora puede estar relativamente fija en su ubicación o puede proporcionar tanto la mezcla como el transporte a una ubicación distinta de la de la mezcla.

- 5 En ciertas realizaciones, la mezcladora está fija o relativamente fija en su ubicación. Por tanto, por ejemplo, en ciertas realizaciones, la mezcladora es parte de un aparato de premoldeo. Por ejemplo, la mezcladora puede estar configurada para mezclar hormigón antes de introducirlo en un molde para producir un producto de hormigón premoldeado. En ciertas realizaciones, la mezcladora está configurada para mezclar el hormigón antes de introducirlo en un molde, y la adición de dióxido de carbono a la mezcla de hormigón, los componentes de la mezcla de hormigón, y, opcionalmente, otros ingredientes tales como uno o más aditivos, se ajusta de modo que se obtenga un nivel deseado de flujo de la mezcla de hormigón, por lo general, un flujo muy bajo o nulo, se combina con un nivel deseado de compactabilidad para que el hormigón pueda compactarse dentro de un cierto intervalo de parámetros durante y después de su administración a un molde, y para que el producto final posea un tiempo de endurecimiento, una resistencia, una contracción y otras características según se desee. Por ejemplo, puede colocarse un tubo de gas para administrar dióxido de carbono a la mezcladora con la línea de gas colocada de tal manera que no interfiera con el funcionamiento normal de la mezcladora. El gas se administra en proporción a la cantidad de cemento, en particular en el intervalo del 0,01-1,0 % en peso de cemento (pdc). La administración de gas puede limitarse al tiempo normal de mezcla. En ciertas realizaciones, la administración de gas puede activarse mediante una compuerta de la tubería de adición de cemento. Cuando la compuerta se cierra (indicando la finalización de la adición de cemento), un sensor magnético de proximidad detecta el estado de cierre y activa el inicio del flujo de dióxido de carbono.

- 25 En ciertas realizaciones en las que la mezcladora es una mezcladora fija, por ejemplo, en una operación de moldeo en seco o de premoldeo en húmedo, la mezcladora está configurada para mezclar hormigón y administrarlo a un componente de retención, por ejemplo, una tolva, que, a su vez, administra el hormigón a un molde, opcionalmente a través de una tolva de carga. Se pueden añadir dióxido de carbono adicional a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en la tolva y/o en la tolva de carga, si se desea. Véase la Solicitud de Patente de EE.UU. n.º 13/660.447. En ciertas realizaciones, no se añade más dióxido de carbono a la mezcla (aparte del dióxido de carbono de la atmósfera) después de que el hormigón salga de la mezcladora.

- 30 La adición de dióxido de carbono puede afectar a la compactabilidad y, por tanto, a la resistencia del objeto final, por ejemplo, un objeto premoldeado. En el caso de una operación de moldeo en húmedo, también hay que tener en cuenta la fluidez. Por tanto, en ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono a la mezcla de hormigón, los componentes de la mezcla de hormigón, y, opcionalmente, otros ingredientes tales como uno o más aditivos, se ajustan de modo que se alcance un nivel deseado de compactabilidad (resistencia) y/o de fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, de cemento hidráulico, por ejemplo, de hormigón, generalmente un nivel de compactabilidad (resistencia) y/o de fluidez similar al nivel que habría sin la adición del dióxido de carbono, para que el producto final, una vez vertido el hormigón en el molde y compactado, posea la resistencia deseada, tal como una resistencia deseada a los 1, 7, 28 y/o 56 días, y/o para que la fluidez esté en un valor deseado. En el caso de una mezcladora de premoldeo, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la compactabilidad y/o la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % del valor o valores que se alcanzarían sin la adición de dióxido de carbono, o esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % de un valor deseado predeterminado. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la compactabilidad y/o la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 10 % de la compactabilidad y/o de la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la compactabilidad y/o la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 5 % de la compactabilidad y/o de la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la compactabilidad y/o la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 2 % de la compactabilidad y/o de la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono. También pueden utilizarse otros límites e intervalos de compactabilidad y/o de resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón, como se describe en el presente documento. Puede utilizarse cualquier método de medición adecuado para determinar la compactabilidad y/o la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón. En ciertas realizaciones, además de la compactabilidad deseada y/o de la resistencia a los 1, 7 y/o 28 días de la mezcla final de hormigón, se consiguen una o más características adicionales, tales como que la contracción esté dentro de ciertos intervalos deseados o por encima o por debajo de ciertos valores umbral, según se determina mediante los métodos convencionales conocidos en la técnica. En todos los casos, si la operación es una operación de moldeo en húmedo, de manera adicional o como alternativa, puede modularse la fluidez, por ejemplo, mediante el uso de uno o más aditivos, por ejemplo, de modo que la fluidez esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % del valor o valores que se alcanzarían sin la adición de dióxido de carbono, o dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % de un valor predeterminado. Puede utilizarse cualquier aditivo adecuado, como se describe en el presente

documento. En ciertas realizaciones, el aditivo comprende un retardante del fraguado. En ciertas realizaciones, el aditivo comprende un hidrato de carbono, tal como un sacárido, por ejemplo, un azúcar o derivado de azúcar. En ciertas realizaciones, el aditivo se selecciona del grupo que consiste en fructosa, glucoheptonato de sodio y gluconato de sodio. En ciertas realizaciones, el aditivo es gluconato de sodio, por ejemplo, gluconato de sodio administrado para

alcanzar un porcentaje, por peso de cemento, del 0,05-0,8 %, 0,1-0,8 %, o 0,1-0,6 %, o 0,1-0,5 %, o 0,2-0,5 %, o 0,2-3 %, o 0,2-2 %, o 0,2-1 %. En ciertas realizaciones se utiliza también un segundo aditivo, tal como una cualquiera de los aditivos descritos en el presente documento.

En ciertas realizaciones, la mezcladora es una mezcladora transportable. "Mezcladora transportable", como se utiliza el término en el presente documento, incluye mezcladoras en las que los componentes de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se colocan en una ubicación y la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se transporta a otra ubicación alejada de la primera, y a continuación se utiliza. Una mezcladora transportable se transporta, por ejemplo, por carretera o ferrocarril. Como se utiliza en el presente documento, una mezcladora transportable no es una mezcladora como las que se utilizan en las operaciones de premoldeo de hormigón. Por tanto, en ciertas realizaciones, la mezcladora puede ser el tambor de un camión hormigonera en el que se prepara una mezcla de hormigón para su administración en una obra. En este caso, la mezcladora está configurada para mezclar hormigón y administrarlo en una obra, y la adición de dióxido de carbono a la mezcla de hormigón, los componentes de la mezcla de hormigón, y, opcionalmente, otros ingredientes tales como uno o más aditivos, se ajustan de modo que se consiga un nivel deseado de fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es decir, hormigón, generalmente un nivel de fluidez que sea similar al nivel que habría sin la adición de dióxido de carbono, o una fluidez predeterminada, y de modo que el producto final, tras el vertido en la obra, posea un tiempo de endurecimiento, una resistencia, una contracción y otras características según se desee. En el caso de la mezcladora de premezcla, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final de hormigón esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % de la fluidez que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o de una fluidez predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final de hormigón esté dentro del 10 % de la fluidez que se lograría sin la adición de dióxido de carbono, o de una fluidez predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final de hormigón esté dentro del 5 % de la fluidez que se lograría sin la adición de dióxido de carbono, o de una fluidez predeterminada. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la fluidez de la mezcla final de hormigón esté dentro del 2 % de la fluidez que se lograría sin la adición de dióxido de carbono, o de una fluidez predeterminada. También pueden utilizarse otros límites e intervalos de fluidez, como se describe en el presente documento. Se puede utilizar cualquier método de medición adecuado para determinar la fluidez, tal como la conocida prueba de asentamiento. En ciertas realizaciones, además de la fluidez deseada, se consiguen una o más características adicionales, tales como esa contracción y/o resistencia, tales como resistencia a la compresión, en uno o más momentos tras el vertido del hormigón están dentro de ciertos intervalos deseados, o por encima o por debajo de ciertos valores umbral, según se determina mediante los métodos convencionales conocidos en la técnica. La adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse para que la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 50, 40, 30, 20, 10, 8, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5 o 0,1 % del valor o valores que se alcanzarían sin la adición de dióxido de carbono, o de un valor de resistencia predeterminado.

Se apreciará que, dependiendo del diseño de la mezcla, las dosis de dióxido de carbono y/u otros aspectos de la mezcla o de las condiciones en las que se mezcla y/o se utiliza el hormigón, el hormigón carbonatado puede tener una mayor resistencia a la compresión en uno o más puntos temporales en comparación con el hormigón no carbonatado; esto es especialmente probable cuando se utiliza una dosis baja de dióxido de carbono, tal como una dosis menor del 1 % en pdc como en la presente invención (véase la sección Dosis bajas. En este caso, la adición de una dosis particular de dióxido de carbono puede dar como resultado un aumento de la resistencia, por ejemplo, la resistencia a la compresión, tal como un aumento de al menos un 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 o 50 % en comparación con el hormigón no carbonatado del mismo diseño de mezcla y en las mismas condiciones en uno o más momentos tras el mezclado, tales como a las 24 horas, 3 días, 7 días, 28 días, 56 días o similares; como alternativa o adicionalmente, la cantidad de cemento en la mezcla puede reducirse de modo que la mezcla carbonatada contenga menos cemento que la mezcla no carbonatada pero alcance una resistencia a la compresión aceptable en uno o más momentos deseados tras el mezclado, tal como por ejemplo dentro del 20, 10, 5, 4, 3, 2, o 1 % de la resistencia a la compresión de una mezcla no carbonatada con la cantidad normal de cemento. En ciertas realizaciones, la cantidad de cemento en la mezcla puede reducirse al menos en un 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20, 25 o 30 % en comparación con la mezcla no carbonatada y seguir consiguiendo la resistencia deseada en el momento o momentos deseados. Estas consideraciones de aumento de la resistencia y/o menor uso de cemento se aplican tanto a las operaciones transportables como a las estacionarias. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón de la mezcla final de hormigón esté dentro del 10 % de la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón que se

conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o un valor de resistencia predeterminado. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 5 % de la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o un valor de resistencia predeterminado. En ciertas realizaciones, la adición de dióxido de carbono, de los componentes de la mezcla de hormigón y/o de los componentes adicionales, tales como uno o más aditivos, puede ajustarse de modo que la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón esté dentro del 2 % de la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón que se conseguiría sin la adición de dióxido de carbono, o un valor de resistencia predeterminado. También pueden utilizarse otros límites e intervalos de resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón, como se describe en el presente documento. Puede utilizarse cualquier método de medición adecuado para determinar la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón. En ciertas realizaciones, además de la resistencia a los 1, 7, 28 y/o 56 días de la mezcla final de hormigón, se consiguen una o más características adicionales, tales como que la contracción esté dentro de ciertos intervalos deseados o por encima o por debajo de ciertos valores umbral, según se determina mediante los métodos convencionales conocidos en la técnica.

En realizaciones en las que se usa un aditivo, puede utilizarse cualquier aditivo adecuado, como se describe en el presente documento. En ciertas realizaciones, el aditivo comprende un retardante del fraguado. En ciertas realizaciones, el aditivo comprende un hidrato de carbono, tal como un sacárido, por ejemplo, un azúcar. En ciertas realizaciones, el aditivo se selecciona del grupo que consiste en fructosa, glucoheptonato de sodio y gluconato de sodio. En ciertas realizaciones, el aditivo es gluconato de sodio, por ejemplo, gluconato de sodio en un porcentaje del 0,01-2 %, o del 0,01-1 %, o del 0,01-0,8 %, o del 0,01-0,5 %, o del 0,01-0,1 %, o del 0,1-0,8 %, o del 0,1-0,6 %, o del 0,1-0,5 %, o del 0,2-0,5 %, o del 0,2-3 %, o del 0,2-2 %, o del 0,2-1 %. En ciertas realizaciones, el aditivo es fructosa, por ejemplo, fructosa en un porcentaje del 0,01-2 %, o del 0,01-1 %, o del 0,01-0,8 %, o del 0,01-0,5 %, o del 0,01-0,1 %, o del 0,1-0,8 %, o del 0,1-0,6 %, o del 0,1-0,5 %, o del 0,2-0,5 %, o del 0,2-3 %, o del 0,2-2 %, o del 0,2-1 %. En ciertas realizaciones se utiliza también un segundo aditivo, tal como una cualquiera de los aditivos descritos en el presente documento.

Un tipo de mezcladora transportable es un camión volumétrico. Un camión de hormigón volumétrico es un camión que transporta y mezcla hormigón *in situ* mezclando áridos, cemento y agua en la obra, generalmente se utiliza una cinta para medir los ingredientes y un sinfín para mezclar el hormigón antes de descargarlo. En la **Figura 147** puede observarse un esquema de un camión. Como se observa en la **Figura 147**, el hormigón se mezcla en un sinfín y a continuación se descarga. Este sinfín se encuentra en una cubeta y suele estar cubierto con una alfombrilla de goma. Por tanto, en esta realización, la mezcladora es el sinfín, y se puede añadir CO₂ gaseoso o gaseoso/sólido al hormigón de mezcla desde la parte superior del sinfín a través de un conducto. El techo de goma mantiene el CO₂ encerrado en la cubeta y permite que se mezcle con el hormigón antes de su descarga. El CO₂ puede controlarse, por ejemplo, utilizando un caudalímetro y un solenoide. El sistema puede controlarse manualmente, utilizando la empuñadura del caudalímetro y abriendo manualmente el solenoide. También puede controlarse automáticamente, por ejemplo, recibiendo una señal del ordenador del camión que corresponda a la velocidad a la que se está dosificando el cemento en la tolva de mezcla, y activarse cuando el sinfín esté en movimiento. La fuente de dióxido de carbono puede ser cualquier fuente como se describe en el presente documento, por ejemplo, un tanque de líquido o un tanque de gas. En el último caso, se puede montar en el camión un cilindro de CO₂ de alta presión para suministrar el CO₂ para el hormigón. El cilindro también puede calentarse (mediante una camisa calefactora) si el caudal necesario supera el posible por la ebullición natural dentro del cilindro. Estos camiones pueden hacer hasta 60 m³/h (1 m³/min), pero normalmente sólo transportan material suficiente para aproximadamente 8 m³ de hormigón. Esto significaría un caudal máximo de CO₂ de entre 60-500 SLPM dependiendo del contenido de cemento de la mezcla y de la dosis de CO₂. Otros aspectos son como se ha descrito anteriormente para las mezcladoras transportables.

Se apreciará que, tanto en el caso de un moldeo en húmedo (tal como una premezcla) como en el de un moldeo en seco, las diferentes mezclas pueden requerir un tratamiento diferente para conseguir una fluidez y/o una compactabilidad deseadas, y que los tipos de mezcla pueden ser sometidos a pruebas previas y a un tratamiento apropiado, por ejemplo, la determinación del tipo y/o el porcentaje de aditivo apropiado. En ciertos casos puede no ser necesario el aditivo; de hecho, con determinados tipos de mezcla y concentraciones de dióxido de carbono, la compactabilidad (resistencia) o la fluidez pueden estar dentro de unos límites aceptables; por ejemplo, la resistencia puede incluso mejorarse en ciertos tipos de mezcla con ciertos niveles de adición de dióxido de carbono. También, el punto del procedimiento en el que se introducen los ingredientes puede afectar a una o más características del producto, como puede determinarse en las pruebas rutinarias y en el ajuste de la mezcla.

La mezcladora puede ser cerrada (es decir, completa o sustancialmente hermética) o abierta (por ejemplo, el tambor de un camión hormigonero o una mezcladora de premoldeo con diferentes puntos de fuga). La mezcladora puede ser una de una pluralidad de mezcladoras, en las que se mezclan diferentes porciones de una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, o puede ser una única mezcladora en la que se mezcla toda la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, tal como una mezcla de hormigón, excepto en algunos casos, agua adicional.

Métodos de administración de dióxido de carbono

Puede utilizarse cualquier mezcladora adecuada para mezclar hormigón en una operación destinada a producir hormigón para su uso en objetos, tales como, por ejemplo, para usar en la producción de materiales de construcción. En algunos casos, puede utilizarse una mezcladora cuando la dosis o la captación de dióxido de carbono deseada pueda conseguirse utilizando únicamente la administración de gas. Por ejemplo, en la mayoría de las hormigoneras de premoldeo, la mezcladora está encerrada pero no es estanca al gas (es decir, no está abierta a la atmósfera, aunque no es estanca al gas, de tal forma que se disponga de puntos de fuga para, por ejemplo, sensores de dióxido de carbono) y el espacio de cabeza y los tiempos de mezcla son tales que se puede conseguir una dosis o captación deseada nada más que con la administración de dióxido de carbono gaseoso.

En algunos casos, sin embargo, tal como en un camión hormigonera, donde el espacio de cabeza es relativamente menor que en una mezcladora típica de premoldeo, puede que se desee, o sea necesaria, una eficiencia adicional, para conseguir una dosis o captación de dióxido de carbono deseada. En estos casos, puede utilizarse dióxido de carbono líquido administrado para formar un gas y un sólido, o añadir dióxido de carbono sólido, o cualquier combinación de los mismos. El dióxido de carbono puede administrarse a la mezcladora como un líquido que, mediante una manipulación apropiada de la administración, tal como el caudal y/o la selección del orificio, se convierte en una mezcla de dióxido de carbono gaseoso y dióxido de carbono sólido tras la administración, por ejemplo, en una relación aproximada de 1:1. El dióxido de carbono gaseoso está inmediatamente disponible para ser captado por la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, mientras que el dióxido de carbono sólido sirve eficazmente como administración retardada de dióxido de carbono gaseoso a medida que el sólido sublima gradualmente a gas. Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, se cree que el dióxido de carbono así liberado reacciona rápidamente con los componentes de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, permitiendo una captación adicional de dióxido de carbono gaseoso por el agua. El dióxido de carbono también administrarse en forma sólida, es decir, como hielo seco, directamente, como se describe en cualquier otro sitio del presente documento.

Una operación de premezclado es un ejemplo de un sistema donde puede ser deseable utilizar uno o ambos de la administración agua cargada con dióxido de carbono y la de dióxido de carbono líquido. El tambor de un camión hormigonera está abierto a la atmósfera y tiene un espacio de cabeza libre relativamente pequeño en comparación con la masa de hormigón, que suele ser de 6 a 10 metros cúbicos cuando el camión se carga hasta su capacidad, que es lo más frecuente siempre que sea posible. El tiempo de mezcla en el lugar de procesamiento por lotes puede ser relativamente corto. Por lo tanto, el uso de CO₂ líquido puede servir para garantizar la administración de la dosis deseada de CO₂. Por ejemplo, en una operación de premezclado en la que se desea una administración de dióxido de carbono del 1,5 %: El volumen de gas a añadir es de ~2,66 m³ de gas/m³ de hormigón (suponiendo que se están carbonatando 350 kg/m³ de cemento al 1,5 %). La mezcladora puede ser cualquier mezcladora adecuada, tal como una mezcladora planetaria o una mezcladora transportable, por ejemplo, el tambor de un camión hormigonera. Cuando la mezcladora es el tambor de un camión hormigonera, el CO₂ líquido puede suministrarse a la mezcladora en una instalación de amasado, o puede suministrarse a la mezcladora durante el transporte del lote a una obra, o incluso en la propia obra, o una combinación de los mismos. El método puede incluir además el control de una característica de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, un componente de una mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato hidráulico de mezcla de cemento, o un componente expuesto a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y la modulación del flujo de CO₂ líquido según la característica controlada. Por ejemplo, puede controlarse la concentración de CO₂, la temperatura, el contenido de humedad, la reología, el pH o una combinación de los mismos, como se detalla en cualquier otro sitio del presente documento. Cuando se controla el CO₂, puede controlarse en una porción de gas fuera de la mezcladora, por ejemplo, en un punto de fuga o de derrame.

III. Métodos

Como se ha analizado con detalle anteriormente, la presente invención proporciona un método de acuerdo con la reivindicación 1.

También se describe un método para producir una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que comprende (i) poner en contacto una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico que comprende agua y cemento hidráulico en una mezcladora con dióxido de carbono mientras la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se mezcla, en donde el dióxido de carbono entra en contacto con la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, dirigiendo un flujo de dióxido de carbono a la superficie de la mezcla desde el exterior de la mezcla, y en donde el flujo dura menos de 5 min. En ciertas realizaciones, la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, comprende áridos. La mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, puede comprender además un aditivo. En ciertas realizaciones, la mezcladora es una mezcladora transportable, tal como el tambor de un camión hormigonera. En ciertas realizaciones, la mezcladora es una mezcladora para hormigón premoldeado. El método puede comprender además el control del flujo del dióxido de carbono según la retroalimentación de uno o más sensores que controlan una característica seleccionada del grupo que consiste en una característica de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, un componente de una mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato hidráulico de mezcla de cemento, o un componente expuesto a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento

hidráulico.

También se describe un método para producir una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que comprende (i) poner en contacto una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en una mezcladora con dióxido de carbono mientras la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se mezcla; y (ii) añadir un aditivo a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. El contacto puede conseguirse dirigiendo un flujo de dióxido de carbono a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. En ciertas realizaciones, el aditivo es un aditivo que modula la fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. En algunas de estas realizaciones, el aditivo puede añadirse en una cantidad para conseguir una fluidez en un intervalo predeterminado de fluidez, tal como un intervalo predeterminado de fluidez determinado teniendo en cuenta un margen de la fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico sin la adición de dióxido de carbono, por ejemplo, como se describe en cualquier otro sitio del presente documento. En ciertos aspectos de la cuarta realización, el aditivo se selecciona del grupo que consiste en un superplastificante de policarboxilato, un naftaleno HRWR o cualquier combinación de los mismos.

También se describe un método para producir una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que comprende (i) poner en contacto una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en una mezcladora con dióxido de carbono mientras la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se mezcla, en donde el dióxido de carbono se expone a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, cuando la relación a/c de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es menor o igual a 0,4. En ciertas realizaciones, el contacto se consigue dirigiendo un flujo de dióxido de carbono a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. En ciertos aspectos de esta realización, la relación a/c de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, es de 0,05-0,4. El método puede comprender además el control de una característica de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, un componente de una mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato hidráulico de mezcla de cemento, o un componente expuesto a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y la modulación del flujo de dióxido de carbono según la característica controlada. El método puede comprender (ii) añadir un aditivo a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, tal como un aditivo que module la fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, un aditivo para modular la fluidez del tipo y/o en la cantidad como se describe en cualquier otro sitio del presente documento.

También se describe un método para producir una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, que comprende (i) poner en contacto una mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en una mezcladora con dióxido de carbono mientras la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se mezcla en una primera ubicación, y (ii) transportar la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, a una segunda ubicación donde la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, se utiliza. En ciertos aspectos de esta realización, dicho contacto se consigue dirigiendo un flujo de dióxido de carbono a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico. La segunda ubicación puede estar al menos a 0,16 km (0,1 millas) de la primera ubicación. La segunda ubicación puede estar al menos a 0,8 km (0,5 millas) de la primera ubicación. El método puede comprender el control de una característica de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, un componente de una mezcla de cemento, por ejemplo, un aparato hidráulico de mezcla de cemento, o un componente expuesto a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y la modulación del flujo de dióxido de carbono según la característica controlada. El método puede comprender (ii) añadir un aditivo a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, tal como un aditivo que module la fluidez de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico.

IV. Aparatos y sistemas

Como se ha descrito con detalle anteriormente, la presente invención proporciona un aparato de acuerdo con la reivindicación 9.

En particular, la invención proporciona un aparato para la adición de dióxido de carbono a una mezcla que comprende cemento hidráulico, donde el aparato comprende una mezcladora para mezclar la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, y un sistema para administrar dióxido de carbono a la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, en la mezcladora durante el mezclado. También se divulgan en el presente documento sistemas. El sistema para administrar dióxido de carbono está configurado para administrar dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, durante el mezclado. El sistema incluye una fuente de dióxido de carbono, un conducto que conecte operativamente la fuente y la mezcladora para la administración del dióxido de carbono a la mezcladora, un sistema dosificador para dosificar el flujo de dióxido de carbono en el conducto, y una válvula regulable para ajustar el caudal. El conducto tiene un diámetro ampliado o tiene un codo capaz de modular el flujo de la mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso ralentizando la velocidad del flujo, de modo que las partículas de dióxido de carbono sólido puedan aglomerarse en partículas más grandes antes de entrar en contacto con la mezcla de cemento. Además, el aparato puede incluir uno o más sensores para detectar el contenido de dióxido de carbono del gas en la mezcladora, o fuera de la mezcladora. El aparato

también puede incluir uno o más sensores para detectar la temperatura de la mezcla de cemento, por ejemplo, una mezcla de cemento hidráulico, o de la mezcladora o de otro componente. El aparato puede incluir además un controlador que esté conectado operativamente a uno o más sensores, por ejemplo, a uno o más sensores de temperatura, a uno o más sensores de dióxido de carbono, o una combinación de los mismos, y que está configurado para recibir datos del uno o más sensores. El controlador puede estar configurado para mostrar los datos, por ejemplo, para que un operador humano pueda ajustar el flujo u otros parámetros tomando como base los datos. El controlador puede estar configurado para realizar una o más operaciones sobre los datos, y para enviar el resultado a uno o más accionadores tomando como base los resultados de la una o más operaciones. Por ejemplo, el controlador puede estar configurado para enviar un resultado a una válvula ajustable haciendo que module el flujo de dióxido de carbono en el conducto, por ejemplo, para detener el flujo una vez alcanzada una temperatura o una concentración de dióxido de carbono particular, o ambas.

La mezcladora puede ser cualquier la mezcladora adecuada siempre que pueda configurarse con los elementos restantes del aparato, tales como las mezcladoras descritas en el presente documento. En ciertas realizaciones, la mezcladora es una mezcladora estacionaria, tal como una mezcladora utilizada en una operación de premoldeo. En ciertas realizaciones, la mezcladora es una mezcladora transportable, tal como el tambor de un camión hormigonera. En realizaciones en las que la mezcladora es transportable, uno o más de los elementos del sistema de control para poner en contacto la mezcla de cemento con dióxido de carbono, detectar una característica, controlar una o más características, tales como el flujo de dióxido de carbono, y los accionadores, puede estar configurado para ser transportado junto con la mezcladora, o puede estar configurado para ser desmontable de la mezcladora, por ejemplo, para permanecer en una estación de procesamiento por lotes para un camión hormigonera. Véanse, por ejemplo, las FIGURAS 3 y 4, que muestran elementos del sistema de administración de dióxido de carbono en forma no transportable o transportable. Los elementos del sistema de control pueden ser igualmente transportables o no transportables. Se apreciará que algunas partes del sistema pueden ser transportadas mientras que otras permanecen, por ejemplo, en la estación de procesamiento por lotes. Por ejemplo, todo el dióxido de carbono puede administrarse en la estación de procesamiento por lotes, pero ciertas características de la mezcla de cemento, por ejemplo, reología, pueden controlarse mientras el camión está en ruta hacia la obra, y, si fuera necesario, la mezcla de cemento puede modularse en función del control, por ejemplo, mediante la adición de un aditivo, o de agua, etc.

El sistema para poner en contacto la mezcla de cemento de la mezcladora con el dióxido de carbono puede ser cualquier sistema adecuado, tal como los sistemas descritos en el presente documento. Como se divulga en el presente documento, el sistema está configurado para administrar dióxido de carbono gaseoso a la mezcla de cemento. El sistema puede estar configurado para administrar dióxido de carbono líquido a la mezcla de cemento de tal manera que el dióxido de carbono líquido se convierta en dióxido de carbono gaseoso y sólido a medida que se administra a la mezcla de cemento, como se describe en el presente documento. El sistema está configurado para administrar dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento. En el caso de un camión hormigonera, el sistema para poner en contacto del cemento de la mezcladora con el dióxido de carbono puede compartir un conducto con el sistema de administración de agua, mediante un empalme en T en el conducto, de forma que el agua o el dióxido de carbono puedan ser administrados a un conducto final común. Véanse los Ejemplos 2 y 6.

Cuando hay un sensor presente, el sensor puede ser cualquier sensor adecuado siempre que esté configurado y colocado para transmitir la información pertinente al controlador. En ciertas realizaciones, la característica de la operación de mezclado que es controlada por el sensor comprende una característica del ligante de cemento, la mezcla de cemento, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento o la mezcladora, o un componente del aparato de mezclado de cemento. En ciertas realizaciones, el sensor está configurado y colocado para controlar (a) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (b) la ubicación del ligante de cemento en el aparato de mezclado, (c) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (d) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (e) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades del aparato de mezclado, (f) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente del aparato de mezclado en contacto con la mezcla de cemento, (g) la reología de la mezcla de cemento, (h) el contenido de humedad de la mezcla de cemento o (i) el pH de la mezcla de cemento. En ciertas realizaciones, la característica controlada por el sensor comprende el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa que sale de la mezcladora; esto puede ser controlado por un único sensor o por una pluralidad de sensores colocados en varios puntos de fuga, en cuyo caso el controlador utiliza la información procedente de la pluralidad de sensores. El controlador puede estar configurado para enviar una señal al accionador para modular el flujo de dióxido de carbono cuando el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa alcance un valor umbral. Como alternativa, o además, el controlador puede estar configurado para enviar una señal al accionador para modular el flujo de dióxido de carbono cuando un índice de cambio del contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa alcance un valor umbral. En ciertas realizaciones, la característica controlada por el sensor comprende la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente del aparato de mezclado en contacto con la mezcla de cemento. El controlador puede estar configurado para enviar una señal al accionador para modular el flujo de dióxido de carbono cuando la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente del aparato de mezclado en contacto con la mezcla de cemento alcance un valor umbral. Como alternativa, o además, el controlador puede estar configurado para enviar una señal al accionador para modular el flujo de dióxido de carbono cuando un índice de cambio de la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente del aparato de mezclado en contacto con la mezcla de cemento alcance un valor umbral.

En ciertas realizaciones, el aparato comprende una pluralidad de sensores configurados para controlar una pluralidad de características una pluralidad de características del ligante de cemento, la mezcla de cemento, una mezcla gaseosa en contacto con la mezcla de cemento o la mezcladora, o un componente del aparato de mezclado de cemento, por ejemplo, al menos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 o 10 características, por ejemplo, al menos 2 de (i) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (ii) la ubicación del ligante de cemento en la mezcladora, (iii) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (iv) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (v) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades de la mezcladora, (vi) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente en contacto con la mezcla de cemento, (vii) la reología de la mezcla de cemento, (viii) el contenido de humedad de la mezcla de cemento. En ciertas realizaciones, una pluralidad de sensores está configurada y colocada para controlar al menos 3 de (i) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (ii) la ubicación del ligante de cemento en la mezcladora, (iii) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (iv) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (v) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades de la mezcladora, (vi) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente en contacto con la mezcla de cemento, (vii) la reología de la mezcla de cemento, (viii) el contenido de humedad de la mezcla de cemento. En ciertas realizaciones, una pluralidad de sensores está configurada y colocada para controlar al menos 4 de (i) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (ii) la ubicación del ligante de cemento en la mezcladora, (iii) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (iv) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (v) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades de la mezcladora, (vi) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente en contacto con la mezcla de cemento, (vii) la reología de la mezcla de cemento, (viii) el contenido de humedad de la mezcla de cemento. En ciertas realizaciones, una pluralidad de sensores está configurada y colocada para controlar al menos 5 de (i) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (ii) la ubicación del ligante de cemento en la mezcladora, (iii) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (iv) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (v) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades de la mezcladora, (vi) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente en contacto con la mezcla de cemento, (vii) la reología de la mezcla de cemento, (viii) el contenido de humedad de la mezcla de cemento. En ciertas realizaciones, una pluralidad de sensores está configurada y colocada para controlar al menos 6 de (i) la masa de ligante de cemento añadida a la mezcla de cemento, (ii) la ubicación del ligante de cemento en la mezcladora, (iii) el contenido de dióxido de carbono de una mezcla gaseosa dentro de la mezcladora en contacto con la mezcla de cemento, (iv) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa que sale de la mezcladora, (v) el contenido de dióxido de carbono de la mezcla gaseosa en las proximidades de la mezcladora, (vi) la temperatura de la mezcla de cemento o de un componente en contacto con la mezcla de cemento, (vii) la reología de la mezcla de cemento, (viii) el contenido de humedad de la mezcla de cemento.

Además de estos sensores, o alternativamente, el aparato puede incluir uno o más sensores para controlar el tiempo de exposición de la mezcla de cemento al dióxido de carbono, el caudal de dióxido de carbono, o ambos. Por ejemplo, un sensor puede señalar cuándo se ha abierto una válvula para suministrar dióxido de carbono, y, por ejemplo, el caudal de dióxido de carbono, y un circuito temporizador del controlador puede determinar la dosis total de dióxido de carbono.

Los sensores pueden estar conectados por cable al controlador o transmitir la información de forma inalámbrica, o cualquier combinación de los mismos.

El aparato puede, de forma adicional o alternativa, incluir un accionador configurado para modular una característica adicional de la operación de mezclado, en donde el accionador está conectado operativamente al controlador y en donde el controlador está configurado para enviar una señal al accionador para modular la característica adicional tomando como base el procesamiento de la información de uno o más sensores. Este accionador puede estar configurado para modular la adición de aditivo a la mezcla de cemento, el tipo de aditivo añadido a la mezcla de cemento, el momento de la adición del aditivo a la mezcla de cemento, la cantidad de aditivo añadido a la mezcla de cemento, la cantidad de agua añadida a la mezcla de cemento, el momento de la adición de agua a la mezcla de cemento o el enfriamiento de la mezcla de cemento durante o después de la adición de dióxido de carbono. En ciertas realizaciones, el aparato comprende una pluralidad de dichos accionadores, tal como al menos 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8 de dichos accionadores.

Los accionadores pueden estar conectados por cable al controlador, o pueden recibir señales del controlador de forma inalámbrica.

El controlador puede ser cualquier controlador adecuado siempre que pueda configurarse para recibir información de uno o más sensores, procesar la información para determinar si se requiere un resultado, y transmitir señales a uno o más accionadores, según sea necesario, tomando como base el procesamiento; por ejemplo, un ordenador. Por ejemplo, el controlador puede ser un controlador lógico programable (PLC), opcionalmente con una interfaz hombre-máquina (IHM), como se describe en cualquier otro sitio del presente documento. El controlador puede estar ubicado

in situ con la mezcladora, o puede estar alejado, por ejemplo, un controlador físico alejado o un controlador basado en la nube. En ciertas realizaciones, el controlador está configurado para almacenar y procesar la información obtenida sobre la característica controlada por el sensor para un primer lote de mezcla de cemento y para ajustar las condiciones de un segundo lote de mezcla de cemento posterior tomando como base el procesamiento para optimizar uno o más aspectos de la operación de mezclado. Por ejemplo, el controlador puede ajustar la segunda receta de mezcla, por ejemplo, la cantidad de agua utilizada o el momento de la adición de agua, o la exposición al dióxido de carbono, en el segundo lote, para mejorar la captación de dióxido de carbono o para mejorar la reología u otras características de la mezcla. En dichas realizaciones en las que se ajustan una o más condiciones de una segunda operación de mezclado, en ciertas realizaciones, la una o más condiciones de la segunda operación de mezclado incluyen (a) la cantidad total de dióxido de carbono añadido a la mezcla de cemento, (b) la tasa de adición de dióxido de carbono, (c) el momento de la adición del aditivo a la mezcla de cemento, (d) si se añade o no un aditivo a la mezcla de cemento, (e) el tipo de aditivo añadido a la mezcla de cemento, (f) el momento de la adición del aditivo a la mezcla de cemento, (g) la cantidad de aditivo añadido a la mezcla de cemento, (h) la cantidad de agua añadida a la mezcla de cemento, (i) el momento de la adición del aditivo a la mezcla de cemento, (j) el enfriamiento de la mezcla de cemento durante o después de la adición de dióxido de carbono, o una combinación de los mismos. El controlador también puede recibir información adicional relativa a una o más características de la mezcla de cemento medidas después de que la mezcla de cemento salga de la mezcladora, y ajusta las condiciones para el segundo lote de mezcla de cemento tomando como base el procesamiento, que comprende además la información adicional. En ciertas realizaciones, la una o más características de la mezcla de cemento medidas después de que la mezcla de cemento salga de la mezcladora comprende (a) la reología de la mezcla de cemento en uno o más puntos temporales, (b) la resistencia de la mezcla de cemento en uno o más puntos temporales, (c) la contracción de la mezcla de cemento, (d) la absorción de agua de la mezcla de cemento, o una combinación de las mismas. Otras características incluyen el contenido de agua, el análisis del dióxido de carbono para confirmar la captación de dióxido de carbono, el contenido de calcita (por ejemplo, determinado por espectroscopia infrarroja), el módulo de elasticidad, la densidad y la permeabilidad. Puede medirse cualquier otra característica adecuada.

El uso de un aparato que incluye un sistema de control, ya sea para una sola operación de mezclado o para una pluralidad de operaciones de mezclado, puede producir unas eficiencias muy altas de captación de dióxido de carbono (relación entre el dióxido de carbono o los derivados del dióxido de carbono en la mezcla de cemento y el dióxido de carbono total administrado). En ciertas realizaciones, el aparato está configurado para controlar uno o más accionadores de forma que se consiga una eficiencia de carbonatación de al menos el 60, 70, 80, 90, 95, 96, 97, 98, 99 o 99,5 %. Dichas altas eficiencias permiten un mayor secuestro de gases de efecto invernadero sin fugas a la atmósfera, así como un funcionamiento más económico.

V. Composiciones

También se divulgan en el presente documento en general composiciones, por ejemplo, composiciones que pueden producirse mediante los métodos descritos en el presente documento.

Ejemplos

Cualquier ejemplo que quede fuera del alcance de las reivindicaciones tiene únicamente fines de referencia.

Ejemplo 1

En este ejemplo se describe el contacto de una mezcla húmeda de cemento hidráulico (hormigón) con dióxido de carbono durante el mezclado del hormigón.

Se realizaron una serie de pruebas para poner en contacto la mezcla de hormigón húmedo con dióxido de carbono durante el mezclado del hormigón.

En un primer experimento se mezclaron 20 kg de hormigón premezclado en sacos (Quikrete o Shaw) con agua en una mezcladora Hobart. El contenido de cemento del hormigón no se conocía, pero se supuso que era del 12-14 %. Se utilizó un valor del 14 % en los cálculos posteriores. Se añadieron 0,957 kg de agua, que era el 57 % del agua final, para obtener una relación a/c de 0,34, y la mezcladora se cubrió con una tapa suelta. La mezcla de hormigón de mezcló durante 1 min. A continuación, se administró una mezcla gaseosa que contenía dióxido de carbono a una concentración del 99,5 % (dióxido de carbono de calidad comercial de Air Liquide, 99,5 % de CO₂, UN1013, CAS: 124-38-9) para que entrara en contacto con la superficie del hormigón de mezcla a través de un tubo de aproximadamente 0,635 cm (¼") de DI (diámetro interior) cuya abertura estaba situada aproximadamente a 10 cm de la superficie del hormigón de mezcla, a un caudal de 20 litros por minuto (LPM) durante 40-80 s, para una cantidad total de dióxido de carbono de 13,3 l (40 s) a 26,7 l (80 s). El agua restante, 0,713 kg, se añadió para llevar la mezcla a una relación a/c de 0,6 mientras se seguía mezclando la mezcla de hormigón tras la adición de dióxido de carbono durante aproximadamente 2 min, durante un tiempo total de mezclado de aproximadamente 4 min, con adición de dióxido de carbono durante 40, 60 u 80 s durante el mezclado. En general, el procedimiento de mezclado fue el siguiente: mezclar la mezcla seca y añadir la primera adición de agua durante 15 s; mezclar durante el resto de un minuto; administrar CO₂ mientras se mezcla durante 40, 60 u 80 s; cuando la administración era de 40 s hubo 20 s adicionales de mezcla

post-CO₂ para llevar la etapa hasta un minuto, cuando la administración era de 60 u 80 s, la siguiente etapa comenzaba inmediatamente después de que se detuviera el CO₂; añadir la segunda adición de agua y mezclar durante dos minutos. En una prueba se añadió un 5 % de agua adicional. Estas pruebas se realizaron con la mezcla preenvasada Shaw, que requería más agua y se suponía que contenía más cemento (17 %). Las dos adiciones de agua fueron de 1,15 kg (58 % dando una a/c estimada de 0,34) y 0,850 kg (para dar un total de 2,0 kg de agua y una a/c estimada de 0,59 a/c). En el caso del 5 % de agua añadida, se aplicó únicamente en la segunda adición (1,150 kg o 55 %, y después 0,950 kg para un total de 2,1 kg y una a/c estimada de 0,62). Las mezclas de hormigón de control se prepararon con la misma relación a/c final y el mismo tiempo de mezclado, pero sin la adición de dióxido de carbono. El hormigón mezclado se vertió en cilindros y se realizaron pruebas de resistencia a los 7 días. Los resultados se muestran en las **Figuras 4 y 5**, donde las barras representan el intervalo de datos (de alto a bajo) y el punto intermedio corresponde al promedio. Las mezclas de hormigón que habían sido expuestas a dióxido de carbono mostraron unas resistencias a los 7 días comparables a las de los controles.

En un segundo experimento, se prepararon varios lotes. En cada lote se mezclaron aproximadamente 20 kg de hormigón premezclado en sacos (BOMIX bagged readymix) con agua en una mezcladora Hobart. El contenido de cemento del hormigón no se conocía pero se supuso que era del 20 %. Se añadió una primera adición de agua de 0,6 kg (30 % del agua total) para una relación a/c de 0,15, y la mezcladora se cubrió con una tapa suelta. La mezcla de hormigón se mezcló durante un total de 1 min. A continuación, se administró una mezcla gaseosa que contenía dióxido de carbono a una concentración del 99,5 % (dióxido de carbono de calidad comercial de Air Liquide, 99,5 % de CO₂, UN1013, CAS: 124-38-9) para que entrara en contacto con la superficie del hormigón de mezcla a través de un tubo de aproximadamente 0,635 cm (1/4") de DI (diámetro interior) cuya abertura estaba situada aproximadamente a 10 cm de la superficie del hormigón de mezcla, a diferentes caudales para diferentes lotes, durante 60 s, para dar diferentes dosis totales de dióxido de carbono para diferentes lotes. El agua restante de 1,4 kg se añadió para llevar la mezcla a una relación a/c de 0,5 mientras se seguía mezclando la mezcla de hormigón tras la adición de dióxido de carbono durante aproximadamente 2 min, durante un tiempo total de mezclado de aproximadamente 4 min, con adición de dióxido de carbono durante 60 s durante el mezclado (un minuto de premezcla, 60 s de dosis de CO₂, a continuación, añadir el resto del agua y terminar con dos minutos de mezcla para un total de 4 min). Las mezclas de hormigón de control se prepararon con la misma relación a/c final y el mismo tiempo de mezclado, pero sin la adición de dióxido de carbono. El hormigón mezclado se vertió en 5 cilindros de 4 kg (100 mm de diámetro por 200 mm, o 4 pulgadas por 8 pulgadas) y se realizaron pruebas de resistencia a los 7, 14 y 28 días. La dosificación de dióxido de carbono se expresa por cilindro y fue de 5, 10, 15, 20, 25 o 30 g por cilindro, dependiendo del lote, que era del 0,6, 1,3, 1,9, 2,5, 3,1 o 3,8 % de dióxido de carbono en pdc, respectivamente. Los resultados se muestran en las **Figuras 6, 7 y 8**. Las mezclas de hormigón que habían sido expuestas a dióxido de carbono mostraron unas resistencias a la compresión a los 7 días comparables a las de los controles, con una tendencia al aumento de la resistencia a los 7 días al aumentar la dosis de dióxido de carbono (**Figura 6**). Las resistencias a la compresión a los 14 días eran comparables o inferiores a las de los controles en dos dosis, 15 y 20 g (**Figura 7**). Las resistencias a la compresión a los 28 días eran comparables a las del control, con una tendencia al aumento de la resistencia a los 28 días al aumentar la dosis de dióxido de carbono (**Figura 8**).

En un tercer experimento, se añadió agua adicional para compensar la fluidez reducida (asentamiento) observada en las mezclas de hormigón que han entrado en contacto con dióxido de carbono en los experimentos anteriores. Las mezclas de hormigón se prepararon como en el segundo experimento, salvo que la dosis de dióxido de carbono utilizada fue de 15 g por cilindro (1,9 % de dióxido de carbono en pdc). Además, en una serie de lotes de control y de dióxido de carbono, la segunda adición de agua se aumentó para dar un total de agua que era un 4,7 % superior a la adición de agua por defecto. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. Los resultados se muestran en la **Figura 9**. Incluso con el agua adicional, la mezcla de hormigón que ha entrado en contacto con dióxido de carbono mostró una resistencia a los 28 días comparable a la de control.

En un cuarto experimento, se investigaron diferentes cantidades adicionales de agua. Las mezclas de hormigón se prepararon como en el segundo experimento, salvo que las dosis de dióxido de carbono utilizadas fueron de 10 o 15 g por cilindro (1,3 o 1,9 % de dióxido de carbono en pdc, respectivamente). Además, en series de lotes de control y de dióxido de carbono, se aumentó la segunda adición de agua para dar un total de 2100, 2200, 2300, 2400 o 2500 ml/20 kg de mezcla seca, en comparación con los 2000 ml/kg de los lotes de control. La cantidad de agua en la primera adición fue del 60 % del agua total, por lo que la relación a/c en el momento del dióxido de carbono aumentó a medida que aumentaba el agua de mezcla. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Los resultados se muestran en las **Figuras 10-13**. También se realizaron pruebas de asentamiento, y los resultados se muestran en la **Figura 14**. El agua adicional compensó parcialmente la disminución del asentamiento con la adición de dióxido de carbono, especialmente con la dosis más baja de dióxido de carbono. La resistencia a los 7 días era comparable a la del control para la mayoría de las dosis de agua.

Ejemplo 2

En este ejemplo se describe la renovación de un camión hormigonera existente con un sistema para poner en contacto una mezcla de hormigón húmedo en el tambor del camión con dióxido de carbono mientras la mezcla de hormigón se está mezclando.

Se renovó un camión hormigonera para administrar dióxido de carbono a la mezcla de hormigón. Se llevó al lugar de premezclado un tubo de goma flexible de aproximadamente 1,9 cm ($\frac{3}{4}$ ") de diámetro y el camión hormigonera se renovó colocando un tubo de goma flexible para la administración del dióxido de carbono en paralelo con la tubuladura existente para la administración de agua a fin de permitir la administración del dióxido de carbono al tambor del camión en el extremo superior del tambor mientras una mezcla de cemento hidráulico, por ejemplo, hormigón, se mezclaba en el tambor. La abertura del tubo se colocó a una distancia de 0,5 a 2 m del hormigón del camión. El camión era una mezcladora de tránsito de seis metros cúbicos. Se fijó una fuente de dióxido de carbono a la tubuladura de goma flexible. En este ejemplo, la fuente de dióxido de carbono era un suministro de dióxido de carbono líquido, un calentador (etilenglicol), un tanque de almacenamiento intermedio, un equipo de medición de gas y salida de gas, para suministrar dióxido de carbono con una concentración de al menos el 99 %. El camión de administración de gas llevaba dióxido de carbono líquido, dosificado por un regulador de presión, y lo hacía pasar a través de un intercambiador de calor donde el glicol líquido caliente (anticongelante) lo calentaba para convertir el dióxido de carbono líquido en un gas. El gas se almacenó en los tanques receptores en una carreta móvil que se puede sacar del remolque hasta una ubicación dentro de la planta. Se utilizó una pantalla táctil para programar la dosis correcta de dióxido de carbono que debía administrarse durante el proceso de fabricación del hormigón. Se utilizaron válvulas y sensores para dosificar correctamente el gas. Se utilizaron mangueras para conectar el remolque, la carrera y los colectores, y los colectores se acoplaron a la mezcladora para administrar la dosis de gas en la ubicación correcta. En los ensayos industriales, la tubería de gas tenía un diámetro de 1,9 cm ($\frac{3}{4}$ ").

En otra renovación de los camiones hormigonera, el camión se renovó conectando la fuente de dióxido de carbono al tambor a través de la liberación de la línea de agua. La línea de agua iba desde el tanque de agua del camión hasta un empalme en T. Subiendo desde la T envió el agua al tambor. Bajando desde la T había un desagüe para vaciar la línea en el suelo. El suministro de agua se cerraba cuando no se utilizaba, conectando esencialmente la salida al tambor. Reservando el suministro de gas en la salida, en este ejemplo, se evitó el enfoque de línea paralela y sólo fue necesario utilizar un suministro de dióxido de carbono y un conducto para conectar con el empalme en T.

Ejemplo 3

En este ejemplo se describe el uso de dióxido de carbono para que entre en contacto con una mezcla de hormigón en un camión hormigonera.

Se utilizó el camión hormigonera renovado descrito en el Ejemplo 2. Los componentes de un lote de hormigón se añadieron al tambor del camión, incluida la mezcla de cemento y los áridos. Mientras se mezclaba la mezcla de cemento hidráulico, se introdujo dióxido de carbono en una mezcla gaseosa que contenía al menos un 99 % de dióxido de carbono en el tambor a un caudal de 750, 1500 o 2250 litros por minuto durante 180 s, para una dosis total de dióxido de carbono del 0,5 %, 1,0 % o 1,5 % en pdc, respectivamente. El tambor permaneció abierto a la atmósfera durante la adición del dióxido de carbono. Después de que el flujo de dióxido de carbono se hubiera detenido, se añadió agua adicional al hormigón de mezcla para llevar la relación a/c del hormigón a 0,45. El camión recibía el hormigón y el dióxido de carbono en el muelle de procesamiento por lotes, y llevaba el hormigón a un edificio adyacente donde se realizaban pruebas y se hacían muestras. Se realizaron pruebas de temperatura, asentamiento y contenido de aire, y se hicieron cilindros para determinar la resistencia y la resistencia a la flexión.

En un segundo ejemplo de mezclado, el dióxido de carbono se añadió antes de añadir nada de agua adicional a la mezcla, y el agua presente en la mezcla durante la adición de dióxido de carbono se debió al agua presente en la mezcla de áridos, que habían sido expuestos al agua antes de la adición. El árido estaba húmedo y, con la adición del árido húmedo, el contenido de agua de mezcla de cemento hidráulico resultante (hormigón) era de una relación a/c de 0,17. El agua de mezcla final se consiguió añadiendo agua al camión manualmente para alcanzar la consistencia deseada.

Ejemplo 4

En este ejemplo se describe la renovación de una mezcladora de cuba estacionaria utilizada para mezclar hormigón para usar en una operación de premoldeo de hormigón con un sistema para poner en contacto el hormigón mezclado en la mezcladora con dióxido de carbono. Se conectó una línea de gas a un suministro de dióxido de carbono y se llevó a una mezcladora de cuba para mezclar el hormigón y administrarlo a un molde. La línea estaba configurada para permitir un flujo controlable de dióxido de carbono desde el dióxido de carbono a la mezcladora durante un tiempo predeterminado durante el mezclado de la mezcla húmeda.

Ejemplo 5

En este ejemplo se describe el uso de dióxido de carbono para que entre en contacto con una mezcla de hormigón mezclado en una mezcladora de cuba estacionaria y el vertido del hormigón en moldes para obtener productos de hormigón premoldeados. Se utilizó una mezcladora de eje vertical renovada como se describe en el Ejemplo 4 para administrar dióxido de carbono a una mezcla de hormigón húmedo en una mezcladora mientras se mezclaba el hormigón, durante 3 min, para obtener una dosis de dióxido de carbono del 0,5 % al 2,5 % en pdc. La tubería de gas estaba aproximadamente a 1 m del hormigón.

Ejemplo 6

En este ejemplo se describe el uso de dióxido de carbono para que entre en contacto con la mezcla de hormigón en dos operaciones diferentes de premezclado.

En una primera operación, se utilizó la siguiente mezcla:

30 MPa con un asentamiento máximo de 10,16 cm (4")

- Áridos de 20 mm: 2780 kg
- Arena: 2412 kg
- Arena lavada: 615 kg
- Cemento GU de tipo 10: 906 kg
- Cenizas volantes: 192 kg
- Visco 2100: 850 ml
- ViscoFlow: 1650 ml
- Agua: 334 litros

El dióxido de carbono se añadió a través de una manguera de goma de 1,9 cm ($\frac{3}{4}$ ") de diámetro sujeta al lateral del camión y dispuesta en el tambor de mezcla para administrar CO₂ a la superficie del hormigón de mezcla durante 180 s (controlado manualmente), a una dosis baja, media o alta, para alcanzar un 0,43, 0,55 y 0,64 % de CO₂ en pdc, respectivamente. Debido a que el árido estaba húmedo, el CO₂ se añadió a la mezcla antes de la adición final de agua; se calculó que la a/c de la mezcla cuando se añadió CO₂ era de 0,16. El agua final se añadió inmediatamente después de la adición del CO₂.

La adición de CO₂ redujo en gran medida el asentamiento a medida que avanzaba el tiempo desde la llegada a la planta, véase la **Figura 15**. El hormigón carbonatado mostró una resistencia reducida a los 7 días en comparación con el control, aumentando su resistencia con el tiempo, de modo que el día 56 el hormigón carbonatado era más resistente que el no carbonatado en todas las dosis probadas. Véase la **Figura 16**. La adición de CO₂ provocó un aumento de la temperatura del cemento húmedo que era dependiente de la dosis, como se muestra en la **Tabla 2**.

TABLA 2

Efecto de la dosis de CO₂ sobre la temperatura, premezcla

Mezcla	Temperatura (°C)
Control	15,2
0,43 % de CO ₂	17,0
0,55 % de CO ₂	18,4
0,64 % de CO ₂	19,4

También se realizaron pruebas de penetración rápida de cloruros (RCPT, utilizando el método de prueba estándar ASTM C1202 para la indicación eléctrica de la capacidad del hormigón de resistir la penetración de iones cloruro) y pruebas de resistencia a la flexión. Véase la **Figura 17**. Aunque la RCPT aumentó con la carbonatación (**Figura 17A**), dado que el hormigón de control se encontraba en el extremo superior de los bajos (generalmente considerado de 1000 a 2000 culombios) y el hormigón carbonatado se encontraba en el extremo inferior de los moderados (generalmente considerado de 2000 a 4000 culombios), la diferencia no se consideró significativa. La resistencia a la flexión disminuyó ligeramente con la carbonatación (**Figura 17B**).

En una segunda operación, las mezclas se prepararon para alcanzar un objetivo de asentamiento predeterminado de 12,7 cm (5 pulgadas), añadiendo agua adicional a los lotes carbonatados según fuera necesario para alcanzar el asentamiento objetivo. Se utilizó la siguiente mezcla:

- Arena: 770 kg/m³ 20 mm
- Piedra: 1030 kg/m³
- Cemento GU: 281 kg/m³
- Cenizas volantes (F): 55 kg/m³
- Agua: 165 l/m³
- Daracem 50: 1400 ml/m³
- Darex II: 200 ml/m³

Total: 2301 kg

El agua en los lotes de CO₂ aumentó (cantidad desconocida añadida tras finalizar la inyección de CO₂) para alcanzar el asentamiento objetivo.

- 5 El CO₂ se introdujo en el tambor de mezclado del camión hormigonera a través de una manguera conectada en un empalme en T a una línea de agua existente que descargaba en el tambor la mezcladora. Como en la operación anterior, debido a que el árido estaba húmedo, el CO₂ se añadió a la mezcla antes de la adición final de agua; se calculó que la a/c de la mezcla cuando se añadió CO₂ era de 0,16. El agua final se añadió inmediatamente después de la adición del CO₂. Se utilizaron dos dosis de CO₂, 0,5 % y 1,0 % en pdc, así como un control no carbonatado. Se
- 10 añadió agua adicional al hormigón carbonatado para alcanzar el asentamiento objetivo. El hormigón se utilizó en una operación de premoldeo *in situ* y llegó 20-25 min después de que comenzara la mezcla.

El uso de agua adicional llevó el asentamiento del hormigón carbonatado a unos niveles comparables a los del control no carbonatado, como se muestra en la **Tabla 3**:

15

TABLA 3

Asentamiento, temperatura y contenido de aire de hormigones premezclados carbonatados y no carbonatados

Mezcla	Contenido de aire	Asentamiento (pulgadas)	Temperatura (°C)
Control	3,6 %	5,5	23,9
0,5 % CO ₂	4,2 %	4,5	26,2
1,0 % CO ₂	4,1 %	5	28,6

20

Para el hormigón carbonatado al 0,5 %, dos mediciones posteriores del asentamiento, a los 20 min y 35 min de su llegada a la obra, fueron ambas de 12,7 cm (5 pulgadas). No se obtuvieron más mediciones para la muestra del 1,0 %.

25

Las resistencias a la compresión de los lotes se muestran en la **Figura 18**. La mezcla con un 0,5 % de CO₂ mostró una resistencia del 85 % en comparación con el control a 1 día, una resistencia equivalente a los 7 y 28 días, y un 106 % de la resistencia de control a los 56 días. La mezcla con un 1,0 % de CO₂ mostró una resistencia del 71 % en comparación con el control, y del 94 % a los 28 y 56 días. El agua adicional añadida para alcanzar el asentamiento objetivo probablemente redujo la resistencia a la compresión del hormigón.

30

En una tercera operación, se utilizó un aditivo, gluconato de sodio, para restablecer la fluidez. Se utilizó la siguiente mezcla:

35

Arena: 770 kg/m³ 20 mm
 Piedra: 1030 kg/m³ de cemento
 GU: 336 kg/m³
 Agua: 163 l/m³
 Daracem 55: 1350 ml/m³

40

El CO₂ se introdujo en el tambor de mezclado del camión hormigonera a través de una manguera conectada en un empalme en T a una línea de agua existente que descargaba en el tambor la mezcladora. Como en la operación anterior, debido a que el árido estaba húmedo, el CO₂ se añadió a la mezcla sin una primera adición de agua y antes de la adición final de agua; se calculó que la a/c de la mezcla cuando se añadió CO₂ era de 0,16. El agua final se añadió inmediatamente después de la adición del CO₂. Se utilizaron dos dosis de CO₂, 1,0 % y 1,5 % en pdc, así como un control no carbonatado. Se añadió gluconato de sodio al lote con CO₂ al 1,5 % a una dosis del 0,05 % en pdc,

45 después de la adición del CO₂. El hormigón se utilizó en una operación de premoldeo *in situ* y llegó 20-25 min después de que comenzara la mezcla.

50

El uso del gluconato de sodio llevó el asentamiento del hormigón carbonatado al 1,0 % a unos niveles comparables a los del control no carbonatado, como se muestra en la **Tabla 4**:

TABLA 4

Asentamiento, temperatura y contenido de aire de hormigones premezclados carbonatados y no carbonatados

Mezcla	Contenido de aire	Asentamiento (pulgadas)	Temperatura (°C)
Control	5,9 %	7	25,8
1,0 % CO ₂	5,9 %	4	28,1
1,5 % CO ₂	4,5 %	3	28,6

Para el hormigón carbonatado al 1,0 % (con gluconato de sodio), unas medidas de asentamiento posteriores, a los 20 min de su llegada a la obra, fueron de 13,97 cm (5,5 pulgadas). Para el hormigón carbonatado al 1,5 % (sin gluconato de sodio), unas medidas de asentamiento posteriores, a los 15 min de su llegada a la obra, fueron de 7,62 cm (3,0 pulgadas). La captación de dióxido de carbono de la dosis del 1,0 % fue del 0,44 % en pdc, para una eficiencia del 44 %. El dióxido de carbono de la dosis del 1,5 % era del 1,69 % en pdc, es decir, una eficiencia del 113 %.

Las resistencias a la compresión de los lotes se muestran en la **Figura 19**. El hormigón al 1,0 % (con gluconato de sodio) tuvo una resistencia a la compresión del 96, 107 y 103 % del control a los 1, 28 y 56 días, respectivamente. El hormigón al 1,5 % (sin gluconato de sodio) tuvo una resistencia a la compresión del 98, 117 y 109 % del control a los 1, 28 y 56 días, respectivamente. El hormigón al 1,5 % de CO₂ tenía un asentamiento reducido, pero seguía siendo utilizable.

Este ejemplo ilustra que la carbonatación puede reducir el asentamiento en la mezcla húmeda utilizada en operaciones de premezclado. Dependiendo de la mezcla, el asentamiento puede ser tal que sean necesarias medidas correctoras, tales como el uso de agua adicional, el uso de aditivos o ambos; como se ilustra mediante este ejemplo, estas medidas pueden restablecer el asentamiento a unos niveles aceptables sin alterar de forma importante la resistencia del hormigón.

Ejemplo 7

En este ejemplo se describe el uso de un aditivo para modular la compactabilidad/resistencia de una mezcla de hormigón moldeado en seco. Se realizaron varias pruebas diferentes.

Los trabajos habían identificado que la carbonatación del hormigón fresco antes de su formación reducía la masa de un producto industrial de mezcla seca carbonatada en ciertas mezclas. Los productos de mezcla seca se fabrican con una dimensión constante, por lo que una masa menor se traduce en una menor densidad, lo que puede contribuir a reducir la resistencia. Una investigación de laboratorio buscó nuevos aditivos para abordar el problema de la densidad. El gluconato de sodio se estudió en un programa de laboratorio. En el hormigón convencional se sabe que los azúcares son retardantes del fraguado. El trabajo investigó su uso junto con hormigón fresco carbonatado para ver si el gluconato de sodio actuaría en relación con los productos de reacción causantes del problema de densidad.

En una primera prueba, el diseño de la mezcla fue un hormigón de mezcla seca con las siguientes proporciones

- 1,75 kg de cemento
- 15,05 kg de árido fino SSD (superficie saturada seca)
- 7,00 kg de árido grueso SSD (superficie saturada seca)
- 1,19 kg de agua de mezcla
- El agua objetivo era del 6,05 % en masa del hormigón

Los aditivos utilizados fueron: 1) Gluconato de sodio para mejorar la densidad: se preparó como una solución de 36,8 g de gluconato de sodio por 100 ml de agua. Se dosificó en el hormigón como una masa de gluconato de sodio sólido por peso de cemento; 2) Rainbloc 80: un aditivo hidrofugante para unidades de mampostería de hormigón; y 3) ProCast 150: un aditivo para usar en unidades de mampostería de hormigón. Los dos aditivos comerciales se dosificaron sobre la base de ml/100 kg de materiales cementosos según las especificaciones del fabricante.

Las muestras se mezclaron según el siguiente procedimiento:

- Primero se introduce el árido y se mezcla hasta que quede homogéneo.
- Se introduce el cemento y se mezcla durante 30 s hasta que quede homogéneo.
- Se añade agua de mezcla durante 15 s.

- El hormigón se mezcla durante un total de 4 min a partir de la adición de agua.
- En el caso de los lotes de CO₂ se utilizó la siguiente secuencia modificada:
- 1 min mezclando todos los materiales
- Se registra la temperatura inicial
- 5 • Se inyecta CO₂ gaseoso sobre la superficie del hormigón de la mezcla a 100 LPM durante el tiempo requerido según el plan de pruebas. Nominalmente, el gas se retiene en el recipiente mediante una tapa que se adapta al movimiento del mecanismo la mezcladora. La mezcla se produce durante la administración de gas.
- Se registra la temperatura final.
- 10 • Los aditivos se introducen en la mezcla: siempre después de la carbonatación
- Mezclar durante más tiempo hasta alcanzar un total de 4 min de mezclado.

Las muestras de hormigón se formaron según el siguiente procedimiento

- El hormigón se formó en moldes cilíndricos estándar de 100 mm de diámetro
- 15 • Se introdujeron 3,5 kg de materiales de mezcla seca en los moldes y se compactaron utilizando un ariete neumático especialmente diseñado que aplica 655-689,5 kPa (95-100 psi) de presión directamente con vibración sobre la sección transversal de la masa de hormigón
- Se utilizó una llana de acero para eliminar cualquier exceso de material de la parte superior del molde y nivelar la superficie de la muestra de prueba.
- 20 • Se registró la masa del cilindro.
- Las probetas se pusieron a curar en un baño de agua de cal, según la ASTM C192

- 25 El primer ensayo produjo cuatro hormigones: 1) Control; 2) Control con gluconato de sodio al 0,05 %; 3) CO₂; 4) CO₂ con un 0,05 % de gluconato de sodio. La masa unitaria del cilindro (masa de un volumen constante de hormigón) se entendió como una estimación de la densidad del producto. Se produjeron 6 muestras.

- 30 Con la densidad de control como patrón, el control con gluconato de sodio tuvo una densidad relativa del 98,8 %, el hormigón carbonatado del 94,0 % y el hormigón carbonatado con gluconato de sodio del 93,4 %. Por tanto, la adición de un 0,05 % de gs al control reduce la densidad del cilindro un 1,2 %, la aplicación de CO₂ reduce la densidad del cilindro un 6 %, y la adición de 0,05 % de gs al hormigón tratado con CO₂ no mejoró la densidad del cilindro. La dosis es demasiado baja.

- 35 En un segundo ensayo, se utilizaron las mismas condiciones para la preparación de la muestra que para el primer ensayo, con las siguientes condiciones de carbonatación y de gluconato de sodio:

- No carbonatado con un 0, 0,24 % y 0,48 % de gluconato de sodio
 - CO₂ durante 1 min con un 0,06 %, 0,12 %, 0,24 % y 0,48 % de gluconato de sodio
 - CO₂ durante 2 min con un 0,10 %, 0,24 %, 0,48 % y 0,72 % de gluconato de sodio
- 40 Los efectos de las diferentes dosis de gluconato de sodio sobre la densidad, que puede considerarse un sustituto de la resistencia, se muestran en la **Figura 20**. La aplicación de CO₂ disminuyó la masa unitaria del cilindro (sustituto de la densidad). Al aumentar la cantidad de CO₂ absorbido por el hormigón aumentaron correspondientemente las cantidades de gluconato de sodio para compensar la deficiencia de densidad. El aumento de la dosis de gluconato de sodio aumentó la densidad de todos los hormigones a lo largo del intervalo considerado. La masa unitaria del cilindro
- 45 de hormigón de control aumentó un 1,7 % con una dosis de un 0,48 % de gluconato de sodio. Para 1 min de CO₂, ambas dosificaciones de gluconato de sodio del 0,24 % y del 0,48 % dieron lugar como resultado una masa del cilindro equivalente a la del control.

- 50 Para 2 min de CO₂, la masa del cilindro fue el 99 % del control con una dosis de gluconato de sodio del 0,48 %, e igualó la masa del cilindro de control cuando la dosis alcanzó el 0,72 %.

- En un tercer ensayo, se utilizaron las mismas condiciones para la preparación de la muestra que para el primer ensayo, con una carbonatación a 50 LPM durante 90 s y las siguientes condiciones de gluconato de sodio:

- 55 • Control
- CO₂ con un 0,24 % de gluconato de sodio
- CO₂ con un 0,30 % de gluconato de sodio
- CO₂ con un 0,36 % de gluconato de sodio
- 60 • CO₂ con un 0,42 % de gluconato de sodio

- 60 Se midió la masa del cilindro (densidad, suponiendo que todos los cilindros tienen el mismo volumen) y la resistencia a la compresión a los 1, 3 y 7 días. Las densidades de los cilindros se muestran en la **Figura 21**. La aplicación de CO₂ disminuyó la masa unitaria del cilindro (sustituto de la densidad). El aumento de la dosis de gluconato de sodio aumentó la densidad a lo largo del intervalo considerado. El efecto se estancó un poco en las dosis más altas, lo que sugiere
- 65 que la dosis preferida está potencialmente en el intervalo del 0,30 % al 0,42 %. Sin gluconato, la masa del cilindro de un producto carbonatado es aproximadamente un 7 % menor de la del control. Una dosis de gluconato del 0,30 %

llevó la masa al 3 % por debajo del control. Una dosis del 0,42 % llevó la masa a un 4 % menos que el control. Las resistencias a la compresión de las muestras tratadas con gluconato de sodio eran comparables a las de la muestra de control a partir de unas dosis del 0,30 %.

- 5 En un cuarto ensayo, se utilizaron las mismas condiciones para la preparación de la muestra que para el primer ensayo. La carbonatación se realizó a 50 LPM durante 90 s y en las siguientes condiciones de gluconato de sodio:
- Control
 - CO₂
 - 10 • CO₂ con un 0,30 % de gluconato de sodio
 - CO₂ con un 0,42 % de gluconato de sodio

15 Todos los hormigones contenían Rainbloc (0,32 %). Se añadió con el agua de mezcla. La masa unitaria del cilindro (masa de un volumen constante) se midió como una prueba de la densidad del producto. Se produjeron 6 muestras. La resistencia se midió a los 1, 3 y 7 días. Las densidades de los cilindros se muestran en la **Figura 22**. La aplicación de CO₂ redujo la densidad (en un 6 %) y la resistencia del producto de hormigón. El uso de gluconato de sodio mejoró la densidad y la resistencia. Un 0,3 % de gluconato de sodio fue suficiente para fabricar hormigón carbonatado con un 98,5 % de la densidad del control y una resistencia equivalente. Un 0,42 % de gluconato de sodio produjo un hormigón carbonatado con una densidad y una resistencia equivalentes a las del control. La dosis óptima para esta combinación de cemento y proporciones de diseño de la mezcla parece ser del orden del 0,42 % de gluconato de sodio en peso de cemento.

- 25 En un cuarto ensayo, se utilizaron las mismas condiciones para la preparación de la muestra que para el primer ensayo. La carbonatación se realizó a 50 LPM durante 90 s y en las siguientes condiciones de gluconato de sodio:
- Control
 - CO₂
 - CO₂ con un 0,30 % de gluconato de sodio
 - CO₂ con un 0,42 % de gluconato de sodio
 - 30 • CO₂ con un 0,30 % de gluconato de sodio con adición de Procast posterior al CO₂.

35 A diferencia de los días anteriores, el cemento era una mezcla 70/30 de cemento blanco y OPC. Todos los lotes contenían Rainbloc (0,32 %) y Procast 150 (0,64 %). El Rainbloc se añadió con el agua de mezcla, mientras que el Procast 150 se probó tanto como parte del agua de mezcla como una adición tras el tratamiento con dióxido de carbono. La resistencia se midió a los 1 (2 muestras) y 7 días (4 muestras). Las densidades de los cilindros se muestran en la **Figura 23**. El tratamiento de carbonatación produjo un producto de hormigón compactado un 7 % menos denso que el de control. La densidad se mejoró añadiendo gluconato de sodio. Una dosis de gluconato de sodio al 0,30 % mejoró la densidad hasta el 97 % del control. Un nuevo aumento hasta el 0,42 % produjo un producto de hormigón con una densidad del 96 %. En comparación con el ensayo anterior, que no incluía Procast, está claro que la dosificación óptima es sensible a la presencia de otros aditivos. La adición del Procast tras el tratamiento con dióxido de carbono mejoró la densidad del producto. El momento de la adición de aditivos con respecto a la aplicación del dióxido de carbono es importante.

45 Este ejemplo ilustra que un aditivo, gluconato de sodio, puede devolver la densidad y la resistencia a la compresión de las muestras de mezcla seca carbonatada a las de las muestras no carbonatadas, que el efecto depende de la dosis y que el momento de administración de los aditivos adicionales añadidos a la mezcla puede afectar al desarrollo de la resistencia.

50 Ejemplo 8

Este ejemplo ilustra los efectos de diferentes aditivos sobre la trabajabilidad de la mezcla de mortero carbonatado, preparado como para una operación de moldeo en húmedo.

55 Se preparó una mezcla de mortero que contenía 535 g de cemento Portland (Holcim GU), 1350 g de arena y 267,5 g de agua. Se introdujo gaseoso CO₂ gaseoso a 20 LPM mientras se mezclaba. El momento de administración del CO₂ dependía del objetivo de captación de CO₂, por ejemplo, para alcanzar un 1,1 % en pdc, la administración duró de 3 a 4,5 min.

60 Se utilizaron tres aditivos: gluconato de sodio, fructosa, glucoheptonato de sodio. Los aditivos se añadieron al mortero carbonatado en unas dosificaciones del 0,05, 0,10 y 0,20 % en peso de cemento. Las dosificaciones reflejan la masa sólida de aditivo administrada en una solución. Los morteros se carbonataron mientras se mezclaban hasta una captación de aproximadamente el 1,9 % en peso de cemento. El aditivo se añadió después de la carbonatación: tras la carbonatación, se midió la temperatura de la muestra, a continuación, se añadió el aditivo y la muestra se volvió a mezclar para homogeneizarla.

65 Se midió el asentamiento del mortero producido como una evaluación de la trabajabilidad. El asentamiento se midió

inmediatamente después de finalizar la mezcla utilizando un aparato de ensayo de conos de asentamiento Mini Transparence Acrylic de Cement & Mortar Testing Equipments (NL SCIENTIFIC INSTRUMENTS SDN. BHD. Malasia). Las muestras se extrajeron en dos levantamientos.

- 5 La carbonatación disminuyó en gran medida el asentamiento del mortero, mientras que cada uno de los aditivos, añadido después de la carbonatación, mejoró el asentamiento. El asentamiento carbonatado se igualó al del control tras la adición de un 0,05 % de fructosa, un 0,10 % de gluconato de sodio o un 0,2 % de glucoheptonato de sodio. Véase la **Figura 24**.
- 10 En una segunda prueba, las mezclas de mortero se prepararon y carbonataron como anteriormente, y se añadieron fructosa o gluconato de sodio antes (Pre), durante (Mid), o después (Post) de la carbonatación, y se midió la captación de CO₂ así como el asentamiento en la mezcla de mortero. Se observó que la adición de aditivo antes o durante la carbonatación no corregía de forma apreciable la disminución del asentamiento causada por la carbonatación, mientras que la adición de aditivo después de la carbonatación mejoró en gran medida el asentamiento (la aparente mejora del asentamiento en la muestra Pre gluconato de sodio puede atribuirse a la captación anómalamente baja de dióxido de carbono de esta muestra); esto era cierto tanto para el gluconato de sodio como para la fructosa. Véase la **Figura 25**.

Ejemplo 9

- 20 Este ejemplo ilustra el efecto del momento de adición del aditivo sobre la trabajabilidad y el desarrollo de la resistencia en una mezcla de mortero carbonatado, como para una operación de moldeo en húmedo.

- 25 En una primera prueba, se preparó una mezcla de mortero con 535 g de cemento Portland (Holcim GU), 1350 g de arena y 267,5 g de agua. Se introdujo gaseoso CO₂ gaseoso a 20 LPM mientras se mezclaba. El momento de administración del CO₂ dependía del objetivo de captación de CO₂, por ejemplo, para alcanzar el 1,1 % en pdc, la administración tardó de 3 a 4,5 min. Los cubos de mortero se crearon con el método de prueba estándar C109M-12 para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Todas las muestras contenían un 0,10 % en pdc de PCE (Mighty 21ES de Kao Chemicals) para ayudar al moldeo de los cubos.

- 30 El gluconato de sodio se añadió antes o después de la carbonatación, al 0, 0,025, 0,05 y 0,075 % en pdc. La resistencia a la compresión a las 24 horas se midió a las 24 horas y se comparó con el control no carbonatado. Véase la **Figura 26**. El gluconato de sodio añadido tras la carbonatación no afectó a la resistencia a la compresión a las 24 horas, mientras que el gluconato de sodio añadido antes de la carbonatación mejoró la resistencia a la compresión a las 24 horas, pero se vio que la mezcla era rígida. La mezcla con gluconato de sodio añadido tras la carbonatación era trabajable, pero el desarrollo de la resistencia se vio afectado negativamente.

- 40 En una segunda prueba, se preparó mortero y se carbonató con o sin gluconato de sodio, añadido antes o después de la carbonatación, como en la primera prueba, excepto porque el cemento era cemento Lehigh. Los resultados fueron similares a los del mortero preparado con cemento Holcim: Cuando se añadió después del CO₂, el aditivo fue un retardante y dio como resultado unas resistencias más bajas a las 24 horas. Cuando se añadió antes del CO₂, el efecto retardante no fue evidente y la resistencia a las 24h era del ~90 % del control con unas dosis de GS relativamente pequeñas.

Ejemplo 10

Este ejemplo ilustra los efectos de la temperatura del sistema sobre la captación de dióxido de carbono en una mezcla húmeda.

- 50 En una primera prueba, se realizó un experimento para estudiar el efecto de la temperatura inicial de los materiales sobre el comportamiento de carbonatación de la pasta de cemento fresca. Se consideraron tres temperaturas de inicio objetivo, 7 °C, 15 °C y 25 °C (las temperaturas reales fueron de ± 2 °C). Las mediciones incluyen la temperatura del mortero, el mini-asentamiento (asentamiento vertical y dispersión lateral), la captación de dióxido de carbono y la resistencia de los cubos.

- 55 Se preparó una mezcla de mortero que contenía 535 g de cemento Portland (Holcim GU), 1350 g de arena y 267,5 g de agua. La mezcla se llevó a 7, 15 o 25 °C, y se introdujo CO₂ gaseoso a 20 LPM mientras se mezclaba. El momento de administración del CO₂ dependía del objetivo de captación de CO₂, por ejemplo, para alcanzar el 1,1 % en pdc, la administración tardó de 3 a 4,5 min. Se midió la captación de CO₂ en diferentes puntos temporales. También se realizaron mediciones del asentamiento en diferentes puntos temporales.

- 60 El efecto de la temperatura sobre la tasa de captación de dióxido de carbono se muestra en la **Figura 27**, donde la línea y los puntos superiores son para 25 °C, la línea y los puntos intermedios son para 15 °C, y la línea y los puntos inferiores son para 7 °C. La tasa de captación de dióxido de carbono aumentó al aumentar la temperatura; la tasa fue del 0,087 % en pdc/min a 7 °C, de 0,231 pdc/min a 15 °C y de 0,331 pdc/min a 25 °C. La tasa de captación de dióxido de carbono aumentó un 278 % al aumentar la temperatura de 7 a 25 °C.

El efecto de la temperatura sobre el asentamiento se muestra en la **Figura 43**. La trabajabilidad con captación del mortero preparado a 7 °C apenas se vio afectada (línea y puntos superiores). La trabajabilidad del mortero preparado a 15 °C disminuyó rápidamente al aumentar la captación (línea y puntos inferiores). La trabajabilidad del mortero preparado a 25 °C estaba entre la de los otros dos morteros, disminuyendo con la captación, pero con mayores captaciones que la muestra a 15 °C para alcanzar una trabajabilidad nula (línea y puntos intermedios).

En un segundo experimento, se midió el efecto de la temperatura del dióxido de carbono (calentado o sin calentar (frío) o de su forma (hielo seco), en algunos casos combinado con el uso de agua helada, sobre la captación de dióxido de carbono en un sistema de pasta de cemento. El cemento, el agua de mezcla (sin tratar o agua helada) y el aditivo se mezclaron durante 30 segundos en una batidora, y se evaluaron las propiedades iniciales y la temperatura de la pasta. A continuación, la pasta se carbonató mientras se mezclaba en la batidora. Carbonatar mientras se mezcla en la batidora, utilizando gas caliente, gas sin calentar (gas frío) o hielo seco. Evaluar las propiedades finales y la temperatura de la pasta. La **Figura 28** muestra los resultados del estudio. Los gases calientes o fríos parecían proporcionar una captación aproximadamente equivalente. Las mezclas con temperatura fría (agua de mezcla fría, hielo seco) no mejoraron la captación de dióxido de carbono.

Ejemplo 11

Este ejemplo ilustra el efecto beneficioso de los compuestos que contienen calcio añadidos antes de la carbonatación sobre el desarrollo de la resistencia a las 24 horas en una mezcla de mortero carbonatado.

Se preparó una mezcla de mortero que contenía 535 g de cemento Portland (Holcim GU), 1350 g de arena y 267,5 g de agua. Se introdujo gaseoso CO₂ gaseoso a 20 LPM mientras se mezclaba. El momento de administración del CO₂ dependía del objetivo de captación de CO₂, por ejemplo, para alcanzar el 1,1 % en pdc, la administración tardó de 3 a 4,5 min. Los cubos de mortero se crearon con el método de prueba estándar C109M-12 para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Se añadió un plastificante (0,10 % de Mighty ES + 0,10 % de Sika VF) con o sin Ca (OH)₂ (2,0 % en pdc) antes de la carbonatación, y se midieron los efectos sobre la resistencia a la compresión a las 24 horas. Los resultados se muestran en la **Figura 29**. La carbonatación disminuyó la resistencia del mortero a las 24 horas. El uso de un plastificante mejoró la resistencia tanto de los morteros carbonatados como de los de control. La adición de Ca(OH)₂ adicional disminuyó la resistencia a las 24 horas del producto de control, pero aumentó aún más la resistencia a las 24 horas del producto carbonatado.

En un segundo experimento, se añadieron CaO (1,5 %), NaOH (2,2 %), Ca(NO₂)₂ o CaCl₂ (3,0 %) antes de la carbonatación a una mezcla de mortero como anteriormente. Los resultados se muestran en la **Figura 30**. Todos los compuestos de calcio mostraron beneficios para el desarrollo de la resistencia en la mezcla de mortero carbonatado, en relación con la mezcla de mortero carbonatado sin adición de aditivo.

Ejemplo 12

Este ejemplo ilustra que el momento de la adición de un aditivo utilizado con fines convencionales, en este caso un arrastrador de aire, en relación con la carbonatación, puede ser importante para conservar el efecto del aditivo.

Como sistema de prueba se utilizó una lechada de hidróxido de calcio. Se mezclaron 20 g de Ca(OH)₂ con 40 g de agua para formar una lechada. Se inyectó CO₂ gaseoso en la lechada a 5 LPM. La temperatura, un indicador de la captación de dióxido de carbono, se midió durante un periodo de 9 min. La lechada simple no contenía ningún aditivo, mientras que la lechada con arrastrador de aire contenía un 2,5 % (en masa de Ca(OH)₂ de una solución líquida de hidrocarburos utilizada para el arrastre neumático en el hormigón (AirEx-L, Euclid Chemical). El contenido de carbono se cuantificó utilizando un analizador de carbono por detección infrarroja de combustión (Eltra CS 800, Eltra GmbH, Alemania). Se calculó el aumento neto del % de CO₂ en comparación con un sistema de base no carbonatado que contenía los componentes.

Después de 10 min de carbonatación, la lechada sin aditivo mostró una captación de CO₂ del 25,5 % de la masa sólida original, mientras que la lechada con el aditivo de arrastre de aire tuvo una captación del 36,2 %; por tanto, la adición de un aditivo tensioactivo aumentó la captación de CO₂ en un 42,1 %.

En una segunda prueba, se probaron diferentes tensioactivos para comprobar sus efectos sobre la captación de CO₂. Se utilizó una mezcla de mortero convencional, como en el Ejemplo 8, y los tensioactivos se dosificaron al 0,10 % en pdc. Se inyectó CO₂ durante 6 min durante el mezclado. Se midieron las temperaturas inicial y final y el aumento neto del contenido de CO₂ como anteriormente. Los resultados se muestran en la **Tabla 5**.

TABLA 5

Efectos de los tensioactivos en la captación de CO₂

Aditivo	Fuente	Inicial	Final	Temp.	neto	CO ₂
		Temp. °C	Temp. °C	Cambio	% de CO ₂	aumento
Ninguno		23,8	33	9,2	1,65	Valor inicial
Luz solar	Jabón de fregar	24,1	41,4	17,3	2,89	75 %
Luz solar	Jabón de fregar	24,1	41,9	17,8	3,34	102 %
MB AE-90	BASF	23,4	33	9,6	1,80	9 %
Solar:w	Jabón Guelph	23,8	35,2	11,4	2,17	31 %
AirEX-L	Euclid	23,8	40,6	16,8	2,84	72 %

En una tercera prueba, los lotes de mortero como anteriormente, que contenían un 0,1 % en peso de un arrastrador de aire tensioactivo (Euclid AirEx-L), o sin tensioactivo (control), se expusieron al CO₂ durante el mezclado durante 0, 2, 4 o 6 minutos, y se midió la captación de CO₂. Hubo una mayor captación en el mortero tratado con el arrastrador de aire que en el mortero de control no tratado, en todos los puntos temporales, pero la mejora relativa fue mayor en los tiempos de exposición bajos: se produjo un aumento del 117 % en la captación de CO₂ en comparación con el control a los 2 min, un aumento del 104 % en la captación de CO₂ a los 4 min y un aumento del 28 % en la captación de CO₂ a los 6 min.

En una cuarta prueba, se probó el efecto de la adición de CO₂ antes o después de la adición de un arrastrador de aire sobre la densidad del mortero. Un peso unitario menor indicaba un mayor contenido de aire. Se utilizaron cuatro arrastradores de aire: Euclid Air-Ex-L, Grace Darex ii, BASF MB-AE 90 y Grace Darex AEA ED. Los resultados se muestran en la **Figura 31**. En todos los casos, la adición del arrastrador de aire antes del tratamiento con CO₂ provocó un aumento de la densidad, mientras que la adición del arrastrador de aire tras el tratamiento con CO₂ dio como resultado una densidad igual a la del mortero sin tratar.

Este ejemplo ilustra que el momento del tratamiento con CO₂ en relación con la adición de un arrastrador de aire afecta a la tasa de captación de CO₂ y a la densidad. Si se desea mantener el efecto de densidad del arrastrador de aire, debe añadirse después de la adición de CO₂. En algunos casos, podría utilizarse un enfoque de dos dosis donde se emplee una dosis temprana de arrastrador de aire para potenciar la captación de CO₂, a continuación, una dosis posterior para conseguir los efectos deseados sobre la densidad.

Ejemplo 13

En este Ejemplo se describen las pruebas de carbonatación en una operación de mezclado en seco de premoldeo. Se realizaron pruebas en una instalación de premoldeados en las que se carbonató una mezcla de hormigón en distintas fases del proceso de moldeo, en algunos casos utilizando un aditivo de gluconato de sodio a diferentes concentraciones. Se midieron los efectos de la carbonatación, con y sin aditivo, sobre la resistencia y la absorción de agua.

Se utilizó la mezcladora de hormigón mostrada en la **Tabla 6**.

TABLA 6
Diseño del bloque estándar

Componente	Nombre	Cantidad
Árido grueso	Grava Birdseye	310,7 kg (685 lb)
Agregado fino	Arena Meyers Mat Torp	1959,5 kg (4320 lb)
Agregado fino	Arena de sílice/Wedron 430	567 kg (1250 lb)
Cemento	Illinois Product	453,6 kg (1000 lb)
Aditivo	Rainbloc 80	1,42 kg (50 oz)
Contenido de agua objetivo		6,5 %

Los áridos, el cemento y el agua se añadieron a una mezcladora planetaria. Se hizo fluir dióxido de carbono en la mezcladora a través de un tubo de goma de 1,9 cm (¾ de pulgada) de diámetro durante 180 s a un caudal para

conseguir la carbonatación deseada. En algunas tandas, se añadió dióxido de carbono tanto en la mezcladora como en la tolva de carga.

- 5 En una tanda preliminar, se añadió toda el agua inicialmente, pero en tandas posteriores, se añadió agua adicional aproximadamente a la mitad de los 180 s según una evaluación de la consistencia de la mezcla antes de completarla, y se añadió agua adicional según fue necesario para conseguir el aspecto deseado de la mezcla. Los lotes con dióxido de carbono administrado al hormigón requirieron agua adicional casi en proporción a la cantidad de dióxido de carbono gaseoso suministrado. La mezcla de hormigón se colocó en un molde para producir bloques de 20,32 cm (8 pulgadas), que se sometieron a pruebas de densidad, resistencia a la compresión a los 7, 28 y 56 días, y absorción de agua (todo ello de acuerdo con la norma ASTM C140, 5 bloques por prueba). También se determinó la carbonatación del hormigón: Las muestras para analizar el contenido de dióxido de carbono del hormigón se crearon tomando una muestra fresca de la línea de producción, secando el hormigón en una placa caliente para eliminar el agua, y posteriormente cribando el material a través de un tamiz de 160 μm . Se examinaron muestras de las materias primas para determinar qué cantidad de cada componente pasa un tamiz de 160 μm y el contenido de carbono del material que pasa. Esta información, junto con el diseño de la mezcla de hormigón, permite calcular un contenido de carbono de control teórico con el que comparar las muestras analizadas. El contenido de carbono se cuantificó con un analizador de carbono por detección de infrarrojos de combustión. Se calculó el aumento neto del % de CO_2 en comparación con un sistema de base no carbonatado que contenía los componentes.
- 10
- 15
- 20 En una primera prueba, se probó la carbonatación tanto en la tolva de carga como en la mezcladora, o únicamente en la tolva de carga. Las variaciones analizadas se resumen en la TABLA 7, a continuación. También se presentan los datos de los controles, que se prepararon otros días (muestras 500 y 700).

TABLA 7

Variables de producción del bloque estándar y contenidos de agua

Código	Condición	Modo	Dosis total (% en pdc)	a/c	Fracción de agua
0600	Control	No carbonatado	-	0,392	6,64 %
0601	CO_2	Tolva de carga 0,5 %	0,5 %	0,422	8,32 %
0602	CO_2	Mezcladora 0,5 %	0,5 %	0,430	8,25 %
0603	CO_2	Mezcladora 1,0 %	1,0 %	0,440	8,08 %
0604	CO_2	Mezcladora 1,0 %, Tolva de carga 0,5 %	1,5 %	0,450	8,23 %
0605	CO_2	Mezcladora 1,5 %	1,5 %	0,455	8,39 %
0500	Control	No carbonatado	-	0,406	8,88 %
0700	Control	No carbonatado	-	0,426	7,45 %

La **Figura 32** muestra los resultados de las pruebas de captación de dióxido de carbono, la resistencia a la compresión, la absorción de agua y la densidad de los bloques producidos en esta prueba.

- 30 La eficiencia de la captación de dióxido de carbono fue mayor en la dosis del 1,5 % en pdc en la que el dióxido de carbono se administraba únicamente en la mezcladora (lote 0605); la administración de un 0,5 % de la dosis en la tolva de carga fue sistemáticamente menos eficaz que la administración de la totalidad de la misma dosis en la mezcladora (lote 0601 comparado con el lote 0602; lote 0604 comparado con el lote 0605). Se logró una eficiencia de captación de dióxido de carbono del 93 % con una dosis de CO_2 del 1,5 % administrada únicamente en la mezcladora (lote 0605). Por consiguiente, en las pruebas posteriores se utilizó una dosis del 1,5 % de CO_2 , administrada únicamente en la mezcladora.
- 35
- 40 La adición de CO_2 a la mezcla mejoró sistemáticamente la resistencia a la compresión a los 7, 28 y 56 días en todas las dosis probadas, tanto si el CO_2 se añadió en la mezcladora como en la tolva de carga, o en ambas. Las resistencias a la compresión promedio globales de las dos series de control (no carbonatado) (0500 y 0700) fueron de 19 601, 22 056 y 25 310 kPa (2843, 3199 y 3671 psi) a los 7, 28 y 56 días, respectivamente. A los 7 días, los cuatro primeros lotes elaborados con CO_2 (0601, 0602, 0603 y 0604) mostraron un beneficio de resistencia del 30-36 % sobre el control promedio, y el lote carbonatado final (0605) era un 18 % más resistente. El beneficio de resistencia se mantuvo a los 28 días con un beneficio de las cuatro primeras condiciones carbonatadas que variaba entre el 290 y el 37 %, y el lote final era un 19 % mejor que el control promedio. Los resultados a los 56 días indicaron que el beneficio de la resistencia había aumentado a un 30-45 % para las cuatro primeras series y a un 36 % para la serie final.
- 45

La absorción de agua se redujo mediante la carbonatación. Las mezclas 0601 a 0603 tuvieron una absorción de agua aproximadamente un 35 % menor de la del control no carbonatado (0500 y 0700), y las mezclas 0604 y 0605, en las que se añadió un 1,5 % de CO₂, presentaban una absorción de agua aproximadamente un 18 % menor de la del control.

La densidad de las mezclas carbonatadas variaba con la cantidad de dióxido de carbono añadida. La densidad de los dos lotes con menos CO₂ (0,5 %) (0601 y 0602) era aproximadamente un 2,5 % superior a la del control, pero la densidad de los lotes carbonatados a una dosis del 1,0 o el 1,5 % (0603, 0604 y 0605) eran equivalentes a la densidad del control.

Globalmente, esta prueba indicó que la carbonatación de esta mezcla en una operación de premoldeo que produce bloques de 20,32 cm (8 pulgadas) indicaba que se podía conseguir una eficiencia de captación de dióxido de carbono superior al 90 %, produciendo bloques que eran más resistentes que los no carbonatados en todas las dosis de dióxido de carbono y puntos temporales probados, culminando en una resistencia a los 56 días superior en más de un 30 % a la del control. La absorción de agua de los bloques carbonatados era sistemáticamente menor de la del control, y los bloques carbonatados a unas dosis del 1,0 y 1,5 % de CO₂ tenían una densidad equivalente a la de los bloques no carbonatado.

En una segunda prueba, se utilizó la mezcla de la TABLA 8, con una dosis del 1,5 % de CO₂, administrado en la mezcladora, y, además, se administraron cinco dosis diferentes de una mezcla de aditivo de gluconato de sodio: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5 % en pdc. El gluconato de sodio se administró en solución acuosa, disuelto un galón de agua (0,1, 0,2 y 0,3 %) o en dos galones de agua (0,4 y 0,5 %). El aditivo de gluconato de sodio se añadió aproximadamente 75 s después de que comenzara la administración del dióxido de carbono a la mezcladora, y tardó aproximadamente 90 s en añadirse. El aditivo se añadió manualmente durante el ciclo de mezclado. La adición de aditivo se inició durante la adición de dióxido de carbono para no prolongar el ciclo de mezclado. Se midieron la carbonatación, la resistencia a la compresión, la densidad y la absorción de agua.

En la **Tabla 8** se resumen las variables investigadas y los contenidos de agua. Los resultados globales se muestran en la **Figura 32**.

TABLA 8

Bloque estándar, con gluconato de sodio

Código	Condición	Modo	Dosis de CO ₂ (% en pdc)	Gluconato de sodio	a/c	Fracción de agua
0700	Control	-	-	-	0,425	7,35 %
0701	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,5 %	0,413	8,12 %
0702	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,4 %	0,413	7,85 %
0703	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,3 %	0,424	7,99 %
0704	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,2 %	0,426	7,87 %
0705	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,1 %	0,433	7,81 %
0706	Control	-	-	-	0,426	7,45 %

Se comprobó que la eficiencia de la administración de CO₂ para los lotes producidos en esta prueba variaba entre el 78 % y el 94 %, en todos los lotes. Los parámetros de inyección de gas se mantuvieron constantes y se comprobó que la eficiencia promedio era de aproximadamente el 85 %.

Se demostró que la resistencia era sensible a la dosis de aditivo. Véase la **Figura 33**. La resistencia de control puede tomarse al 100 % en todos los curados, y se muestran las resistencias carbonatadas en comparación relativa. Para las dosis más bajas, la resistencia del hormigón carbonatado era equivalente a la resistencia de control tanto a los 7 como a los 28 días. Para una dosis del 0,4 % hubo un beneficio de resistencia del 12 % a los 7 días y un rendimiento equivalente a los 28 y 56 días. Para una dosis del 0,5 % hubo un beneficio de resistencia del 34 % a los 7 días, el 28 % a los 28 días y el 25 % a los 56 días. Estos resultados indican que se requiere una cierta cantidad de aditivo en el hormigón a partir de la cual se puede obtener un beneficio de resistencia.

Se observa que la absorción de agua se redujo de nuevo en los productos carbonatados. Todas las mezclas carbonatadas se dosificaron con un 1,5 % de CO₂ en pdc y tuvieron unas captaciones similares. La absorción de agua

se redujo un 12 % para la dosis más baja de aditivo y un 31 % para la más alta. La densidad mostró cierta dependencia de la dosificación del aditivo. El tratamiento de carbonatación con la dosis pequeña de aditivo disminuyó la densidad de 2098,42 kg/m³ a 2058,37 kg/m³ (de 131 a 128,5 lb/pie³) (aunque cabe señalar que la resistencia se mantuvo equivalente a la del control). La densidad aumentó con la dosis de aditivo y se encontró una densidad equivalente con una dosis del 0,3 %, y la densidad era un 1,3 % mayor para la dosis más alta de aditivo.

Reducción de las emisiones: El dióxido de carbono absorbido en el hormigón puede reducir eficazmente las emisiones del carbono incorporado. Si se conocen la masa del bloque y el diseño de la mezcla, entonces se pueden determinar las emisiones totales relacionadas con el cemento. En este Ejemplo, se encuentra que el bloque de 17,7 kg tiene un 12,9 % (en masa húmeda) de cemento y, por tanto, hay 2282 g de cemento en cada bloque. El proveedor sugirió que el cemento tuviera un 94 % de clínker. Si se supone que la intensidad de las emisiones del clínker es de unos genéricos 866 kg de CO₂/tonelada de clínker producido, entonces las emisiones de clínker de cada bloque alcanzan los 1858 g. Un escenario genérico de captación de carbonatación puede permitir calcular la absorción global de dióxido de carbono y la compensación neta de emisiones. La eficiencia global de captación en el presente Ejemplo, teniendo en cuenta todas las pruebas, fue del 88 %. Una dosis del 1,5 % en peso de cemento significa que se dosifican 34,2 g de CO₂ por bloque, mientras que la eficiencia de captación significa que 30,1 g se ligan como productos de reacción de carbonato estables en el bloque. La diferencia es una pérdida que representa el 12 % de ineficiencia. Bajo estas suposiciones, la cantidad absorbida de dióxido de carbono representa una compensación directa de aproximadamente el 1,62 % de las emisiones procedentes de la producción de clínker. Una consideración de secuestro neto requiere un análisis detallado que incluya las emisiones necesarias para implantar la tecnología. Se puede hacer una estimación razonable teniendo en cuenta la energía necesaria para capturar y comprimir el CO₂ y la distancia que hubo que transportar el CO₂. Otros factores adicionales son relevantes (tales como la creación y el transporte del soporte físico para la tecnología), pero se consideran menores frente a los aspectos relacionados con el gas. La fuente industrial de CO₂ más cercana al lugar del ensayo estaba a 101,4 km (63 millas) de distancia. Las emisiones del transporte pueden considerarse de 222 g de CO₂/tonelada-milla de carga (Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU., 2014). La energía necesaria para capturar el dióxido de carbono es del orden de 150 kWh/tonelada. Para 1000 bloques, una dosis del 1,5 % en pdc inyectaría 34 250 g de CO₂. La absorción total sería de 30 140 g de CO₂. El procesamiento y el transporte del gas se calculan con respecto a la cantidad total inyectada. Las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la energía necesaria para capturar y comprimir el CO₂ son de 3522 g. El transporte del CO₂ líquido 101,4 km (63 millas) supuso unas emisiones de dióxido de carbono de 479 g. No se necesita energía para vaporizar el CO₂ líquido en la planta de hormigón si se emplea un vaporizador atmosférico. La tecnología para carbonatar 1000 bloques supondría unas emisiones de CO₂ de 4001 g. La utilización neta, 26 139 g, es entonces la diferencia entre el total de dióxido de carbono absorbido y el total de emisiones del proceso. Esto significa que el 13,3 % del dióxido de carbono absorbido no puede asociarse a un beneficio medioambiental debido a las emisiones asociadas. Sin embargo, sugiere que la eficacia neta de la utilización del CO₂ es del 86,7 %. Un análisis de sensibilidad puede sugerir cómo los insumos específicos de la ubicación pueden afectar a la eficacia del secuestro. Algunas ubicaciones están más alejadas de las fuentes de CO₂ industrial que el caso actual. Si la distancia de transporte del CO₂ líquido aumentara hasta 965,6 km (600 millas) (algo razonable en los mercados en los que los gases industriales se envían desde zonas lejanas), el aumento de las emisiones del transporte reduciría la eficacia estimada al 73,2 %. Sin embargo, si la distancia se mantuviera en 101,4 km (63 millas), entonces se podría examinar el efecto de las emisiones de la red en las emisiones del procesamiento del dióxido de carbono. Un ejemplo de las bajas emisiones de la red puede encontrarse en Nueva York, donde algunas partes del estado registran 248,74 kg (548,37 lb) de CO₂e/MWh (248,7 g de CO₂e/kWh). La reducción de las emisiones del procesamiento del gas aumentaría la eficacia del secuestro hasta el 94,2 %. Un ejemplo de emisiones de red muy bajas lo encontramos en Quebec, con 2,3 kg (5,1 lb) de CO₂e/MWh (2,3 g de CO₂e/kWh), donde la eficacia alcanzaría el 98,4 %. Por otra parte, Colorado tiene unas emisiones de red elevadas, de 864,67 kg (1906,27 lb) de CO₂e/MWh (864,7 g de CO₂e/kWh). La eficacia disminuiría al 83,7 %. Estas estimaciones son coherentes con un caso analizado anteriormente. Del orden del 80-90 % del dióxido de carbono absorbido por el hormigón representaría una eliminación neta de CO₂ de la atmósfera, mientras que el resto se compensaría con las emisiones necesarias para emplear la tecnología.

Este ejemplo ilustra que se puede añadir dióxido de carbono a una mezcla de hormigón de premoldeo en una operación de moldeo en seco en la fase de mezclado y los productos formados son generalmente más resistentes, muestran una menor absorción de agua y una densidad equivalente en comparación con los productos no carbonatados. La adición de un aditivo de gluconato de sodio dio como resultado un efecto dependiente de la dosis sobre la resistencia, la absorción de agua y la densidad, e indicó que se puede conseguir una dosis óptima de aditivo para optimizar estos parámetros.

Ejemplo 14

En este ejemplo se utilizó el mismo equipo de premoldeo en la misma instalación que en el Ejemplo 13, pero utilizando tres mezclas de hormigón diferentes: una mezcla de piedra caliza, una mezcla ligera y una mezcla de arenisca. Este ejemplo ilustra la importancia de ajustar los parámetros de la mezcla de carbonatación a mezclas con características diferentes.

Se usaron tres diseños de mezcla diferentes, mostrados en las TABLAS 9, 10 y 11.

TABLA 9

Diseño de la mezcla para bloques de piedra caliza

Componente	Nombre	Cantidad
Árido grueso	Sycamore FA-5	1429,7 kg (3152 lb)
Árido grueso	Sycamore FM-20	2333,7 kg (5145 lb)
Agregado fino	Arena de sílice/Wedron 430	337,9 kg (745 lb)
Cemento	Illinois Product	159,2 kg (351 lb)
Cemento	Cemento blanco	8191b
Aditivo	Rainbloc 80	1,67 kg (59 oz)
Aditivo	Frocast 150	3,31 kg (117 oz)
Contenido de agua objetivo		8,6 %

5

TABLA 10

Diseño de la mezcla para bloques ligeros

Componente	Nombre	Cantidad
Árido grueso	Grava Birdseye	10301b
Árido grueso	Gravelita	680,4 kg (1500 lb)
Agregado fino	Arena de cribado	997,9 kg (2200 lb)
Agregado fino	Arena Meyers Mat Torp	680,4 kg (1500 lb)
Cemento	Illinois Product	328,8 kg (725 lb)
Aditivo	Rainbloc 80	0,96 kg (34 oz)
Contenido de agua objetivo		7,9 %

10

TABLA 11

Diseño de la mezcla para bloques de arenisca

Componente	Nombre	Cantidad
Árido grueso	Sycamore FA-20	1700,9 kg (3750 lb)
Agregado fino	Arena Meyers Mat Torp	816,5 kg (1800 lb)
Cemento	Illinois Product	7301b
Aditivo	Rainbloc 80	1,04 kg (37 oz)
Contenido de agua objetivo		7,0 %

Prueba de una mezcla de piedra caliza.

- 15 En una primera prueba, se utilizó la mezcla de piedra caliza de la TABLA 9. Las condiciones fueron las mismas que para la segunda prueba del Ejemplo 13, con el CO₂ añadido a una dosis del 1,5 % en la mezcladora. Se probó la adición de gluconato de sodio al 0,4 %. La adición del aditivo Procast, que normalmente forma parte de la secuencia de mezclado para el diseño de la mezcla de piedra caliza, se retrasó para ser añadido una vez finalizada la inyección de dióxido de carbono. En la **Tabla 12** se resumen las variables investigadas y los contenidos de agua. Los resultados
- 20 globales se muestran en la **Figura 34**.

TABLA 12

Variables de producción de la mezcla de piedra caliza y contenidos de agua

Código	Mezcla			Dosis de CO ₂ (% en pdc)	Aditivo	a/c	Fracción de agua
	Diseño	Condición	Modo				
0805	Caliza	Control	-	-	-	0,225	7,75 %
0806	Caliza	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,4 %	0,514	8,53 %

El diseño de la mezcla de piedra caliza se analizó únicamente en una tanda de producción limitada, debido en parte a la dificultad percibida de evaluar con exactitud la cantidad neta de dióxido de carbono absorbido frente al alto contenido de carbono del fondo de piedra caliza, al menos cuando se utilizan los métodos y procedimientos analíticos actuales.

Los datos de la resistencia a la compresión mostraron que los bloques de piedra caliza carbonatada tenían un promedio de 16 195 kPa (2349 psi) a los 7 días y eran ligeramente más débiles (7 %) que los bloques de control. La resistencia a los 28 días fue de 17 361 kPa (2518 psi) y un 14 % menor de la del control. La resistencia a los 56 días fue de una media de 19 043 kPa (2762 psi) y un 9 % más débil que el control, aunque esta diferencia podría reducirse al 6 % si se eliminara un punto atípico. La dosis de aditivo en esta prueba se determinó utilizando el cemento Illinois Product y no se realizaron pruebas de avance con el cemento Federal White utilizado en el diseño de la mezcla de piedra caliza. El desarrollo posterior en laboratorio ha dejado claro que el efecto y la dosificación del aditivo son sensibles al tipo de cemento. La integración de la tecnología de carbonatación puede requerir una pequeña serie de tandas de investigación para determinar tanto si se desea el aditivo como cuál debe ser la dosis apropiada. El éxito en la demostración del uso del aditivo, para el cemento Illinois Product, en el laboratorio antes del piloto sugiere que podría realizarse un cribado preliminar de optimización para cualquier mezcla para la que se dispusiera de los materiales.

En términos de absorción de agua, se comprobó que el bloque de piedra caliza carbonatada tenía una mayor absorción y una menor densidad que los bloques de control. La absorción aumentó un 18 % y la densidad disminuyó un 2 %. Los resultados concuerdan con la menor resistencia de los bloques de piedra caliza carbonatada y respaldan la necesidad de afinar los insumos utilizados al carbonatar esta mezcla.

Prueba de una mezcla ligera. En una segunda prueba, se utilizó la mezcla ligera de la **Tabla 10**. Las condiciones fueron las mismas que para la segunda prueba del Ejemplo 13, con el CO₂ añadido a una dosis del 1,5 % en la mezcladora. Se probó la adición de gluconato de sodio, a tres niveles diferentes, 0,35, 0,4 y 0,45 %. En la **Tabla 13** se resumen las variables investigadas y los contenidos de agua. Los resultados globales se muestran en la **Figura 35**.

TABLA 13

Variables de producción del diseño de la mezcla ligera y contenidos de agua

Código	Diseño de la mezcla	Condición	Modo	Dosis de CO ₂ (% en pdc)	Aditivo	a/c	Fracción de agua
0801	Ligera	Control	-	-	-	0,745	6,96 %
0901	Ligera	CO ₂	Mezcladora	1,5	-	0,691	12,25 %
0902	Ligera	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,35 %	0,703	13,79 %
0802	Ligera	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,40 %	0,758	8,80 %
0903	Ligera	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,45 %	0,707	13,99 %

Los resultados preliminares sugieren que en todos los casos se produjo un aumento del contenido de CO₂ similar al observado en el bloque estándar para las mezclas ligeras carbonatadas. Sin embargo, debido a las dificultades inherentes a la cuantificación del carbono para estos diseños de mezcla, no se realizó un análisis definitivo, y las cifras reales obtenidas, en algunos casos superiores al 100 %, no son fiables.

Los datos de la resistencia a la compresión para la mezcla ligera se resumen en la **Figura 36**. En la prueba se rompieron tres bloques de la serie de control y cinco bloques de cada una de las series carbonatadas. La resistencia del control (no carbonatado, sin gluconato de sodio) puede tomarse al 100 % en todos los curados, y se muestran las resistencias carbonatadas (con y sin gluconato de sodio) en comparación relativa. El lote carbonatado sin gluconato

de sodio estaba ligeramente por detrás del control a los 7 días, pero desarrolló resistencia a un tasa más rápida a partir de entonces. Los lotes de aditivo resultaron ser más resistentes en la primera medición y mantuvieron al menos este nivel o beneficio durante el resto del programa de pruebas.

- 5 La producción de bloques ligeros encontró una cantidad óptima o casi óptima de aditivo. Sin utilizar ningún aditivo, la resistencia estaba un 11 % por detrás de la resistencia del control a los 7 días, un 5 % por delante a los 28 días y un 10 % por delante a los 56 días. El hormigón carbonatado con baja dosis de aditivo era un 22 %, 42 % y 41 % más resistente que el control no carbonatado a los 7, 28 y 56 días respectivamente. La dosis del 0,40 % produjo un hormigón un 76 %, 94 % y 84 % más resistente en los tres curados, mientras que la dosis del 0,45 % de aditivo produjo mejoras del 21 %, 32 % y 33 %. Estos resultados son diferentes a los del bloque estándar del Ejemplo 13, donde no se alcanzó necesariamente una dosis óptima de gluconato de sodio ni siquiera con un 0,5 %, e ilustra la utilidad de realizar pruebas previas u otro tipo de optimización, de la dosis de aditivo y otras condiciones específicas para un diseño de mezcla específico. Véase el Ejemplo 15 para más pruebas de ello.
- 10
- 15 La inyección de CO₂ tuvo poco efecto sobre la densidad del bloque ligero o la absorción de agua cuando no se utilizó gluconato de sodio. En todas las dosis de aditivo, las absorciones de agua disminuyeron aproximadamente un 10 % para las dosis del 0,35 % y el 0,45 %, y un 34 % para la dosis intermedia del 0,4 %, en comparación con el control no carbonatado y sin gluconato de sodio. Por el contrario, la densidad aumentó cuando se utilizó gluconato de sodio. Aumentó un 1-2 % en las dosis alta y baja, y un 7 % en la dosis intermedia, en comparación con el control no carbonatado y sin gluconato de sodio. Aunque los bloques carbonatados de dosis intermedia eran los más resistentes y tenían la menor absorción de agua, también eran los de mayor densidad. Con las otras dos dosificaciones de aditivo se obtuvieron unos resultados prometedores en cuanto a resistencia y absorción, acompañados de un pequeño aumento de la densidad. El uso de aditivos se beneficiará generalmente de pruebas previas u otros trabajos predictivos para optimizar las condiciones que permitan obtener el resultado deseado, por ejemplo, en el caso de bloques ligeros, una combinación de resistencia, densidad, absorción de agua y otras propiedades según se desee.
- 20
- 25

Prueba de una mezcla de arenisca.

- 30 En una tercera prueba, se utilizó la mezcla de arenisca de la **Tabla 11**. Las condiciones fueron las mismas que para la segunda prueba del Ejemplo 13, con el CO₂ añadido a una dosis del 1,5 % en la mezcla. Se probó la adición de gluconato de sodio al 0,35, 0,4 y 0,45 %. En la **Tabla 14** se resumen las variables investigadas y los contenidos de agua. Los resultados globales se muestran en la **Figura 37**.

TABLA 14

Variables de producción del diseño de la mezcla de arenisca y contenidos de agua

Código	Diseño de la mezcla	Condición	Modo	Dosis de CO ₂ (% en pdc)	Aditivo	a/c	Fracción de agua
0803	Arenisca	Control	-	-	-	0,672	6,55 %
0904	Arenisca	CO ₂	Mezcladora	1,5	-	0,697	6,93 %
0905	Arenisca	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,35 %	0,736	7,00 %
0804	Arenisca	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,40 %	0,710	7,29 %
0906	Arenisca	CO ₂	Mezcladora	1,5	0,45 %	0,718	7,02 %

- 40 El análisis preliminar de las muestras de arenisca reveló que el contenido de CO₂ era mayor en todas las mezclas carbonatadas en relación con el control. Se comprobó que la eficiencia promedio de la administración de CO₂ para los lotes producidos variaba entre el 20 % y el 90 % con una dosis de CO₂ del 1,5 % en peso de cemento. A partir del análisis preliminar, el lote 0905 parece contener una menor cantidad de CO₂ capturado en comparación con otros lotes producidos en condiciones similares. Actualmente se están realizando nuevos análisis para confirmar este resultado. La eficiencia promedio de la administración de CO₂ considerando todos los lotes de arenisca es de aproximadamente el 66 %, sin embargo, aumenta hasta aproximadamente el 81 % si se omite del cálculo el lote 0905.

- 45 Los datos de la resistencia a la compresión para la mezcla de arenisca se resumen en la FIGURA 38. En las pruebas se rompieron tres bloques de control y cinco bloques carbonatados. Los datos se representan gráficamente para mostrar cada rotura individual con la resistencia a la compresión promedio resaltada. Los bloques carbonatados de arenisca sin aditivo tuvieron una resistencia funcionalmente equivalente a la del control (carbonatado, sin aditivo) (un 4 % por detrás a los 7 días, un 2 % por delante a los 28 días y un 5 % por detrás a los 56 días). De tres dosis de aditivo, la resistencia aumentó con la dosificación del aditivo, lo que sugiere que la dosificación alcanzaba un nivel óptimo en todo el intervalo considerado. El beneficio de resistencia a los 7 días era del 7 %, 9 % y 63 % en las tres dosis de aditivo consideradas. El beneficio a los 28 días era del 8 %, 22 % y 63 %, respectivamente. A los 56 días era del 9 %, 8 % y 58 %, respectivamente. El aumento de la resistencia con la dosis de aditivo en todo el intervalo de dosificaciones refleja los datos con el bloque estándar del Ejemplo 13, en donde parece superarse cierta cantidad "umbral" de aditivo en relación con la cantidad de dióxido de carbono presente en el hormigón.
- 50
- 55

El tratamiento de carbonatación sin utilizar el aditivo aumentó la absorción de agua un 12 % y disminuyó la densidad un 3 %. El uso de la mezcla volvió a situar los parámetros en línea con el control en la dosis más baja, y ofreció una

mejora significativa en la dosis más alta. La absorción de agua se redujo un 19 % y la densidad aumentó un 3 % en los bloques carbonatados con una dosis del 0,45 % del aditivo. Como con otras mezclas, las propiedades finales deseadas de los bloques determinarán si se utiliza un aditivo, tal como gluconato de sodio, y en qué condiciones, por ejemplo, a qué concentración, que pueden predeterminarse mediante pruebas preliminares o mediante otra prueba apropiada.

Este ejemplo ilustra la importancia de adaptar las condiciones de carbonatación, por ejemplo, el uso de aditivos, al diseño exacto de la mezcla que se esté considerando, ya que las tres mezclas utilizadas mostraron respuestas diferentes al gluconato de sodio como aditivo, y también tenían requisitos diferentes. Por ejemplo, en la mezcla ligera, la densidad es una consideración importante y puede dictar que se utilice una dosis de aditivo menor de la que produce el máximo desarrollo de resistencia y/o la mínima absorción de agua. Para otras mezclas, otras consideraciones pueden desempeñar un papel preponderante en la determinación de las condiciones de carbonatación, tales como el uso de aditivos.

Ejemplo 15

Este ejemplo ilustra el uso de un aditivo de gluconato de sodio con un diseño de mezcla de peso medio, donde la dosis de aditivo se predeterminó tomando como base los resultados de los lotes probados en los Ejemplos 13 y 14.

Se utilizó un diseño de mezcla de peso medio en la misma instalación y con el mismo equipo que en los Ejemplos 13 y 14. En la **Tabla 15** se presenta el diseño de la mezcla.

TABLA 15

Diseño de la mezcla de peso medio (a/c objetivo = 0,78)

Ingrediente	Cantidad	Fracción
Grava Birdseye	467,2 kg (1030 lb)	12,8 %
Cemento Illinois Product	306,2 kg (675 lb)	8,4 %
Arena McCook Block	816,5 kg (1800 lb)	22,3 %
Arena Meyers Torp	1029,7 kg (2270 lb)	28,1 %
Cribado	1011,5 kg (2300 lb)	28,5 %
RainBloc 80	34 z	-

Se comprobó que la mejor dosis de gluconato sódico en las mezclas estándar, ligera y arenisca utilizadas en los Ejemplos 13 y 14 estaba linealmente relacionada con el contenido de cemento. Véase la **Figura 39**, tomando como base esta relación, y ajustada por el hecho de que la dosis de CO₂ debía ser del 1,0 % en lugar del 1,5 % utilizado en las estándar, ligera y arenisca, se utilizó una dosis de gluconato de sodio del 0,25 % en pdc. Los bloques se produjeron como se describe en el Ejemplo 13, con no carbonatado - gluconato de sodio (control), no carbonatado + gluconato de sodio, carbonatado - gluconato de sodio, y carbonatado + gluconato de sodio, y se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión y de densidad. Los bloques también se sometieron a pruebas de terceros que también incluyeron la absorción de agua (Nelson Testing Laboratories, Schaumburg, IL).

Los resultados de la resistencia a la compresión y la masa a los 7, 28 y 56 días se resumen en la **Figura 40**. La dirección de las flechas representa el momento de la medición, de los 7 a los 56 días. Los bloques no carbonatados con gluconato de sodio eran ligeramente más densos y resistentes que los bloques no carbonatados sin gluconato de sodio en todos los puntos temporales probados, mientras que los bloques carbonatados sin gluconato de sodio tenían una resistencia y una masa inferiores a los no carbonatados sin gluconato de sodio, y los carbonatados con gluconato de sodio eran a la vez más resistentes y más ligeros que los no carbonatados sin gluconato de sodio.

Los resultados de las pruebas de terceros se muestran en la **Figura 41**. Se utilizaron tres series de datos en bloque, cumpliendo todos los lotes la norma ASTM C90. El CO₂ por sí solo hizo que los bloques fueran un 6 % más débiles que los de control, pero el uso de CO₂ más gluconato de sodio los hizo un 8 % más fuertes que el control. El CO₂ por sí solo aumentó la absorción de agua en un 7 % en comparación con el control, pero el CO₂ más gluconato de sodio dio como resultado bloques con un 4 % menos de absorción de agua en comparación con el control. La contracción aumentó tanto para las series de CO₂ como para las de CO₂ más gluconato, pero para el lote de gluconato de sodio fue eficazmente equivalente al control.

Este ejemplo demuestra que una dosis predeterminada de gluconato de sodio para una nueva mezcla, tomando como base los resultados anteriores, era suficiente para producir bloques carbonatados comparables en masa y contracción, mayores en resistencia a la compresión y menores en absorción de agua que los bloques no carbonatados sin gluconato de sodio.

Ejemplo 16

En los EJEMPLOS 17 a 21 se utilizaron los siguientes protocolos, con las modificaciones indicadas en los ejemplos particulares.

Mezcla de mortero

1. Preparar la cubeta de mezcla humedeciendo las paredes con un paño húmedo, asegúrese de eliminar el agua estancada de la cubeta antes de introducir las materias primas.
2. Pesar la cantidad de agua necesaria para su prueba y añadirla a la cubeta de mezcla húmeda y vacía.
3. Añadir arena a la mezcladora
4. Mezclar la arena y el agua durante 30 s a velocidad n.º 2
5. Raspar las paredes de la cubeta con una espátula de goma previamente humedecida para eliminar cualquier material que se haya pegado a las paredes de la cubeta de mezcla
6. Añadir los materiales cementosos necesarios a la cubeta de mezcla
7. Mezclar la arena, el agua y los materiales cementosos durante 30 s a la velocidad n.º 2
8. Registrar el momento de la adición de los materiales cementosos a la mezcla
9. Raspar las paredes de la cubeta de mezcla con una espátula de goma previamente humedecida
10. Registrar la temperatura
11. Si no se está carbonatando, omitir la etapa 14
12. Carbonatar a un caudal de 20 litros por minuto durante el tiempo deseado.
13. Registrar la temperatura final
14. Raspar las paredes de la cubeta con una espátula de goma previamente humedecida
15. Introducir los aditivos necesarios: la secuencia de mezclado y los detalles de la dosificación de los aditivos, y los aditivos, pueden variar en función de la prueba. Registrar el momento y la dosificación.
16. Después de añadir cada aditivo o azúcar, mezclar durante 30 s
17. Medir el asentamiento utilizando el cono de asentamiento japonés. Registrar el asentamiento y la dispersión (dos mediciones).
18. Para la retención del asentamiento, devolver a la cubeta, esperar, volver a mezclar 30 s antes del siguiente asentamiento.
19. Producir una muestra para calorimetría
20. Llenar tres moldes de cubas de mortero con mortero (Procedimiento ASTM C109 / C109M - 12 Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico)
21. Cubrir las cubas de mortero con una bolsa de basura de plástico o un paño húmedo y desmoldar únicamente cuando hayan transcurrido 18 +/- 8 horas
22. Romper las cubas a las 24 horas +/- 30 min (utilizar el momento en que se introdujo el cemento en la mezcla como indicador de cuándo deben romperse las muestras)

Mezcla de hormigón

- Humedecer el interior de la mezcladora, añadir toda la piedra y la arena, mezclar 30 s para homogeneizar
- Añadir todos los materiales cementosos, mezclar un minuto para homogeneizar
- Añadir toda el agua del lote en un periodo de 30 s, mezclar todos los materiales durante un minuto
- Tomar la temperatura inicial
- Lote de control: mezclar durante 4 min y tomar la temperatura final. Añadir los aditivos según sea necesario, mezclar un minuto
- Mezcla carbonatada: inyectar CO₂ gaseoso a 80 LPM, encierre la mezcladora, mezclar mientras se carbonata durante el tiempo necesario
- Retirar la tapa y registrar la temperatura final. Añadir los aditivos según sea necesario, mezclar un minuto
- Registrar el asentamiento (ASTM C143) y verter 6 cilindros de resistencia a la compresión (ASTM C192)
- Tomar dos muestras para la coacción de cuantificación de humedad/carbono, una muestra para calorimetría
- Desmoldar los cilindros al cabo de 28 +/- 8 horas y colocarlos en un tanque de curado al baño maría de cal a una temperatura de 23 °C +/- 3 °C
- Probar la resistencia a la compresión las 24 horas (3 muestras) y 2 a los 7 días (2 muestras)

Ejemplo 17

En este ejemplo se comparó la captación de dióxido de carbono de cementos de dos fuentes diferentes, Lehigh y Holcim.

Mezcla de mortero realizada bajo un flujo de 20 LPM de gas CO₂. Se extrajeron muestras del lote de mortero cada 60 s hasta el punto de 8 min. Se midió el contenido de dióxido de carbono y se construyó una curva que relacionaba la duración de la exposición al CO₂ gaseoso con la cantidad aproximada de captación de CO₂. Se compararon dos cementos. El diseño de la mezcla era de 1350 g de arena EN, 535 g de cemento, 267,5 g de agua, a/c = 0,5.

Los resultados se muestran en la **Figura 42**. La captación de dióxido de carbono aumentó con el tiempo, como se esperaba, pero la tasa de aumento fue diferente para los dos cementos diferentes. A una a/c de 0,5, la pasta de mortero puede absorber dióxido de carbono, pero para superar el 1 % de captación se necesitarían de 3 a 5 min, dependiendo del tipo de cemento usado.

En este Ejemplo se ilustra que una a/c de 0,5 permite la captación de dióxido de carbono, pero a una tasa que puede no ser compatible con los tiempos de mezclado en algunos entornos, y que la fuente del cemento puede afectar a las propiedades de una mezcla de cemento hidráulico hecha con el cemento en lo que respecta a la captación de dióxido de carbono.

Ejemplo 18

En este Ejemplo, se estudió el efecto de la relación a/c sobre la captación de dióxido de carbono.

En un primer estudio, se realizó una prueba con mortero. La mezcla total era de 990 g de arena Ottawa, 440 g de cemento, con 206 g de agua en total. Se mezclaron agua, arena y cemento, añadiendo el agua en dos fases. Se suministró CO₂ durante varios tiempos a 10 LPM después de la primera adición de agua, lo que llevó la mezcla a una a/c de 0,1 o de 0,45, y a continuación se añadió el agua restante y se completó el mezclado. Se midió la captación de carbono en diferentes puntos temporales, como se muestra en la **Figura 44**. La tasa de captación de dióxido de carbono era mayor para la pasta con una a/c de 0,1 en el momento de la reacción que para una a/c de 0,45.

En un segundo estudio, se realizaron una serie de pruebas con mortero. Mezcla de mortero realizada bajo un flujo de 20 LPM de gas CO₂. Se midió el contenido de dióxido de carbono y se construyó una curva que relacionaba la a/c de la mezcla de mortero en el momento de la adición de dióxido de carbono con la cantidad aproximada de captación de CO₂. El diseño de la mezcla era de 1350 g de arena EN, 535 g de cemento (Holcim GU), 267,5 g de agua. a/c total = 0,5 Se añadió agua en dos fases. Una porción antes de la carbonatación, la porción restante tras 1 min de carbonatación. La cantidad antes de la carbonatación variaba entre el 10 % y el 100 % del total (a/c = de 0,05 a 0,50). El efecto de la relación a/c en la carbonatación a 1 min se muestra en la **Figura 45** y en la **Tabla 16**.

TABLA 16

Efecto de la relación a/c del mortero sobre la captación de dióxido de carbono

a/c inicial	Captación	En relación con el nivel de 0,05
0,50	0,00	
0,05	1,98	100 %
0,10	1,56	79 %
0,15	1,52	77 %
0,20	1,29	65 %
0,25	1,32	67 %
0,30	1,24	63 %
0,35	0,77	39 %
0,40	0,78	40 %
0,45	0,48	24 %
0,50	0,35	18 %

Los sistemas de mortero más secos mostraron mayores tasas de captación que los sistemas húmedos. Una captación del 1,98 % a una a/c de 0,05 descendió al 0,35 % a una a/c de 0,50.

En una tercera prueba, se preparó una mezcla de hormigón de ensayo con adiciones de agua divididas. La mezcla total era de 300 kg/m³ de cemento, 60 de cenizas volantes, 160 de agua, 1030 de piedra, 832 de arena. El agua se añadió en dos fases. El CO₂ se suministró durante 180 s a 80 LPM después de la primera adición de agua. A continuación se añadió el agua restante y se completó el mezclado. La a/c en la adición de dióxido de carbono era de 0,1, 0,15 o 0,45. Los resultados se muestran en la FIGURA 46. Como con los morteros, la captación de carbono aumenta con una menor a/c cuando se administra el dióxido de carbono.

Ejemplo 19

Este ejemplo ilustra que el aumento de temperatura durante la carbonatación de una mezcla de cemento hidráulico está muy correlacionado con el grado de carbonatación y puede utilizarse como indicador del grado de carbonatación en un sistema específico.

En una primera prueba, el mortero utilizado en la segunda prueba del Ejemplo 17 también se sometió a mediciones de temperatura en los diferentes puntos temporales. Los resultados se muestran en la **Figura 47**. Había una relación lineal entre el grado de carbonatación y el aumento de temperatura en este sistema, en el que se varió la a/c y se mantuvo constante la exposición al dióxido de carbono.

En una segunda prueba, se estudió la temperatura frente a la captación de dióxido de carbono en morteros preparados con tres cementos diferentes, Holcim GU, Lafarge Quebec y Lehigh. El mortero se preparó con una a/c = 0,5 y se carbonató durante diferentes tiempos a 20 LPM de CO₂. Los resultados se muestran en la **Figura 48**. También se observó una relación lineal entre el grado de carbonatación y el aumento de temperatura en este sistema, en el que la a/c se mantuvo constante en 0,5 y se varió el tiempo de exposición al dióxido de carbono. La relación era relativamente constante entre los diferentes tipos de cemento. Las pendientes de la línea difieren en las dos pruebas, que se representaron gráficamente en dos sistemas diferentes, reflejando la especificidad del aumento de temperatura con la carbonatación para un sistema particular.

Estos resultados indican que en un sistema bien caracterizado, el aumento de la temperatura puede utilizarse como indicador sustituto de la captación de dióxido de carbono.

Ejemplo 20

Este ejemplo ilustra los efectos de diferentes aditivos sobre el asentamiento y la resistencia a la compresión del hormigón.

En una primera prueba, se añadió gluconato de sodio al 0, 0,1 % o 0,2 % a una mezcla de hormigón después de la carbonatación, y se midieron los efectos en el asentamiento a los 1, 10 y 20 min después del mezclado, y se

compararon con el control, hormigón no carbonatado. Los resultados se muestran en la **Figura 49** y la **Tabla 17**. El asentamiento del hormigón carbonatado es menos de la mitad del de control a 1 min y disminuye hasta desaparecer a los 10 min. La adición de gluconato de sodio al 0,1 % después de la carbonatación dio un asentamiento igual al del control a 1 min, 80 % a los 10 min y 50 % a los 20 min. La adición de un 0,2 % también proporcionó un asentamiento mayor que la dosis menor en todos los intervalos, antes de ser el 75 % del control a los 20 min.

TABLA 17

Efectos del gluconato de sodio en el asentamiento del hormigón

	Control	Control de CO ₂	GS - 0,1 %	GS - 0,2 %
1 min	100 %	46 %	100 %	108 %
10 min	100 %	0 %	80 %	140 %
20 min	100 %	0 %	50 %	75 %

En una segunda prueba, se probaron los efectos de la fructosa en diferentes concentraciones sobre el asentamiento inicial de una mezcla de hormigón. La fructosa se añadió tras carbonatación. La mezcla total era de 4,22 kg de cemento, 1 kg de cenizas volantes, 3,11 kg de agua, 16,96 kg de piedra, 14,21 kg de arena. Los resultados se muestran en la **Figura 50**. La carbonatación redujo el asentamiento del hormigón. En respuesta, se añadió fructosa tras la carbonatación en unas proporciones del 0,05, 0,10 y 0,20 % en peso de cemento. Las dosificaciones reflejan la masa sólida de aditivo administrada en una solución. El contenido de CO₂ se cuantificó en un 1,3 %, 1,4 % y 1,5 % en peso de cemento para los tres lotes carbonatados, respectivamente. Un 0,20 % de fructosa fue suficiente para que el asentamiento volviera a ser equivalente al del control. Sin embargo, la fructosa tuvo un efecto retardante de la resistencia, como se muestra en la **Figura 51**. La resistencia a las 24 horas fue significativamente menor que la del control no carbonatado, pero las resistencias a los 7 días eran aceptables, con unas resistencias mayores asociadas a mayores contenidos de fructosa.

Ejemplo 21

En este ejemplo, se probó una variedad de cementos diferentes en una mezcla de mortero para determinar las variaciones en la respuesta a la carbonatación.

Se probaron seis cementos: Holcim GU (Hol), Lafarge Quebec (LQc), Lafarge Brookfield (LBr), Lehigh (Leh), Illinois Product (Ipr) y Northfield Fed White (NWWh). Las propiedades y las químicas de los diferentes cementos se indican en la **Tabla 18**.

TABLA 18

Propiedades y químicas de los diferentes cementos

Parámetro	Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWWh
Superficie (m ² /kg)	423	417	392	425	501	408
CaO libre (%)	0,31	0,94	0,16	1,45	1,45	1,47
CaO (%)	62,22	60,56	62,68	61,55	62,61	65,36
Na ₂ Oe (%)	0,28	0,38	0,18	0,11	0,41	0,08
SiO ₂ (%)	20,30	19,18	20,10	19,53	19,12	21,41
Al ₂ O ₃ (%)	4,62	4,72	5,24	4,45	5,47	4,38
TiO ₂ (%)	0,22	0,21	0,26	0,32	0,29	0,08
P ₂ O ₅ (%)	0,14	0,26	0,05	0,25	0,13	0,01
Fe ₂ O ₃ (%)	2,50	2,74	2,27	3,00	2,23	0,20
MgO (%)	2,21	2,80	1,48	3,21	2,70	0,90
Na ₂ O (%)	0,22	0,32	0,11	0,06	0,34	0,06

K ₂ O (%)	0,92	0,84	1,09	0,70	1,01	0,28
Mn ₂ O ₃ (%)	0,05	0,09	0,07	0,18	0,19	0,01
SrO (%)	0,08	0,24	0,06	0,04	0,07	0,03
SO ₃ (%)	3,63	3,79	4,10	2,96	3,88	3,94
BaO (%)	0,06	0,05	0,13	0,05	0,05	0,08
ZnO (%)	0,04	0,07	0,00	0,02	0,01	0,00
Cr ₂ O ₃ (%)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00
Pérdida por calcinación a 975 °C (%)	2,52	4,08	2,38	3,54	1,98	3,00

La mezcla de mortero era arena EN 196 1350 g, cemento 535 g, agua 267,5 g, relación a/c de 0,5. Se añadió CO₂ a la cubeta de mezcla a 20 LPM durante periodos de 0, 2, 4, 6 y 8 min. Se midieron el cambio de temperatura, el asentamiento, la dispersión del flujo, la absorción de CO₂ y la resistencia del cubo a las 24 horas. Los resultados se dan en la **Tabla 19**.

5

TABLA 19
Propiedades de morteros carbonatados fabricados con diferentes cementos

		Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWh
0 min de CO ₂	Captación de CO ₂ (% en pdc)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Delta T (°C)	0,0	1,1	1,2	0,7	1,3	1,0
	Asentamiento (mm)	110	115	100	110	95	105
	Asentamiento (% del control)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	Trabajo (mm)	157	185	144	165	130	180
	Resistencia (MPa)	20,2	15,0	25,1	16,0	33,4	20,4
	Resistencia (% del control)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
		Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWh
2 min de CO ₂	Captación de CO ₂ (% en pdc)	0,87	0,64	0,47	0,67	0,55	0,69
	Delta T (°C)	2,9	3,6	2,8	4,3	3,7	6,5
	Asentamiento (mm)	70	105	40	50	10	30
	Asentamiento (% del control)	64 %	91 %	40 %	45 %	11 %	29 %
	Trabajo (mm)	83	140	58	60	10	35
	Resistencia (MPa)	9,9	7,6	12,0	13,1	31,3	17,3
	Resistencia (% del control)	49 %	38 %	48 %	65 %	94 %	85 %
		Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWh
4 min de CO ₂	Captación de CO ₂ (% en pdc)	0,94	0,88	1,10	1,30	1,79	0,88
	Delta T (°C)	4,9	6,1	7,6	7,2	9,3	9,3
	Asentamiento (mm)	60	70	20	45	0	8
	Asentamiento (% del control)	55 %	61 %	20 %	41 %	0 %	8 %
	Trabajo (mm)	75	78	21	45	0	10
	Resistencia (MPa)	9,9	8,1	11,2	10,9	27,5	16,4
	Resistencia (% del control)	49 %	40 %	45 %	54 %	82 %	80 %
		Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWh
6 min CO ₂	Captación de CO ₂ (% en pdc)	1,96	1,74	4,06	1,84	2,71	1,57
	Delta T (°C)	7,6	9,2	9,7	11,2	13,2	12,7
	Asentamiento (mm)	35	70	0	35	0	0
	Asentamiento (% del control)	32 %	61 %	0 %	32 %	0 %	0 %
	Trabajo (mm)	35	89	-6	37	0	0
	Resistencia (MPa)	8,8	6,4	11,2	13,4	29,5	-
	Resistencia (% del control)	43 %	32 %	45 %	66 %	88 %	-
		Hol	LQc	LBr	Leh	IPr	NWh
8 min CO ₂	Captación de CO ₂ (% en pdc)	2,76	1,68	1,27	2,23	3,75	2,07
	Delta T (°C)	13,4	9,2	14,8	14,7	22,2	17,3
	Asentamiento (mm)	5	40	0	15	0	0
	Asentamiento (% del control)	5 %	35 %	0 %	14 %	0 %	0 %
	Trabajo (mm)	5	44	-8	13	0	0
	Resistencia (MPa)	8,2	6,8	13,9	14,5	---	---
	Resistencia (% del control)	41 %	34 %	56 %	72 %	---	---

Había una variación considerable entre los morteros fabricados con los diferentes cementos en cuanto a asentamiento y resistencia. El Illinois Product destacó por su mayor resistencia a la compresión en todos los puntos temporales probados. Sin pretender quedar ligados a teoría alguna, esto puede deberse a su mayor superficie (véase la **TABLA 18**), que le permite absorber dióxido de carbono con un impacto relativamente menos proporcional en el desarrollo de la resistencia. En la **Figura 52** se muestra la resistencia frente a la superficie de las mezclas de mortero carbonatado con diferentes superficies.

Ejemplo 22

En este ejemplo, se añadieron diferentes aditivos a las mezclas de pasta de cemento expuestas a dióxido de carbono y se determinaron sus efectos sobre el asentamiento tras el mezclado. La mezcla de pasta era de 500 g de cemento, 250 g de agua. cemento Holcim GU. Se dosificó CO₂ al 1 % en pdc, mezclando durante un minuto. Los resultados se muestran en la **TABLA 20**.

TABLA 20

Efectos de los aditivos en el asentamiento del mortero carbonatado

Condición (todas las dosis expresadas en % en peso de cemento)	Dispersión de la pasta (cm) 1 min después del mezclado	Dispersión de la pasta (cm) 10 min después del mezclado
Control	11,5	13,75
1 % de CO ₂	8,75	5
1 % de CO ₂ + 1 % de Na ₂ SO ₄	9,75	4,25
1 % de CO ₂ + 3 % de Na ₂ SO ₄	7,25	4
1 % de CO ₂ + 5 % de Na ₂ SO ₄	4,75	4
1 % de CO ₂ + 0,04 % de ácido cítrico	6,75	4
1 % de CO ₂ + 0,10 % de gluconato	6,5	4,25
1 % de CO ₂ + 0,15 % de gluconato	9,25	9,75
1 % de CO ₂ + 0,20 % de gluconato	9,25	10,25
1 % de CO ₂ + 0,05 % de gluconato - Después de la carbonatación	9,75	4,75
1 % de CO ₂ + 0,10 % de gluconato - Después de la carbonatación	10,75	11,775
1 % de CO ₂ + 0,15 % de gluconato - Después de la carbonatación	13,5	14

Ejemplo 23

En este Ejemplo, se utilizaron sensores de dióxido de carbono y de humedad en una operación de mezclado.

Se realizó una operación de premoldeo utilizando los siguientes componentes de mezcla:

Árido	Fino	Arena Shaw Resources	602 kg
Árido	Grueso	Coldstream de 0,95 cm (3/8")	200 kg
Árido	Grueso	Granodiorite	839 kg

Cemento	Cemento	Maxcem	286 kg
Aditivo		Rheopel Plus	400 ml
Admis		Rheofit 900	350

Se utilizaron dos sensores de dióxido de carbono, El sensor 1 situado junto a una trampilla de acceso a la mezcladora y el sensor 2 situado en el lugar de expulsión de la mezcladora, en una puerta que descarga sobre una cinta. La dosis de CO₂ se aumentó o disminuyó en función del desbordamiento, detectado por los dos sensores.

5

Participan en un enfoque de inyección en dos fases.

1. Llenado: alto caudal para llenar la mezcladora con CO₂

10 2. Suministro: menor caudal para mantener un suministro a medida que el CO₂ es absorbido por el hormigón.

El PLC se programó de la siguiente manera para realizar cambios en función de las lecturas de los sensores de CO₂:

15 El sensor 1 debe colocarse junto a la puerta, el sensor 2 colocarse junto a la salida de la mezcladora (medir cada sensor por separado)

Si el sensor 1 supera X ppm durante el flujo 1, ir al flujo 2

20 Si el sensor 1 supera X ppm durante el flujo 2, reducir el flujo reduciendo el porcentaje

Si el sensor 2 supera Y ppm alguna vez, reducir el tiempo máximo de mezclado por reducir el tiempo

Si cualquiera de los sensores supera las 5000 ppm durante más de 5 min, aparece una alarma en pantalla

25 Si cualquiera de los sensores supera las 5000 ppm durante más de 10 min, apagar el sistema

Si cualquiera de los sensores supera las 9000 ppm, apagar el sistema

30 X e Y eran programables en cada receta (esto permite cambiar si una planta tiene un valor inicial de CO₂ elevado debido al polvo, etc.). El flujo 1 era programable y era el flujo que se utilizaba para llenar rápidamente el espacio de cabeza (normalmente ~1500 LPM). El flujo 2 fue calculado por el PLC y se basó en el tiempo máximo de mezclado, la dosis de CO₂ y el total que ya hay en el espacio de cabeza. El tiempo máximo de mezclado era programable y era el tiempo total de inyección deseado. El porcentaje de reducción y el tiempo de reducción eran programables y determinaban en qué porcentaje reducir el caudal (reduciendo por tanto la dosis total de CO₂) o el tiempo máximo de mezcla (aumentando por tanto el caudal para inyectar en menos tiempo).

35

El sistema se utilizó en varios lotes, y los resultados se muestran en la FIGURA 53. La línea superior de la FIGURA 53 indica el CO₂ real dosificado, y la segunda línea indica el CO₂ detectado en la mezcla. La eficiencia de la captación variaba del 60 al 95 %. Las dos líneas inferiores indican los valores máximos detectados en el sensor 1 (todos los lotes, incluido el lote 3) y en el sensor 2 (lotes 4-10). Los valores promedio pueden producir un mejor resultado.

40

Este ejemplo demuestra que los sensores de dióxido de carbono pueden utilizarse para ajustar el caudal de dióxido de carbono en una operación de mezclado de cemento, produciendo unas eficiencias de captación de hasta el 95 %.

45 Ejemplo 24

Este ejemplo demuestra el uso de dióxido de carbono sólido (hielo seco) como modo de administración de dióxido de carbono en la mezcla de hormigón.

50 Una partícula sólida de dióxido de carbono sublimará al entrar en contacto con el agua de mezcla, liberando así dióxido de carbono gaseoso durante el periodo de tiempo necesario para consumir la partícula. Para conseguir una dosificación prolongada de dióxido de carbono, por ejemplo, en un camión hormigonera, el dióxido de carbono sólido puede añadirse en la masa y cantidad deseadas, y en la forma y tamaño apropiados, para proporcionar eficazmente una dosis dada de dióxido de carbono durante el tiempo deseado. La forma y el tamaño del dióxido de carbono sólido determinarán la superficie total del sólido; cuanto mayor sea la superficie, mayor será la velocidad de sublimación del hielo seco.

55

Se utilizaron dos procedimientos de dosificación. En el primero, se utilizó hielo seco en forma de gránulos de 2,54 cm (una pulgada). En el segundo, se cortó una plancha cuadrada con una sección transversal de 5,08 cm × 5,08 cm (2 por 2 pulgadas) a la longitud apropiada para proporcionar la dosis deseada. El mezclado se realizó en una mezcladora de tambor pequeño (17 litros) o en una mezcladora de tambor grande (64 litros), y el mezclado se llevó a cabo con

60

una tapa, salvo que se indique lo contrario.

Administración de los gránulos:

- 5 Se utilizó un diseño de mezcla de 400 kg/m³ de cemento, 175 kg/m³ de agua, 1040 kg/m³ de piedra y 680 kg/m³ de arena. El cemento en un lote fue de 26,14 kg.

10 En un primer lote, se añadió CO₂ a una dosis del 0,5 % en pdc de gránulos (34 g) con los demás materiales de la mezcla, y el hormigón se mezcló durante 2 min. Se encontró una captación del 0,14 % en pdc y un aumento de la temperatura de 1 °C. Los gránulos de hielo seco no habían sublimado completamente tras 2 min de mezclado.

15 En un segundo lote, se añadió CO₂ a una dosis de 1,0 % en pdc de gránulos (68 g) con los demás materiales de la mezcla, y el hormigón se mezcló durante 4 min. La captación de CO₂ fue del 0,3 % en pdc con un aumento de la temperatura de 1 °C. Después de 4 min de mezclado, todos los gránulos de hielo seco habían sublimado completamente.

20 En un tercer lote, se añadió CO₂ a una dosis de 2,75 % en pdc de gránulos (186g) con los demás materiales de la mezcla, y el hormigón se mezcló durante 4 min. La captación de CO₂ fue del 0,6 % en pdc con un aumento de temperatura de 2 °C; todos los gránulos de hielo seco habían sublimado tras 4 min de mezclado.

Mediante el uso de gránulos, la captación aumentó al aumentar la dosis de gránulos, y los gránulos de este tamaño y en estas dosis tardaron de 2 a 4 min en sublimar completamente. La absorción de CO₂ fue de baja eficiencia, y la captación de gas se asoció con la rigidez de la mezcla.

25 Administración de planchas:

30 En una primera prueba, se utilizó el mismo diseño de mezcla que para las pruebas con gránulos. La plancha de 5,08 cm × 5,08 cm (2 por 2 pulgadas) se cortó a 13,97 cm (5,5") de largo para una dosis de CO₂ al 2 % en pdc. En un primer lote, se añadió agua en dos adiciones. Se realizó una primera adición de agua hasta alcanzar una a/c de 0,2, se añadió la plancha de hielo seco y se mezcló durante 40 s. Se añadió agua final a la cantidad total de agua y se mezcló el hormigón durante 6 min más. La captación de CO₂ fue del 0,95 % y no se observó ningún aumento de la temperatura. En un segundo lote, se realizaron 4 adiciones sucesivas de planchas de hielo seco. Se añadió toda el agua a la mezcla (a/c de 0,44) y a continuación se añadió una plancha de hielo seco para una dosis del 2 % en pdc. El hormigón se mezcló durante 6 min. La captación de CO₂ fue del 0,67 % y no se observó ningún aumento de la temperatura. Se añadió una plancha adicional de hielo seco a la mezcla, al 2 % en pdc para una dosis total del 4 % en pdc, y se realizaron otros 6 min de mezclado. La captación de CO₂ fue del 1,67 % y no se observó ningún aumento de la temperatura. Se añadió una plancha adicional de hielo seco a la mezcla, al 2 % en pdc para una dosis total del 6 % en pdc, y se realizaron otros 6 min de mezclado. La captación de CO₂ fue del 2,33 % y se observó un aumento de la temperatura de 3,5 °C. Se añadió una plancha adicional de hielo seco a la mezcla, al 6 % en pdc para una dosis total del 12 % en pdc, y se realizaron otros 6 min de mezclado. La captación de CO₂ fue del 3,44 % y se observó un aumento de la temperatura de 5 °C. En esta prueba, en la que la mezcla se realizaba a máxima velocidad, todo el dióxido de carbono sublimó completamente al final de cada tiempo de mezclado. Las pruebas posteriores se realizaron a una velocidad menor, representativa de un camión en tránsito, y no de un camión en la fase inicial de mezclado.

45 En una segunda prueba, se utilizó el mismo diseño de mezcla que para los gránulos, salvo que la proporción final de agua fue de 200 kg/m³. Se realizó un mezclado lento (~ 1 RPM) en una mezcladora de 65 l, con una plancha de hielo seco añadida 2 min después del contacto inicial del cemento y el agua, para una dosis del 2 % en pdc. El mezclado continuó durante un total de 36 min. La captación de CO₂ fue del 0,95 % y se observó un aumento de la temperatura de 3,5 °C. El asentamiento de la mezcla de hormigón antes de la adición de CO₂ era de 15,24 cm (6"), y de 7,62 cm (3") tras 36 min de mezclado bajo CO₂.

55 En una tercera prueba, se utilizó el mismo diseño de mezcla que para las pruebas con gránulos. Se añadió agua hasta alcanzar una a/c inicial de 0,2, se añadió una plancha de hielo seco para una dosis del 0,2 % en pdc, y la mezcla de hormigón se mezcló durante 40 s a máxima velocidad (45 rpm), a continuación se añadió el resto del agua, hasta una a/c de 0,45 y la mezcla se mezcló durante 36 min de mezclado lento (tránsito, ~ 1 RPM) del lote en una mezcladora de 65 l. La captación de CO₂ fue del 0,75 % y se observó un aumento de la temperatura de 1,5 °C. El asentamiento fue de 13,97 cm (5,5") tras 36 min de mezclado. Se supuso un asentamiento de control (sin dióxido de carbono) de ~15,24 cm (6"). A continuación, se añadió otro 2 % en pdc de plancha de hielo seco y el hormigón se mezcló a alta velocidad durante 11 min más. La captación de CO₂ fue del 1,66 %. El asentamiento disminuyó de 13,97 cm (5,5") a 6,35 cm (2,5").

65 En una cuarta prueba, se utilizó el mismo diseño de mezcla que para las pruebas con gránulos, excepto porque el agua fue 195 kg/m³. Se realizaron dos lotes en los que se añadió hielo seco a una dosis del 2 % en pdc 2 min después del contacto inicial del cemento y el agua. En el primer lote, el hormigón se mezcló con la cubierta puesta a un mezclado de tránsito rápido (~2 RPM) durante 30 min. La captación de CO₂ fue del 1,3 % en pdc, y se observó un aumento de la temperatura de 5 °C. El asentamiento fue de 0 cm (0") tras el mezclado, en comparación con el asentamiento de

16,51 cm (6,5") en el control (sin dióxido de carbono). En el segundo lote, el mezclado se realizó con la cubierta quitada a un mezclado de tránsito rápido durante 29 min. La captación de CO₂ fue del 0,7 % en pdc, y se observó un aumento de la temperatura de 0,2 °C. El asentamiento fue de 7,62 cm (3") tras 29 min de mezclado, en comparación con el asentamiento de 16,51 cm (6,5") en el control (sin dióxido de carbono).

Este ejemplo demuestra que el tamaño y la forma del hielo seco pueden utilizarse para controlar el suministro, y que pueden manipularse diferentes tiempos de adición, índices de mezcla, contenidos de agua y otras variables para modular la cantidad de dióxido de carbono captado por el hormigón y el efecto del dióxido de carbono sobre factores tales como el asentamiento.

Ejemplo 25

Este ejemplo ilustra el uso de dosis bajas de dióxido de carbono para proporcionar una hidratación acelerada, el desarrollo temprano de la resistencia y el fraguado, con un impacto mínimo en la reología y la resistencia posterior al curado.

Pruebas de mortero

En una primera serie de pruebas, se prepararon morteros. Los morteros se prepararon con 1350 g de arena, 535 g de cemento y 267,5 g de agua, y se homogeneizaron en una mezcladora de paletas mezclando a baja velocidad durante ~2 min, a continuación se extrajeron las muestras para el análisis del CO₂ y la calorimetría. A continuación, se expuso el mortero a CO₂ gaseoso a un caudal de ~0,15 LPM durante 2 min y se extrajeron muestras adicionales. Este mismo mortero se expuso a 3-7 rondas sucesivas de carbonatación en total, extrayendo muestras entre cada ronda.

En una prueba, se utilizó cemento Holcim GU. Los niveles de carbonatación del mortero alcanzados en las sucesivas rondas de exposición al dióxido de carbono fueron del 0, 0,05, 0,10, 0,20, 0,48 y 0,70 % en pdc. En la **Figura 54** se presentan los datos de las curvas de potencia de la calorimetría isotérmica para los diferentes niveles de carbonatación, mostrando que al carbonatar el mortero se podía acelerar la tasa de hidratación del cemento (las curvas están desplazadas hacia la izquierda y se hacen más pronunciadas con la carbonatación). La evolución total del calor también mejoró en los curados tempranos con la carbonatación de los morteros (**Figura 55**).

Además, el inicio del fraguado tanto inicial como final se aceleró con la carbonatación, como indican las mediciones del penetrómetro y se muestra en la **Figura 56**. Para estas mediciones, el mortero se preparó como sigue: 5 veces el tamaño del lote en Hobart (lote normal con un aumento de escala de un 500 % para utilizarlo en una mezcladora más grande), 1337,5 g de agua, 2675 g de cemento, 5175 g de arena. Combinados en una batidora Hobart y homogeneizados. Carbonatados a 1,0 LPM durante 5 rondas de 2 min (es decir, muestras a los 0, 2, 4, 6, 8 y 10 min). La medición del penetrómetro se realizó en la última muestra (10 min de exposición total al CO₂). La dosis prevista para 1 LPM durante 10 min es de aproximadamente 20 g de CO₂, para una dosis total es de aproximadamente un 0,74 % en pdc. De Eltra: captación de dióxido de carbono estimada en un 0,10 % en pdc. La baja captación puede haberse debido al espacio de cabeza/velocidad de flujo. A continuación se realizó un molde de control para comparaciones posteriores. 2 veces el tamaño del lote en un robot amasador (mezcladora más pequeña): 1070g de cemento, 535 g de agua, 2070 g de arena.

Se observaron unos resultados similares para los morteros preparados con cemento Lafarge Brookfield GU dosificado al 0, 0,07 0,14 y 0,22 % en pdc con dióxido de carbono, como se muestra para la hidratación en la **Figura 57**, así como el desarrollo temprano de la resistencia, como se muestra en la **Figura 58**.

Pruebas de hormigón

Las pruebas se ampliaron a los hormigones. En un experimento típico se preparó un lote de hormigón con las siguientes proporciones: 16,0 kg de arena, 23,80 kg de piedra, 9,18 kg de cemento, 3,15 kg de agua. El hormigón se homogeneizó en una mezcladora de tambor mezclando a baja velocidad durante ~2 min y se extrajeron muestras para el análisis de CO₂ y la calorimetría. A continuación, se expuso el hormigón a CO₂ gaseoso a un caudal de ~2,0 LPM durante 2 min y se extrajeron muestras adicionales. Este mismo hormigón se expuso a tres rondas sucesivas de carbonatación en total, extrayendo muestras entre cada ronda. La captación total de CO₂ en las rondas sucesivas fue del 0, 0,10, 0,15 y 0,20 % en pdc.

En una primera serie, se utilizó cemento LaFarge Brookfield GU en el hormigón. Las curvas de potencia de la calorimetría muestran la aceleración del hormigón. Véase la **Figura 59**. Las curvas de energía de la calorimetría muestran una mayor cantidad de calor liberado en todos los curados en el hormigón carbonatado. Véase la **Figura 60**. El desarrollo temprano de la resistencia también se aceleró en los hormigones carbonatados. Véase la **Figura 61**. Además, las mediciones del tiempo de fraguado confirmaron que la aceleración de la hidratación observada se tradujo en una aceleración del fraguado inicial (3447,4 kPa (500 psi)) y final (25 579 kPa (4000 psi)) en el hormigón carbonatado. La **Figura 62** muestra las lecturas del penetrómetro a lo largo del tiempo para el hormigón carbonatado (aproximadamente un 0,20 % en pdc de captación de CO₂) en comparación con el no carbonatado.

Se obtuvieron unos resultados similares en una segunda serie, donde se produjo hormigón con cemento St. Mary's B;

por ejemplo, la carbonatación al 0,08, 0,17 y 0,35 % en pdc produjo en todos los casos un aumento de la resistencia a la compresión a las 8 y 12 horas en comparación con el control no carbonatado. Véase la **Figura 63**.

Se produjeron otros hormigones utilizando cemento St. Mary's HE y cemento Holcim GU (carbonatado a un único nivel de captación de CO₂). Los hormigones se carbonataron a una exposición constante de dióxido de carbono administrado a un tasa del 0,10-0,15 % en pdc por minuto durante tres minutos (2 min con flujo de dióxido de carbono y un minuto de mezclado con tapa después de la administración) para una dosis total del 0,20-0,30 % en pdc de dióxido de carbono. El nivel de carbonatación fue del 0,15 % en pdc en la mezcla con Holcim GU y del 0,26 % en pdc en la mezcla con St Mary's HE. Véase la **Tabla 21**.

TABLA 21

Propiedades de los hormigones carbonatados a baja dosificación

ID del cemento	Aceleración inicial del fraguado (minutos)	Aceleración final del fraguado (minutos)	Resistencia a las 8 h (% del control)	Resistencia a las 8 h (MPa)
St. Mary's HE	55	41	133	2,2
Holcim GU	61	70	149	1,3

En un ensayo industrial, se llevó al laboratorio un camión que transportaba 2 m³ de hormigón, con un diseño de mezcla de 1930 kg de arena, 2240 kg de piedra, 630 kg de cemento LaFarge Brookfield GU y 238 kg de agua. En primer lugar, se extrajo del camión una muestra de hormigón no carbonatado para moldear las muestras de control. A continuación, el camión se sometió a 6 dosis distintas de CO₂ al 0,05 % en pdc. Se extrajo suficiente hormigón para satisfacer las demandas de moldeo después de cada dosis (~60 l). Las propiedades en fresco del hormigón se muestran en la **Tabla 22**.

TABLA 22

Propiedades en fresco del hormigón premezclado a bajas dosis de carbonatación

N.º de muestra	ID de la muestra	Dosis total de CO ₂ (pdc)	Momento de la descarga	Temp. en la descarga (°C)	Asentamiento (pulgadas)	Contenido de aire (%)	Dosis de antiespumante (% en pdc)	Dosis de Mighty 21ES (% en pdc)
1	Control	0	8:45	14,7	3,5	1,5	0,10	0,10
2	CO ₂ -1	0,05	8:50	16,4	3,5	n/d	0,10	0,10
3	CO ₂ -2	0,10	9:04	16,7	3,5	n/d	0,10	0,10
4	CO ₂ -3	0,15	9:12	18,0	3,0	n/d	0,10	0,10
5	CO ₂ -4	0,20	9:26	18,4	3,0	n/d	0,10	0,10
6	CO ₂ -5	0,25	9:35	18,5	1,5	n/d	0,10	0,10
7	CO ₂ -6	0,30	9:50	18,7	2,0	n/d	0,10	0,15

En general, la resistencia a la compresión de las muestras de hormigón aumentó con cada ronda adicional de carbonatación. Esto fue más evidente en los curados tempranos (hasta un 74 % de aumento a las 12 horas) pero persistió hasta curados más tardíos (un 5 % de aumento de la resistencia a la compresión a los 7 días). Véanse las Figuras 64 (12 horas), 65 (16 horas), 66 (24 horas) y 67 (7 días).

Este ejemplo ilustra que el uso de dosis bajas de dióxido de carbono en las mezclas de mortero y hormigón puede acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia en comparación con las mezclas de mortero y hormigón no carbonatado.

Ejemplo 26

Este ejemplo demuestra el uso de gluconato de sodio en un hormigón de mezcla seca, tanto carbonatado como no carbonatado.

La mezcla era de 200 g de piedra, 1330 g de arena, 330 g de cemento Holcim GU y 130 g de agua. El ciclo de mezcla fue:

Mezclar los áridos y el agua durante 30 s

Añadir cemento y mezclar 30 s
mezclar 60 s, con carbonatación si es necesario

añadir aditivos y mezclar 30 s

Cilindros compactos con martillo Proctor

Las dosis empleadas fueron un 0, 0,02 %, 0,04 % y 0,06 % de gluconato de sodio en masa de cemento.

- 5 La **Figura 68** muestra la captación de CO₂ de las muestras carbonatadas. Las masas de los cilindros preparados, un sustituto de la densidad, ya que todos los volúmenes de los cilindros son sustancialmente iguales, mostraron que la carbonatación provocaba un déficit de masa del 8,4 % en comparación con el control, pero que la adición de gluconato de sodio aumentaba la masa de las muestras carbonatadas, proporcional a la dosis, de modo que a una dosis del 0,06 % de gluconato de sodio, el déficit de masa se redujo hasta el 5,5 %, mientras que ninguna de las tres dosis de gluconato de sodio tuvo efecto sobre la compactación de las muestras de control. Véanse las Figuras 69 y 70. El retardo se cuantificó mediante calorimetría, determinando la cantidad de energía liberada durante las primeras 6 horas tras el inicio del mezclado. La carbonatación provocó una disminución de la energía liberada, al igual que la adición de gluconato de sodio; en las muestras carbonatadas, la reducción de la energía liberada fue del 19 % con la dosis más alta de gluconato de sodio, mientras que en las muestras no carbonatadas la reducción de la energía liberada fue del 53 % con la dosis más alta de gluconato de sodio. Véanse las Figuras 71 y 72.

Ejemplo 27

- 20 Este ejemplo demuestra los efectos del aumento de la cal libre sobre la captación de dióxido de carbono y la hidratación.

- 25 En una primera prueba, se prepararon morteros con la adición de CaO (1,5 % en pdc), NaOH (2,2 % en pdc) o CaCl₂ (3 % en pdc), se carbonataron y se compararon con el control. Se utilizó una mezcla de mortero estándar de 535 g de cemento, 2350 g de arena y 267,5 g de agua. La arena y el agua se combinaron y mezclaron durante 30 s, seguido de la adición del cemento (con polvo añadido si se utiliza) y un mezclado adicional durante 60 s. Se registró la temperatura inicial, a continuación, el mortero se mezcló durante 60 s bajo un flujo de CO₂ de 20 LPM, se detuvo el mezclado, se registró la temperatura y se extrajo la muestra para el análisis de CO₂, a continuación se reanudó el mezclado y la exposición al CO₂ durante otros 60 s y se realizó el muestreo, durante un total de 5 min de exposición al CO₂. Los resultados se muestran en la **Figura 73**. La adición de las especies alcalinas, cal libre (CaO) o NaOH, aumentó la tasa de captación de CO₂, mientras que la adición de CaCl₂ disminuyó la tasa de captación. Las tasas de captación fueron: 0,34 % de captación de CO₂/min (sin aditivo); 0,56 % de captación de CO₂/min (CaO), un aumento del 66 %; 0,69 % de captación de CO₂/min (NaOH), un aumento del 104 %; y 0,23 % de captación de CO₂/min (CaCl₂), una disminución del 34 %.

- 35 En una segunda prueba, se compararon dos morteros de prueba, un mortero convencional y otro que incluía una adición del 1,5 % de CaO en pdc. Las mezclas de mortero eran como en la primera prueba. El cemento utilizado tenía un contenido de cal libre del 0,31 % en pdc antes de la adición de CaO adicional; esto se considera un nivel bajo de cal libre. El mortero de mezcla se sometió a 0, 30, 60 o 90 s de CO₂ a 20 LPM, y la hidratación se midió por calorimetría. Se realizó un seguimiento de la liberación de energía hasta 24 horas a intervalos de 6 horas.

- 40 Los resultados se presentan en la **Figura 74**. Cuando se compararon los morteros carbonatados de control (sin adición de CaO) frente a los no carbonatados, la liberación de energía con 30 s de CO₂ era un 19 % mayor en los carbonatados en comparación con los no carbonatados a las 6 horas, disminuyendo hasta un 7 % menos a las 24 horas; la liberación de energía con 60 s de CO₂ era un 23 % mayor en los carbonatados en comparación con los no carbonatados a las 6 horas, disminuyendo hasta un 12 % menos a las 24 horas; la liberación de energía con 90 s de CO₂ era un 21 % mayor en los carbonatados en comparación con los no carbonatados a las 6 horas, disminuyendo hasta un 17 % menos a las 24 horas. Véase la **Figura 75**. En general, la adición de CaO a la mezcla aumentó tanto la captación de CO₂ para un tiempo de exposición dado como la liberación de energía en un punto temporal dado, en comparación con las muestras sin adición de CaO. En comparación con un mortero de control que no contenía CaO añadido, los morteros con CaO añadido mostraron una liberación de energía del 97-99 % del control en todos los puntos temporales en las muestras no carbonatadas; en muestras expuestas a 30 s de CO₂, los morteros con CaO añadido mostraron una liberación de energía un 20 % mayor que los morteros sin CaO añadido a las 6 horas, disminuyendo hasta un 11 % mayor a las 24 horas, y la captación de CO₂ fue un 56 % mayor que en los morteros sin CaO añadido; en muestras expuestas a 60 s de CO₂, los morteros con CaO añadido mostraron una liberación de energía un 33 % mayor que los morteros sin CaO añadido a las 6 horas, disminuyendo hasta un 15 % mayor a las 24 horas, y la captación fue un 151 % mayor que en los morteros sin CaO añadido; en muestras expuestas a 90 s de CO₂, los morteros con CaO añadido mostraron una liberación de energía un 23 % mayor que los morteros sin CaO añadido a las 6 horas, disminuyendo hasta un 9 % mayor a las 24 horas, y la captación fue un 151 % mayor que en los morteros sin CaO añadido. Véase la **Figura 76**.

- 60 Este ejemplo demuestra que la adición de cal libre (CaO) a un mortero mejora tanto la tasa de captación de dióxido de carbono como la hidratación, en comparación con el mortero sin adición de cal libre

- 65 Los Ejemplos 28-32 se refieren a la administración de dosis bajas de dióxido de carbono a camiones hormigonera, como un gas (Ejemplo 27) o un líquido que se convierte en sólido y gas (Ejemplos 29-32), en diferentes condiciones.

Ejemplo 28

Este ejemplo es una ilustración del tratamiento con una dosis baja de dióxido de carbono gaseoso de una mezcla de hormigón en el tambor de un camión hormigonera en un momento significativamente posterior al procesamiento por lotes del hormigón, y sus efectos sobre la resistencia temprana.

El dióxido de carbono se dosificó en el tambor de un camión hormigonera. El dióxido de carbono era gaseoso. El dióxido de carbono se añadió a la mezcla aproximadamente 70 min después del procesamiento por lotes, en múltiples fases para obtener una mezcla de hormigón con dosis cada vez mayores de dióxido de carbono, de modo que la adición final se produjo aproximadamente 135 min después del procesamiento por lotes. Por tanto, la dosificación de CO₂ se produjo mucho después de que comenzara la mezcla, similar al suministro de CO₂ a un camión en tránsito o en una obra en lugar de durante el procesamiento por lotes.

El diseño de la mezcla era una mezcla de plancha de 30 MPa, 2 m³ de carga, camión menos de medio lleno

Arena 1930 kg
Piedra 2240 kg
Cemento GU 630 kg
Agua 238 kg

Los aditivos se añadieron en el lugar de la prueba antes de cualquier muestreo: antiespumante 0,10 % en pdc, superplastificante (Mighty ES) 0,10 % en pdc. El Mighty ES se aumentó para la muestra final.

Se añadió CO₂ al tambor desde un tanque de gas con un regulador. El flujo fue de ~80 LPM durante 2 min para cada dosis de CO₂. La presión de la línea era de 482,6 kPa (70 psi). Mezcla más rápida del camión (25 RPM) "post dosis" durante ~60 s. Mezcla de tránsito (lenta, 5 RPM) el tiempo restante.

La dosificación se realizó en serie sobre el mismo lote de hormigón: dosis, muestra, siguiente dosis, muestra, siguiente dosis, etc.

El momento de la descarga indica cuándo se tomaron las muestras de hormigón. La dosificación se habría producido en los cinco minutos inmediatamente anteriores.

La Tabla 23 muestra las condiciones para cada muestra:

TABLA 23**Condiciones para diferentes muestras a dosis bajas de dióxido de carbono**

ID de la muestra	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
Tiempo de descarga (min)	74	79	93	101	115	124	139
Dosis total de CO ₂ (% en pdc)	0	0,05 %	0,10 %	0,15 %	0,20 %	0,25 %	0,30 %
Temperatura (°C)	14,7	16,4	16,7	18	18,4	18,5	18,7
Asentamiento (pulgadas)	3,5	3,5	3,5	3	3	1,5	2
Contenido de aire (%)	1,5	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Antiespumante (% en pdc)	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %
Mighty ES (% en pdc)	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,10 %	0,15 %
Captación de CO ₂ (% en pdc)	-	no concluyente					

Las resistencias a las 12 horas, 16 horas, 24 horas, 7 días y 28 días se muestran en las **Tablas 24** (valores absolutos) y **25** (valores relativos al hormigón de control, no carbonatado). Se tomaron tres muestras en cada curado como cilindros de 10,16 cm × 20,32 cm (4"x8") con tapas reutilizables. Las muestras se mantuvieron en un almacén de curado en húmedo hasta la realización de las pruebas. Los datos de calorimetría se muestran en las **Figuras 77A** (potencia frente al tiempo) y **77B** (energía frente al tiempo) para el control, CO₂-1, 2 y 3, y en las **Figuras 78A** (potencia frente al tiempo) y **78B** (energía frente al tiempo) para el control, CO₂-4, 5 y 6.

TABLA 24

Resistencias a la compresión, absolutas (MPa)

ID	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
12 h	1,7	2,0	2,0	2,7	2,7	2,4	2,9
16 h	5,9	6,4	6,0	6,5	6,8	6,0	6,5
24 h	12,8	13,3	13,3	13,5	13,7	13,5	13,9
7d	31,5	31,7	31,3	33,1	32,9	32,6	33,1
28 d	37,3	37,9	38,7	38,0	38,9	38,7	39,1

TABLA 25

Resistencias a la compresión, en relación con los no carbonatados

ID	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
12 h	100 %	123 %	119 %	166 %	163 %	145 %	174 %
16 h	100 %	109 %	103 %	111 %	116 %	102 %	110 %
24 h	100 %	104 %	104 %	105 %	107 %	105 %	109 %
7d	100 %	101 %	100 %	105 %	105 %	104 %	105 %
28 d	100 %	101 %	104 %	102 %	104 %	104 %	105 %

5

El fraguado también se aceleró ligeramente con la dosis más alta de CO₂.

10

Los resultados muestran que, en todos los casos, incluso con la dosis más baja de CO₂ (0,05 % de CO₂ administrado, en pdc), hubo un aumento en la resistencia temprana. En general, el beneficio de resistencia del CO₂ correspondió ampliamente al aumento de la dosis. El beneficio fue más pronunciado en los curados más tempranos, a pesar de que seguía habiendo un pequeño beneficio a los 7 y 28 días.

15

Este ejemplo demuestra que unas dosis muy bajas de dióxido de carbono, añadido a las mezclas de hormigón después del procesamiento por lotes, provocan unos aumentos notables en el desarrollo temprano de la resistencia. Esto era cierto incluso para la dosis más baja de dióxido de carbono, 0,05 %; a estas dosis tan bajas, la carbonatación del hormigón puede no ser detectable, pero, no obstante, el dióxido de carbono actúa de forma similar a un aditivo, en este caso como un potente acelerante del desarrollo temprano de la resistencia.

20

Ejemplo 29

Este ejemplo es una ilustración del tratamiento del hormigón con una dosis baja de dióxido de carbono gaseoso y sólido en el tambor de un camión hormigonera, desde una fuente líquida de dióxido de carbono, en un momento significativamente posterior al procesamiento por lotes del hormigón, y sus efectos sobre la resistencia temprana.

25

Se utilizó el diseño de mezcla de plancha de 30 MPa del Ejemplo 28. Se produjeron 2 metros cúbicos de hormigón, el camión estaba menos de medio lleno. Aditivos añadidos en el lugar de prueba TK - superplastificante ADVA 140 al 0,20 % en pdc, gluconato de sodio al 0,05 % en pdc.

30

El CO₂ se suministró como un líquido, desde un dewar con una manguera conectada con un racor en el extremo y un orificio de un tamaño definido, 0,199 cm (5/64 pulgadas). La dosificación se calculó tomando como base una serie de suposiciones y es aproximada. Las suposiciones eran: 1) que el dióxido de carbono era 100 % líquido en la línea antes del orificio, es decir, no hay flujo de fase 2; 2) el caudal se basó en una ecuación (no se midió directamente); y 3) que no hubiera caída de presión en la línea, que era de 2068,4 kPa (300 psi) constantes. El tubo se introdujo en el tambor del camión hormigonera para administrar el dióxido de carbono gaseoso y sólido en la superficie del hormigón de la mezcla.

35

La Tabla 26 muestra las condiciones para cada muestra. Se realizó una dosificación estadificada, la primera dosis se

administró aproximadamente 45 min después del procesamiento por lotes, y la dosis final aproximadamente 110 min después del procesamiento por lotes. Por tanto, igual que con el Ejemplo 28, la dosificación con CO₂ se produjo mucho después de comenzar el mezclado, similar al suministro de CO₂ a un camión en tránsito o en una obra en lugar de durante el procesamiento por lotes.

5

TABLA 26

Condiciones para cada muestra

ID de la muestra	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
Tiempo de descarga (min)	28	48	63	78	88	99	113
Dosis total de CO ₂ (% en pdc)	0	0,10 %	0,20 %	0,30 %	0,40 %	0,50 %	0,60 %
Temperatura (°C)	19,5	20,7	20,8	21,2	21,5	22,3	23,2
Asentamiento (pulgadas)	7	4,5	3,75	4	3	2,75	2
Contenido de aire (%)	1,8	-	-	-	-	-	1,8
Captación de CO ₂ (% en pdc)	0,00	-0,09	0,01	-0,01	0,01	0,07	0,10

- 10 Las resistencias a las 8 horas, 12 horas, 24 horas, 7 días y 28 días se muestran en las **Tablas 27** (expresadas como resistencias absolutas) y **28** (expresadas como relativas al control de no carbonatado). Se tomaron tres muestras en cada curado como cilindros de 10,16 cm × 20,32 cm (4 x 8") con tapas reutilizables. Las muestras se mantuvieron en un almacén de curado en húmedo hasta la realización de las pruebas. Los datos de calorimetría se muestran en las **Figuras 79A** (potencia frente al tiempo) y **79B** (energía frente al tiempo) para el control, CO₂-1, 2 y 3, y en la **Figura**
- 15 **80A** (potencia frente al tiempo) y **80B** (energía frente al tiempo) para el control, CO₂-5 y 6.

TABLA 27

Resistencias a la compresión, absolutas (MPa)

	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
8 h	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9
12 h	6,1	6,4	6,1	6,4	6,3	6,8	7,0
24 h	13,9	14,1	14,9	14,9	15,2	15,6	15,4
7 días	24,8	25,7	27,0	26,1	28,0	27,7	28,7
28 días	34,5	34,0	34,0	33,8	35,6	35,8	35,8

20

TABLA 28

Resistencias a la compresión, en relación con los no carbonatados

	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2	CO ₂ -3	CO ₂ -4	CO ₂ -5	CO ₂ -6
8 h	100 %	107 %	91 %	97 %	100 %	98 %	104 %
12 h	100 %	104 %	100 %	105 %	103 %	112 %	114 %
24 h	100 %	101 %	107 %	108 %	110 %	113 %	111 %
7 días	100 %	104 %	109 %	105 %	113 %	112 %	116 %

28 días	100 %	99 %	99 %	98 %	103 %	104 %	104 %
----------------	-------	------	------	------	-------	-------	-------

La calorimetría muestra que el tratamiento de carbonatación ha aumentado la liberación de calor asociada a la hidratación de los aluminatos, véanse las **Figuras 79A, B y 80A, B**, y las **Tablas 27 y 28**, respaldando el uso de la calorimetría como marcador alternativo o adicional a las mediciones de la resistencia para determinar las condiciones de dosificación deseadas u óptimas para la carbonatación de una mezcla de hormigón.

El beneficio de la resistencia del CO₂ se correspondió ampliamente con el aumento de la dosis. El fraguado se aceleró ligeramente en la dosis más alta de CO₂.

Este ejemplo demuestra que la dosificación de dióxido de carbono en un tambor de premezclado mediante una conversión de líquido a sólido/gas a medida que se dosifica el dióxido de carbono es viable.

Ejemplo 30

Este ejemplo es una ilustración del tratamiento del hormigón con una dosis baja de dióxido de carbono gaseoso y sólido en el tambor de un camión hormigonera, desde una fuente líquida de dióxido de carbono, en un momento significativamente posterior al procesamiento por lotes del hormigón, y sus efectos sobre la resistencia temprana. La mezcla de hormigón incluía un MCS (escoria). Se realizaron dos ensayos en días consecutivos. El primer día se dosificó el dióxido de carbono en diferentes momentos hasta aproximadamente 70 min después del procesamiento por lotes. El segundo día, el dióxido de carbono se dosificó mucho antes tras el procesamiento por lotes, aproximadamente a los 20 min.

Un camión de 4 m³ de hormigón se llenó por lotes con un diseño de mezcla para suelos de 25 MPa, a continuación:

Componente	Masa (kg/m ³)
Arena	959
Piedra	1080
Cemento	212
Escoria	53
Agua	155
SuperP (ml)	190

El primer día del ensayo, un camión recibió tres dosis sucesivas de CO₂ después de la muestra de control. El segundo día del ensayo, sólo había una dosis de CO₂. La inyección de CO₂ prosiguió durante 30-90 s con 90-180 s adicionales de mezclado a alta velocidad una vez finalizada la inyección. La carga de hormigón solicitada se dosificó en primer lugar en el camión antes de su transporte al bastidor de lavado, donde el lote recibió los últimos ajustes de agua por parte del operador del camión. Una vez finalizados los ajustes del lote, se extrajo una muestra de hormigón no carbonatado (control), se realizó una prueba de asentamiento y se moldearon muestras de prueba. A continuación, el camión se sometió a tres dosis secuenciales de dióxido de carbono con evaluación del asentamiento y moldeo del hormigón tratado entre cada ronda. Se registró el tiempo transcurrido entre el inicio del mezclado y la aplicación del dióxido de carbono. Todas las muestras de prueba procedían del mismo camión para maximizar los resultados experimentales de un único lote y minimizar cualquier variación entre lotes que pudiera haber surgido. Se siguió una dosificación secuencial de dióxido de carbono para determinar una dosis óptima.

Mientras que el ensayo del ejemplo 29 implicaba un tubo mantenido en posición, los ensayos de aquí en lo sucesivo en el presente documento utilizaron un tubo inyector rígido. Una abrazadera permitió fijarlo a la estructura del camión y mantenerlo en su sitio.

Este tipo de sistema es similar a un sistema portátil de dosificación de dióxido de carbono que podría montarse en el propio camión, para que la dosificación pueda hacerse en cualquier momento antes, durante o después del procesamiento por lotes, en una dosis única o en dosis estadificadas.

Las condiciones se resumen en la **Tabla 29**

TABLA 29

Condiciones del ensayo

Camión (día)	Código de muestra	Condición	Tiempo estimado de descarga (min)	Dosis total de CO ₂ (% en pdc)	Captación de CO ₂ (% en pdc)	Asentamiento (pulgadas)	Temp. (°C)
1	1401	Control	23	-	-	3,5	23,9
	1402	CO ₂	45	0,10 %	no concluyente	3,0	-
	1403	CO ₂	59	0,30 %	no concluyente	3,0	25,6
	1404	CO ₂	74	0,60 %	no concluyente	2,0	26,5
2	1501	Control	10	-	-	2,5	23,7
	1502	CO ₂	20	0,30 %	no concluyente	2,0	24,9

5 Los ensayos se realizaron en dos días consecutivos. Las resistencias a la compresión a los 1, 3, 7, 28 y 56 para las muestras tomadas el primer día se muestran en las **Figuras 81-85**, y la calorimetría para las muestras del primer día se muestra en las **Figuras 86A** (potencia frente al tiempo) y **86B** (energía frente al tiempo). Se usaron tres muestras para 1 día, dos muestras en todos los demás curados. Los cilindros de 10,16 cm x 20,32 cm (4 x 8") se sometieron a un rectificado de los extremos para crear caras planas y se mantuvieron en un almacén de curado en húmedo antes de las pruebas. Para el segundo día, las **Figuras 87-91** muestran la resistencia a los 1, 3, 7, 28 y 56 días, y las **Figuras 92A** (potencia frente al tiempo) y **92B** (energía frente al tiempo) muestran la calorimetría. Se puede observar que para ambos días, los desplazamientos en las curvas de calorimetría coinciden con los aumentos de la resistencia, con el mayor desplazamiento observado para la dosis de dióxido de carbono en un día dado que dio la mayor aceleración del desarrollo de la resistencia, véase, por ejemplo, la **Figura 86A**. Se usaron tres muestras para 1 día, dos muestras en todos los demás curados. Los cilindros de 10,16 cm x 20,32 cm (4 x 8") se sometieron a un rectificado de los extremos para crear caras planas y se mantuvieron en un almacén de curado en húmedo antes de las pruebas.

20 La inyección de dióxido de carbono no pareció tener ningún efecto sobre el periodo de inducción. La fase de aceleración de la hidratación de cada muestra se prolongó durante 4 horas. A las 7 horas, la evolución del calor de las muestras carbonatadas se produjo a un tasa mayor (como se observa en un desplazamiento hacia la izquierda de la forma de las curvas), donde el efecto fue mayor con la mayor dosis de dióxido de carbono. Además, se comprobó que la liberación de calor en el pico de la hidratación temprana aumentaba en magnitud y se desplazaba a momentos más tempranos a medida que aumentaba la dosis de dióxido de carbono. Una interpretación alternativa de los datos considera la energía total liberada con el tiempo. La liberación de energía en relación con el control puede cuantificarse en distintos curados y utilizarse como un parámetro del progreso de la hidratación. Se observa que, a las 6 horas, los lotes carbonatados habían liberado aproximadamente un 10 % menos de energía que el control. La dosis baja había igualado al control a las 11 horas y se mantuvo equivalente a partir de entonces. La segunda dosis de CO₂ alcanzó el 101 % del control a las 9 horas antes de mejorar hasta un 12 % a las 12 horas y terminar con un 6 % más de energía liberada hasta las 20 horas. La dosis más alta alcanzó el 102 % del control a las 10 horas, un 13 % más a las 12 horas y un 4 % más hasta las 20 horas. Se observa que el dióxido de carbono puede haber ralentizado ligeramente la hidratación en las primeras 8 horas, pero en el intervalo de 10 a 14 horas se pudo observar un efecto acelerante en las dos dosis más altas. Esto corresponde potencialmente a un beneficio de rendimiento, tal como una mayor resistencia en esos momentos.

35 También se realizaron pruebas de resistencia, siguiendo la AASHTO TP 95-11 "Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration". Se midió la resistividad eléctrica y el riesgo evaluado de penetración de cloruros.

40 Las normas se resumen en la **Tabla 30**, a continuación.

TABLA 30

Normas ASTM y AASTO

Penetración de cloruros	ASTM C1202 a 56 días RCPT	AASHTO TP95-11 Resistividad eléctrica a los 28 días
	Culombios	Ωm

Alta	>4000	<45,93
Moderada	2000-4000	45,93-91,86
Baja	1000-2000	91,86-183,7
Muy baja	100-1000	de 183,7-1837
Insignificante	<100	>1837

Los resultados se resumen en la **Tabla 31**.

TABLA 31

Resultados de resistividad para hormigones carbonatados

Muestra	Resistividad eléctrica aparente promedio (Ωm) y riesgo de penetración de cloruros para cinco curados de prueba (días)				
	1	3	7	28	56
1401	8,9	19,3	33,6	78,7	106,5
1402	8,8	18,9	25,5	74,1	112,0
1403	8,7	18,8	24,7	67,1	97,7
1404	8,9	20,3	24,1	70,2	101,8
1401	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
1402	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
1403	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
1404	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja

Muestra	1	3	7	28	56
1501	9,1	16,2	22,9	54,7	85,0
1502	8,9	16,1	22,0	50,8	82,8
1501	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada
1502	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada

El tratamiento con CO₂ no afectó a la resistividad, con unos valores para el control y el CO₂ "moderados" a los 28 días y "bajos" a los 56 días.

- 5 El uso de los lotes estadificados frente al lote único indica que la los lotes estadificados (1403), en comparación con el lote único (1502), ambos al 0,30 %, produjo un aumento más robusto de la resistencia.

- 10 Esto puede deberse al procesamiento por lotes, o al tiempo que se aplicó el dióxido de carbono tras el mezclado (60 min frente a 20 min), o a ambas cosas. El mayor beneficio se produjo en el lote con la dosis en tres fases (1404), con un beneficio del 13 al 26 % a lo largo del periodo de prueba. Los resultados de la calorimetría mostraron una aceleración y una mayor liberación de energía en las muestras estadificadas.

- 15 Este ejemplo demuestra que el dióxido de carbono a dosis bajas aumenta la resistencia temprana, con unos beneficios mantenidos en puntos temporales posteriores, que el dióxido de carbono no afectó a la resistividad, y que el tiempo transcurrido tras el procesamiento por lotes de la adición del dióxido de carbono y/o la estadificación pueden afectar a la magnitud del aumento de la resistencia temprana. Finalmente, el Ejemplo ilustra el uso de dióxido de carbono en una mezcla que contiene un MCS (escoria), observándose unos resultados beneficiosos para el hormigón carbonatado frente al no carbonatado.

20 Ejemplo 31

- 25 Este ejemplo es una repetición del Ejemplo 30, con algunas modificaciones. Se utilizó el mismo diseño de mezcla (es decir, hormigón con MCS). Un camión de 4 m³ de hormigón recibió tres dosis sucesivas de CO₂ después de la muestra de control. La inyección de CO₂ prosiguió durante 30-90 s con 90-180 s adicionales de mezclado a alta velocidad una vez finalizada la inyección. Se utilizó el mismo sistema de inyección de dióxido de carbono que en el Ejemplo 30. El ensayo del Ejemplo 31 fue una repetición del Ejemplo 30 para aumentar la confianza en los resultados. Sin embargo, mientras se administra una inyección de CO₂ a un camión parado en el bastidor de lavado (como en el Ejemplo 30) es potencialmente factible, la división de la entrega en diferentes dosis representa un posible retraso que es preferible evitar y no es de aplicación universal. Existen muchos ejemplos en donde el hormigón se procesa por lotes y de mezcla de forma centralizada, evitando de este modo la necesidad de un bastidor de lavado y una pausa relacionada. Por tanto, el Ejemplo 31 incluía un modo alternativo de inyección del CO₂ (código de muestra 805, más abajo) en donde el gas se añadía durante la fase inicial de procesamiento por lotes/mezclado.

- 35 El segundo camión tenía una dosis de CO₂, equivalente a dos dosis del primer camión (0,30 % de dióxido de carbono en pdc), pero se dosificó durante el mezclado. Las condiciones de las muestras en el ensayo se proporcionan en la **Tabla 32**.

TABLA 32

Condiciones de las muestras

Camión	Código de muestra	Condición	Tiempo estimado de descarga (min)	Dosis total de CO ₂ (% en pdc)	Captación de CO ₂ (% en pdc)	Asentamiento (pulgadas)	Temp. (°C)
1	801	Control	21	-	-	3,5	22,4
	802	CO ₂	30	0,10 %	no concluyente	3,0	24,0
	803	CO ₂	46	0,30 %	no concluyente	2,5	24,7
	804	CO ₂	55	0,60 %	no concluyente	1,5	27,3

2	805	CO ₂	-	0,3 %	-	3,0	23,3
---	-----	-----------------	---	-------	---	-----	------

Las resistencias absolutas a la compresión se muestran en la **Tabla 33**, y las resistencias a la compresión relativas al control no carbonatado se muestran en la **Tabla 34**. Las **Figuras 93A** (potencia frente al tiempo) y **93B** (energía frente al tiempo) muestran los datos de calorimetría para las diferentes dosis de dióxido de carbono.

5

TABLA 33
Resistencias a la compresión, absolutas

Resistencia a la compresión (MPa)					
	Control 0801	CO2 0802	CO2 0803	CO2 0804	CO2 0805
1 día	8,0	8,0	8,6	8,7	9,2
3 días	14,8	15,8	16,6	16,1	18,6
7 días	19,2	20,4	21,4	22,1	23,2
28 días	30,8	32,0	33,9	32,8	35,5
56 días	32,8	27,9	37,9	36,4	38,7
91 días	36,9	38,4	39,1	39,5	42,5

TABLA 34
Resistencias a la compresión, relativas

Resistencia en relación con el control					
	Control 0801	CO2 0802	CO2 0803	CO2 0804	CO2 0805
1 día	100 %	99 %	106 %	108 %	114 %
3 días	100 %	107 %	112 %	109 %	126 %
7 días	100 %	106 %	111 %	115 %	121 %
28 días	100 %	104 %	110 %	107 %	115 %
56 días	100 %	85 %	116 %	111 %	118 %
91 días	100 %	103 %	106 %	107 %	115 %

Como en el Ejemplo 30, cuando el dióxido de carbono se dosificó por fases, se observó un beneficio creciente de la resistencia temprana (1 día) con el aumento de la dosis, aunque el efecto no fue coherente en los puntos temporales posteriores. Sin embargo, a diferencia del Ejemplo 30, la muestra de dosis única, 0805, era superior en resistencia en cada punto temporal a la misma dosis, administrada en dos fases (0803). En este Ejemplo, la dosis única se administró durante el procesamiento por lotes y no después. Este método superó a todas las dosis estadificadas en cada punto temporal.

Las tendencias de la calorimetría eran coherentes con el Ejemplo 30, es decir, las dosis que dieron la mayor aceleración de la resistencia también mostraron el mayor desplazamiento en las curvas de calorimetría. Los datos considerados como energía muestran la magnitud del efecto del dióxido de carbono. La dosis más baja liberó un 20 % más de energía que el control a lo largo de 2 horas. El beneficio disminuyó hasta un 7 % a las 7 horas, antes de aumentar hasta un 13 % a las 10 horas y a partir de entonces el descenso hasta ser equivalente al control. La dosis intermedia de CO₂ fue un 41 % superior a la de control a las 2 horas, y el beneficio disminuyó hasta un 9 % a las 8 horas. La liberación de energía saltó hasta un 16 % por encima del control a las 10 horas antes de descender hasta ser equivalente al control. En el caso de la dosis más alta, la energía era de entre el 92 % y el 99 % del control en las primeras 9 horas, antes de alcanzar un pico del 9 % y, a partir de entonces, descender hasta ser equivalente a la del control. Es evidente que las dosis más bajas de CO₂ tuvieron un efecto en la hidratación muy temprana, y todas las dosis tuvieron un efecto notable alrededor de la marca de las 10 horas. La forma de las curvas de potencia sugiere que este periodo de tiempo coincide con el final del periodo de aceleración, cuando la hidratación inicial del silicato comienza a ralentizarse.

El lote al que se le dosificó CO₂ durante el procesamiento por lotes (805) mostró una respuesta calorimétrica que parecía mostrar un cierto retraso con respecto al control (datos no mostrados). La evolución del calor fue más lenta a lo largo del intervalo de las 7 a las 13 horas. Tras rezagarse hasta un 83 % del control a las 11 horas, la hidratación se aceleró y se adelantó un 5 % a las 15 horas, aumentando después hasta un 7 % a las 20 horas.

Las mediciones de la resistividad aparente se realizaron según el protocolo utilizado en el Ejemplo 31. Los resultados se muestran en la Tabla 34A.

TABLA 34A
Resistividad aparente (Ωm) y riesgo de penetrabilidad de cloruros en muestras con cinco curados diferentes

Código de muestra	Condición	1 día	3 días	7 días	28 días	91 días
801	Control	9,6	14,9	21,0	58,3	123,4
802	0,1 % de CO ₂	9,6	16,4	21,6	56,8	122,2
803	0,3 % de CO ₂	9,2	15,9	20,9	59,6	123,7
804	0,6 % de CO ₂	9,2	16,1	20,7	50,3	112,9
805	0,3 % de CO ₂	10,1	18,0	23,3	61,8	129,8
801	Control	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja

802	0,1 % de CO ₂	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
803	0,3 % de CO ₂	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
804	0,6 % de CO ₂	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja
805	0,3 % de CO ₂	Alta	Alta	Alta	Moderada	Baja

Las mediciones de la resistividad aparente eran coherentes con lo observado en el Ejemplo 31 en la medida en que las evaluaciones de los lotes carbonatados fueron equivalentes a las del control. El riesgo de penetrabilidad de cloruros para todas las muestras se evaluó como moderado a los 28 días y bajo a los 91 días.

Este ejemplo confirma el beneficio coherente de una dosis baja de dióxido de carbono en el desarrollo temprano de la resistencia, y demuestra el efecto del momento de la adición de dióxido de carbono en la magnitud del beneficio de la resistencia. La adición de dióxido de carbono durante el procesamiento por lotes sería equivalente a la dosificación realizada en el depósito, mientras que los otros momentos de adición de dióxido de carbono durante la adición estadificada son similares a la dosificación durante el tránsito y/o en la obra.

Ejemplo 32

En este ejemplo, el dióxido de carbono se añadió al hormigón en los camiones hormigonera casi inmediatamente después del procesamiento por lotes, utilizando la misma dosis en dos camiones diferentes, pero un momento de administración diferente del dióxido de carbono. Se utilizó un diseño de mezcla que contenía un MCS, en este caso, cenizas volantes.

Se utilizaron tres camiones, cada uno de 8,5 m³, por lo que se trataba de camiones llenos;

El diseño de la mezcla era:

Arena 868 kg
Piedra 1050 kg
Cemento 282 kg
Cenizas volantes 68 kg

El CO₂ se suministraba en forma líquida mediante una varilla que lo dirigía hacia el interior del tambor. En este Ejemplo, el sistema sería equivalente a un sistema permanente en la instalación de procesamiento por lotes.

El CO₂ se suministraba al hormigón inmediatamente después de que el camión abandonara la nave de procesamiento por lotes. Hubo aproximadamente 4 min de procesamiento por lotes/mezclado en la nave, 2 min de reorientación del camión y, a continuación, se añadió el CO₂, como una única dosis por camión. Esto equivaldría a un esquema de dosificación en la instalación de procesamiento por lotes. Se administró una única dosis por camión, que era la misma dosis para cada camión pero administrada en dos periodos de tiempo diferentes. Las condiciones para los camiones en el ensayo se dan en la **Tabla 35**

TABLA 35
Condiciones de las muestras en el ensayo

Camión	Condición	Dosis total de CO ₂ (% en pdc)	Captación de CO ₂ (% en pdc)	Asentamiento (pulgadas)	Temp. (°C)
1	Control	-	-	5,5	21,1
2	CO ₂ -1	0,50 % durante 4 min	no concluyente	2,0	20,7
3	CO ₂ -2	0,50 % durante 2 min	no concluyente	6,0	21,6

Las resistencias a la compresión se midieron a los 1, 4, 7 y 28 días. Las resistencias a la compresión absolutas se proporcionan en la **Tabla 36**; las resistencias a la compresión relativas al control se proporcionan en la **Tabla 37**. Los datos de calorimetría se muestran en las **Figuras 94A** (potencia frente al tiempo) y **94B** (energía frente al tiempo). Se utilizaron tres muestras en todos los curados como cilindros de 10,16 cm x 20,32 cm (4 x 8") con tapas reutilizables. Se utilizó un almacenamiento de curado húmedo antes de las pruebas.

TABLA 36

Resistencias a la compresión, absolutas

Resistencia a la compresión (MPa)			
	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2
1 día	15,2	18,9	14,2
4 días	31,4	33,4	28,3
7 días	31,7	37,6	33,1
28 días	44,9	47,8	42,0

TABLA 37

Resistencias a la compresión, en relación con el control

Resistencia en relación con el control			
	Control	CO ₂ -1	CO ₂ -2
1 día	100 %	125 %	93 %
4 días	100 %	107 %	90 %
7 días	100 %	119 %	105 %
28 días	100 %	106 %	94 %

- 5 La resistencia en cada punto temporal fue superior en el hormigón del camión dosificado durante 4 min (CO₂-1) en comparación con el del camión dosificado durante 2 min (CO₂-2), posiblemente porque la administración más lenta permitió que el hormigón fresco tuviera más tiempo para reaccionar sin inundar el sistema.

- 10 El ejemplo ilustra que otra posibilidad para la dosificación del dióxido de carbono puede ser después de que se añada agua a la mezcla y comience el mezclado, pero a los pocos minutos de iniciarse el mezclado. En las instalaciones con un bastidor de lavado, donde se enjuaga el camión antes de la salida y se comprueba la consistencia del hormigón, un camión puede detenerse durante aproximadamente diez minutos. Esto ofrece una oportunidad para la dosificación de dióxido de carbono en este intervalo de tiempo. En este Ejemplo se ilustra también el uso de la dosis baja de dióxido de carbono con una mezcla que contiene un MCS, y los resultados beneficiosos en el desarrollo temprano de la resistencia en comparación con el control no carbonatado. Finalmente, este ejemplo ilustra además que los cambios en los datos de calorimetría se correlacionan con los tempranos de la resistencia.

Ejemplo 33

- 20 En este ejemplo, se realizó un método de cribado de un cemento particular para determinar la dosificación óptima de dióxido de carbono.

El diseño de la mezcla fue arena 1350 g, cemento 535 g, agua 267,5 g

- 25 El procedimiento fue:

- 30 Combinar la arena y el agua en un robot amasador - mezclar 30 s en la posición n.º 2
 Añadir cemento: mezclar 30 s en la posición n.º 2
 Extraer la muestra no carbonatada para la calorimetría y el análisis de CO₂
 Carbonatar durante 2 min a 0,15 LPM
 Extraer la muestra n.º 2 para la calorimetría y el análisis de CO₂
 Repetir los pasos 4 y 5 tantas veces como desee

- 35 En este ejemplo, se utilizó cemento Lafarge Brookfield, pero el procedimiento puede utilizarse con cualquier cemento para determinar la dosificación óptima de dióxido de carbono.

- 40 Se observó un aumento del calor liberado en los curados tempranos (aceleración) para todas las dosis de CO₂. Las captaciones más bajas son mejores en los curados más avanzados; las dosis más altas tuvieron un impacto negativo en la energía total. Véanse las Figuras 95-99. La Figura 95 muestra las curvas de calorimetría (potencia frente al tiempo) de 5 morteros con niveles variables de captación de CO₂ (1 muestra antes de la carbonatación seguida de 5 rondas de carbonatación, cada una durante 2 min a 0,15 LPM). Las Figuras 96-99 proporcionan los resultados del análisis de la energía liberada en relación con el control no carbonatado a las 4, 8, 12 y 16 horas.

Este ejemplo ilustra un método para determinar rápidamente la dosis óptima de dióxido de carbono para un cemento

particular que se vaya a utilizar en, por ejemplo, una mezcla de hormigón, utilizando la calorimetría como marcador alternativo o adicional al desarrollo de la resistencia.

Ejemplo 34

5 En este ejemplo, se probó la administración de CO₂ a través de agua carbonatada utilizando agua carbonatada como única fuente de agua para un hormigón.

10 Si una parte o la totalidad del agua de mezcla de un hormigón de mezcla húmeda está carbonatada, puede contener una cantidad de CO₂ que puede ser suficiente para obtener una dosis deseada de dióxido de carbono en el hormigón mediante el uso de agua de mezcla carbonatada sola, dependiendo de la dosis deseada; esto es indudablemente cierto para muchas mezclas de dosis bajas. Por ejemplo, considerar una mezcla con 350 kg/m³ de cemento. Una dosis de CO₂ del 0,5 % en pdc serían 1,75 kg de CO₂. Con una relación a/c de 0,45 hay 157,5 kg de agua en un metro cúbico. Por tanto, una dosis de CO₂ del 0,5 % sería de 11,1 g de CO₂/l de agua. Esta cantidad de dióxido de carbono podría ser transportada por el agua carbonatada a aproximadamente 648,1 kPa (94 psi) y 25 °C. El agua más fría podría transportar más, particularmente si una parte del agua debe permanecer no carbonatada. Se pueden conseguir fácilmente dosis inferiores al 0,5 % mediante la carbonatación del agua de mezcla, o de una parte del agua de mezcla.

20 Por tanto, exploramos el uso de agua carbonatada como portadora de la dosis baja de CO₂.

Procedimiento de mezcla A - Control

1. Combinar 1350 g de arena y 53,5 g de agua en una cubeta: mezclar 30 s
2. Añadir 535 g de cemento a la cubeta: mezclar 30 s
- 25 3. Añadir 214 g de agua a la cubeta durante ~10 s: mezclar 30 s
4. Mezclar el mortero durante 2 minutos adicionales

Procedimiento de mezcla B - CO₂

- 30 1. Combinar 1350 g de arena y 535 g de cemento en una cubeta: mezclar 30 s
2. Añadir 267,5 g de agua carbonatada a la cubeta: mezclar 30 s. El agua carbonatada era agua Perrier.
3. Mezclar el mortero durante 2 minutos adicionales

35 En este ensayo, el agua de mezcla, en este caso carbonatada, se añadió como una sola adición, y toda el agua de mezcla estaba carbonatada.

40 Sorprendentemente, la calorimetría indicó un retraso de aproximadamente 2 a 4 horas. Véanse las **Figuras 100** (potencia frente al tiempo) y **101** (energía frente al tiempo). El momento en el que se introduce el agua de mezcla carbonatada puede ser importante, y que se puede utilizar una etapa de "prehumectación" antes de la adición del agua carbonatada para "cebar" las reacciones en el cemento en hidratación, de modo que cuando se añada a continuación el agua carbonatada se observe el efecto deseado sobre la aceleración de la resistencia.

Ejemplo 35

45 En este ejemplo se muestran los efectos de la carbonatación a dosis bajas sobre la inversión del retraso del desarrollo temprano de la resistencia en hormigones que contienen un MCS, en este caso, se estudiaron las cenizas volantes.

El procedimiento fue el siguiente:

- 50 Combinar 1350 g de arena y 267,5 g de agua en una cubeta: mezclar 30 s
- Añadir 428 g de cemento y 107 g de cenizas volantes (mezcla 80/20): mezclar 60 s
- Extraer la muestra para calorimetría y cocción
- Dosificar el CO₂ a 0,15 LPM durante 2 min
- Extraer la muestra para calorimetría y cocción
- 55 Dosificar el CO₂ a 0,15 LPM durante 2 min (dosis total de CO₂ de 4 min)
- Extraer la muestra para calorimetría y cocción
- Dosificar el CO₂ a 0,15 LPM durante 2 min (dosis total de CO₂ de 6 min)
- Extraer la muestra para calorimetría y cocción

60 Los cementos utilizados en los ensayos fueron: Argos, Cemex, Holcim, Titan Roanoake.

Las cenizas volantes utilizadas en los ensayos fueron: Venture Belews creek, SEFA Wateree.

65 Los resultados se muestran en las **Figuras 102-109**. En cada Figura, se proporciona la captación de CO₂ para la mezcla particular para las tres dosis diferentes de dióxido de carbono, y la calorimetría, se muestra como la energía total liberada en un intervalo de tiempo discontinuo (8, 16 y 23 horas después del mezclado), como un porcentaje del

control no carbonatado. La **Figura 102** muestra los resultados de una mezcla de cemento Argos + Venture FA. La **Figura 103** muestra los resultados de una mezcla de cemento Cemex + Venture FA. La **Figura 104** muestra los resultados de una mezcla de cemento Holcim + Venture FA. La **Figura 105** muestra los resultados de una mezcla de cemento Titan Roanoake + Venture FA. La **Figura 106** muestra los resultados de una mezcla de cemento Argos + SEFA FA. La **Figura 107** muestra los resultados de una mezcla de cemento Cemex + SEFA FA. La **Figura 108** muestra los resultados de una mezcla de cemento Holcim + SEFA FA. La **Figura 109** muestra los resultados de una mezcla de cemento Titan Roanoake + SEFA FA. En resumen, para la ceniza Venture: en los cuatro cementos se observó un aumento de la liberación de calor de hidratación a las 8 y a las 16 horas. Generalmente equivalente a las 23 horas. Para la ceniza SEFA: se observó un efecto similar al de la ceniza Venture en 3 cementos. Holcim se retrasó en los curados tempranos y fue equivalente a las 23 horas.

La mayor liberación de energía detectada por calorimetría en las muestras carbonatadas indica un probable aumento temprano de la resistencia. Esto es importante en las mezclas con MCS, porque los productores de muchos mercados dejan de utilizar cenizas volantes o escorias cuando hace más frío debido a un desarrollo más lento de la resistencia.

El mayor aumento de la resistencia de los lotes carbonatados permite a los productores utilizar cenizas volantes o escorias en climas más fríos, cuando el desarrollo más lento de la resistencia asociado a los MCS les haría optar en contra del uso de cenizas volantes o escorias.

Este ejemplo demuestra el uso de la carbonatación a dosis bajas para acelerar el desarrollo de la resistencia en las mezclas de hormigón que utilizan un MCS, compensando por tanto potencialmente de forma parcial o completa el retraso en el desarrollo de la resistencia observado en estas mezclas cuando no están carbonatadas.

Ejemplo 36

En este ejemplo se estudiaron adicionalmente los efectos de la carbonatación a dosis bajas sobre la inversión del retraso en el desarrollo temprano de la resistencia en hormigones que contienen un MCS.

Se utilizó una ceniza volante, cenizas volantes de clase F Trenton. Se utilizaron dos cementos portland normales, St Mary's Bowmanville (STMB) y Roanoake. La fracción de mezcla era un 80 % de cemento, un 20 % de cenizas volantes

El procedimiento fue el siguiente:

Combinar 1350 g de arena y 267,5 g de agua en una cubeta y para mezclar 30 s
 Añadir 428 g de cemento 107 g de cenizas volantes y mezclar durante 30 s
 Para mortero carbonatado, mezclar 2, 4 o 6 min adicionales con un caudal de CO₂ de 0,15 LPM
 Para un mortero de control mezclar 4 min adicionales
 Muestras de moldeo

A continuación, se tomaron muestras del lote y se realizó la calorimetría como se describe en el presente documento. Los valores derivados de la calorimetría se utilizaron como marcador alternativo al desarrollo de la resistencia, también como se describe en el presente documento.

Los resultados de calorimetría de la mezcla Roanoake-Trenton se muestran en las **Figuras 110** (potencia) y **111** (energía) y en la **Tabla 38** (energía en relación control). Los resultados para el cemento STMB se muestran en las **Figuras 112** (potencia) y **113** (energía) y en la **Tabla 39** (energía en relación con el control).

Tabla 38

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para una mezcla 80/20 de cemento Roanoake y cenizas volantes Trenton

Tiempo después del mezclado (h)	Control	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	-	-	-	-
2	100 %	49 %	73 %	67 %
3	100 %	74 %	95 %	86 %
4	100 %	90 %	113 %	99 %
5	100 %	103 %	126 %	107 %
6	100 %	112 %	130 %	109 %

7	100 %	117 %	130 %	107 %
8	100 %	120 %	127 %	105 %
9	100 %	121 %	125 %	102 %
10	100 %	121 %	122 %	100 %
11	100 %	120 %	120 %	99 %
12	100 %	120 %	117 %	98 %
13	100 %	119 %	114 %	97 %
14	100 %	117 %	112 %	96 %
15	100 %	116 %	110 %	96 %
16	100 %	115 %	108 %	96 %
17	100 %	114 %	107 %	96 %
18	100 %	114 %	106 %	96 %
19	100 %	113 %	105 %	96 %
20	100 %	112 %	104 %	96 %
21	100 %	112 %	104 %	96 %
22	100 %	112 %	103 %	96 %
23	100 %	111 %	103 %	96 %
24	100 %	111 %	102 %	97 %

Tabla 39

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para una mezcla 80/20 de cemento St Mary's Bowmanville y cenizas volantes Trenton

Tiempo después del mezclado (h)	Control	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	-	-	-	-
2	100 %	80 %	68 %	48 %
3	100 %	83 %	81 %	73 %
4	100 %	88 %	88 %	83 %
5	100 %	94 %	93 %	89 %
6	100 %	98 %	95 %	91 %
7	100 %	100 %	95 %	90 %
8	100 %	101 %	94 %	88 %
9	100 %	101 %	92 %	87 %

10	100 %	101 %	92 %	86 %
11	100 %	100 %	91 %	85 %
12	100 %	100 %	91 %	85 %
13	100 %	99 %	90 %	84 %
14	100 %	99 %	90 %	83 %
15	100 %	98 %	89 %	83 %
16	100 %	98 %	89 %	82 %
17	100 %	97 %	89 %	82 %
18	100 %	97 %	89 %	82 %
19	100 %	96 %	89 %	82 %
20	100 %	96 %	89 %	82 %
21	100 %	96 %	89 %	82 %
22	100 %	95 %	89 %	82 %
23	100 %	95 %	89 %	82 %
24	100 %	95 %	89 %	82 %

Se observó una fuerte aceleración en la mezcla Roanoke-Trenton. Con la dosis de 2 min (0,06 % en pdc de captación de CO₂) se liberó más energía que con el control en los curados superiores a las 5 horas, con al menos un 20 % más de energía observada en el intervalo de las 8 a las 12 horas. La energía total liberada a las 24 horas fue del 111 % del control. Con la dosis de 4 min (0,26 % en pdc de captación de CO₂) se liberó más energía que con el control en todos los momentos superiores a las 4 horas, con un beneficio superior al 10 % de las 6 a las 15 horas. El máximo alcanzó un 30 % más a las 6 a 7 horas. La energía total liberada a las 24 horas fue del 102 % del control. La dosis de 6 min (0,38 % en pdc de captación de CO₂) liberó ligeramente más energía que el control para todos los curados de 5 a 9 horas (máx. 9 % por delante a las 6 horas). La energía total liberada a las 24 horas fue del 97 % del control.

Por el contrario, no se observó ninguna aceleración en la mezcla de St Mary's-Trenton. Con la dosis de 2 min (0,14 % en pdc de captación de CO₂) se liberó menos energía que con el control en todos los curados, excepto en el intervalo de las 7 a las 12 horas, donde fue equivalente. La energía total liberada a las 24 horas fue del 95 % del control. Con la dosis de 4 min (0,27 % en pdc de captación de CO₂) se liberó menos energía que con el control en todos los curados. El máximo fue del 95 % en el intervalo de 6 a 7 horas. La energía total liberada a las 24 horas fue del 89 % del control. Con la dosis de 6 min (0,48 % en pdc de captación de CO₂) se liberó menos energía que con el control en todos los curados. El máximo fue del 91 % a las 6 horas. La energía total liberada a las 24 horas fue del 82 % del control.

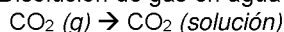
Este Ejemplo es una demostración más de los efectos del tipo de mezcla en los resultados de la carbonatación, obteniéndose unos resultados notablemente diferentes en función del cemento utilizado en la mezcla: prácticamente ningún efecto de la carbonatación en la mezcla STMB-Trenton, y un efecto pronunciado en la mezcla Roanoke-Trenton. El efecto de la carbonatación en una mezcla dada se estudia mejor en esa mezcla; esto puede ser especialmente importante en las mezclas de cemento/MCS, en las que tanto el tipo específico de cemento como el tipo específico de MCS pueden aportar especies reactivas que influyan en el curso y/o el efecto de la carbonatación. En este Ejemplo se también ilustra que, con la mezcla adecuada de cemento/MCS, la carbonatación de la mezcla, por ejemplo, con dosis bajas de dióxido de carbono, puede acelerar el desarrollo de la resistencia temprana, como indica la calorimetría; en algunos casos la aceleración puede ser bastante acusada, incluso con una dosis relativamente baja de dióxido de carbono. Finalmente, una mezcla dada puede presentar diferentes cursos temporales de aceleración del desarrollo de la resistencia; esto puede ser útil en ciertas condiciones de campo cuando se desea realizar una operación particular en un momento particular tras el vertido de la mezcla, por ejemplo, la eliminación de mohos, el acabado, y similares, que requieren una cierta resistencia del hormigón. Los tiempos tempranos de desarrollo acelerado de la resistencia podrían desearse para, por ejemplo, acortar el tiempo que el hormigón está en el molde, mientras que se podrían desear unos tiempos tardíos en el desarrollo acelerado de la resistencia para, por ejemplo, permitir que el acabado del hormigón se realice antes.

Ejemplo 37

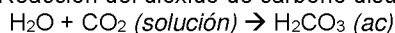
En este Ejemplo se estudió el uso del bicarbonato como fuente de carbonato en la carbonatación de mezclas de cemento.

Como se describe en cualquier otro sitio del presente documento, y sin pretender quedar ligados a teoría alguna, las reacciones relevantes en la carbonatación de mezclas de cemento u otras mezclas que contienen las especies reactivas necesarias son:

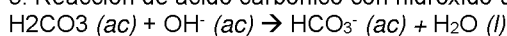
1. Disolución de gas en agua para formar **dióxido de carbono disuelto**:



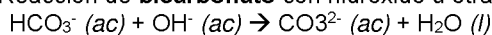
2. Reacción del dióxido de carbono disuelto con el agua para formar **ácido carbónico**:



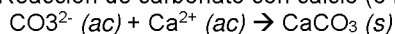
3. Reacción de ácido carbónico con hidróxido u otra base para formar **bicarbonato**:



4. Reacción de **bicarbonato** con hidróxido u otra base para formar **carbonato**:



5. Reacción de carbonato con calcio (o ion alternativo) para formar **carbonato sólido**:



Hay una serie de puntos donde las condiciones en las que se están produciendo las reacciones pueden afectar a varias etapas de la carbonatación. La disolución del dióxido de carbono en agua, 1, se ve afectada por la temperatura, la presencia o ausencia de catalizadores, y otros factores. De forma similar, la formación de ácido carbónico, 2, se ve afectada por el pH del agua, etc., al igual que la reacción del ácido carbónico con hidróxido u otra base para formar bicarbonato, 3. No es necesario que la base para la reacción de 3 sea una base fuerte, ya que el pK_a para esta reacción es relativamente bajo, de alrededor de 7 o así, por lo que la reacción podría producirse incluso en el agua de mezcla en las realizaciones en las que se añade dióxido de carbono al agua de mezcla. Los procesos de 1 y 2 pueden evitarse utilizando agua cargada con dióxido de carbono (por ejemplo, agua de mezcla) en una prueba; dependiendo del pH del agua de mezcla, el proceso 3 también puede evitarse parcial o totalmente. El uso de la solución de bicarbonato evita todos los procesos 1, 2 y 3, lo que permite probar únicamente la carbonatación de la mezcla de cemento.

En el presente Ejemplo, se utiliza una solución de bicarbonato como fuente de sustrato que se convertirá en carbonato en las pruebas de carbonatación de mezclas de cemento. Al eliminar las variables asociadas a la disolución y la conversión en ácido carbónico y bicarbonato, pueden analizarse únicamente los efectos del cemento y de otros componentes reactivos de la mezcla, para obtener una imagen rápida y exacta del cemento y otros efectos por sí solos. Es posible determinar si la carbonatación es eficaz o no con un cemento o una mezcla de cemento dados, y determinar el nivel óptimo o deseado de carbonatación que debe alcanzarse, ya que todo o sustancialmente todo el bicarbonato se convierte en carbonato en las reacciones de mezclado del cemento de mezcla. También pueden observarse los efectos de las diferentes dosis en la cronología del aumento de la resistencia. De este modo, la atención sobre el terreno puede desplazarse hacia la consecución de la carbonatación deseada, dadas las condiciones del agua de mezcla, el tiempo de mezclado, la cronología de las operaciones por lotes, la fuente de dióxido de carbono, el potencial control de la retroalimentación, y similares, para conseguir una carbonatación uniforme y eficaz en el terreno. Los resultados del laboratorio pueden utilizarse en pruebas preliminares sobre el terreno para confirmar la dosis de carbonatación y demostrar la eficacia de la carbonatación, antes de confiar en la administración del dióxido de carbono a la mezcla de cemento sobre el terreno.

Cuando una molécula de CO_2 forma una única molécula de bicarbonato, una dosis efectiva de CO_2 como bicarbonato de sodio puede calcularse como sigue:

$$\text{CO}_2 (\text{como bicarbonato}) = (\text{dosis de CO}_2) * (\text{masa molar bicarbonato de sodio/masa molar de CO}_2)$$

$$\text{Por tanto: CO}_2 (\text{como bicarbonato}) = (\text{dosis de CO}_2) * (84/44) = (\text{dosis de CO}_2) * 1,91$$

Por ejemplo, una dosis de CO_2 del 0,10 % en pdc requeriría una dosis de bicarbonato de sodio del 0,191 % en pdc

Se usaron dos cementos diferentes en las pruebas, Lafarge Brookfield (LAFB) y St Mary's Bowmanville (STMB), con el plan de lotes mostrado en la **Tabla 40**

Tabla 40
Plan de dosificación para las pruebas con bicarbonato

Lote	Masa de cemento (g)	Agua 1 (g)	Agua 2 (g)	Masa de NaHCO ₃ (g)	Dosificación de NaHCO ₃ (% en pdc)	Dosis equivalente de CO ₂ (pdc)	Masa total de agua (g)
1	535	53,5	250	0	-	-	303,5
2	535	53,5	250	0,5	0,09 %	0,05 %	303,5
3	535	53,5	250	1,0	0,18 %	0,10 %	303,5
4	535	53,5	250	2,0	0,37 %	0,20 %	303,5

El procedimiento de mezclado fue el siguiente:

- 5 Añadir bicarbonato de sodio (NaHCO₃) al agua 2 y remover bien para disolverlo
 Combinar la arena y el agua 1 (10 % de la masa de cemento) en una cubeta y mezclar 30 s
 Añadir cemento a la cubeta y mezclar 30 s
 Añadir agua 2 durante el tiempo indicado (4 min)
 Mezclar 30 s adicionales
- 10 A continuación, se tomaron muestras del lote y se realizó la calorimetría como se describe en el presente documento. Los valores derivados de la calorimetría se utilizaron como marcador alternativo al desarrollo de la resistencia, también como se describe en el presente documento.
- 15 Los resultados para el cemento STMB se muestran en las **Figuras 114** (potencia) y **115** (energía) y en la **Tabla 41** (energía en relación con el control). Los resultados para el cemento LAFB se muestran en las **Figuras 116** (potencia) y **117** (energía) y en la **Tabla 42** (energía en relación con el control).

Tabla 41
Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB mezclado con bicarbonato de sodio

Tiempo después del mezclado (h)	Control	0,09 % de bicarbonato	0,18 % de bicarbonato	0,37 % de bicarbonato
1	-	-	-	-
2	100 %	95 %	116 %	100 %
3	100 %	99 %	104 %	102 %
4	100 %	101 %	104 %	102 %
5	100 %	103 %	104 %	101 %
6	100 %	103 %	103 %	98 %
7	100 %	103 %	103 %	97 %
8	100 %	103 %	102 %	95 %
9	100 %	103 %	101 %	94 %
10	100 %	103 %	101 %	94 %
11	100 %	103 %	101 %	94 %
12	100 %	103 %	101 %	94 %
13	100 %	103 %	101 %	94 %

14	100 %	103 %	101 %	94 %
15	100 %	103 %	101 %	94 %

Tabla 42

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento LAFB mezclado con bicarbonato de sodio

Tiempo después del mezclado (h)	Control	0,09 % de bicarbonato	0,18 % de bicarbonato	0,37 % de bicarbonato
1	-	-	-	-
2	100 %	92 %	141 %	163 %
3	100 %	95 %	133 %	155 %
4	100 %	103 %	134 %	151 %
5	100 %	107 %	130 %	140 %
6	100 %	109 %	123 %	129 %
7	100 %	108 %	116 %	120 %
8	100 %	106 %	110 %	112 %
9	100 %	105 %	106 %	107 %
10	100 %	104 %	103 %	104 %
11	100 %	103 %	100 %	101 %
12	100 %	102 %	98 %	98 %
13	100 %	100 %	96 %	96 %
14	100 %	99 %	94 %	95 %
15	100 %	99 %	93 %	94 %
16	100 %	98 %	92 %	93 %
17	100 %	98 %	92 %	92 %
18	100 %	97 %	91 %	91 %
19	100 %	97 %	90 %	91 %
20	100 %	96 %	90 %	90 %

5 Los resultados confirman los de Ejemplos anteriores que muestran que los efectos de la carbonatación dependen en gran medida del tipo de cemento utilizado. En los lotes en los que se utilizó cemento STMB, el bicarbonato no tuvo casi ningún efecto sobre la calorimetría, a ninguna dosis, mientras que en los lotes de LAFB, la carbonatación en todas las dosis provocó un aumento de la hidratación temprana, de manera similar al Ejemplo 33, siendo el efecto dependiente de la dosis. 2,0 g de bicarbonato fue la mejor de las tres dosis, con un aumento del 63 % de la energía a las dos horas, que disminuyó gradualmente hasta el 12 % a las 8 horas.

10 En este Ejemplo se demuestra el uso del bicarbonato en las pruebas de carbonatación de diferentes mezclas de cemento, para analizar los efectos de la carbonatación por sí sola, sin efectos de disolución ni reacción temprana, y demuestra que los diferentes cementos reaccionan de forma diferente a la carbonatación. Los resultados de la utilización de bicarbonato con los cementos LAFB y STMB concordaron con los resultados de la carbonatación

utilizando dióxido de carbono con estos cementos, confirmando que el bicarbonato puede utilizarse como herramienta de comprobación de la carbonatación.

Ejemplo 38

En este Ejemplo, se utilizó agua de mezcla carbonatada como fuente de dióxido de carbono para la carbonatación de las mezclas de cemento, y se probaron los efectos de retrasar la adición del agua de mezcla carbonatada, o de la duración de la adición del agua de mezcla carbonatada.

En una primera prueba, el agua de mezcla carbonatada se añadió al principio de la mezcla o tras un breve retraso. Esto permite que las pruebas se centren más en la cronología del CO₂ en el proceso de mezclado que con una reacción de gas en solución, es decir, para evitar las reacciones 1 y 2 mostradas en el Ejemplo 37 El agua carbonatada era Perrier.

El procedimiento de mezclado fue el siguiente:

Combinar arena, agua del grifo 1 (53,5 g), agua carbonatada 1 (no carbonatada o carbonatada) y cemento en la cubeta: mezclar 60 s

Añadir el agua del grifo 2 y el agua carbonatada 2 (con gas) a la cubeta durante 10 s: mezclar 60 s Mezclar el mortero durante 1 min adicional

Moldear para resistencia, CO₂ y calorimetría

El plan de lotes era como se muestra en la **Tabla 43**.

Tabla 43
Lotes de trabajo de cronometraje carbonatados

Lote	Cemento (g)	Agua corriente 1 (g)	Agua carbonatada 1 (g)	Agua corriente 2 (g)	Agua carbonatada 2 (g)	Prehumectación total
1	535	267,5	0	0	0	267,5
2	535	53,5	0	214	0	53,5
3	535	53,5	214	0	0	267,5
4	535	53,5	0	0	214	53,5

A continuación, se tomaron muestras del lote y se realizó la calorimetría como se describe en el presente documento. Se usaron valores derivados de la calorimetría, también como se describe en el presente documento.

Los resultados para el cemento STMB se muestran en las **Figuras 118** (potencia) y **119** (energía) y en la **Tabla 44** (energía en relación con el control). Los resultados para el cemento LAFB se muestran en las **Figuras 120** (potencia) y **121** (energía) y en la **Tabla 45** (energía en relación con el control).

Tabla 44

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB sometido a diferentes composiciones de agua de mezcla y cronologías.

Tiempo después del mezclado (h)	Control	Control - agua dividida	CO ₂ por adelantado	CO ₂ - agua dividida
2	100 %	94 %	0 %	134 %
3	100 %	103 %	37 %	122 %
4	100 %	103 %	46 %	124 %
5	100 %	103 %	54 %	125 %
6	100 %	103 %	62 %	123 %

7	100 %	103 %	70 %	119 %
8	100 %	103 %	76 %	116 %
9	100 %	103 %	81 %	112 %
10	100 %	103 %	85 %	110 %
11	100 %	103 %	88 %	108 %
12	100 %	103 %	90 %	106 %
13	100 %	103 %	91 %	104 %
14	100 %	103 %	92 %	103 %
15	100 %	103 %	93 %	101 %
16	100 %	103 %	93 %	100 %
17	100 %	103 %	94 %	99 %
18	100 %	103 %	94 %	98 %
19	100 %	103 %	94 %	97 %

Tabla 45

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento LAFB sometido a diferentes composiciones de agua de mezcla y cronologías.

Tiempo después del mezclado (h)	Control	Control - agua dividida	CO₂ por adelantado	CO₂ - agua dividida
2	100 %	227 %	0 %	41 %
3	100 %	137 %	51 %	94 %
4	100 %	122 %	53 %	107 %
5	100 %	117 %	65 %	115 %
6	100 %	114 %	75 %	115 %
7	100 %	112 %	82 %	111 %
8	100 %	110 %	88 %	107 %
9	100 %	109 %	92 %	104 %
10	100 %	108 %	95 %	102 %
11	100 %	107 %	98 %	100 %
12	100 %	107 %	101 %	98 %
13	100 %	106 %	103 %	97 %
14	100 %	106 %	104 %	96 %
15	100 %	106 %	105 %	95 %
16	100 %	106 %	106 %	95 %

17	100 %	106 %	107 %	95 %
18	100 %	106 %	107 %	95 %
19	100 %	106 %	108 %	95 %
20	100 %	106 %	108 %	95 %
21	100 %	106 %	108 %	95 %
22	100 %	106 %	108 %	94 %
23	100 %	106 %	108 %	94 %

Para el cemento STMB, la adición de agua carbonatada como parte del agua de mezcla mostró un retraso de hasta 10 horas (menos del 85 % de la energía liberada por el control) antes de alcanzar el 93 % de la energía liberada por el control con unos curados superiores a las 15 horas. Por el contrario, la adición retardada de la misma cantidad de agua de mezcla mostró que la liberación de energía era superior en más de un 15 % a la del control durante las primeras 8 horas de hidratación antes de ser equivalente a la del control al cabo de 15 horas. No hubo diferencias apreciables en el sistema no carbonatado si el agua se añadía toda de una vez o en un reparto de 80/20.

Para el cemento LAFB, la adición de agua carbonatada como parte del agua de mezcla mostró un retraso a lo largo de las primeras 7 horas (en donde se liberó menos del 85 % de la energía del control) antes de alcanzar un aumento del 8 % de la energía liberada frente al control en unos curados superiores a las 19 horas. En el caso de la adición retardada de la misma cantidad de agua carbonatada, la liberación de energía de hidratación superó en más de un 15 % a la del control en las 5ª y 6ª horas de hidratación, antes de quedar ligeramente por detrás de la del control a las 15 horas. En este caso, la adición dividida a 80/20 del agua de mezcla no carbonatada mostró una marcada aceleración en los puntos temporales tempranos, en comparación con la adición de una sola vez.

Estos resultados demuestran una vez más que los resultados varían en función del cemento utilizado. Tanto el STMB como el LAFB mostraron un marcado retraso de la hidratación, como se muestra mediante calorimetría, cuando el agua de mezcla carbonatada se añadió sin retraso; sin embargo, el cemento LAFB había recuperado e incluso acelerado la hidratación a las 12 horas, mientras que el STMB no se recuperó en las 23 horas probadas.

Tanto con STMB como con LAFB, el retraso en la adición del agua de mezcla carbonatada dio como resultado una aceleración de la hidratación, pero en diferentes momentos y en diferentes grados. Para el STMB, hubo una marcada aceleración en el punto temporal de la primera hora, continuando hasta las 15 horas. Por el contrario, la aceleración de la hidratación en el sistema LAFB no fue evidente hasta las 4 horas y finalizó a las 11 horas, y fue moderada en comparación con la del STMB.

En una segunda prueba, el retraso hasta la adición del agua carbonatada y la cantidad de agua carbonatada se mantuvieron constantes, y se varió la duración global de la adición del agua. Se utilizó cemento LAFB. El agua carbonatada era Perrier. El procedimiento de mezclado fue el siguiente:

Combinar la arena y el agua 1 en la cubeta: mezclar 30 s

Añadir cemento a la cubeta: mezclar 30 s

Añadir tanto el agua 2 como el agua carbonatada durante el tiempo indicado (2-5 min)

Mezclar el mortero durante un total de 2 min

Nota: para los lotes 4 y 5 el tiempo total de mezclado fue de 5 min

El plan de lotes era como se muestra en la **Tabla 46**.

Tabla 46

Plan de lotes para diferentes duraciones de adición de agua carbonatada.

Lote	Masa de cemento (g)	Agua 1 (g)	Dosis de agua carbonatada (g)	Masa total de agua (g)	Tiempo de adición
1	535	53,5	250	303,5	30 s
2	535	53,5	250	303,5	60 s

3	535	53,5	250	303,5	120 s
4	535	53,5	250	303,5	180 s
5	535	53,5	250	303,5	300 s

Los resultados de la calorimetría se muestran en las **Figuras 122** (potencia) y **123** (energía) y en la **Tabla 47** (energía en relación con el control).

5

Tabla 47

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en unos intervalos de tiempo específicos para el cemento LAFB con diferentes duraciones de adición de agua carbonatada

Tiempo después del mezclado (h)	0,5 min	1 min	2 min	3 min	5 min
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	100 %	109 %	122 %	186 %	228 %
4	100 %	117 %	141 %	192 %	229 %
5	100 %	116 %	137 %	166 %	191 %
6	100 %	111 %	125 %	140 %	156 %
7	100 %	107 %	117 %	124 %	135 %
8	100 %	104 %	112 %	114 %	122 %
9	100 %	102 %	109 %	108 %	114 %
10	100 %	101 %	107 %	104 %	109 %
11	100 %	101 %	106 %	102 %	106 %
12	100 %	100 %	105 %	100 %	104 %
13	100 %	100 %	104 %	99 %	102 %
14	100 %	99 %	104 %	98 %	101 %
15	100 %	99 %	103 %	97 %	100 %
16	100 %	99 %	103 %	97 %	100 %
17	100 %	99 %	102 %	97 %	99 %

10

En comparación con la adición más rápida de agua carbonatada, cuanto más lenta sea la adición, mayor será el beneficio. Los beneficios se observaron sobre todo en los periodos de hidratación de hasta 9 horas después del mezclado.

15

En este Ejemplo se demuestra que variar la duración de la adición de agua de mezcla carbonatada a una mezcla de cemento puede tener efectos notables en la hidratación temprana.

Ejemplo 39

En este Ejemplo, el agua de mezcla carbonatada derivaba del agua de lavado artificial, y se utilizó como fuente de dióxido de carbono para la carbonatación de las mezclas de cemento.

En la producción de hormigón, el agua del proceso se produce en varias fases del proceso de producción y envasado, tales como la limpieza de los camiones y otros procesos, donde el agua del proceso tiene un pH elevado que puede ser necesario reducir antes de que el agua pueda ser descargada. Los métodos de tratamiento actuales incluyen el uso de HCl, pero el proceso es difícil de controlar y presenta problemas de seguridad derivados de la manipulación de un ácido concentrado. Un método alternativo utiliza la adición de dióxido de carbono al agua del proceso. El dióxido de carbono forma ácido carbónico, un ácido débil, que se convierte en bicarbonato y finalmente en carbonato (por ejemplo, carbonato de calcio). A medida que el pH se reduce por estas reacciones, finalmente alcanza 7 u 8, y el carbonato de calcio precipitado se disuelve, creando bicarbonato de calcio. Debido a los pKa de las diferentes reacciones, el sistema está tamponado y es más fácil alcanzar el pH deseado para la descarga. Por tanto, ciertas realizaciones proporcionan el tratamiento del agua del proceso de un proceso de fabricación que produce agua del proceso de alto pH, tal como la fabricación de hormigón, con dióxido de carbono, tal como el dióxido de carbono producido en la fabricación de cal y/o de cemento, para bajar el pH del agua del proceso. En este Ejemplo se prueba si el agua de lavado carbonatada podría utilizarse como agua de mezcla en el proceso de procesamiento por lotes del hormigón.

Se utilizó el siguiente procedimiento:

se preparó un "agua de lavado" sintética mezclando una solución de cemento al 2 % en peso con gluconato de sodio al 0,20 % en pdc, en agua. El gluconato se añadió, ya que la adición de un retardante es una parte convencional del proceso de lavado para evitar que el hormigón fragüe en el camión hormigonera antes del lavado. La mezcla se agitó periódicamente y se dejó reposar durante 24 horas.
 Combinar arena (1350 g) y agua 1: mezclar 30 s
 Añadir cemento (STMB, 535 g): mezclar 30 s
 Añadir tanto el agua 2 como el agua de lavado a la cubeta: mezclar 2 min
 Muestras de moldeo

Las pruebas compararon el agua de lavado sin filtrar frente a la filtrada, en sus variantes tanto carbonatada como no carbonatada. El agua de lavado se carbonató tratándola en un aparato casero para hacer soda según las instrucciones del fabricante para hacer agua carbonatada. El agua de lavado se filtró con papel de filtro para eliminar los sólidos en suspensión. El procesamiento por lotes se muestra en la **Tabla 48**. El agua de lavado carbonatada representó más del 60 % del agua total utilizada en las mezclas de cemento.

Tabla 48
Lotes de trabajo de agua de lavado carbonatada

Lote	Cemento (g)	Agua 1 (g)	Agua de lavado (g)	Agua 2 (g)	Agua total (g)	Agua de lavado
1	535	53,5	171,2	42,8	267,5	Filtrada, no carbonatada
2	535	53,5	171,2	42,8	267,5	Filtrada, carbonatada
5	535	53,5	171,2	42,8	267,5	Sin filtrar, no carbonatada
6	535	53,5	171,2	42,8	267,5	Sin filtrar, carbonatada

Los resultados de la calorimetría se muestran en las **Figuras 123** (potencia) y **124** (energía) y en las **Tablas 49** (sin filtrar) y **50** (filtrada).

Tabla 49

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control no carbonatado en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB con agua de lavado simulada filtrada utilizada como un 80 % del agua de mezcla

Tiempo después del mezclado (h)	Filtrada, no carbonatada	Filtrada, carbonatada
2	100 %	194 %
3	100 %	110 %
4	100 %	111 %
5	100 %	109 %

6	100 %	109 %
7	100 %	108 %
8	100 %	107 %
9	100 %	105 %
10	100 %	103 %
11	100 %	102 %
12	100 %	101 %
13	100 %	100 %
14	100 %	99 %
15	100 %	98 %
16	100 %	96 %
17	100 %	96 %
18	100 %	95 %

Tabla 50

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control no carbonatado en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB con agua de lavado simulada no filtrada utilizada como un 80 % del agua de mezcla

Tiempo después del mezclado (h)	Sin filtrar, no carbonatada	Sin filtrar, carbonatada
2	100 %	28 %
3	100 %	62 %
4	100 %	77 %
5	100 %	88 %
6	100 %	95 %
7	100 %	99 %
8	100 %	101 %
9	100 %	102 %
10	100 %	103 %
11	100 %	103 %
12	100 %	104 %
13	100 %	103 %
14	100 %	103 %
15	100 %	103 %

16	100 %	102 %
17	100 %	102 %
18	100 %	102 %

Cuando se filtró el agua de lavado, el tratamiento de carbonatación dio como resultado cierta aceleración de la hidratación temprana (94 % más de energía liberada a lo largo de 2 horas, 10 % a lo largo de 3 horas, 11 % a lo largo de 4 horas) antes de tender a la baja para ser un 8 % menor de las 22 horas. Cuando el agua de lavado no estaba filtrada, el tratamiento de carbonatación dio como resultado un retraso en la hidratación temprana (hasta las 6 horas la energía no estuvo dentro del 10 % del control) antes de que la liberación de energía llegara a ser comparable a la del control.

En este Ejemplo se ilustra que el agua de lavado carbonatada puede utilizarse como parte o como toda el agua de mezcla en una mezcla de cemento con aceleración de la hidratación en la mezcla posterior en comparación con el control no carbonatado. El uso de agua de lavado carbonatada puede permitir el tratamiento simultáneo del agua de lavado, su eliminación en una mezcla de cemento, y un efecto beneficioso o al menos neutro en la mezcla posterior. Si el dióxido de carbono procede del propio proceso de fabricación del cemento, también representa una vía para disminuir la huella de carbono del proceso global del cemento.

Ejemplo 40

En este Ejemplo, se probó el efecto de la carbonatación en la hidratación temprana para dos condiciones diferentes de baja temperatura.

El hormigón producido industrialmente puede variar de temperatura, tanto en las instalaciones de dosificación como en la obra. Normalmente, se requiere que la mezcla de hormigón esté entre 10-30 °C en el momento de la administración, aunque potencialmente puede estar más caliente o más fría en el momento del procesamiento por lotes.

En esta prueba, se carbonataron una serie de muestras de mortero a bajas temperaturas para observar si el efecto del CO₂ sobre el cemento era sensible a la temperatura de la mezcla. Se utilizaron dos intervalos de temperatura, de 5 a 10 °C y de 10 a 15 °C. La calorimetría isotérmica se realizó en el mismo intervalo de temperatura que el mezclado.

El procedimiento fue el siguiente:

- Combinar 1350 g de arena y 267,5 g de agua en una cubeta y para mezclar 30 s
- Añadir 535 g de cemento y mezclar durante 30 s
- Para mortero carbonatado, mezclar 2, 4 o 6 min adicionales con un caudal de CO₂ de 0,15 LPM
- Para un mortero de control mezclar 4 min adicionales
- Muestras de moldeo

Se utilizaron dos cementos portland normales: St Mary's Bowmanville (STMB) o Lafarge Brookfield (LAFB)

Para morteros de cemento LAFB, las **Figuras 125 y 126** muestran las curvas de potencia y de energía, respectivamente, entre 5 y 10 °C, y las **Figuras 127 y 128** muestran las curvas de potencia y energía, respectivamente, entre 10 y 15 °C, mientras que la **Tabla 51** muestra el sumario de la energía en comparación con el sistema de control a entre 5 y 10 °C, y la **Tabla 52** muestra el sumario de la energía en comparación con el sistema de control a entre 10 y 15 °C.

Tabla 51

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento LAFB hidratado a una temperatura de entre 5 y 10 °C

Tiempo después del mezclado (h)	Control a 5 °C	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	-	-	-	-
2	100 %	80 %	45 %	22 %
3	100 %	73 %	46 %	38 %
4	100 %	73 %	40 %	35 %

5	100 %	75 %	45 %	41 %
6	100 %	78 %	57 %	53 %
7	100 %	80 %	69 %	64 %
8	100 %	83 %	79 %	74 %
9	100 %	85 %	86 %	81 %
10	100 %	88 %	92 %	86 %
11	100 %	89 %	95 %	90 %
12	100 %	90 %	99 %	93 %
13	100 %	91 %	102 %	96 %
14	100 %	92 %	104 %	98 %
15	100 %	93 %	106 %	100 %
16	100 %	93 %	107 %	101 %
17	100 %	94 %	109 %	102 %
18	100 %	94 %	110 %	103 %
19	100 %	94 %	110 %	103 %
20	100 %	94 %	111 %	104 %
21	100 %	95 %	111 %	104 %
22	100 %	95 %	-	-
23	-	-	-	-
24	-	-	-	-

Tabla 51

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento LAFB hidratado a una temperatura de entre 10 y 15 °C

Tiempo después del mezclado (h)	Control a 10 °C	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	100 %	106 %	160 %	0 %
2	100 %	84 %	108 %	36 %
3	100 %	82 %	95 %	73 %
4	100 %	89 %	102 %	97 %
5	100 %	95 %	107 %	107 %
6	100 %	97 %	107 %	107 %
7	100 %	99 %	105 %	104 %
8	100 %	100 %	102 %	100 %

9	100 %	100 %	101 %	98 %
10	100 %	100 %	99 %	95 %
11	100 %	100 %	97 %	93 %
12	100 %	100 %	95 %	91 %
13	100 %	100 %	94 %	89 %
14	100 %	99 %	92 %	88 %
15	100 %	99 %	92 %	87 %
16	100 %	99 %	91 %	86 %
17	100 %	99 %	90 %	86 %
18	100 %	98 %	90 %	85 %
19	100 %	98 %	89 %	85 %
20	100 %	98 %	89 %	84 %
21	100 %	98 %	88 %	84 %
22	100 %	98 %	88 %	84 %
23	100 %	97 %	88 %	83 %
24	100 %	97 %	87 %	-

Para morteros de cemento STMB, las **Figuras 129** y **130** muestran las curvas de potencia y de energía, respectivamente, entre 5 y 10 °C, y las **Figuras 131** y **132** muestran las curvas de potencia y energía, respectivamente, entre 10 y 15 °C, mientras que la **Tabla 53** muestra el sumario de la energía en comparación con el sistema de control a entre 5 y 10 °C, y la **Tabla 54** muestra el sumario de la energía en comparación con el sistema de control a entre 10 y 15 °C.

Tabla 53

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB hidratado a una temperatura de entre 5 y 10 °C

Tiempo después del mezclado (h)	Control a 5 °C	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	-	-	-	-
2	100 %	62 %	67 %	76 %
3	100 %	56 %	64 %	68 %
4	100 %	57 %	67 %	74 %
5	100 %	60 %	72 %	83 %
6	100 %	64 %	78 %	91 %
7	100 %	68 %	83 %	97 %
8	100 %	72 %	88 %	100 %
9	100 %	75 %	91 %	102 %

10	100 %	79 %	93 %	103 %
11	100 %	82 %	95 %	103 %
12	100 %	84 %	96 %	103 %
13	100 %	86 %	97 %	102 %
14	100 %	88 %	98 %	102 %
15	100 %	89 %	99 %	102 %
16	100 %	90 %	100 %	102 %
17	100 %	92 %	101 %	102 %
18	100 %	93 %	102 %	103 %
19	100 %	94 %	103 %	103 %
20	100 %	95 %	104 %	103 %
21	100 %	96 %	105 %	103 %
22	100 %	96 %	105 %	103 %
23	100 %	97 %	-	-
24	-	-	-	-

Tabla 54

Energía, mediante calorimetría, en relación con el control en intervalos de tiempo específicos para el cemento STMB hidratado a una temperatura de entre 10 y 15 °C

Tiempo después del mezclado (h)	Control a 10 °C	2 min de CO ₂	4 min de CO ₂	6 min de CO ₂
1	-	-	-	-
2	100 %	26 %	47 %	61 %
3	100 %	54 %	80 %	87 %
4	100 %	67 %	100 %	103 %
5	100 %	75 %	109 %	110 %
6	100 %	80 %	112 %	111 %
7	100 %	83 %	112 %	109 %
8	100 %	85 %	109 %	106 %
9	100 %	88 %	107 %	104 %
10	100 %	90 %	106 %	103 %
11	100 %	92 %	105 %	102 %
12	100 %	93 %	104 %	101 %
13	100 %	94 %	103 %	100 %

14	100 %	94 %	102 %	99 %
15	100 %	94 %	100 %	98 %
16	100 %	95 %	99 %	98 %
17	100 %	95 %	99 %	98 %
18	100 %	95 %	98 %	97 %
19	100 %	96 %	98 %	97 %
20	100 %	96 %	97 %	97 %
21	100 %	96 %	97 %	97 %
22	100 %	96 %	96 %	97 %
23	100 %	96 %	96 %	97 %
24	100 %	97 %	96 %	97 %

Para el mortero LAFB, a ambas temperaturas, la dosis intermedia (4 min) produjo el mayor aumento de la hidratación, y a ambas temperaturas el efecto comenzó antes que el de la dosis más alta (6 min); en la temperatura de 10 a 15, ya había un aumento del 60 % en la hidratación en el punto de tiempo de una hora para la dosis de 4 min de dióxido de carbono. Para el mortero STMB, las dosis intermedia y alta produjeron unos aumentos moderados de la hidratación aproximadamente equivalentes a ambas temperaturas, pero el inicio del efecto fue notablemente diferente para las dos dosis a la temperatura más baja, comenzando aproximadamente a las 9 horas para la dosis de 6 min y a las 17 horas para la dosis de 4 min.

- 10 En este Ejemplo se demuestra que la carbonatación de una mezcla de cemento puede tener un efecto sobre el desarrollo temprano de la resistencia en hormigones que se van a procesar por lotes y utilizar a bajas temperaturas, y que la dosis óptima puede depender de la temperatura y del tipo de cemento. Además, el momento de inicio del desarrollo de una mayor resistencia puede manipularse manipulando la dosis en algunas circunstancias.

15 **Ejemplo 41**

En este Ejemplo se demuestra la formación *in situ* de nanocristales de carbonato de calcio en condiciones específicas de carbonatación en el cemento.

20 **Cemento para pozos petrolíferos**

Se realizaron experimentos a escala de laboratorio en un sistema modelo para comprender mejor los impactos del dióxido de carbono. En las pruebas se utilizó cemento para pozos petrolíferos debido a su bajo contenido inicial de calcita (por debajo de los límites de detección en la DRX). Por lo tanto, pudieron distinguirse fácilmente pequeñas cantidades del desarrollo de productos de reacción del carbonato.

- 30 Las muestras se generaron mezclando 250 g de agua con 500 g de cemento para pozos petrolíferos sin tratar en una batidora durante 30 s. La batidora se inundó con un suministro continuo de CO₂ gaseoso al 100 % durante un minuto durante el mezclado. Las muestras se congelaron instantáneamente con nitrógeno líquido tras el periodo de mezclado y, a continuación, se liofilizaron para detener las reacciones de hidratación y de carbonatación. La hidratación temprana se analizó tomando muestras del lote en cinco momentos distintos (t = inmediatamente después del final del mezclado, 5 min, 4 horas, 10 horas y 24 horas después del final del mezclado). También se preparó un serie paralela de muestras para un sistema no carbonatado (de control). Se empleó una difracción cuantitativa de rayos X (QXRD) para caracterizar los constituyentes de las muestras preparadas. El carbono inorgánico total se utilizó para cuantificar el dióxido de carbono.

Cemento GU

- 40 Se realizó una investigación para caracterizar los productos de reacción del carbonato mediante la carbonatación de un sistema de cemento simple. Se consiguió un alto grado de carbonatación para permitir la observación directa de los productos de reacción cristalinos.

En el experimento se mezclaron 450 g de cemento GU y 50 g de agua destilada desionizada en una bolsa de plástico

hermética y resellable. Los materiales se agitaron a mano a través de la bolsa hasta que se mezclaron homogéneamente y el cemento se humedeció (30 s). La bolsa se infló con gas CO_2 al 100 % y se selló. Se dejó que el sistema reaccionara hasta que todo el dióxido de carbono hubiera reaccionado (durante varios minutos) y que la bolsa se hubiera desinflado. Este proceso se repitió un total de diez veces a lo largo de 1 hora. Se preparó una la

Resultados de la QXRD del cemento para pozos petrolíferos

Los resultados de la QXRD de las muestras de cemento para pozos petrolíferos se resumen en la Tabla 55 (muestras hidratadas) y en la Tabla 56 (series carbonatadas). Los resultados se presentan como fracción de masa porcentual por masa inicial normalizada. El análisis estadístico de los datos recogidos mediante la QXRD sugirió que el porcentaje de error está controlado por el error analítico. Se utilizó una ecuación que representaba esta distribución para calcular todos los errores tomando como base la abundancia absoluta. Se realizó un seguimiento de la evolución de C3S, calcita, etringita, hidróxido de calcio y contenido amorfo. La identificación Rietveld del contenido amorfo se interpretó, en parte, como representación del gel C-S-H. Mientras que el contenido amorfo de las muestras anhidras no se ajustaría a esta interpretación, el desarrollo del C-S-H estaría generalmente asociado al aumento neto del contenido amorfo a medida que avanza la hidratación.

Tabla 55

Sumario de la abundancia de fases (% en peso) mediante QXRD para la serie de cementos hidratados para pozos petrolíferos

Fase	Anhidro	0 min	5 min	4 horas	10 horas	24 horas
C3S	$54,9 \pm 1,2$	$54,5 \pm 1,2$	$53,4 \pm 1,2$	$49,9 \pm 1,2$	$46,0 \pm 1,2$	$26,4 \pm 1,0$
Calcita	n/d	n/d	n/d	n/d	$0,9 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,4$
Amorfo	$8,6 \pm 0,7$	$8,39 \pm 0,7$	$7,6 \pm 0,7$	$13,5 \pm 0,8$	$20,0 \pm 0,9$	$34,1 \pm 1,1$
Etringita	$0,6 \pm 0,3$	$0,7 \pm 0,4$	$1,1 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,4$	$1,8 \pm 0,5$	$4,4 \pm 0,6$
Yeso	$4,0 \pm 0,6$	$3,3 \pm 0,6$	$4,5 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,6$	$3,3 \pm 0,6$	$0,9 \pm 0,4$
Ca(OH)_2	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	$6,0 \pm 0,7$

Tabla 56

Sumario de la abundancia de fases (% en peso) mediante QXRD para la serie de cementos carbonatados para pozos petrolíferos

Fase	Anhidro	0 min	5 min	4 horas	10 horas	24 horas
C3S	$54,9 \pm 1,2$	$53,7 \pm 1,2$	$52,3 \pm 1,2$	$51,6 \pm 1,2$	$42,3 \pm 1,1$	$27,9 \pm 1,0$
Calcita	n/d	$0,8 \pm 0,4$	$0,5 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,5$
Amorfo	$8,6 \pm 0,7$	$10,4 \pm 0,8$	$11,2 \pm 0,8$	$13,0 \pm 0,8$	$25,4 \pm 1,0$	$38,3 \pm 1,1$
Etringita	$0,6 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,3$	$0,5 \pm 0,3$	$0,7 \pm 0,4$	$1,1 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,5$
Yeso	$4,0 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,6$	$4,5 \pm 0,6$	$4,3 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$	n/d
Ca(OH)_2	n/d	n/d	n/d	n/d	$1,0 \pm 0,4$	$5,2 \pm 0,6$

El progreso de la disolución y reacción del C3S se controla mediante el cambio de su abundancia relativa (disminución) con el tiempo. El caso carbonatado se muestra paralelo al caso hidratado en donde los dos valores son equivalentes dentro del intervalo de error en la medición inicial, 5 min y 4 horas. Una mayor cantidad de C3S ha reaccionado en la muestra carbonatada (potencialmente un 8 % más) a las 10 horas, pero a las 24 horas el C3S en las dos condiciones es de nuevo funcionalmente equivalente. Se demuestra que el dióxido de carbono tiene únicamente un pequeño efecto en la disolución total del C3S o en la cinética de reacción, dado que la reacción total del C3S fue prácticamente la misma. La mayor reacción del C3S en el cemento carbonatado para pozos petrolíferos observada a las 10 horas mediante la QXRD concordaba con la calorimetría de campo del hormigón premezclado (Ejemplos anteriores) en donde se liberaba mayor energía en el intervalo de las 7 a las 11 horas. Esta fase de hidratación está asociada con el final del periodo de aceleración, cuando la hidratación inicial del silicato comienza a ralentizarse. Es posible que los productos de la reacción del carbonato estén proporcionando un papel de siembra para impulsar la hidratación o estén afectando de otro modo a la cinética de la reacción de hidratación.

Las concentraciones iniciales de calcita en el cemento anhidro estaban por debajo de los límites de detección. La calcita aparece en el sistema hidratado después de 600 min a un nivel del $0,90 \pm 0,40$ %. Se mantuvo sin cambios hasta el final del análisis. El gran error relativo (44 %) se debe a la incertidumbre a unas concentraciones tan bajas de calcita. En la muestra carbonatada se observa un aumento de la concentración de calcita inmediatamente después de la inyección de dióxido de carbono gaseoso al $0,80 \pm 0,37$ % en peso de calcita. Este nivel de calcita permanece relativamente constante en el sistema a lo largo de las primeras 4 horas. En la muestra a las 10 horas, la concentración de calcita aumenta hasta el $1,52 \pm 0,45$ % en peso antes de alcanzar finalmente su concentración máxima observada del $2,83 \pm 0,55$ % a las 24 horas. La cantidad de calcita en el sistema parece aumentar, pero se reconoce que no se añadió dióxido de carbono adicional al sistema tras el mezclado inicial. El aumento observado con el tiempo es

probablemente atribuible a que los productos de reacción de la calcita eran inicialmente poco cristalinos o demasiado pequeños (invisibles en la DRX) antes de desarrollar una mayor cristalinidad o un tamaño que permitiera detectarlos mediante la DRX.

- 5 El contenido amorfo de la muestra carbonatada es un 24 % superior al del control hidratado inmediatamente después de la carbonatación. A los 5 min es un 47 % mayor. Se quedó un 4 % por detrás a las 4 horas antes de acelerar hasta un 27 % por delante a las 10 horas y un 12 % por delante a las 24 horas. El pequeño retraso a las 4 horas se reflejó en el contenido de C3S, cuyo consumo se mostró ligeramente menor para la pasta carbonatada a las 4 horas. El contenido amorfo, dado que sería paralelo al contenido de C-S-H y se tomaría como un sustituto del progreso de la hidratación, refleja algunas de las observaciones sobre el terreno. La calorimetría sobre el terreno proporcionó pruebas de un giro en donde la hidratación estaba ligeramente por detrás a las 4 horas y notablemente por delante a las 10 horas antes de mostrar un beneficio de resistencia a las 24 horas.

- 15 Se comprobó que el contenido de etringita de la pasta carbonatada era menor al de la pasta hidratada. Si la cuantificación se considera como un aumento neto sobre la traza encontrada en el estado anhidro, entonces la pasta carbonatada contenía un 90 % menos de etringita a las 4 horas, un 56 % a las 10 horas y un 49 % a las 24 horas. La implicación es que la etringita tardó más en formarse en la muestra carbonatada.

- 20 El contenido de yeso de ambas muestras no cambió de forma concluyente a lo largo de las cuatro horas de muestreo. El descenso, a través del consumo durante la hidratación, fue mayor en la muestra carbonatada que en la muestra hidratada. Al parecer, todo el yeso se había consumido en la muestra carbonatada a las 24 horas, pero menos del 80 % había reaccionado en la muestra hidratada.

- 25 La primera detección de hidróxido de calcio se produjo en la muestra de las 10 horas, pero únicamente en la pasta carbonatada. A las 24 horas, la muestra carbonatada tenía el 88 % de la portlandita que se detectó en la pasta de control.

- 30 La pequeña dosis de dióxido de carbono crea nanocalcita, pero no impide que se produzcan las vías convencionales de la reacción de hidratación. Los silicatos de calcio continúan hidratándose, mientras que la portlandita y la etringita continúan formándose.

Análisis del carbono inorgánico total del cemento para pozos petrolíferos

- 35 Se realizaron mediciones del carbono inorgánico total (TIC) para los tres estados (anhidro, hidratado y carbonatado). El análisis daría cuenta del carbono en nanopartículas amorfas de calcita que serían insuficientemente cristalinas y/o demasiado pequeñas para ser observadas mediante la QXRD.

- 40 El TIC del cemento anhidro fue del 0,098 %. Tras el tratamiento de carbonatación, el carbono había aumentado hasta el 0,264 %. En un curado equivalente, el contenido de carbono de la muestra hidratada era del 0,097 %. y sin cambios con respecto a la muestra anhidra. Los datos del TIC demuestran que el dióxido de carbono había entrado en el sistema incluso si la QXRD estaba detectando únicamente parte del valor definitivo. Se observó un aumento neto del 0,166 %. Esto representa un 0,377 % de CO₂ en peso de cemento.

MEB del cemento GU

- 45 La producción de una muestra de pasta muy carbonatada consiguió aumentar el contenido de calcita (normalizado con respecto al estado anhidro) del 6,7 % en la anhidra al 37,7 % en la carbonatada. La conversión de la calcita en % de CaCO₃ a % de CO₂, muestra que la muestra carbonatada tenía un contenido neto de CO₂ del 13,6 % en peso del cemento anhidro. Este nivel de carbonatación garantiza que los productos de reacción se encuentren en una abundancia considerablemente mayor que la alcanzada en el caso industrial. No obstante, sirve como un sistema eficaz para el análisis, dado que los productos de reacción son fáciles de observar en un sistema de pasta pura que tiene un alto grado de reacción.

- 55 La microscopia electrónica de la muestra carbonatada (mostrada en la micrografía de la **Figura 137**) reveló la presencia de numerosos nanocristales romboédricos en el sistema. La dimensión primaria de las partículas superaba generalmente los 10 nm y era predominantemente menor de 150 nm. Los tamaños de las partículas eran demasiado pequeños para permitir una evaluación química directa eficaz mediante una EDS. Sin embargo, la geometría de las partículas es coherente con la calcita, y la QXRD identificó la presencia de grandes cantidades de calcita, por lo que se llega a la conclusión de que el proceso de carbonatación ha logrado la formación *in situ* de calcita nanocristalina.
- 60 El método de producción (carbonatación amplia y agresiva) dio como resultado productos de reacción probablemente de mayor tamaño y en mayores cantidades que los que se habrían encontrado en las muestras industriales.

- 65 Este Ejemplo reveló que las vías de hidratación eran prácticamente las mismas con y sin carbonatación. Se formaron las fases de hidratación convencionales después de que se produjera la reacción de carbonatación. El impacto de la carbonatación puede haber sido aumentar la formación de C-S-H en el plazo de 10 a 24 horas. En el proceso se formó *in situ* carbonato cálcico nanocristalino distribuido homogéneamente.

Ejemplo 42

En este Ejemplo se describe un sistema de inyección de CO₂ líquido, por ejemplo, para adaptarse a las plantas de hormigón premezclado en seco por lotes para una administración eficaz de CO₂ a los camiones de hormigón y una instalación sin fisuras de los componentes. El sistema se aplica a las operaciones que utilizan un manguito de carga para depositar materiales en el tambor de un camión hormigonera; un manguito de carga es generalmente un canal flexible y cerrado que puede colocarse en la tolva del camión hormigonera y guía los materiales hacia el tambor del camión.

El sistema utiliza componentes adicionales a los componentes del manguito convencional.

Descripciones de los componentes adicionales:

Tubo rígido, por ejemplo, tubo de acero (por ejemplo, DI = 5,71 cm (2 ¼"))

Manguera flexible, por ejemplo, manguera flexible de goma (por ejemplo, DI = 3,17 cm (1½"))

Manguera con camisa de vacío (por ejemplo, 1,9 cm (DI = ¾"))

electroválvula neumática de 5 puertos y 4 vías

Varilla telescópica del cilindro neumático Deslizador de plástico

codo giratorio de 1,9 cm (¾") de 90° FNPT

Manguera neumática de goma de 0,63 cm (¼") (x2)

El sistema de inyección de CO₂ líquido incluye una manguera flexible, por ejemplo, una manguera de goma, alojada en un tubo de acero. La manguera flexible puede estar hecha de cualquier material adecuado que posea la flexibilidad suficiente para las operaciones del sistema, así como la capacidad de soportar las temperaturas del dióxido de carbono sólido y gaseoso que pasan a su través. El tubo de acero se alinea de modo que no se extienda más allá del fondo del contenedor de áridos (véase la **Figura 135**), sin embargo, la manguera se extiende a través del manguito de carga y hacia el conducto del camión hormigonera mediante la acción de una varilla telescópica del cilindro neumático (o dispositivo giratorio) u otro dispositivo adecuado para extender la manguera durante la inyección. Una vez extendida en la tolva del camión de hormigón, la propia manguera se alinea con el eje central del camión para maximizar la captación de CO₂ del hormigón, pero no tanto como para estar en contacto con las destructoras aletas del camión.

La tubería de acero se instala directamente encima del manguito de carga y se monta en, o cerca de, la tolva de cemento. Véase la **Figura 135** para hacerse una idea de dónde debe montarse el tubo de acero.

La tubería se coloca de forma que quede libre de la caída de materiales que entran en el camión a través del manguito de carga. En el interior del tubo de acero hay un cilindro telescópico neumático y una varilla que determina la posición de la manguera flexible. La varilla está controlada por una electroválvula neumática que permite el flujo de aire al cilindro neumático en dos puertos separados, uno para retraer la varilla y el otro para extenderla. La varilla está conectada a una corredera de plástico que se asienta en el interior del tubo de acero. Hay un codo giratorio NPT hembra de 90° instalado en la corredera de plástico que se utilizará para conectar el flujo de CO₂ del sistema de suministro de CO₂ a la manguera flexible de goma. Hay una larga ranura abierta en el lateral del tubo de acero para permitir que la línea de CO₂ siga a la manguera de goma hasta su posición extendida. Se utiliza una manguera con camisa de vacío desde el codo para garantizar que la línea de CO₂ conectada a la corredera de plástico permanezca flexible incluso después de la inyección.

Debido al frío extremo del CO₂ líquido, una línea hidráulica normal se congelaría durante la inyección y se volvería completamente rígida. La manguera con camisa de vacío es ligeramente más larga que la distancia que debe recorrer la manguera de goma desde su posición replegada hasta la extendida, después de esto se permite una línea de cobre o una manguera hidráulica aislada en el sistema de suministro de CO₂.

El sistema de inyección puede controlarse manualmente o mediante cualquier sistema de control adecuado, tal como un sistema lógico directo, como se describe a continuación.

Lógica directa

La electroválvula neumática tiene un puerto de entrada y dos puertos de salida. Cada puerto de salida controla un extremo del cilindro telescópico neumático y están cableados a un interruptor de relé unipolar de doble efecto (SPDT). Cuando el interruptor de relé no tiene corriente, permite el flujo de aire a través de la salida de la primera electroválvula y mantiene retraída la varilla del cilindro neumático. El usuario envía una señal continua de 120VAC desde su sistema al sistema de inyección para iniciar la secuencia de inyección. Una vez que el sistema de inyección recibe la señal, el interruptor de relé recibe alimentación, cierra un puerto de salida y abre el otro. Esto hace que el aire fluya a través de la segunda salida de la electroválvula neumática y permite que la varilla se extienda. Se utiliza un retardo en la receta de la mezcla para garantizar que el CO₂ no comience a inyectarse hasta que la varilla esté completamente extendida y la manguera flexible de goma esté en su posición correcta dentro del camión. En este punto, el sistema de inyección comienza a permitir el flujo de CO₂ a través del sistema y hacia el camión de hormigón. Véase la **Figura 136** para ver un esquema de la varilla del cilindro neumático dentro del tubo de acero en su posición retraída y extendida. Cabe

señalar que también podrían utilizarse solenoides giratorios, u otro dispositivo adecuado, para extender la manguera flexible de goma hacia el interior del camión, por ejemplo, si el espacio es un problema. Este diseño puede adaptarse a medida para satisfacer los requisitos de la mayoría, si no de todos, los productores de premezclas. Si la limpieza lo permite, la electroválvula neumática también puede montarse fuera de la tubería de acero y colocarse a lo largo de ella para reducir la longitud.

El sistema del usuario cuenta las señales de pulso que se envían desde el sistema de inyección y que equivalen a una masa predeterminada de CO₂. Una vez alcanzada la dosis necesaria de CO₂, el usuario cesa la señal continua de 120VAC y el interruptor de relé pierde la alimentación. Esto hace que la varilla del cilindro neumático se retraiga y retire la manguera flexible del camión hormigonera. La secuencia de inyección no se completa hasta que la barra se retrae lo suficiente como para quedar fuera del camino de los camiones y de los materiales que caen. Esto se consigue mediante un mensaje visible en la pantalla de la interfaz hombre-máquina (IHM) cuando la varilla retraída activa un sensor de proximidad (o dependiente del tiempo).

Secuencia de inyección

La electroválvula neumática se activa una vez que todos los materiales han pasado por el manguito de carga y han entrado en el camión hormigonera. Normalmente es la última etapa de la secuencia de procesamiento por lotes. Por lo general, la secuencia de inyección no se completa hasta que la varilla se ha retraído lo suficiente y se ha apartado del camino de otros materiales que entran en el manguito de carga. En ese momento se mostrará un mensaje al dosificador de la planta indicando que la carga ha finalizado y que el conductor puede salir de debajo de el manguito de carga.

Secuencia de inyección típica:

1. Un camión de hormigón se coloca debajo del manguito de carga y recibe todos sus materiales (áridos, cemento, agua, etc.)
2. El usuario envía una señal continua de 120VAC al sistema de inyección una vez que se han cargado todos los materiales para iniciar la inyección de CO₂
3. El sistema de inyección utiliza un interruptor de relé unipolar de doble efecto (SPDT) para controlar una válvula solenoide neumática
 - a. Cuando el interruptor del relé está normalmente cerrado, un puerto de la varilla del cilindro neumático recibe alimentación para permanecer en su posición retraída
 - b. Una vez recibida la señal del usuario (señal continua de 120VAC que permanece encendida durante toda la duración de la inyección), el interruptor de relé se abre y envía alimentación al otro puerto de la varilla del cilindro neumático para extender completamente la varilla
4. La varilla del cilindro neumático mueve la corredera de plástico dentro del tubo de acero, que empuja la manguera de goma a través de la manguito y hacia la tolva del camión
5. Tras un retardo predeterminado (generalmente, el tiempo que tarda la varilla en extenderse completamente), el sistema de inyección comienza a inyectar CO₂ en el camión
6. El usuario recibe pulsos que equivalen a una masa de CO₂ inyectada. Una vez que el camión ha recibido la dosis necesaria, la señal continua de 120VAC del usuario se elimina y el interruptor del relé vuelve a estar normalmente cerrado
7. La varilla del cilindro neumático se retrae, volviendo a introducir la manguera de goma en el tubo de acero, lejos de cualquier material que pueda caer en el manguito
8. Una vez que la varilla esté suficientemente retraída, aparece un mensaje "Inyección completada" en la pantalla de la IHM indicando al conductor que puede sacar su camión de debajo del manguito

Ejemplo 43

En este Ejemplo se proporciona información sobre la composición del agua de los poros en lechadas de cemento tratadas con diversas cantidades de dióxido de carbono para carbonatar la lechada.

Se hizo una lechada combinando 500 g de cemento y 500 g de agua en una batidora y mezclando durante 30 s. La combinación de cemento y agua se consideró el inicio del experimento. En el caso del control y de las dosis más bajas de CO₂, las muestras se extrajeron 2 min después del inicio del experimento. En caso necesario, se introdujo CO₂ en el espacio de cabeza de la mezcladora durante 2 min mientras se mezclaba. Esto ocurrió 5 min después de que comenzara el experimento. En todos los casos, se extrajeron muestras de la batidora a los 8 y 30 min del inicio del experimento, que representa el periodo posterior a la carbonatación. Las muestras se filtraron a través de un cartucho filtrante de 0,22 µm para eliminar las partículas, produciendo un filtrado claro. El filtrado se acidificó con ácido nítrico y se sometió a un análisis químico.

Los resultados se muestran en las **Figuras 138 y 139**. La concentración de silicio del agua de los poros en un punto temporal temprano (8 min) aumentó al aumentar la dosis de dióxido de carbono; incluso una dosis de dióxido de

carbono tan baja como del 0,05 % en pdc produjo un aumento notable de la concentración de silicio en el agua de los poros en ese momento; sin embargo, a los 30 min, la concentración de silicio en el agua de los poros era prácticamente la misma independientemente de la dosis de dióxido de carbono utilizada. Las curvas de potencia se desplazaron generalmente hacia la izquierda al aumentar la dosis de dióxido de carbono.

Ejemplo 44

En este Ejemplo, se examinaron los efectos de diferentes grados de carbonatación sobre el tiempo de fraguado temprano y tardío en dos tipos diferentes de cemento.

El diseño de la mezcla era: 2700g de arena, 1070 g de cemento y 535 g de agua. El procedimiento de mezclado fue el siguiente: Añadir arena y agua: mezclar 30 s; añadir la mitad del cemento: mezclar 30 s; añadir la otra mitad de cemento: mezclar 30 s; mezclar durante 2 min más aplicando CO₂, si fuera necesario. Se aplicó CO₂ a un caudal de 20 SLPM durante periodos de 15-120 s para conseguir el nivel de carbonatación deseado. Procedimiento de ensayo: Transferir toda la mezcla al cilindro de tiempo de fraguado y dejar reposar durante ~2 h; realizar la prueba de tiempo de fraguado estándar de acuerdo con la norma ASTM C40.

Los resultados se muestran en las Figuras 140 y 141. Tanto el fraguado inicial (**Figura 140**) como el final (**Figura 141**) se aceleraron con la carbonatación, y, en general, cuanto mayor sea el grado de carbonatación, mayor será la aceleración del fraguado. Esto fue así tanto para el cemento Illinois Product como para el cemento St. Mary's Bowmanville, aunque la magnitud del efecto fue diferente para cada uno.

En este Ejemplo se ilustra que la carbonatación de una mezcla de cemento durante el mezclado puede acelerar el fraguado de una manera que depende generalmente del grado de carbonatación, y también que la magnitud del efecto sobre el tiempo de fraguado varía en función del tipo de cemento utilizado.

Ejemplo 45

En este Ejemplo se investigaron los efectos de la adición de un MCS a las mezclas carbonatadas.

En una primera prueba, el ligante del diseño de la mezcla era únicamente cemento: 1350 g de arena; 535 g de cemento; 241 g de agua; 3 ml de aditivo ADVA 140. En una segunda prueba, el ligante del diseño de la mezcla era cemento y cenizas volantes: 8100 g de arena; 2407 g de cemento; 802,5 g de cenizas volantes de clase C; 1445 g de agua; 8,4 ml de aditivo Zyla 620. En cada caso, se utilizaron dos cementos diferentes. Las mezclas se carbonataron con tres dosis diferentes de dióxido de carbono, y la resistencia a la compresión a las 24 horas se comparó con la de la mezcla no carbonatada.

En las mezclas con cemento únicamente como ligante, todas las dosis de dióxido de carbono dieron como resultado una menor resistencia a la compresión a las 24 horas en comparación con el control para ambos tipos de cemento (**Figura 142**). Por el contrario, en las mezclas con cemento y cenizas volantes de clase C como ligante, todas las dosis de dióxido de carbono dieron como resultado una mayor resistencia a la compresión a las 24 horas en comparación con el control para ambos tipos de cemento (**Figura 143**).

Este Ejemplo demuestra que el efecto del dióxido de carbono depende en gran medida de la mezcla, y, en particular, los cambios sutiles en la química de la mezcla (adición de cenizas volantes) producen cambios notables en la respuesta de resistencia a las 24 horas. Se observó una mejora de la resistencia cuando la mezcla contenía cenizas volantes.

Ejemplo 46

En este Ejemplo, se combinaron los datos de 12 ensayos industriales diferentes y se presentaron gráficamente.

Se realizaron pruebas industriales de carbonatación de mezclas de hormigón en 12 emplazamientos industriales diferentes. En la mayoría de los casos, se utilizaron al menos dos o tres dosis diferentes de dióxido de carbono;

se muestran los resultados para la mejor dosis. Por tanto, las condiciones pueden considerarse "semi-optimizadas", ya que, por lo general, no se realizó una determinación cuidadosa de la dosis óptima. Los resultados representan una variedad de modos de inyección (por ejemplo, durante el procesamiento por lotes o en un estante de lavado, dosis única o en serie); para cada modo de inyección diferente, se representan los resultados para la mejor dosis. La **Figura 144** representa los resultados de resistencia, con los valores atípicos en círculos, la banda interior más oscura representa el 50 % intermedio de los resultados, la banda exterior más oscura representa el 90 % de todos los resultados, indicándose el resultado promedio. En todos los puntos temporales (1, 3, 7 y 28 días) la resistencia promedio a la compresión del hormigón carbonatado (mejor dosis en cada ensayo; el mejor tamaño de dosis varió con el diseño de la mezcla y las condiciones del ensayo) fue entre un 8 y un 12 % mayor que el control no carbonatado. El valor atípico más alto fue de aproximadamente el 190 % de la resistencia a la compresión de control (1 día), mientras que el valor atípico más bajo fue de aproximadamente el 98 % de la resistencia a la compresión de control (1 día y 28

días). La **Figura 145** representa el asentamiento: el resultado promedio para las condiciones de CO₂ fue 1,45 cm (0,57") menor al del control, la mediana fue 1,27 cm (0,50") más baja. Esta diferencia era aceptable y entraba dentro de la variación normal. La **Figura 146** representa el aire: los resultados promedio en condiciones de CO₂ fueron un 0,40 % inferiores a los del control, la mediana fue un 0,20 % menor. Esta diferencia era aceptable y entraba dentro de la variación normal.

5

Este Ejemplo demuestra que la carbonatación de las mezclas de hormigón durante el mezclado produce sistemáticamente una mezcla que tiene una mayor resistencia a la compresión, tanto temprana como tardía, en comparación con la mezcla no carbonatada, con unas características de asentamiento y aire aceptables, siempre que se elija una dosis óptima para la mezcla y las condiciones.

10

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para carbonatar una mezcla de hormigón que comprende un tipo de cemento, que comprende administrar una dosis de dióxido de carbono a la mezcla de hormigón mientras se mezcla en una mezcladora, en donde la administración del dióxido de carbono comienza en los 3 min siguientes al inicio del mezclado de la mezcla de hormigón, en donde la duración de la administración del dióxido de carbono es menor o igual a 5 min, en donde la dosis de dióxido de carbono es del 0,01-1,0 % en peso de cemento (pdc), en donde el dióxido de carbono se administra como una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso, y en donde el flujo del dióxido de carbono sólido y gaseoso se modula para ralentizar el flujo, de modo que las partículas de dióxido de carbono sólido se aglomeren en partículas más grandes.
- 10 2. El método de la reivindicación 1, en donde la duración de la administración del dióxido de carbono es de 10 s a 4 min.
- 15 3. El método de las reivindicaciones 1 o 2, en donde la administración del dióxido de carbono comienza en el minuto siguiente al inicio del mezclado de la mezcla de hormigón.
- 20 4. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la mezcladora es una mezcladora estacionaria.
- 25 5. El método de la reivindicación 4, en donde el hormigón se transfiere de la mezcladora estacionaria a un tambor de un camión hormigonera después de administrar el dióxido de carbono en la mezcladora estacionaria.
- 30 6. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la dosis de dióxido de carbono se basa en pruebas previas de al menos tres dosis de dióxido de carbono en una pluralidad de mezclas de prueba, en donde las mezclas de prueba comprenden el tipo de cemento de la mezcla de hormigón, en donde las dosis de dióxido de carbono utilizadas en las pruebas previas son todas del 0,01-1,0 % en pdc, y la dosis de dióxido de carbono administrada al hormigón de mezcla es del 0,01-1,0 % en pdc.
- 35 7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dióxido de carbono se administra a través de un conducto a la superficie del hormigón de la mezcla.
- 40 8. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dióxido de carbono se introduce en una primera fase de mezclado del agua en la mezcla de cemento, a continuación, después de esta fase, se añade agua adicional sin dióxido de carbono.
- 45 9. Un aparato para la adición de dióxido de carbono a una mezcla que comprende cemento hidráulico mediante un método de una cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en donde el dióxido de carbono comprende una mezcla de dióxido de carbono sólido y gaseoso, aparato que comprende
 - (i) una mezcladora para mezclar la mezcla de cemento;
 - (ii) un sistema para administrar el dióxido de carbono a la superficie de la mezcla de cemento, en donde el sistema comprende un conducto que conecta operativamente la fuente y la mezcladora, un sistema dosificador para dosificar el flujo de dióxido de carbono en el conducto, y una válvula regulable para ajustar el caudal; en donde el
- 50 10. El aparato de la reivindicación 9, en donde el conducto tiene dicho diámetro expandido.
- 55 11. El aparato de la reivindicación 9 o 10 en donde el conducto tiene uno de dichos codos.
12. El aparato de una cualquiera de las realizaciones 9-11 en donde la mezcladora es una mezcladora estacionaria.
13. El aparato de una cualquiera de las reivindicaciones 9-11 en donde la mezcladora es un tambor de un camión hormigonera.

Figura 1

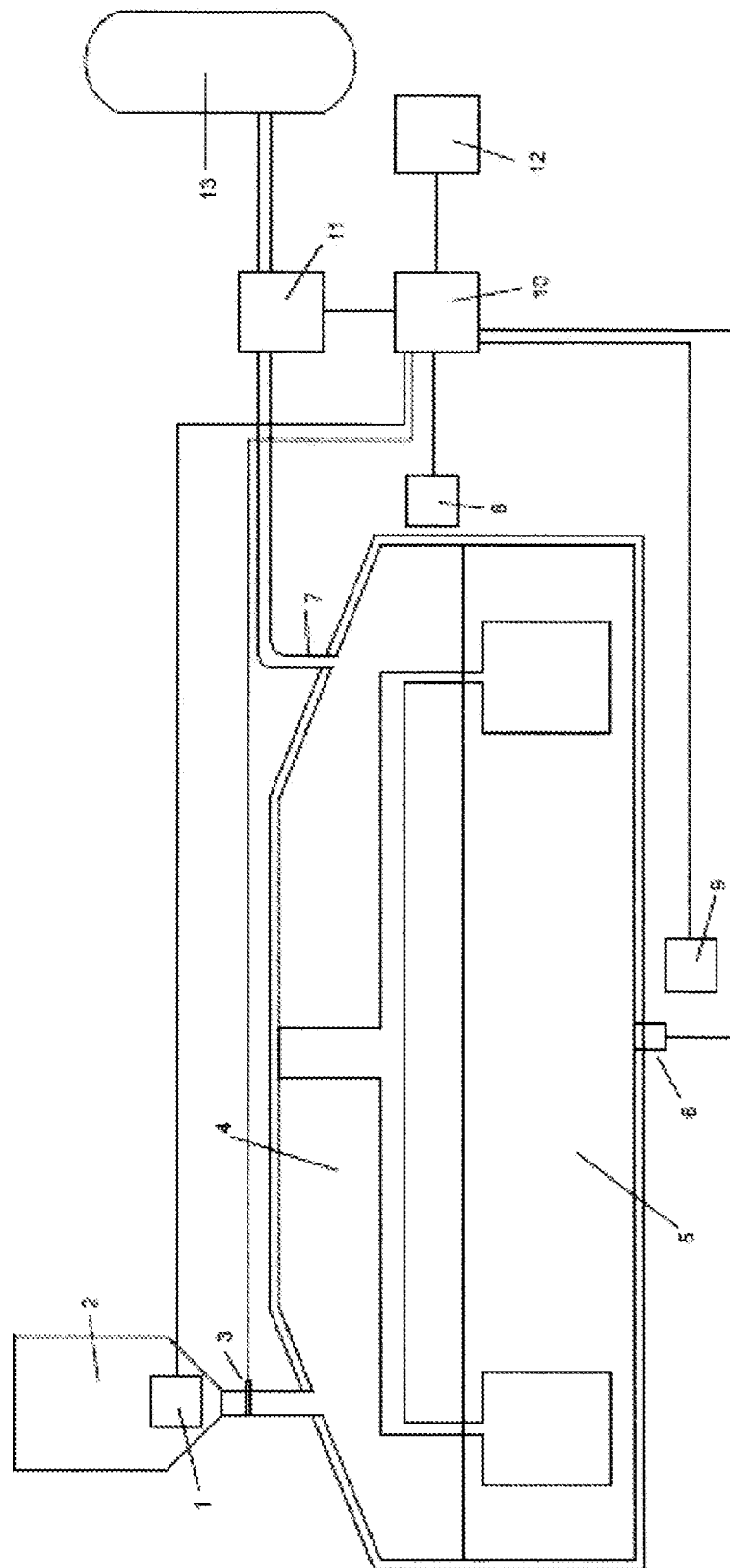


Figura 2

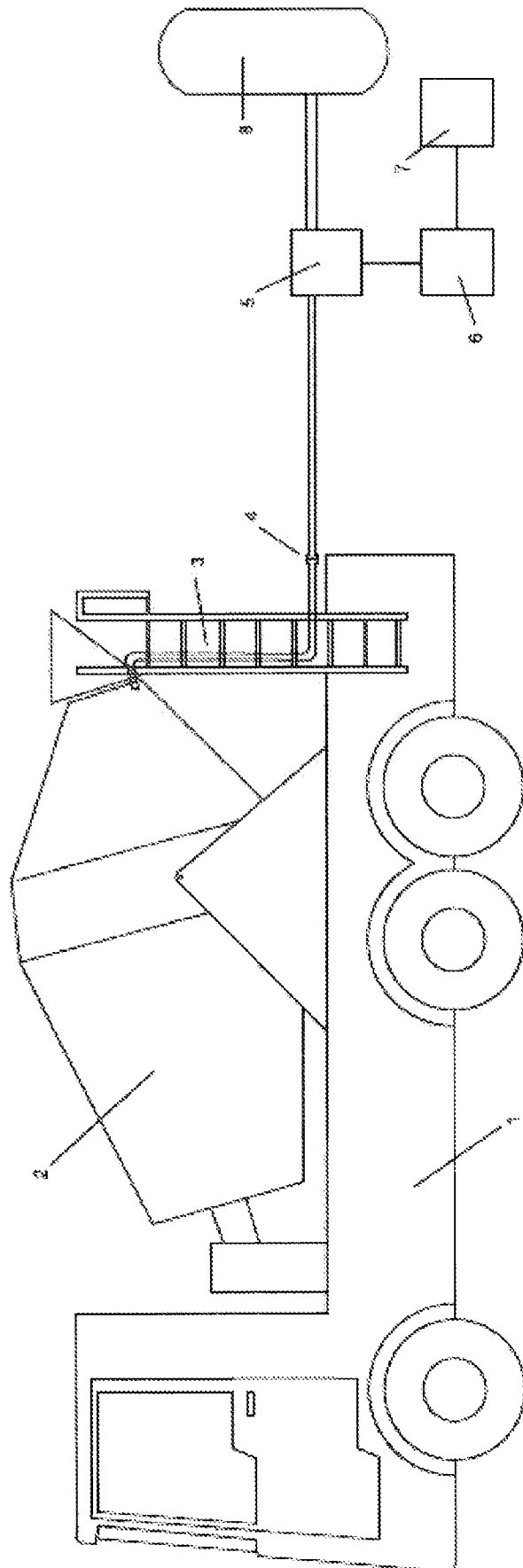


Figura 3

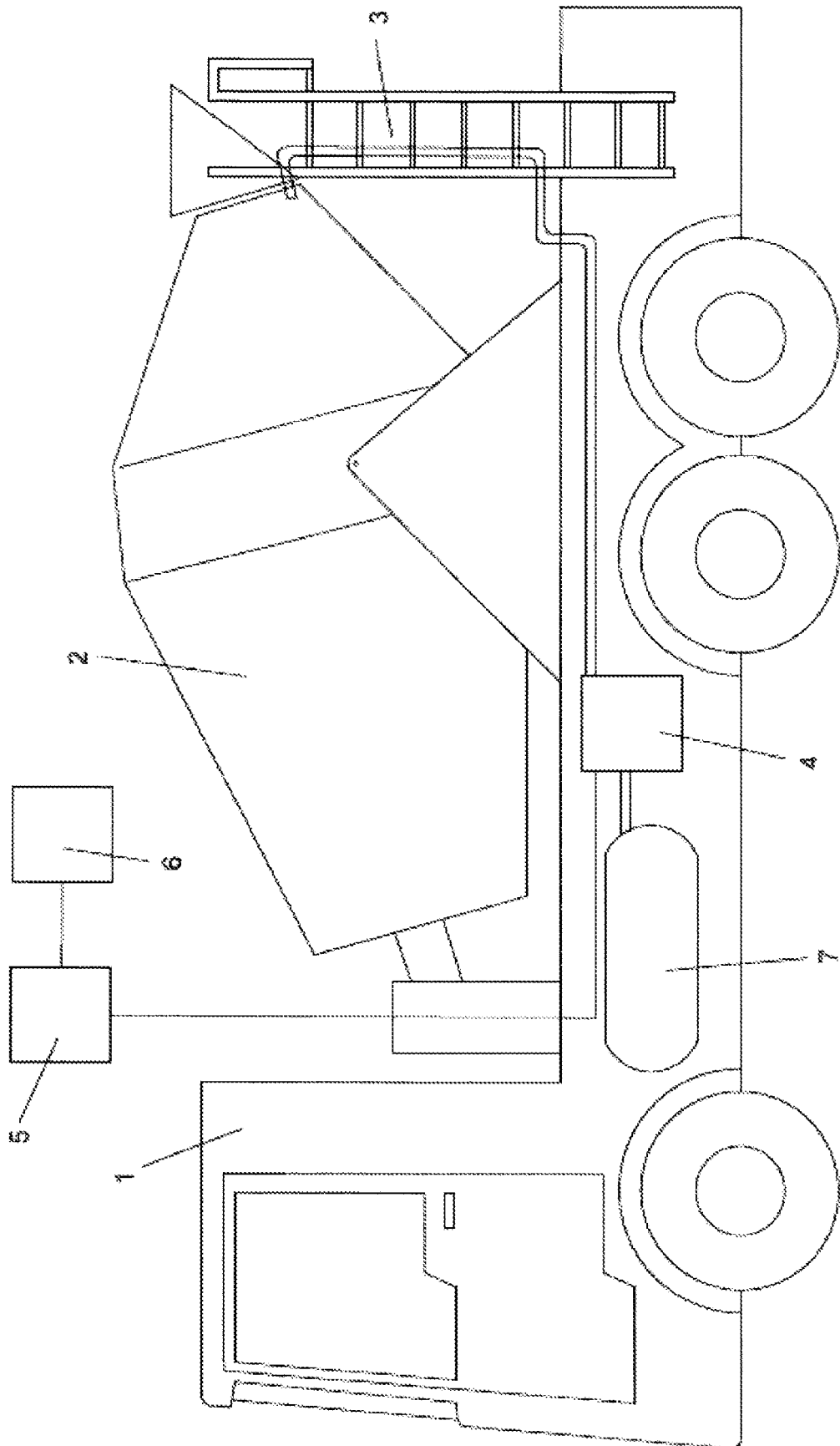


Figura 4
Gráfica de la resistencia a los 7 días alta - baja - promedio
para Quikrete premezclado en sacos

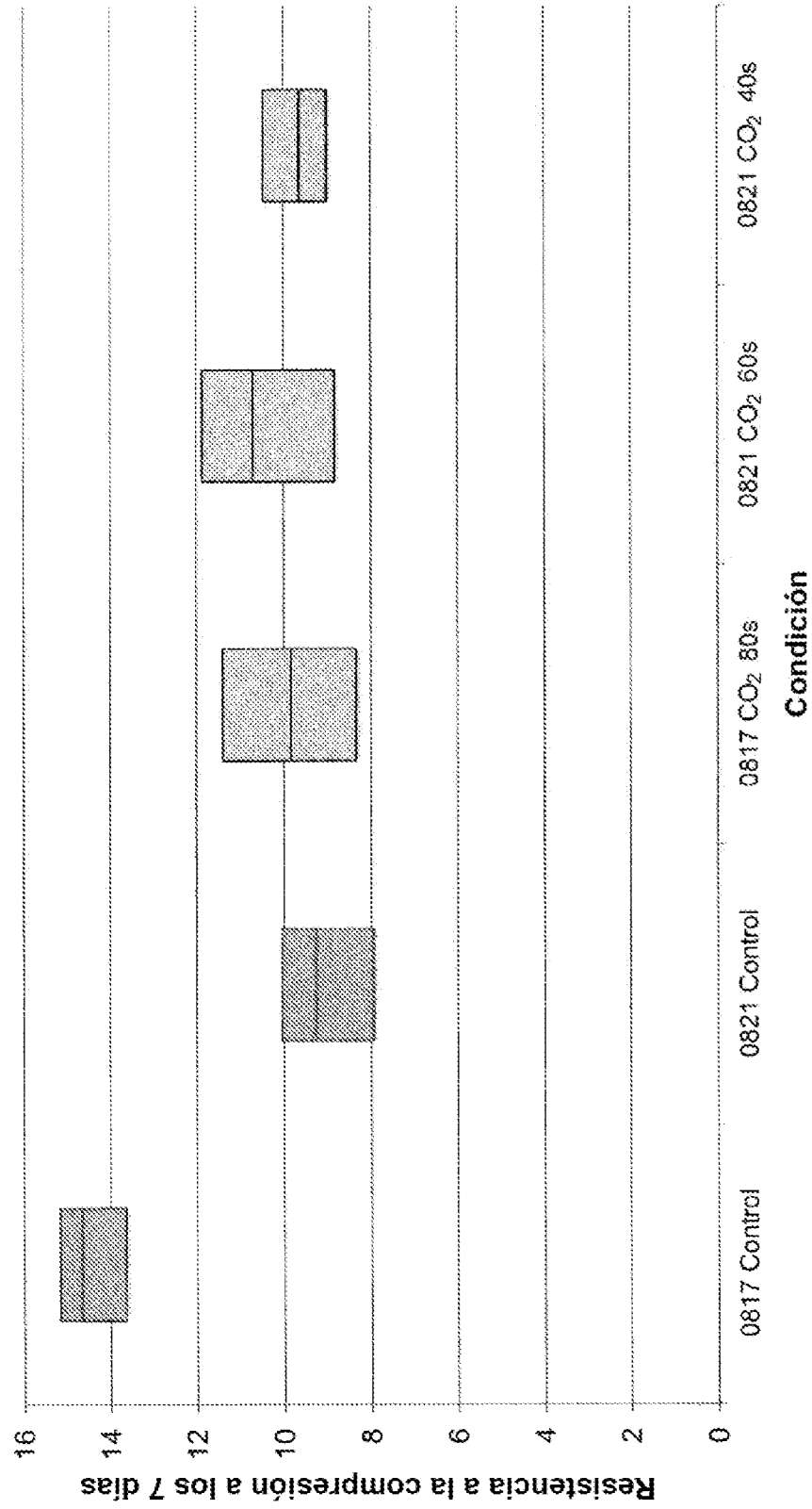


Figura 5
Gráfica de la resistencia a los 7 días alta - baja - promedio
para Shaw premezclado

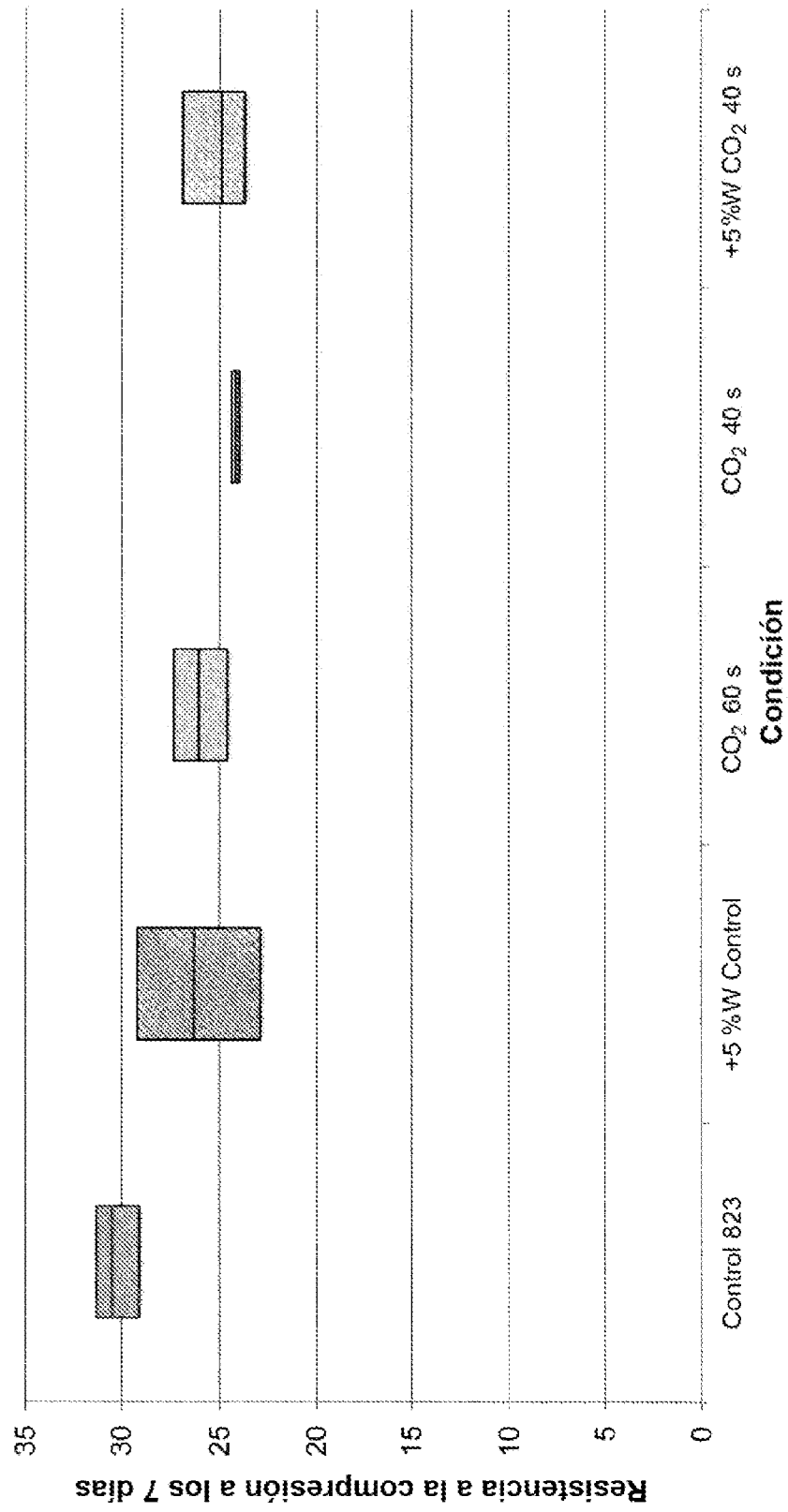


Figura 6
Gráfica de la resistencia a los 7 días alta - baja - promedio
para BOMIX premezclado

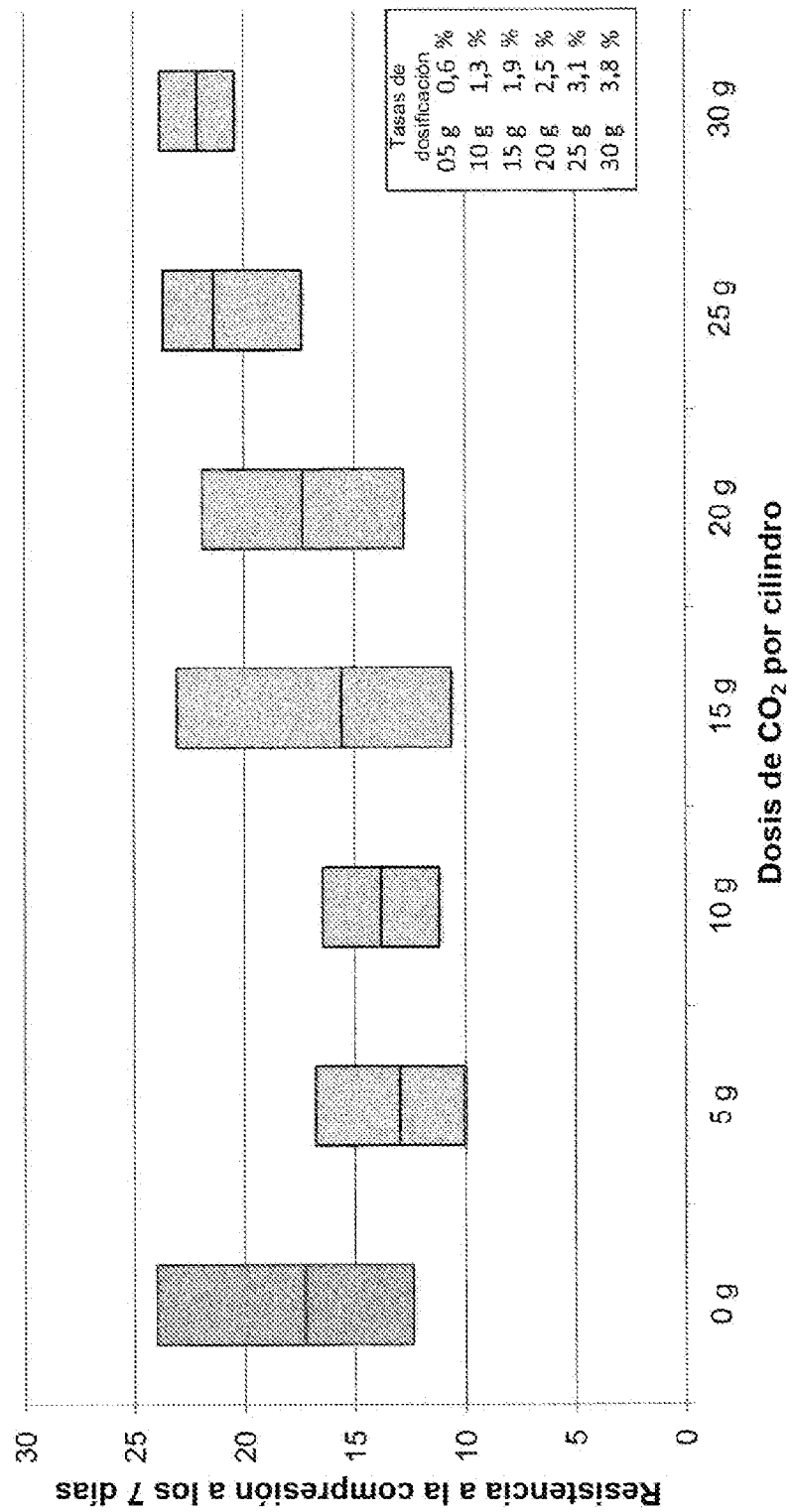


Figura 7
Gráfica de la resistencia a los 14 días
alta - baja - promedio

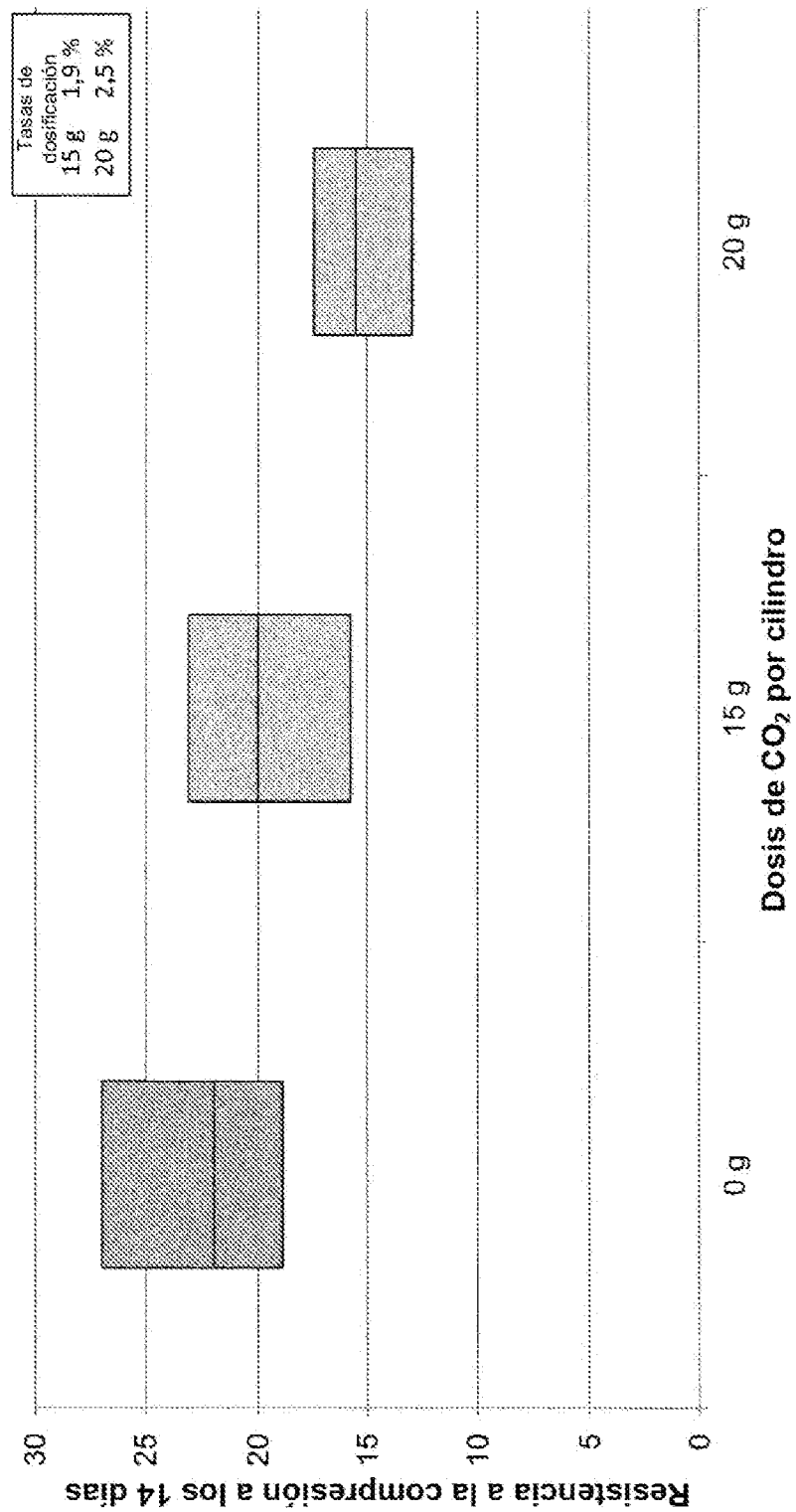


Figura 8
Gráfica de la resistencia a los 28 días alta - baja - promedio
para BOMIX premezclado

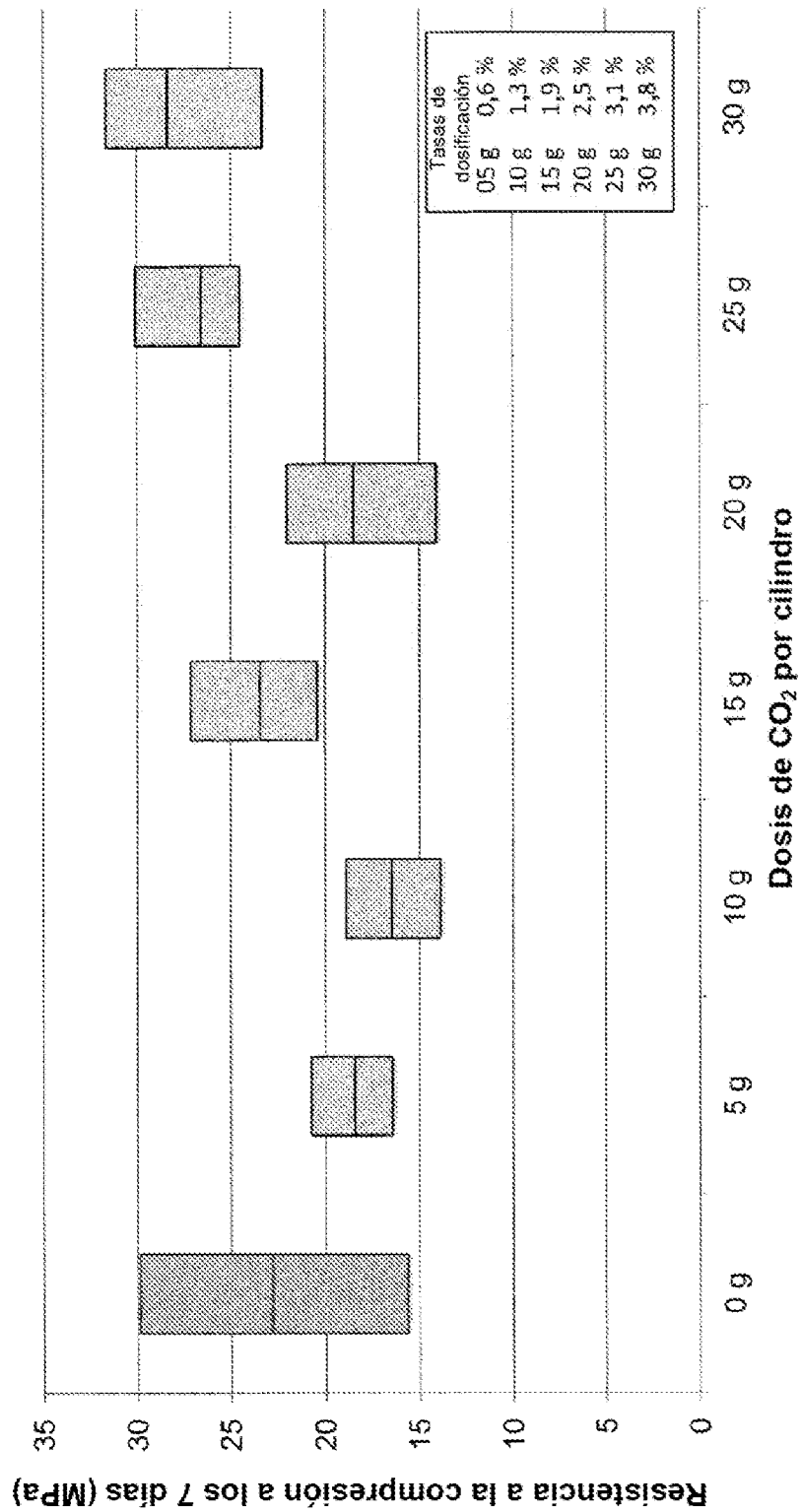


Figura 9
Desarrollo de resistencia, BOMIX

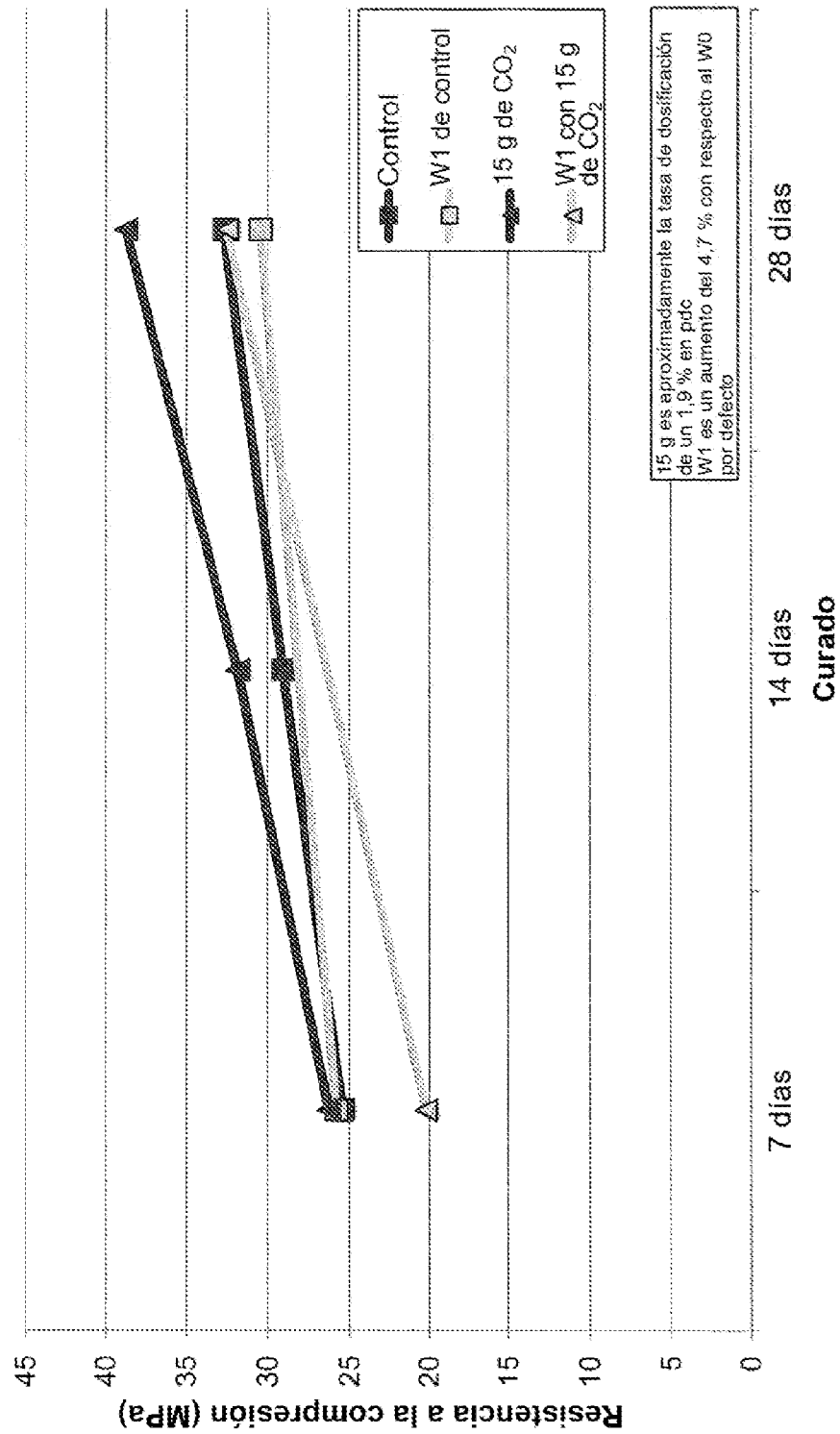


Figura 10
Desarrollo de resistencia, BOMIX

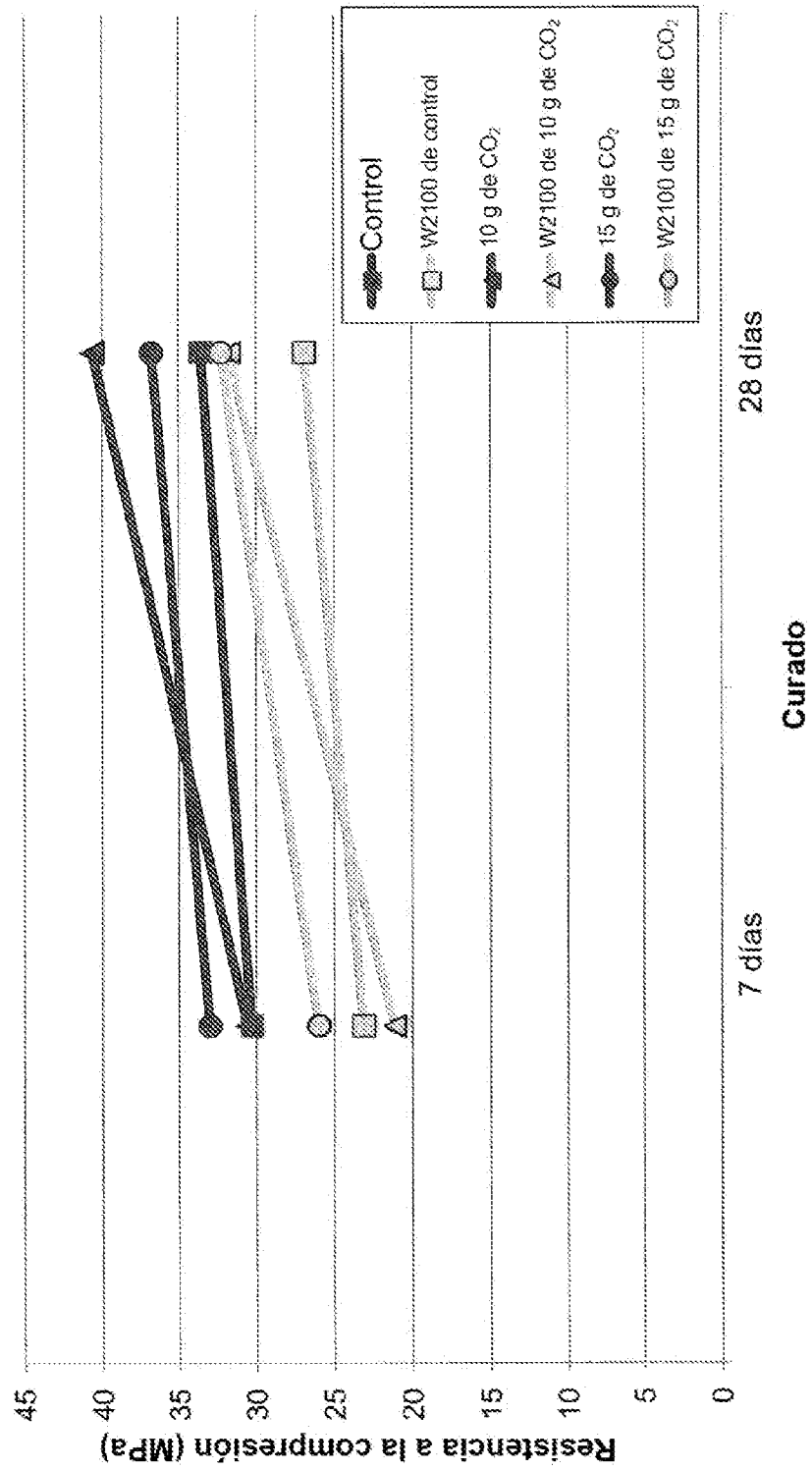


Figura 11
Resistencia a los 7 días de BOMIX
premezclado con ajuste del agua (2200 ml)

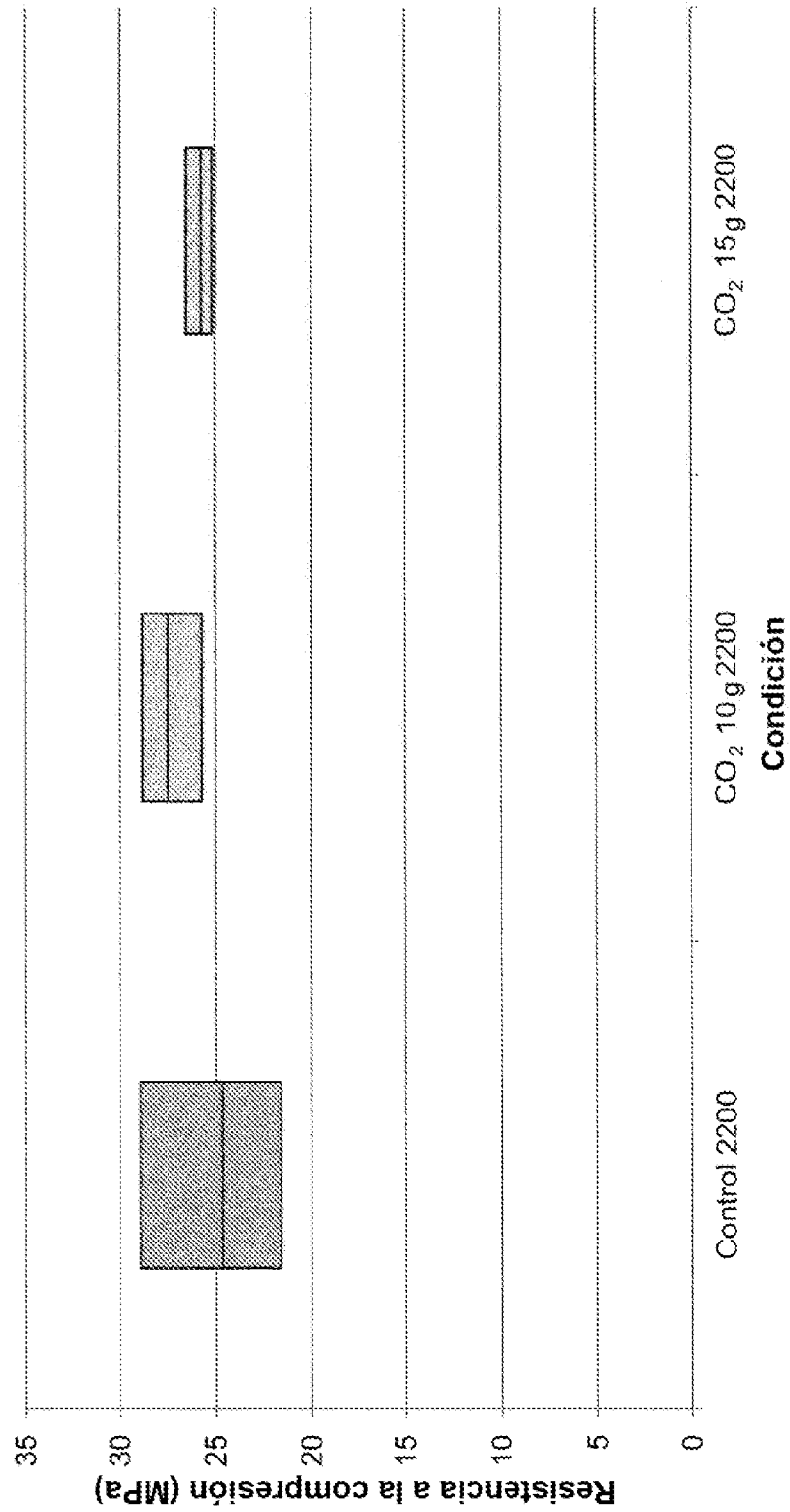


Figura 12
Resistencia a los 7 días de BOMIX
premezclado con ajuste del agua (2300 ml)

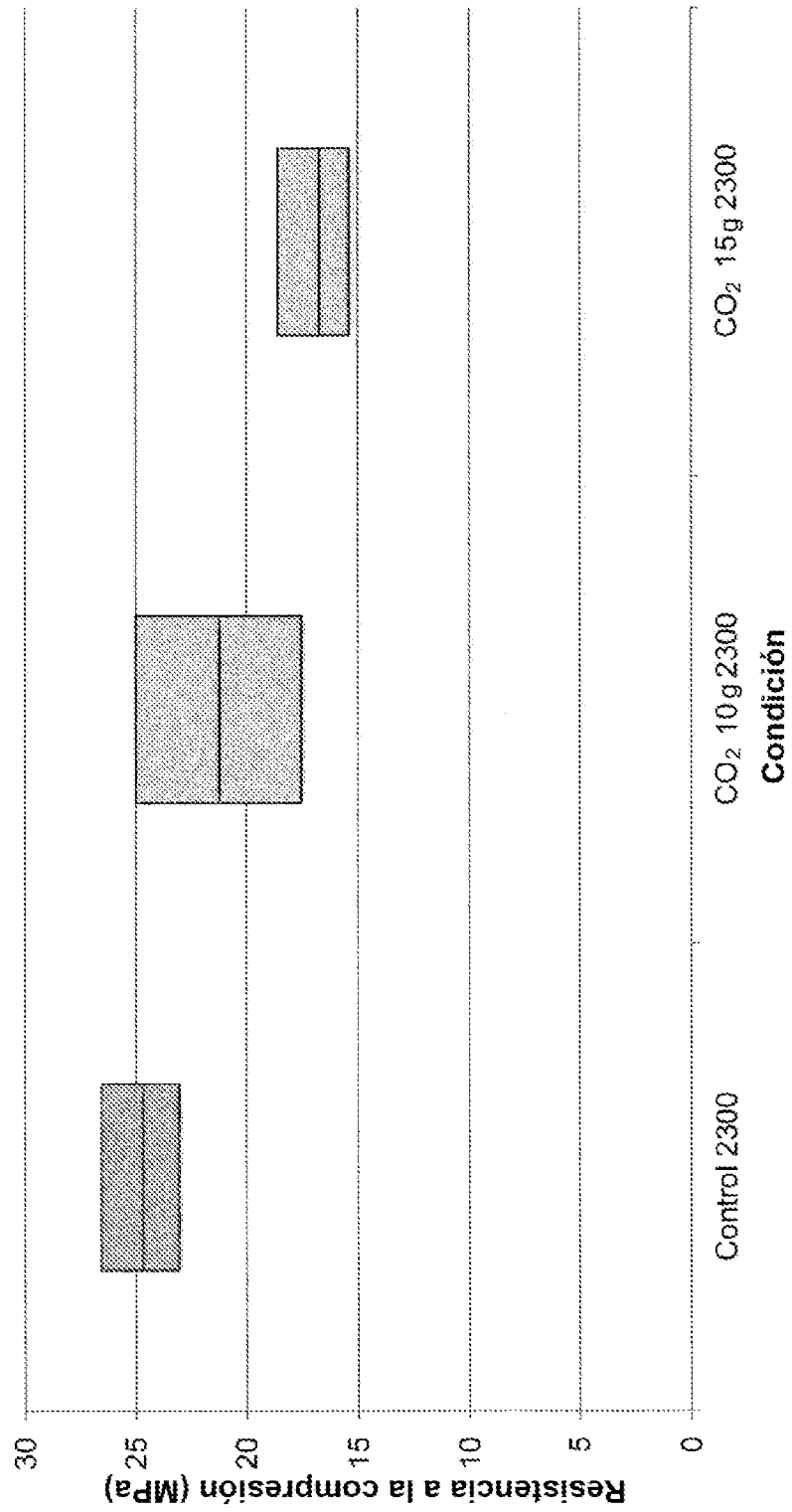
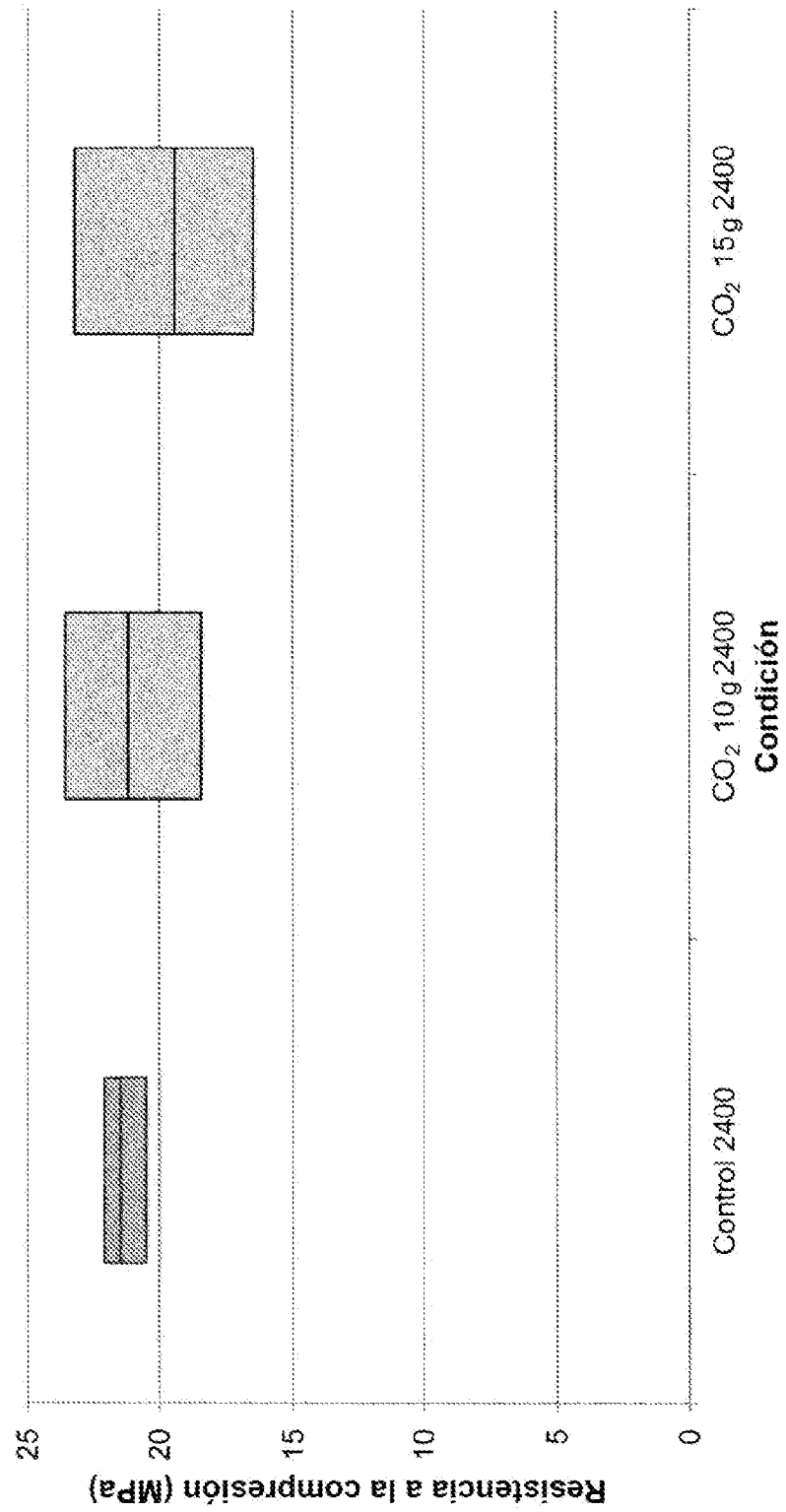


Figura 13
Resistencia a los 7 días de BOMIX premezclado
con ajuste del agua (2400 ml) – 31 de octubre



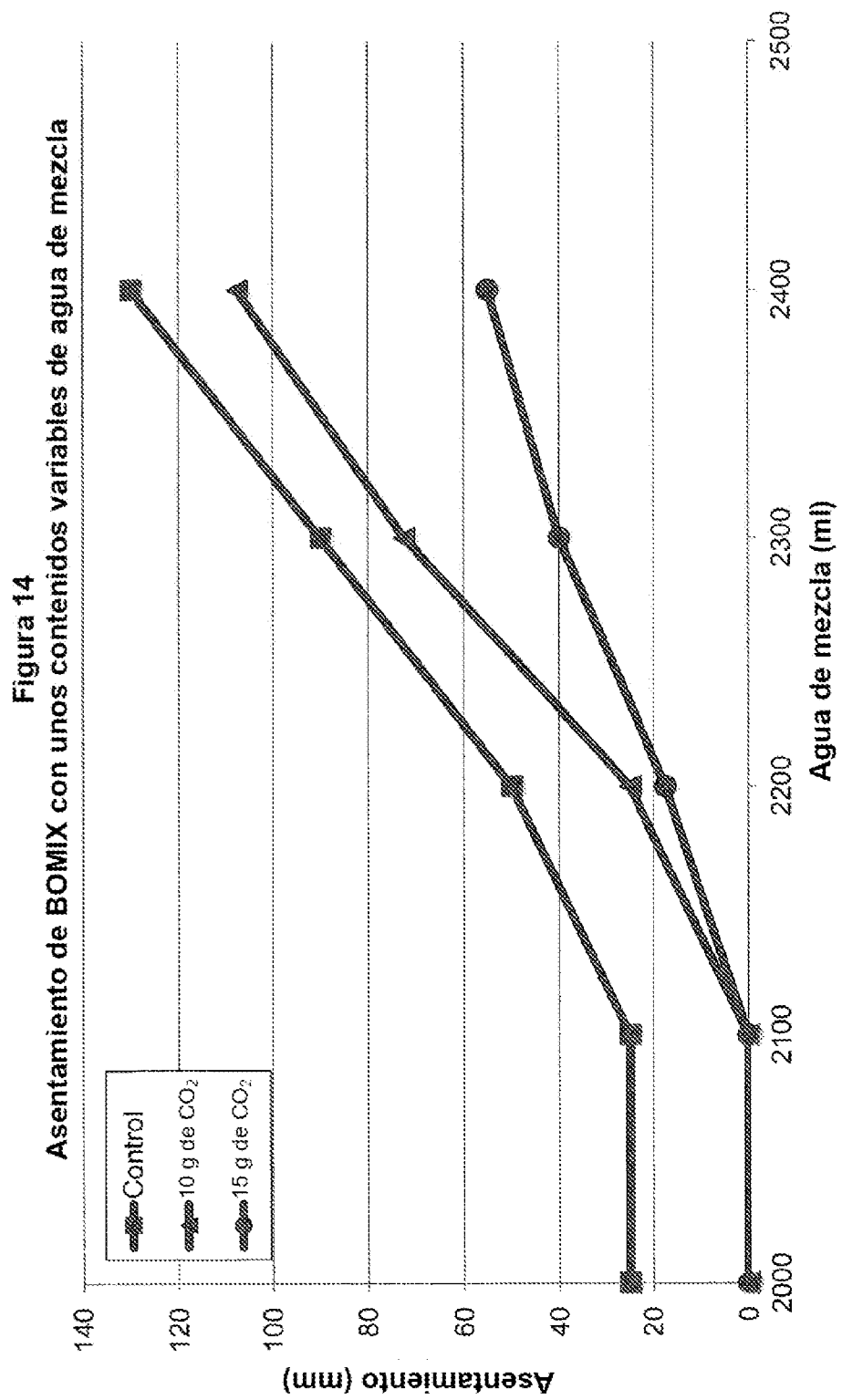


Figura 15

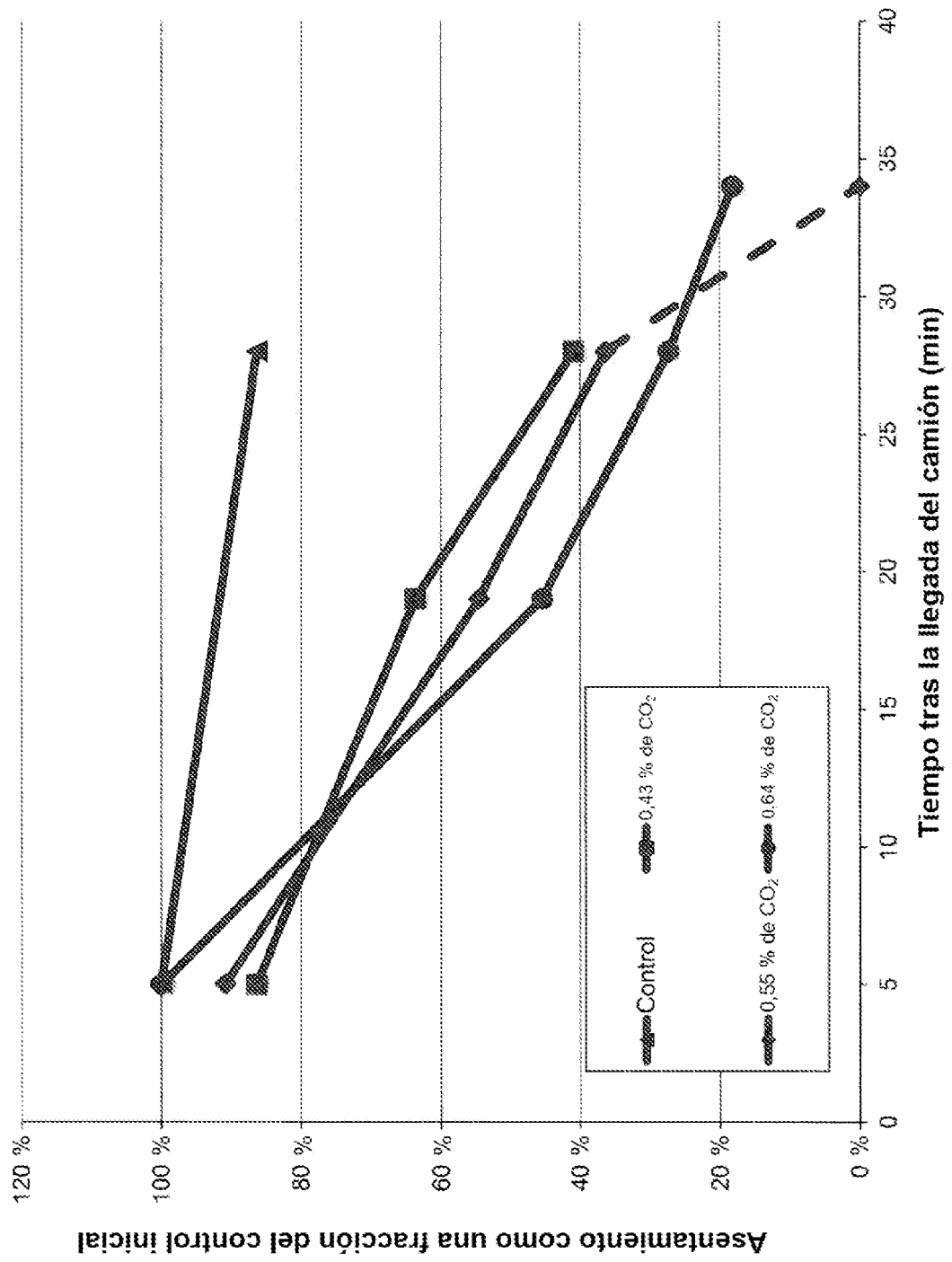


Figura 16

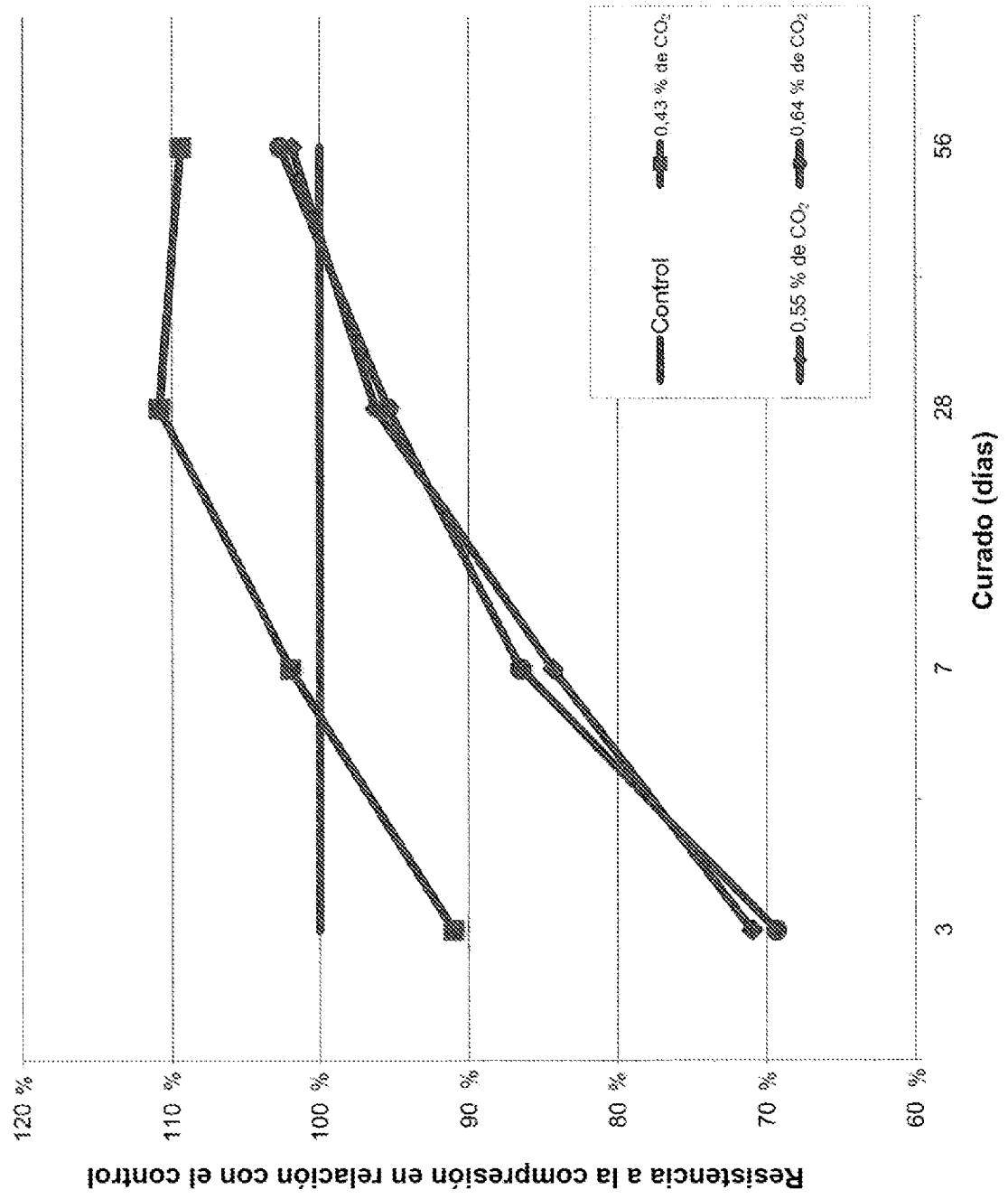


Figura 17

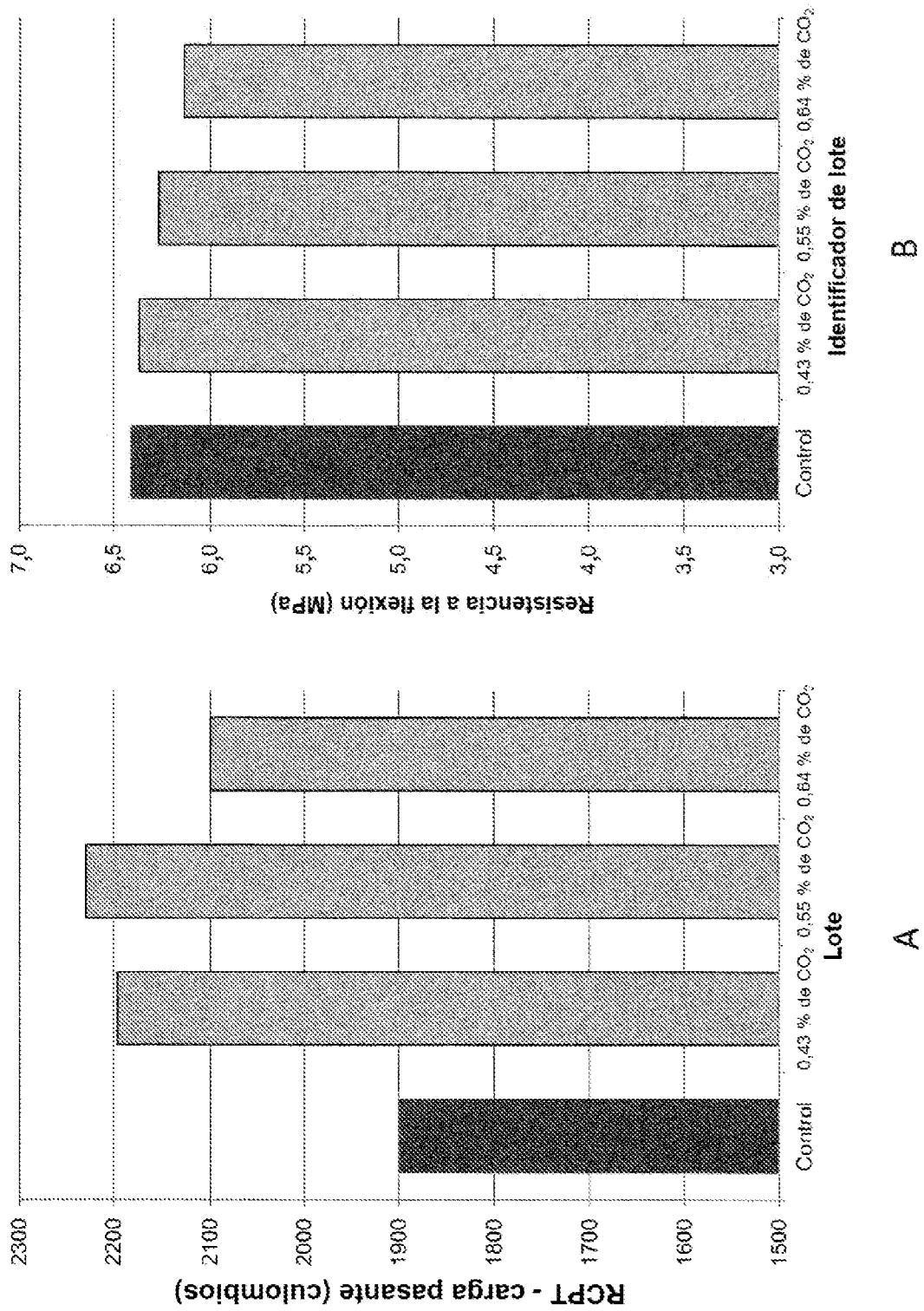


Figura 18

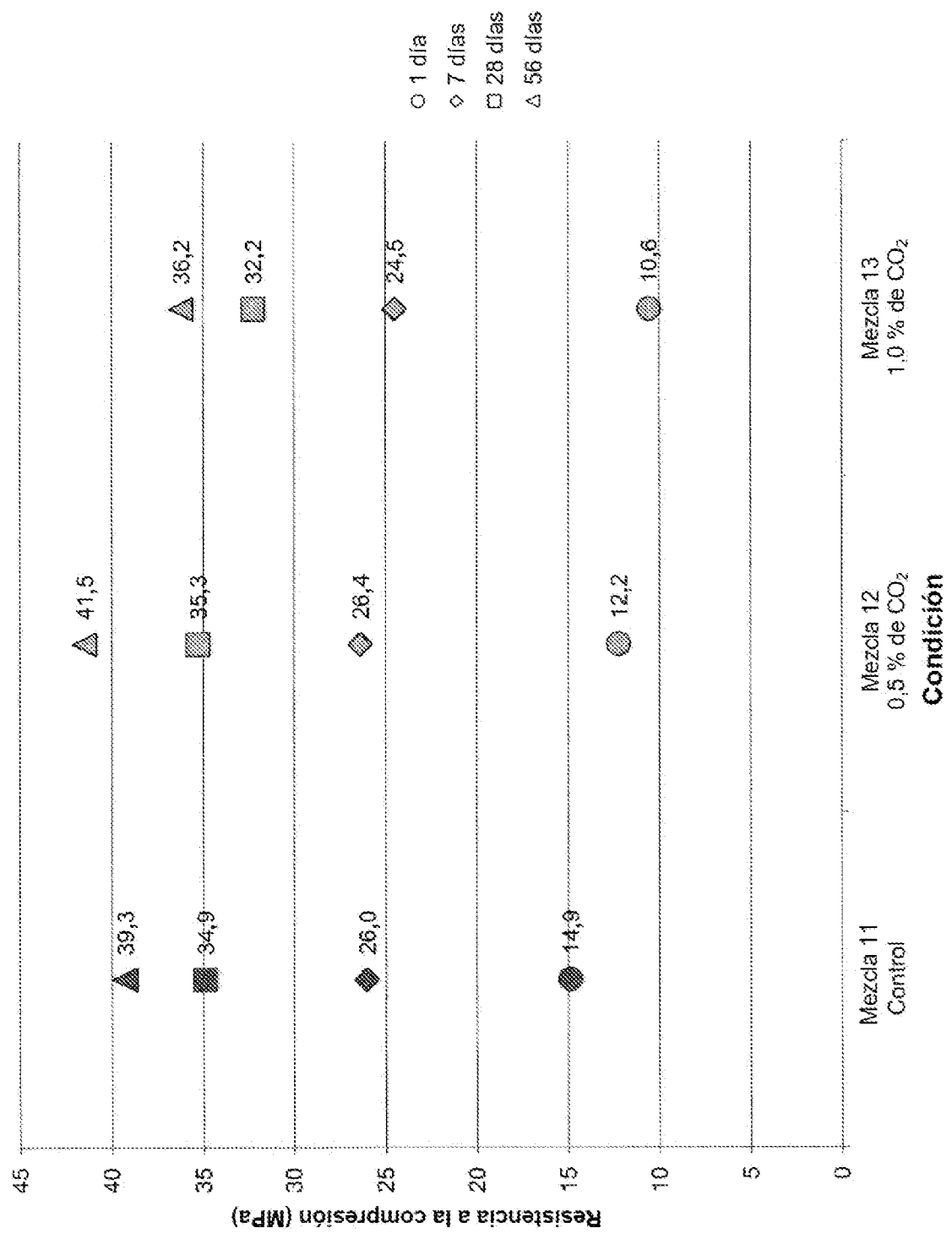


Figura 19

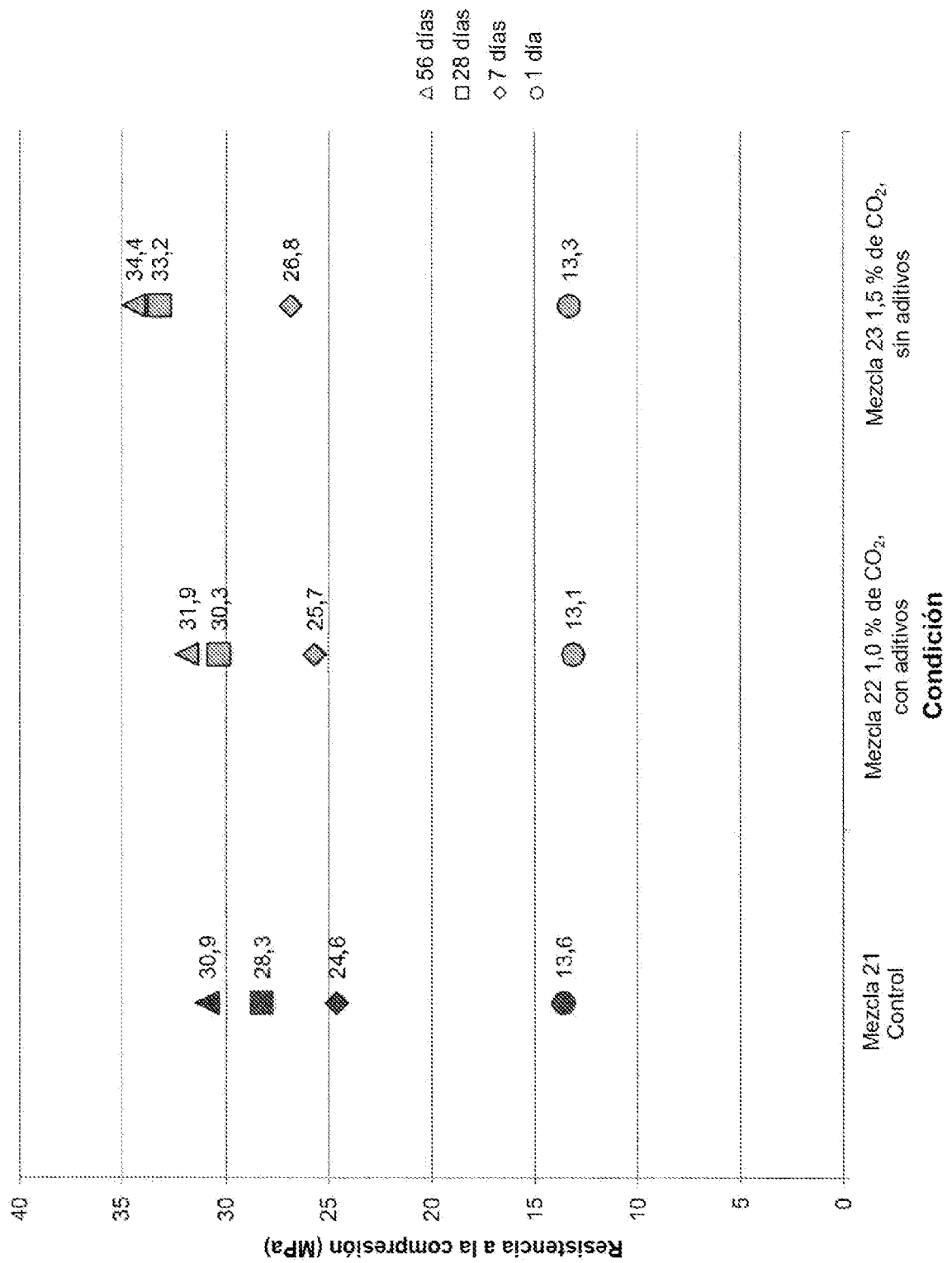


Figura 20

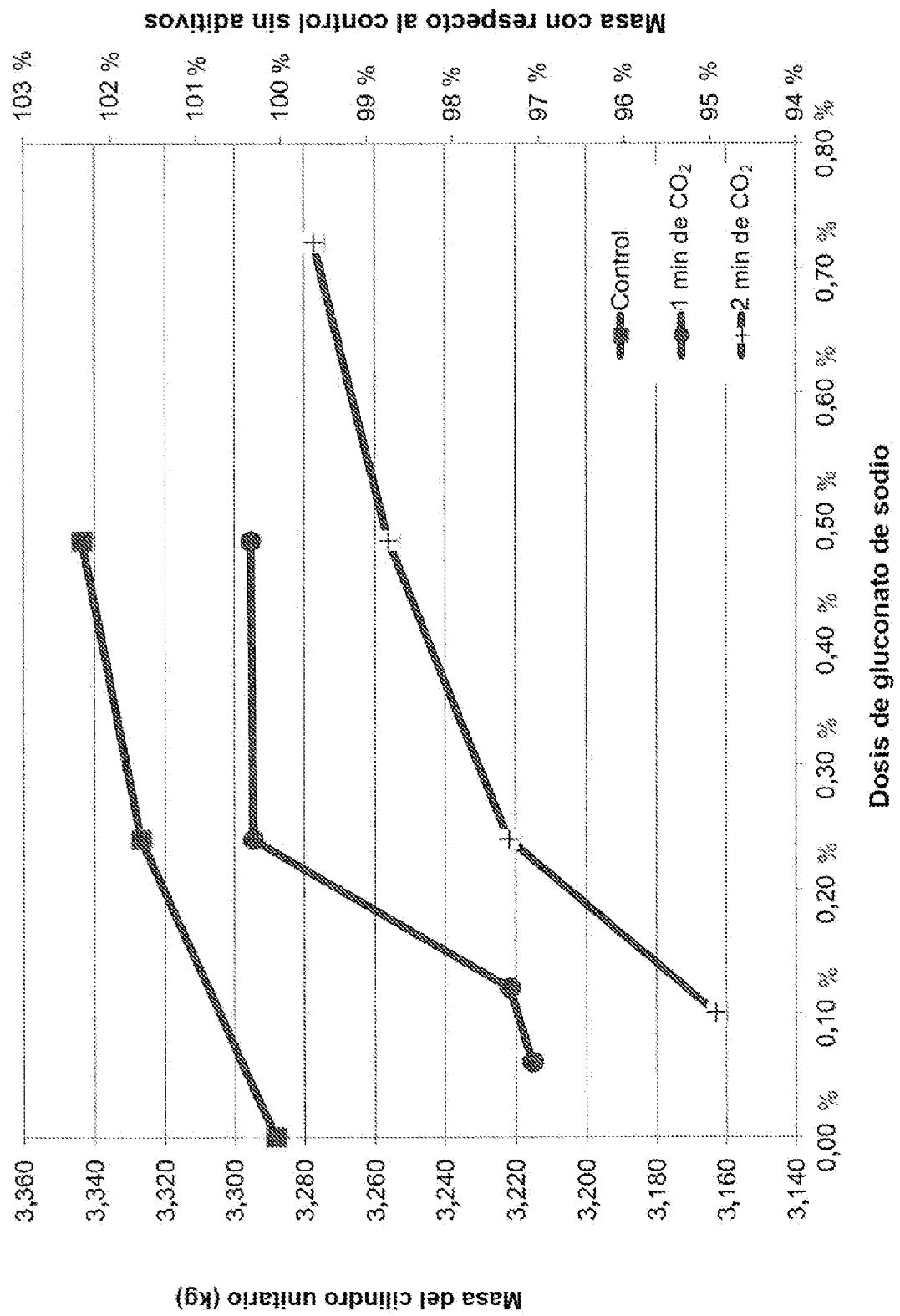


Figura 21

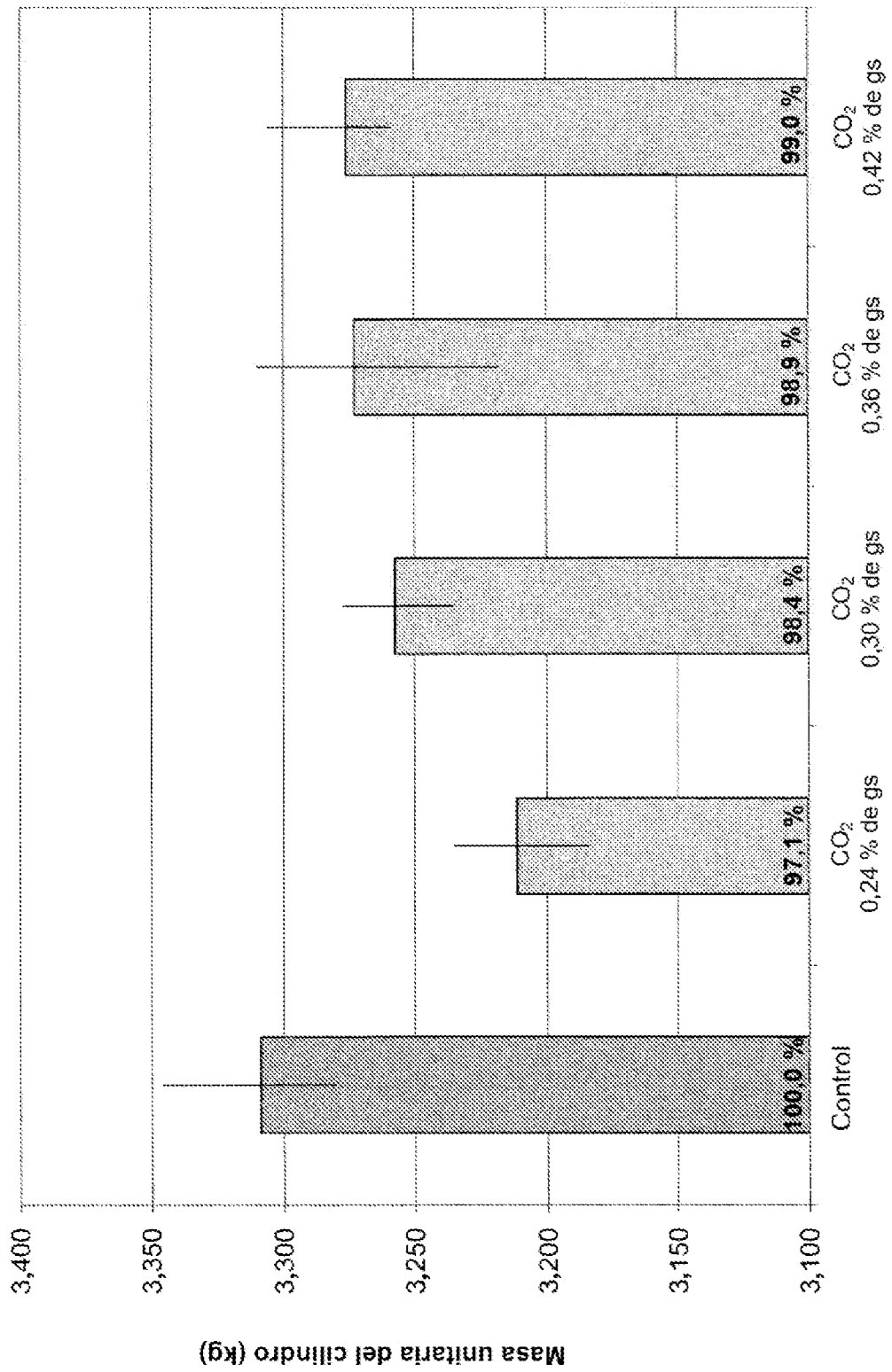


Figura 22

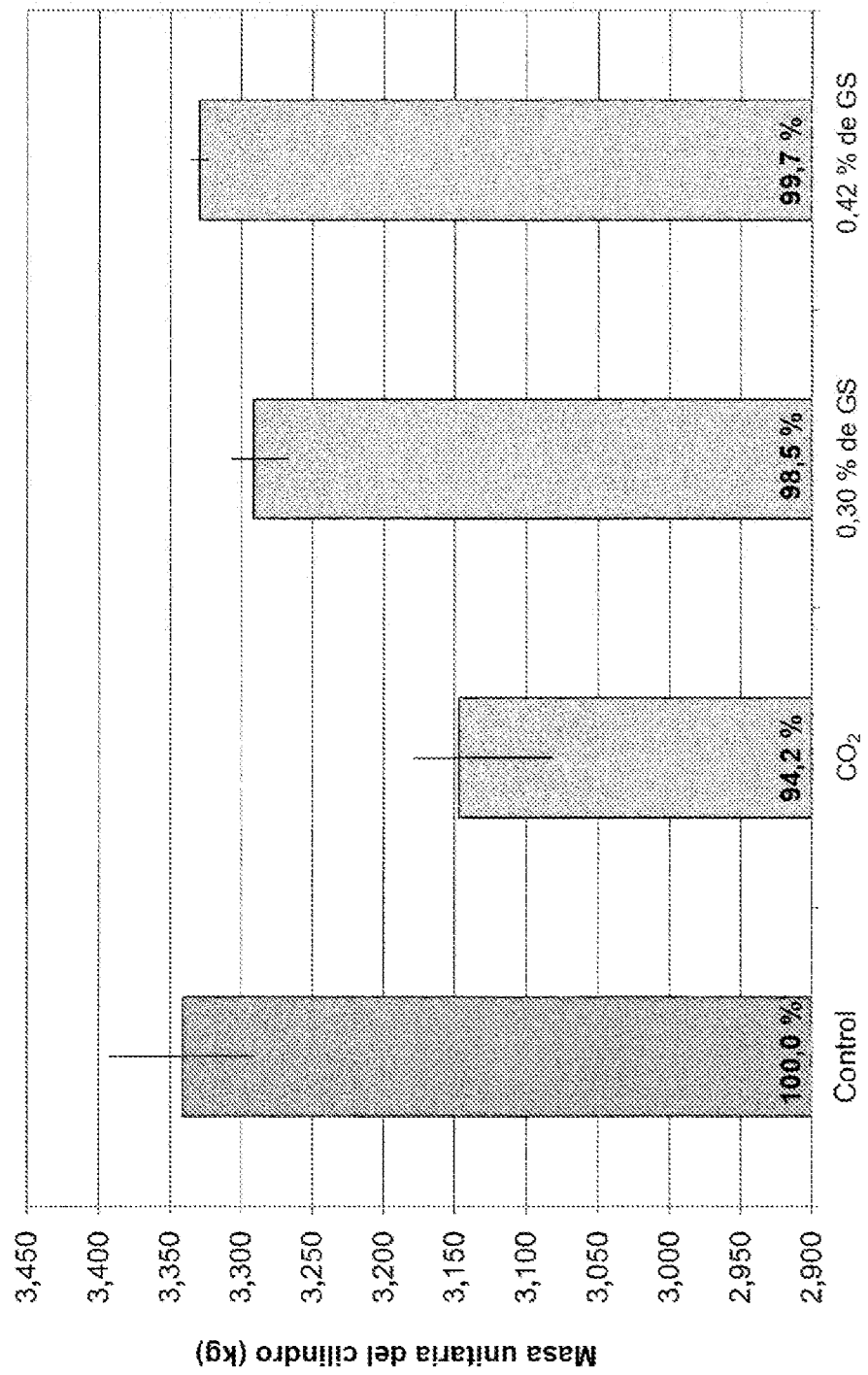


Figura 23

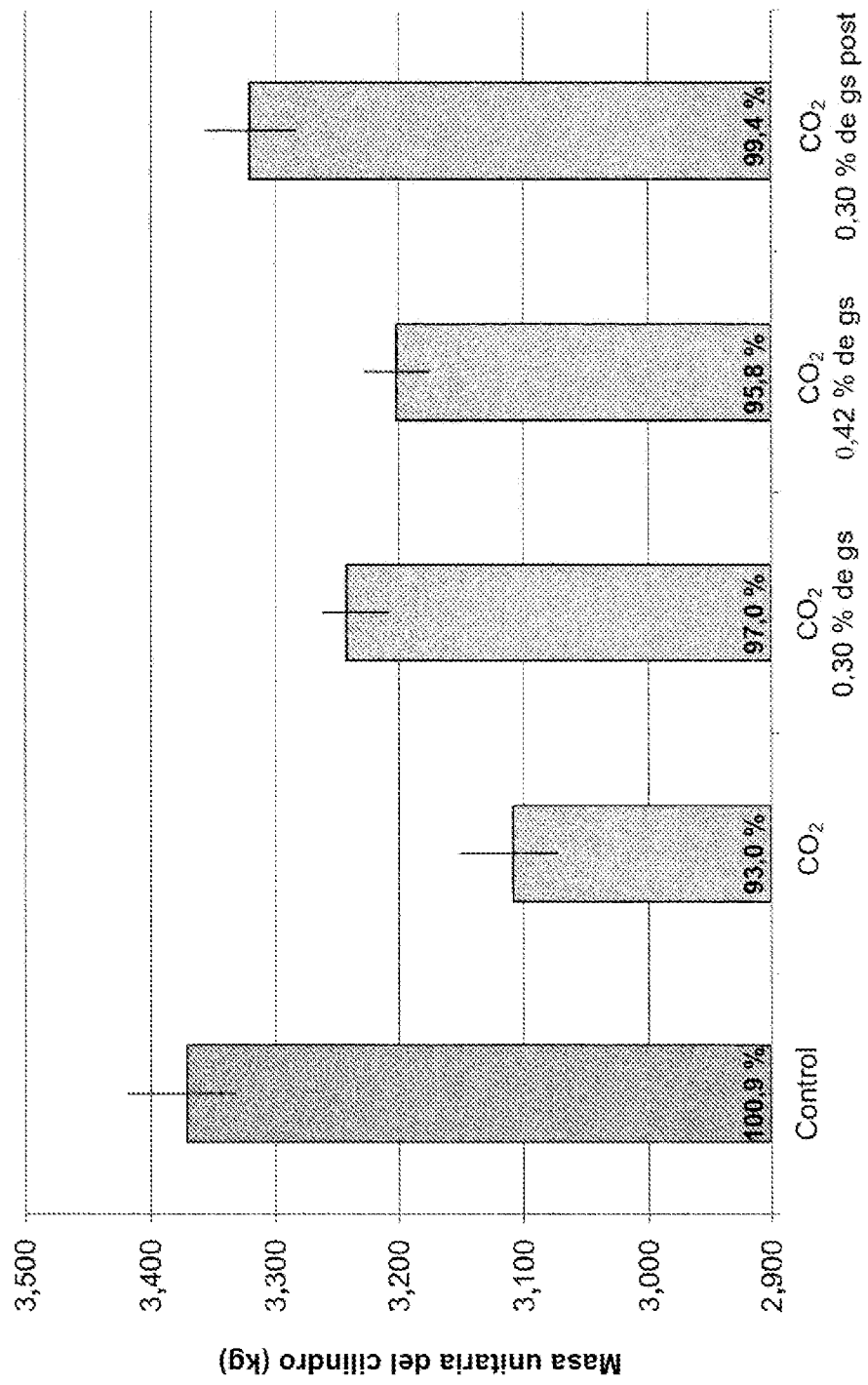


Figura 24

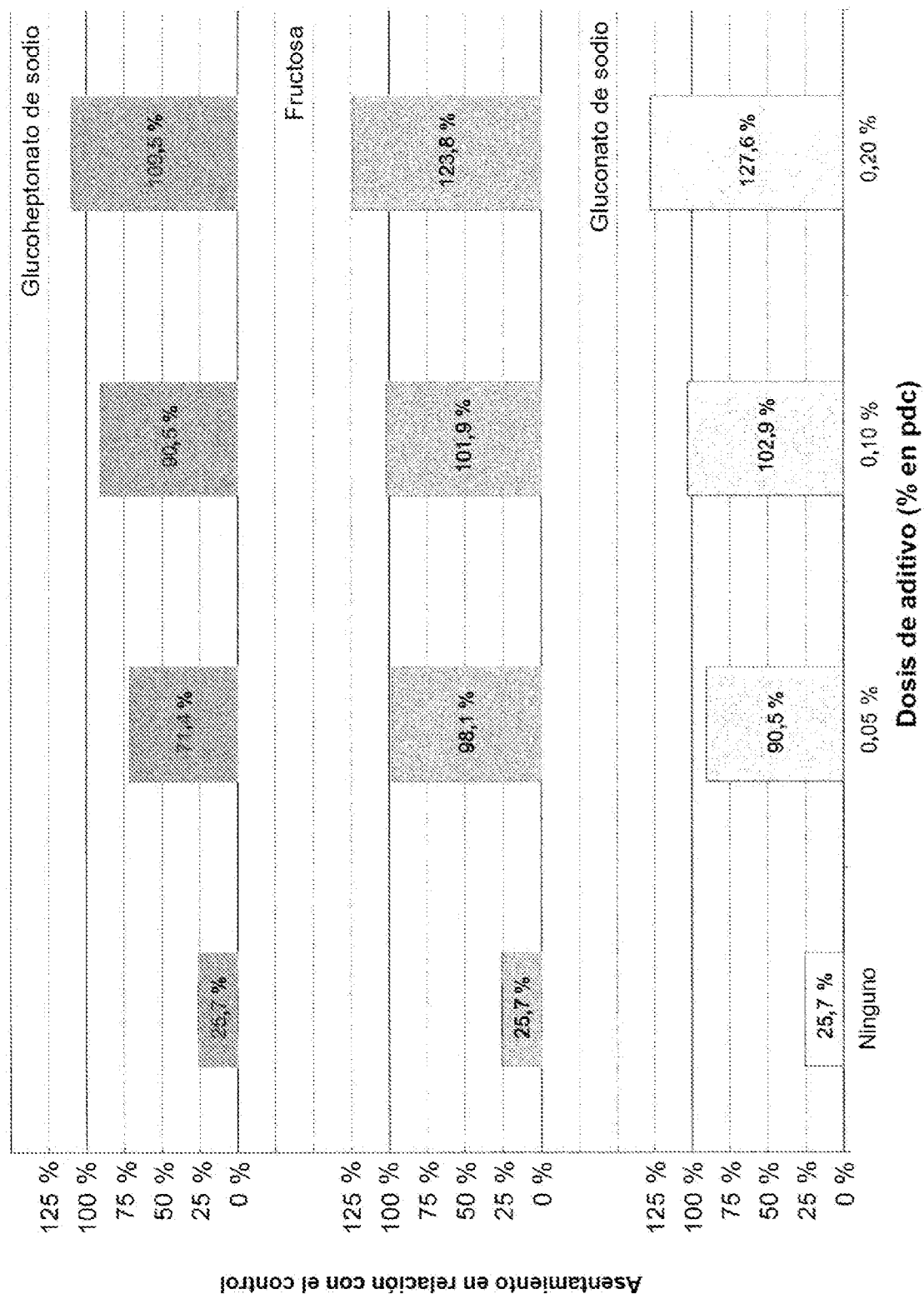


Figura 25

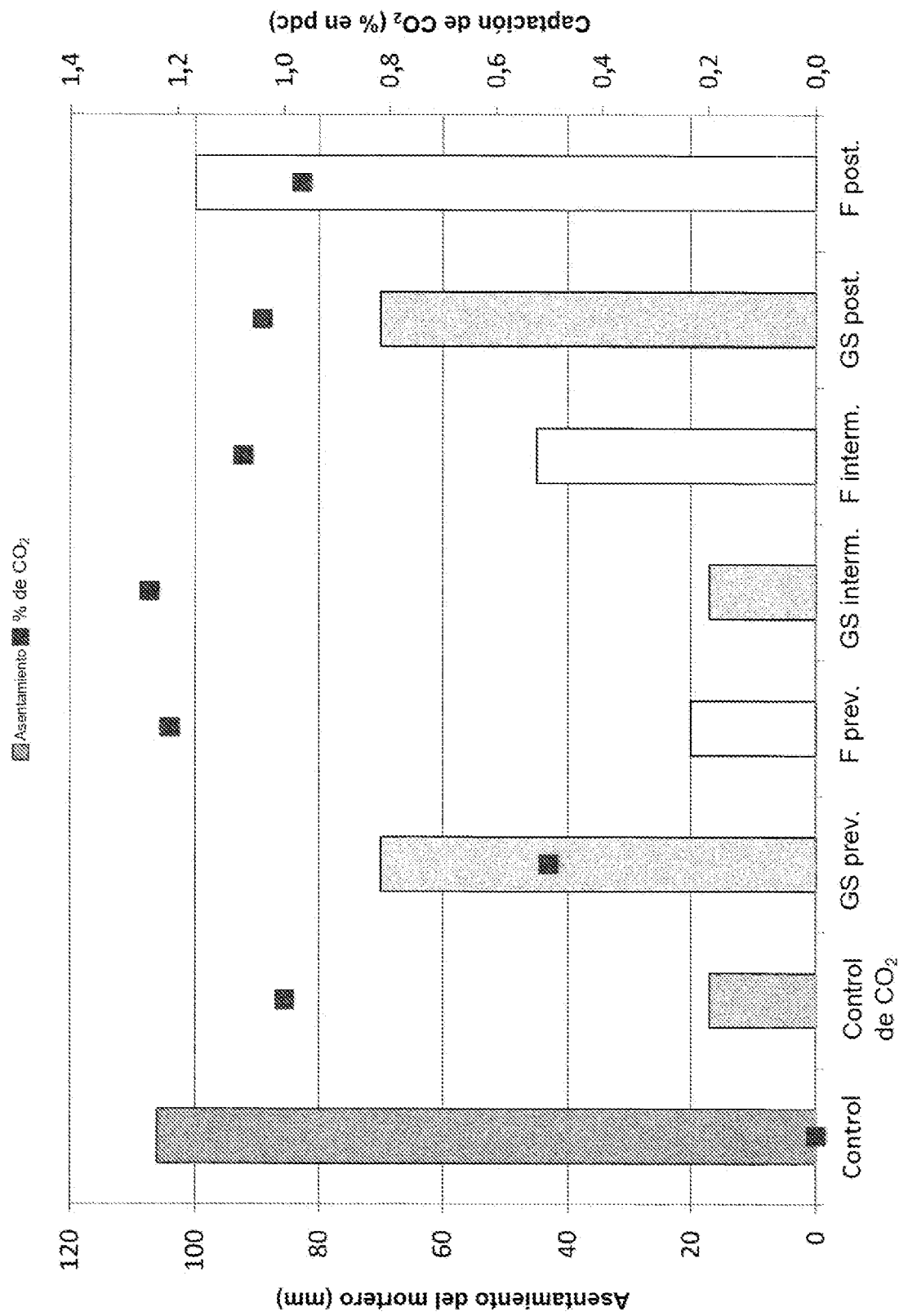


Figura 26

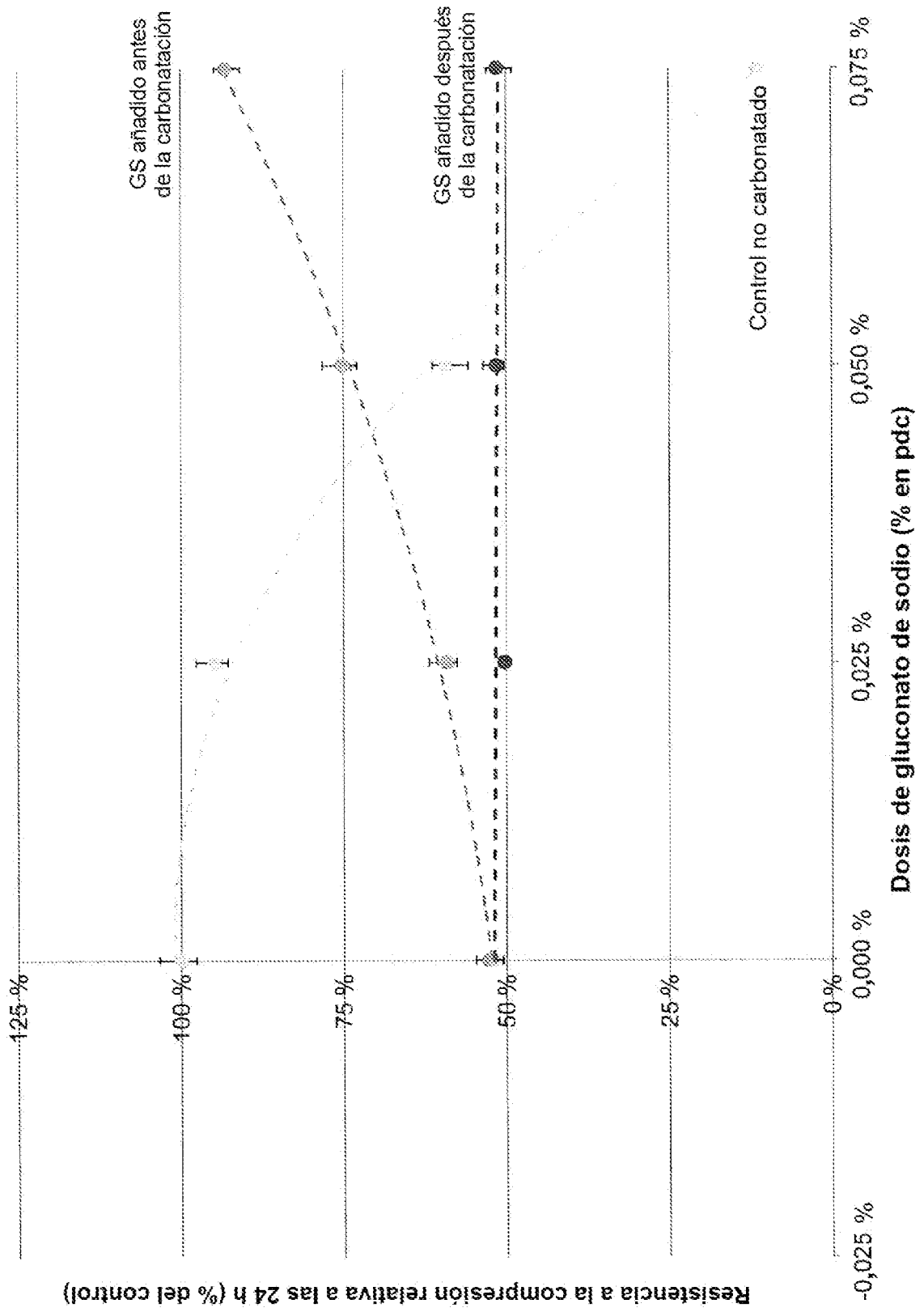


Figura 27

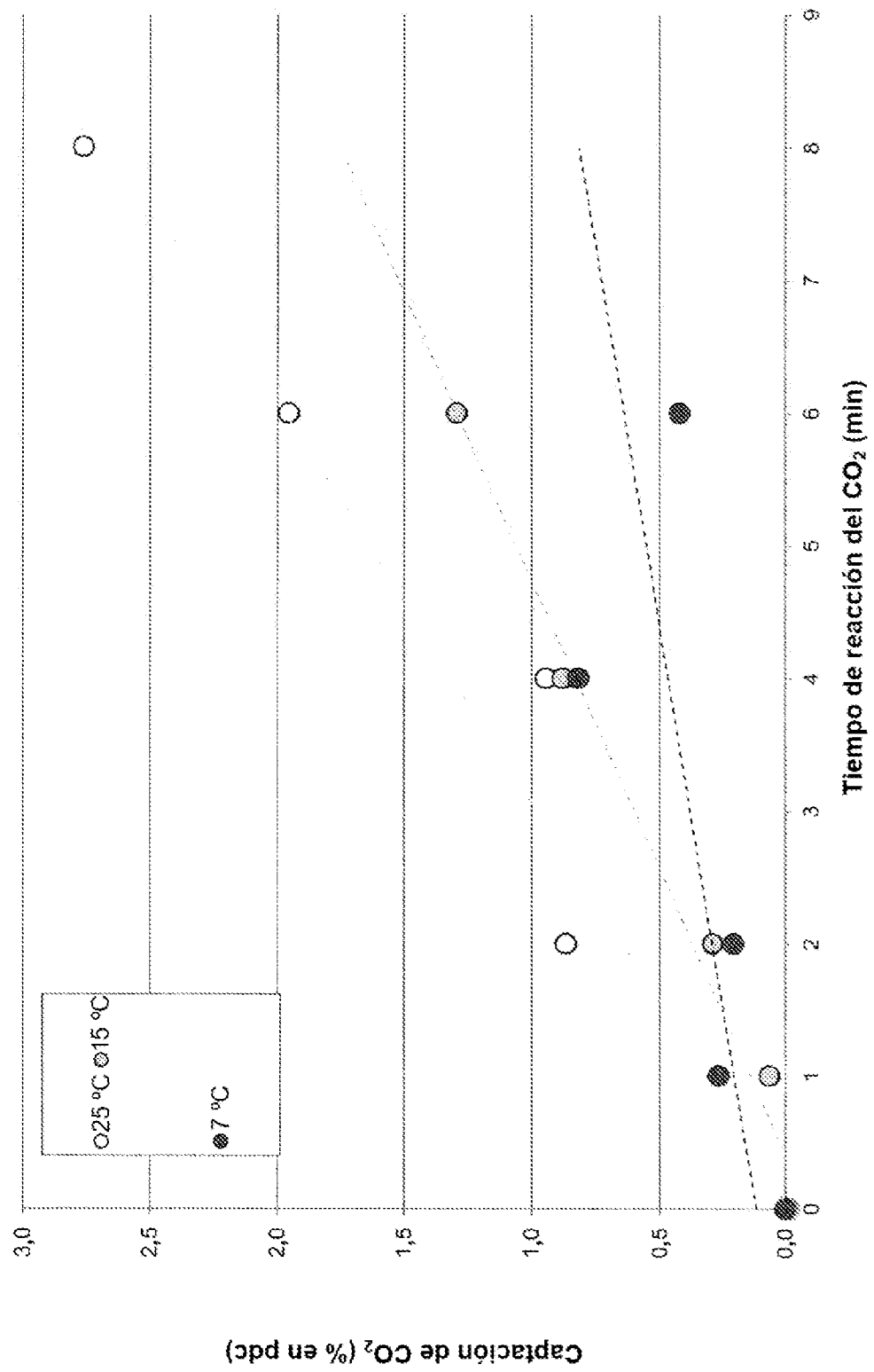


Figura 28

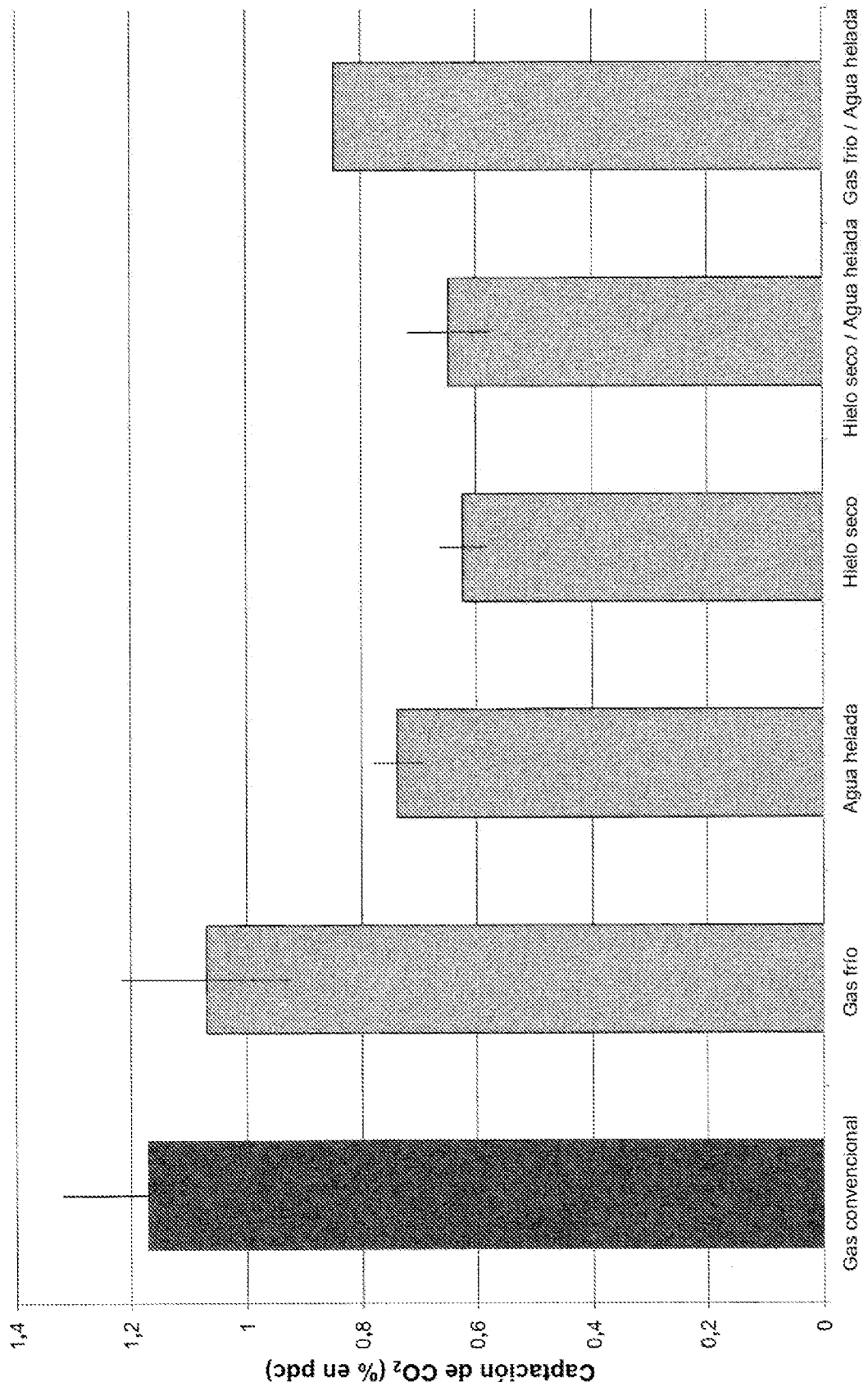


Figura 29

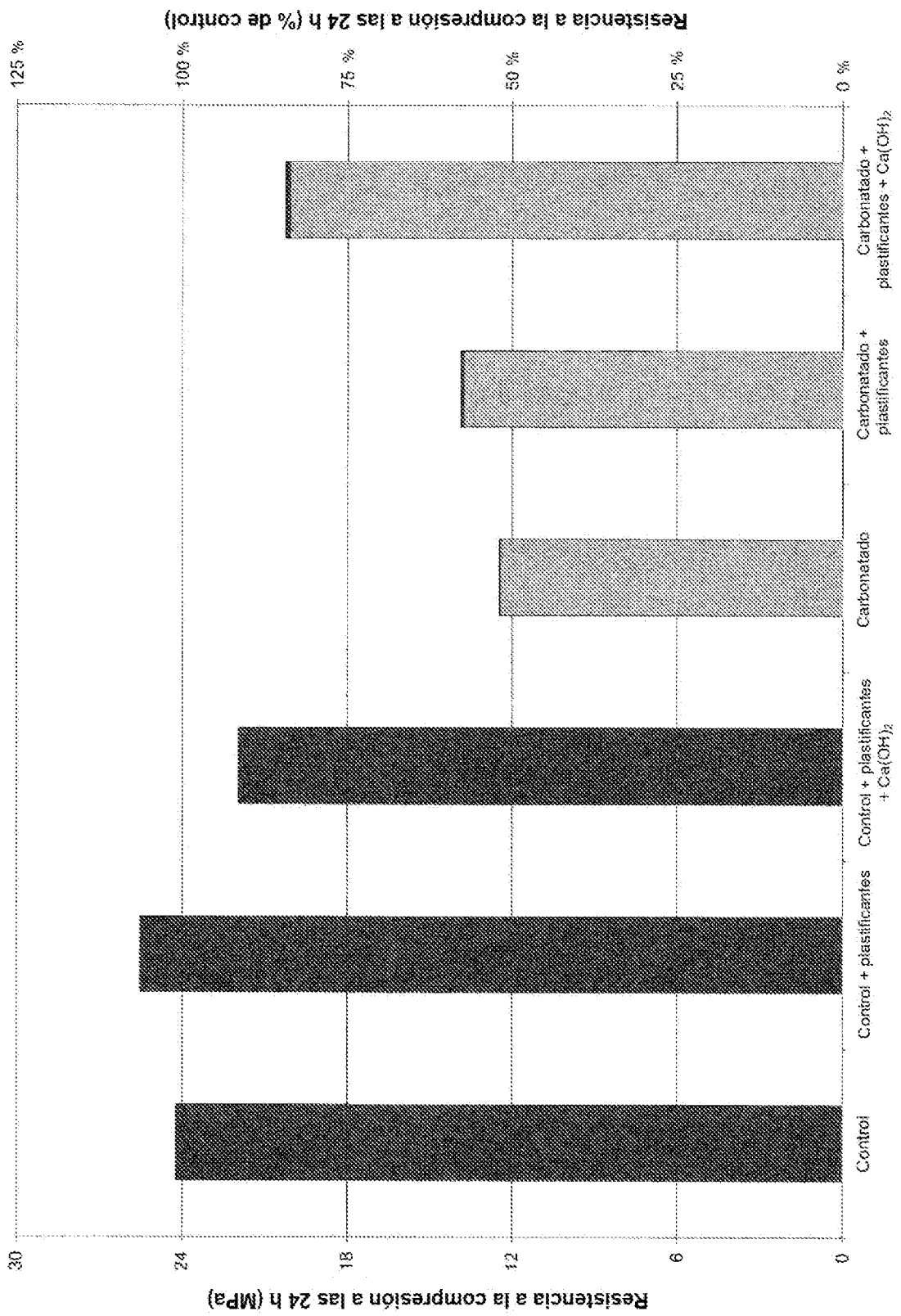


Figura 30

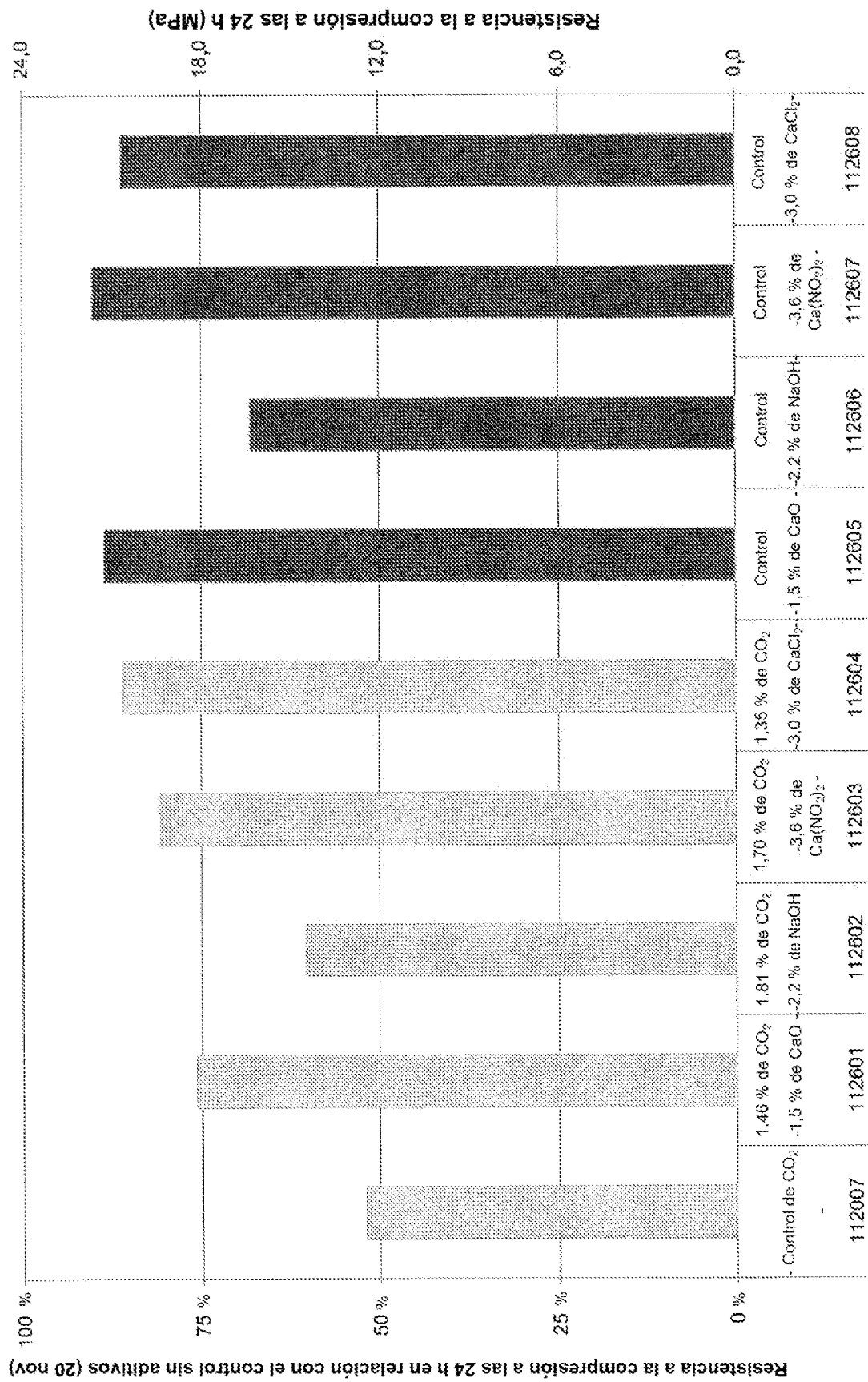


Figura 31

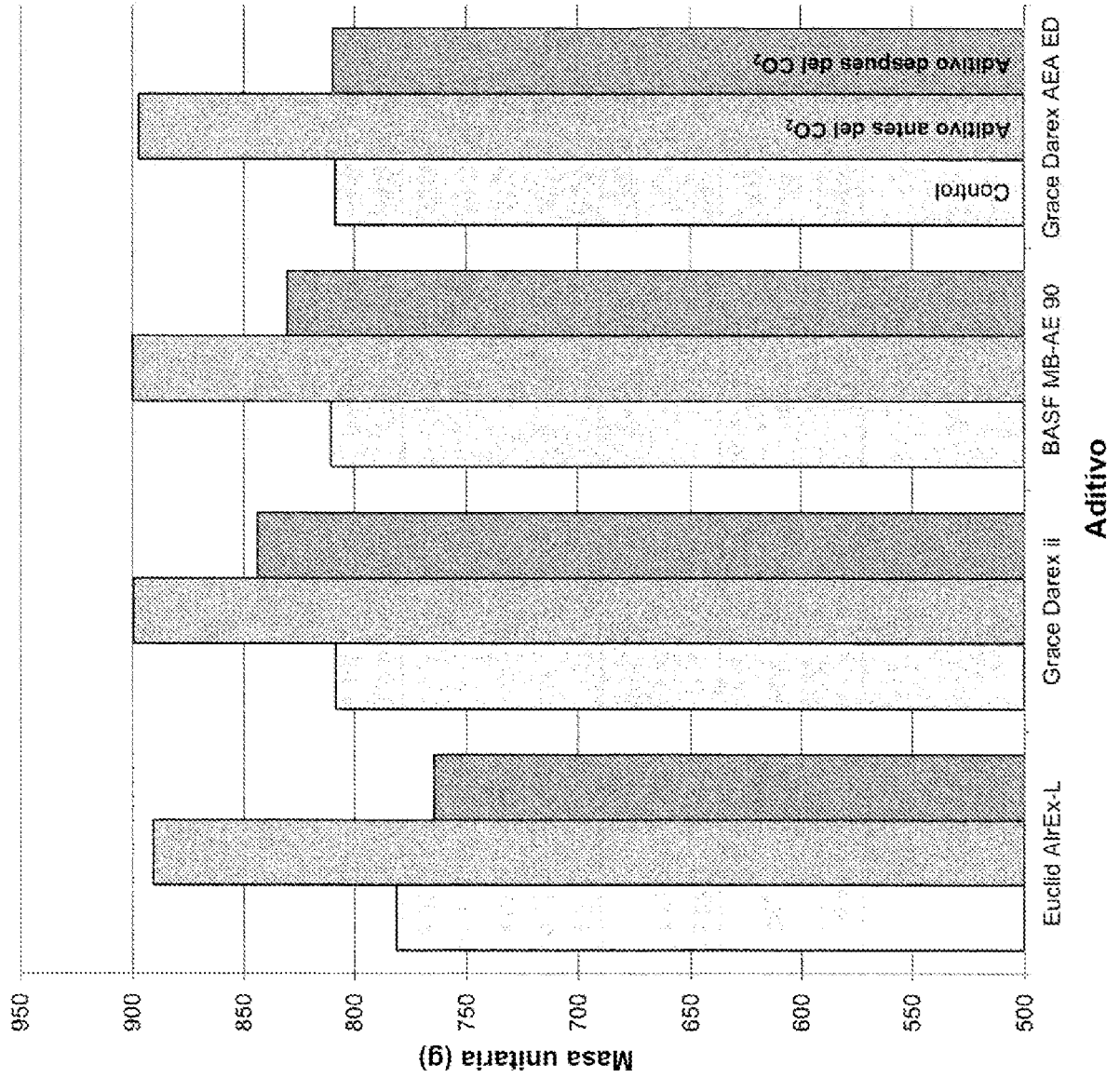


Figura 32

Código	Condición	a/c	Agua		Aditivo	CO ₂ (% en pdc)		Eficiencia del CO ₂ (%)	Resistencia, psi			Absorción	Densidad (lb/pie ³)
			Final	Cocción		Dosis	Capta-ción		7 días	28 días	56 días		
0500	No carbonatado	0,406	8,88 %	6,83 %	-	-	0,00	-	2646	3002	3688	6,6 %	130,3
0700	No carbonatado	0,425	7,35 %	6,71 %	-	-	0,00	-	3172	3529	3642	6,4 %	131,0
Avg	No carbonatado	-	-	-	-	-	0,00	-	2843	3199	3671	6,5 %	130,7
0601	CO ₂	0,422	8,32 %	6,55 %	-	0,50	0,20	39 %	3872	4175	4528	3,9 %	134,0
0602	CO ₂	0,430	8,25 %	6,58 %	-	0,50	0,28	57 %	3703	4171	4648	4,0 %	133,8
0603	CO ₂	0,440	8,08 %	6,26 %	-	1,00	0,54	54 %	3788	4121	4150	4,3 %	131,0
0604	CO ₂	0,450	8,23 %	6,01 %	-	1,50*	0,80	53 %	3836	4377	4554	5,3 %	130,9
0605	CO ₂	0,455	8,39 %	6,56 %	-	1,50	1,40	93 %	3347	3804	4364	5,4 %	130,4
0701	CO ₂	0,413	8,12 %	5,92 %	0,5 %	1,50	1,43	95 %	4248	4456	4569	4,4 %	132,7
0702	CO ₂	0,413	7,85 %	6,24 %	0,4 %	1,50	1,43	95 %	3539	3538	3738	4,4 %	131,5
0703	CO ₂	0,424	7,99 %	5,90 %	0,3 %	1,50	1,24	83 %	3249	3720	3861	4,7 %	129,9
0704	CO ₂	0,426	7,87 %	6,11 %	0,2 %	1,50	1,19	79 %	3275	3559	3788	5,5 %	128,1
0705	CO ₂	0,433	7,81 %	5,48 %	0,1 %	1,50	1,19	79 %	3216	3121	3590	5,6 %	128,6

* La dosis de CO₂ notificada para los lotes 601 y 604 incluye un 0,5 % en pdc administrado en la tolva de carga

Figura 33

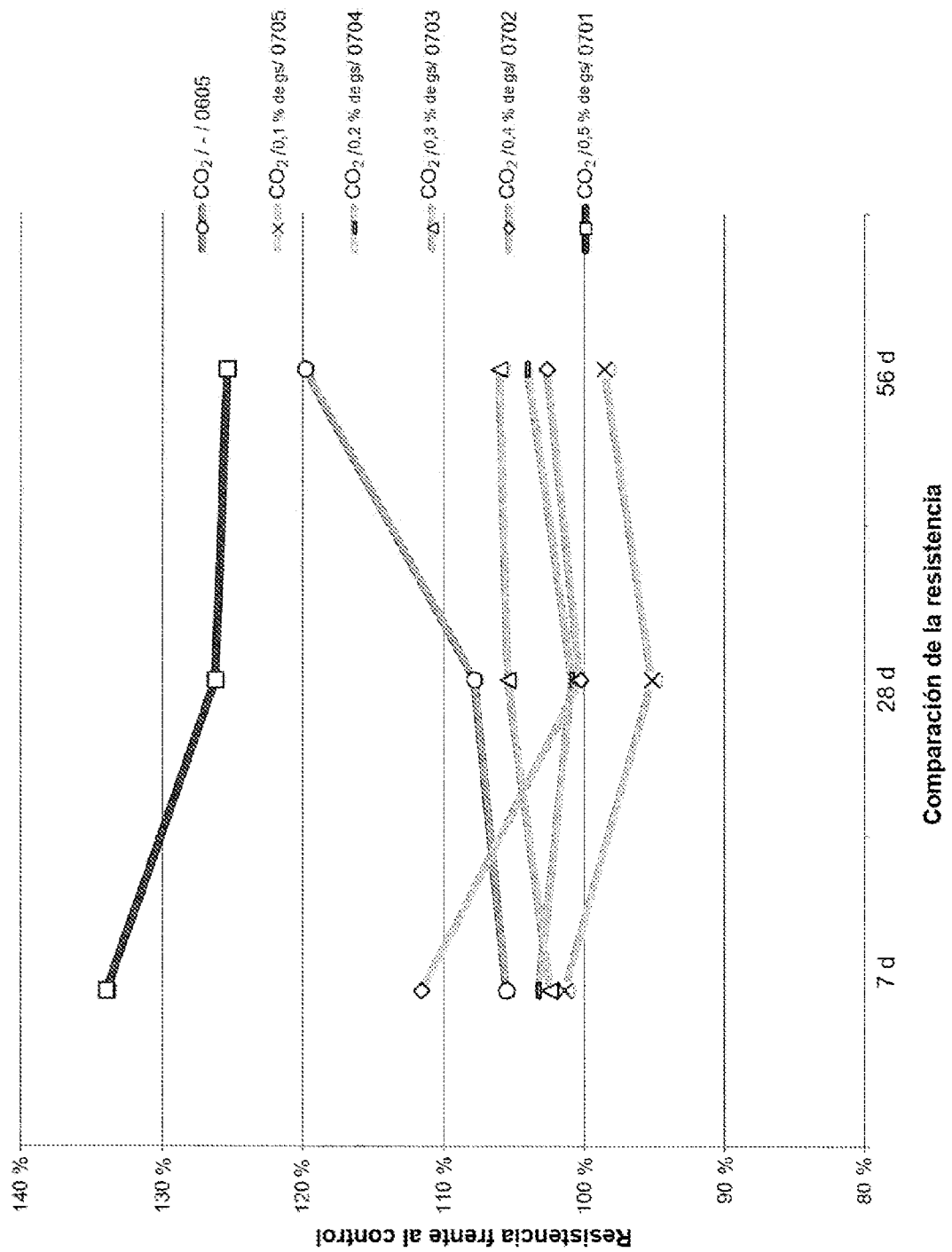


Figura 34

Código	Condición	Agua		Aditivo	CO ₂ (% en pde)		Eficiencia del CO ₂ (%)	Resistencia			Absorción	Densidad (lb/pie ³)
		a/c	Final	Cocción	Dosis	Capta-ción		7 días	28 días	56 días		
0805	No carbonatado	0,225	7,75%	7,17%	-	0,00	-	2518	2927	3035	7,5%	128,9
0806	CO ₂	0,514	8,53%	7,27%	0,4%	1,50	140%	2349	2518	2762	8,9%	125,8

Figura 35

Código	Con- dición	Agua			CO ₂ (% en pde)			Eficien- cia del CO ₂ (%)	Resistencia			Absor- ción	Densidad (lb/pie ³)
		a/c	Final	Cocción	Aditivo	Dosis	Capta- ción		7 días	28 días	56 días		
0801	No carbonatado	0,745	6,96 %	12,20 %	-	-	0,00	-	1549	1680	1803	13,0 %	101,7
0901	CO ₂	0,691	12,25 %	12,53 %	-	1,50	2,09	139 %	1374	1758	1980	13,6 %	100,1
0902	CO ₂	0,703	13,79 %	12,14 %	0,35 %	1,50	1,69	113 %	1893	2381	2536	11,6 %	103,6
0802	CO ₂	0,758	8,80 %	12,85 %	0,40 %	1,50	0,92	61 %	2724	3260	3319	8,6 %	108,8
0903	CO ₂	0,707	13,99 %	12,27 %	0,45 %	1,50	1,62	108 %	1871	2224	2398	11,8 %	102,8

Figura 36

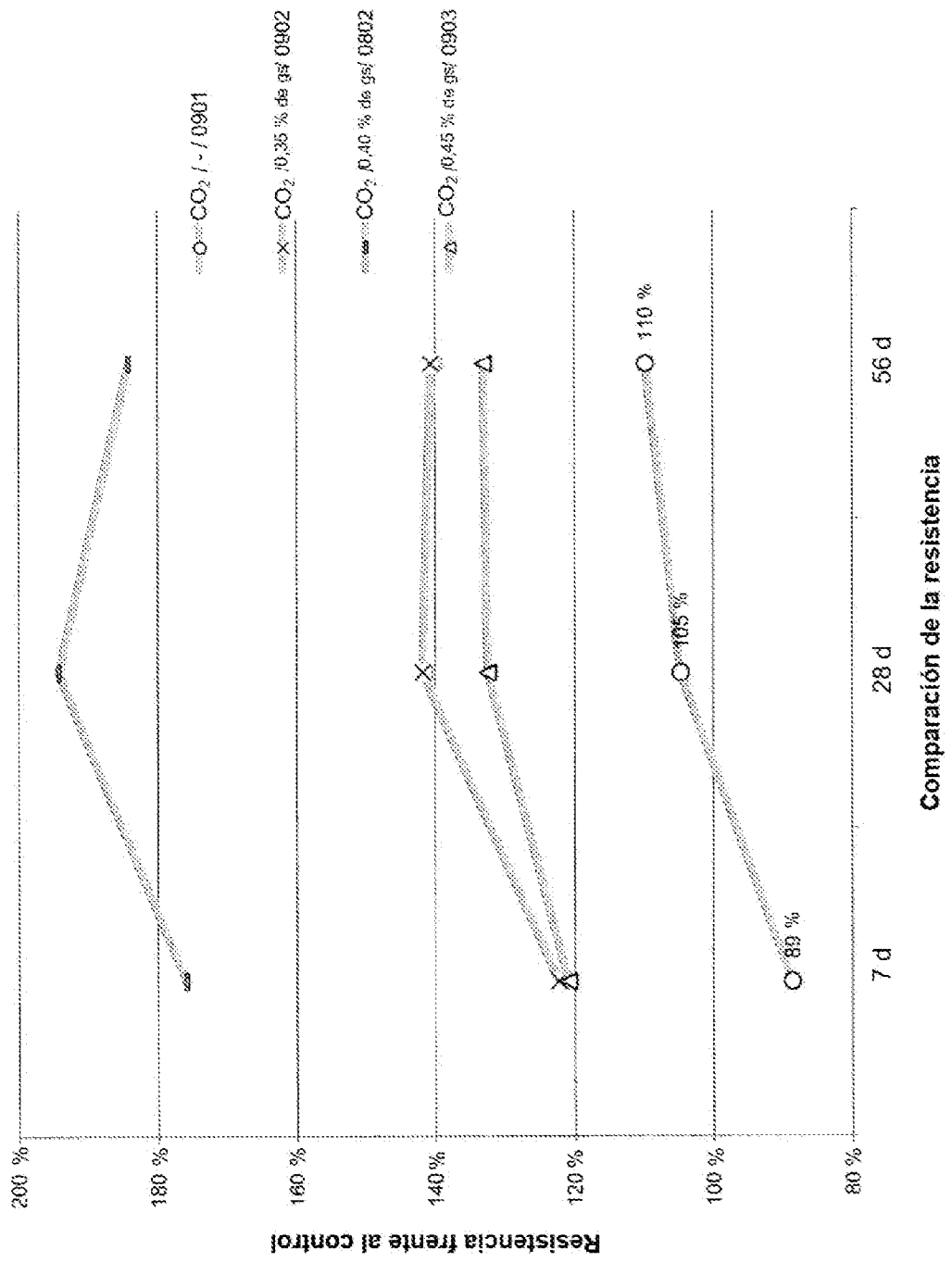


Figura 37

Código	Con- dición	a/c	Agua		Aditivo	CO ₂ (% en pdc)		Eficien- cia del CO ₂ (%)	Resistencia			Absor- ción	Densidad (lb/pie ³)
			Final	Cocción		Dosis	Captu- ción		7 días	28 días	56 días		
0803	No carbonatado	0,672	6,55 %	6,99 %	-	-	0,00	-	1876	1884	2200	8,9 %	125,5
0904	CO ₂	0,697	6,93 %	6,58 %	-	1,50	1,26	84 %	1809	1922	2086	10,0 %	121,4
0905	CO ₂	0,736	7,00 %	6,65 %	0,35 %	1,50	0,35	23 %	2004	2027	2399	9,1 %	125,6
0804	CO ₂	0,710	7,29 %	6,80 %	0,40 %	1,50	1,04	69 %	2038	2292	2373	8,7 %	126,0
0906	CO ₂	0,718	7,02 %	6,37 %	0,45 %	1,50	1,35	90 %	3050	3073	3483	7,2 %	129,3

Figura 38

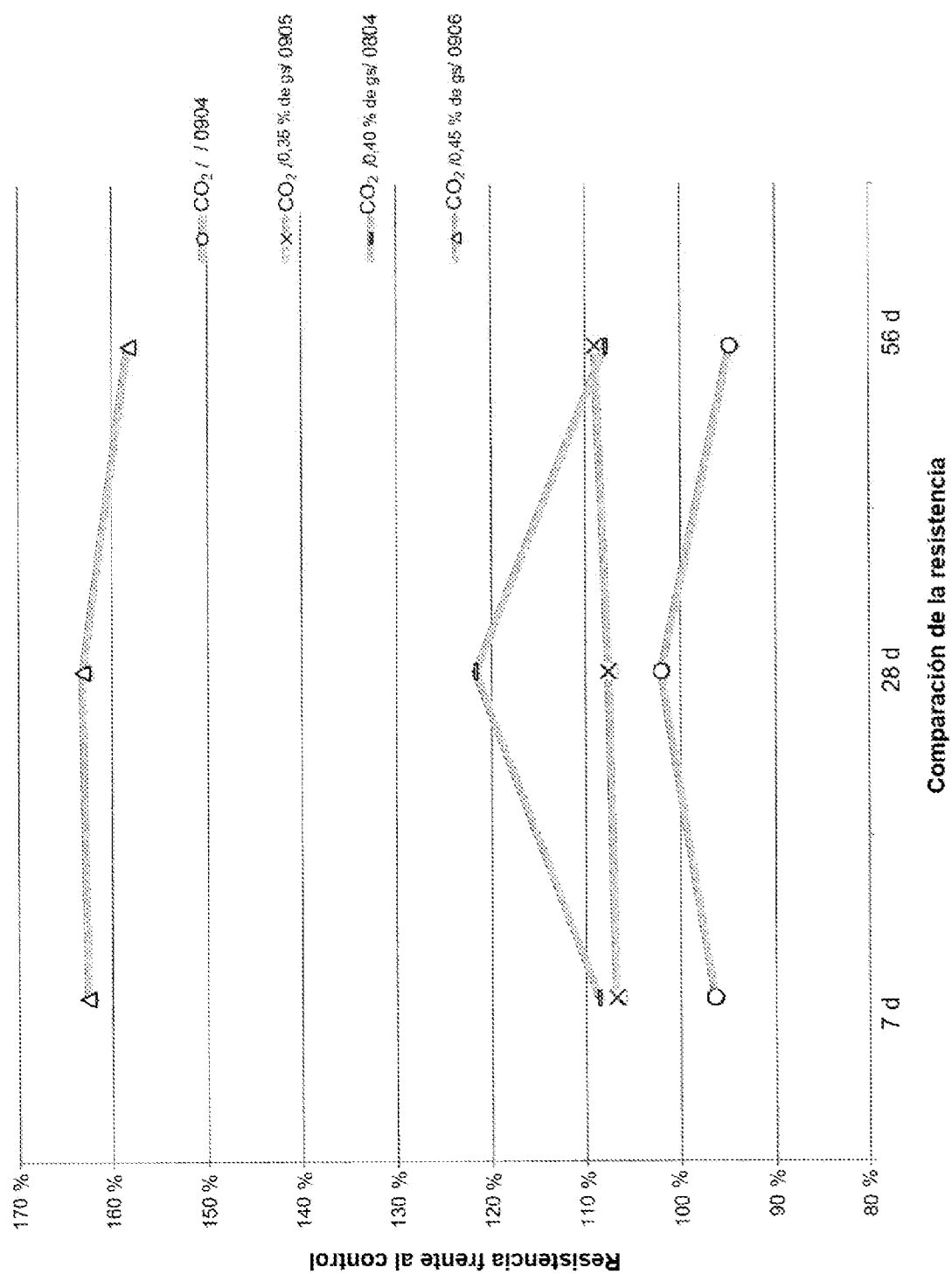


Figura 39

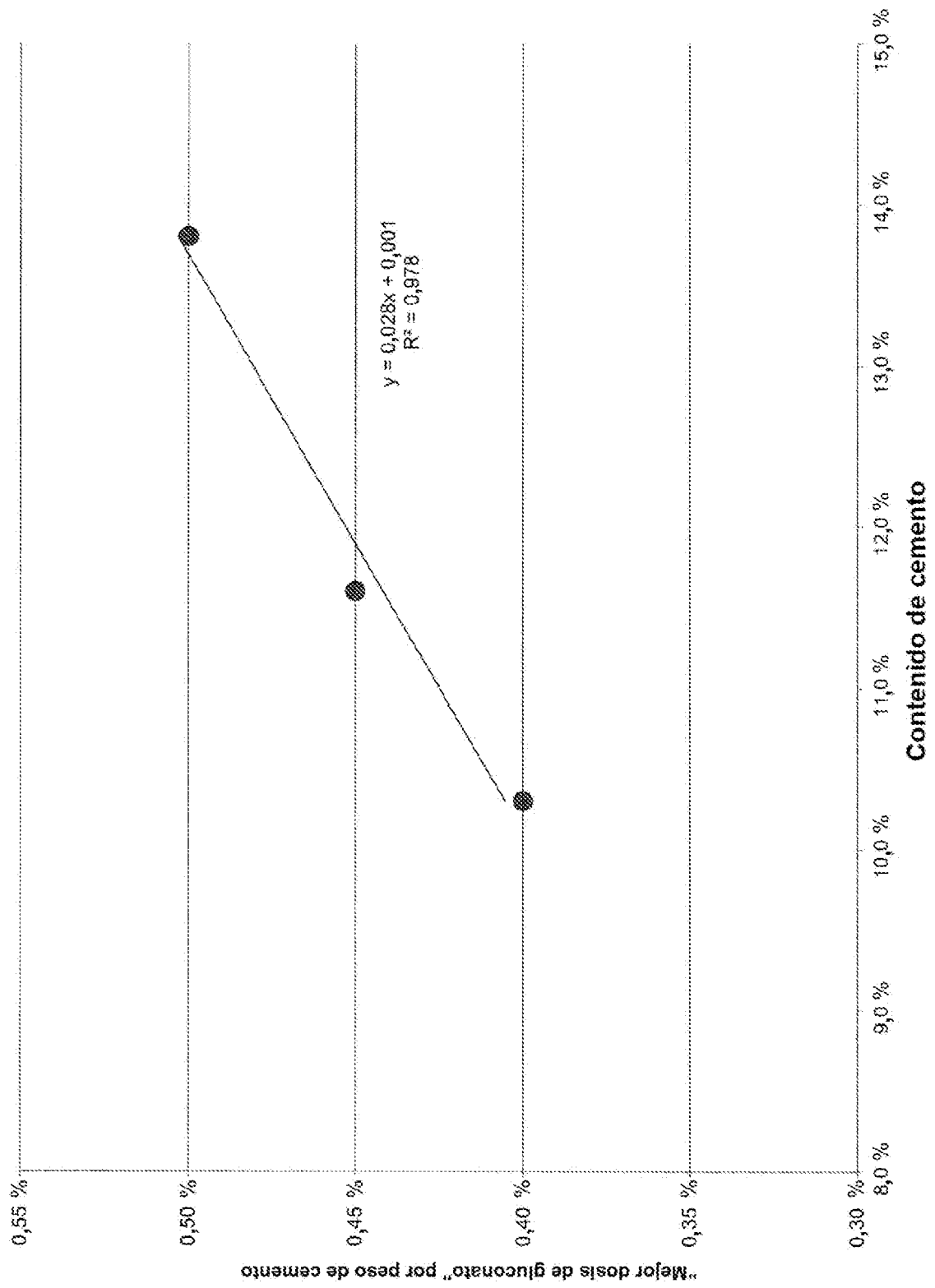
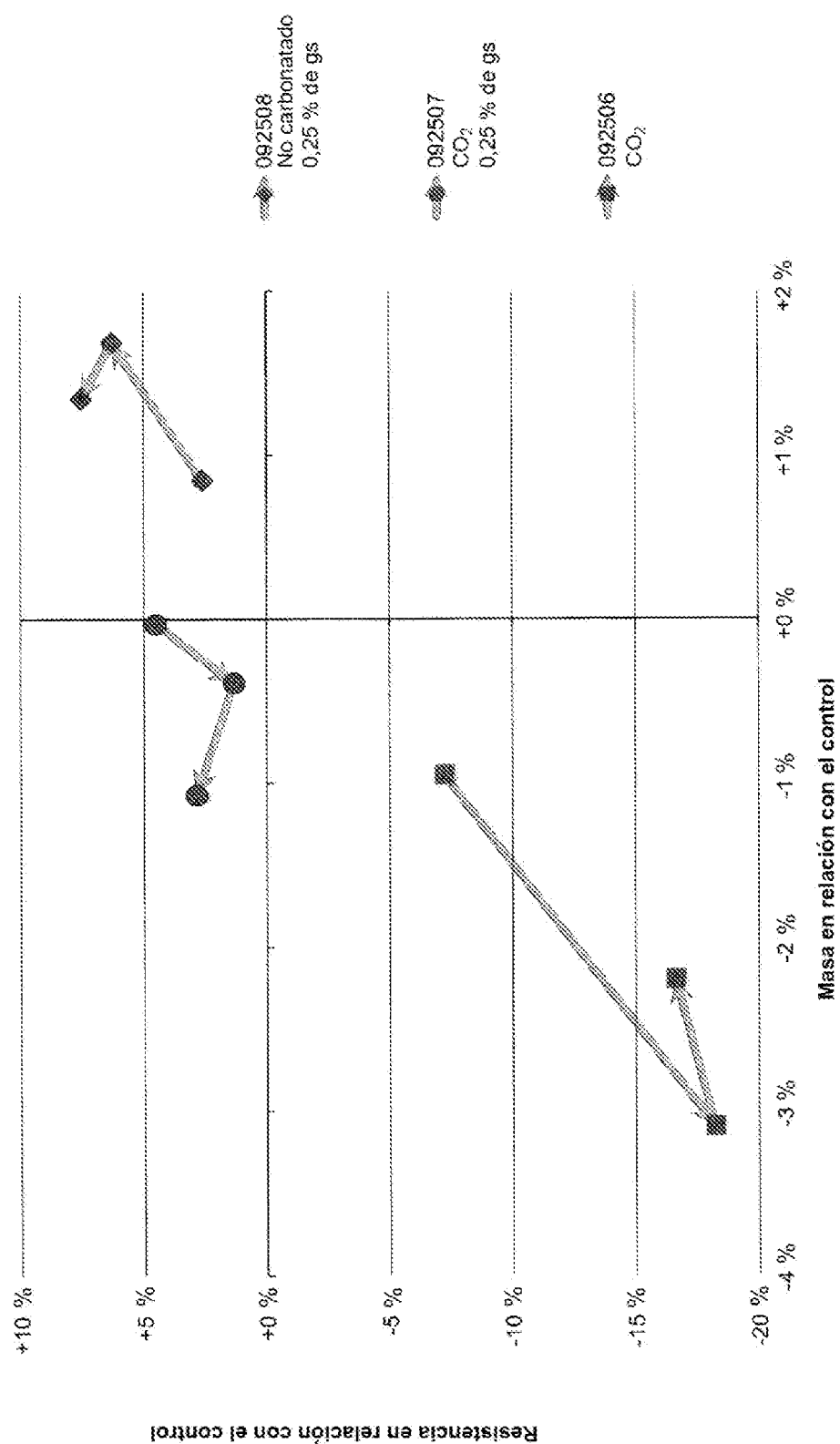


Figura 40



Los puntos con bordes en negro contienen aditivo

Figura 41

Lote		
	092509	092507
Condición	Control	1 % de CO ₂ + 0,25 % de gs
Resistencia (psi)	3723	3510
Absorción	6,5 %	7,0 %
Contracción	0,044 %	0,051 %
Resistencia frente al control	-	- 6 %
Absorción frente al control	-	+ 7 %
Contracción frente al control	-	+ 14 %
		+ 4 %

Figura 42

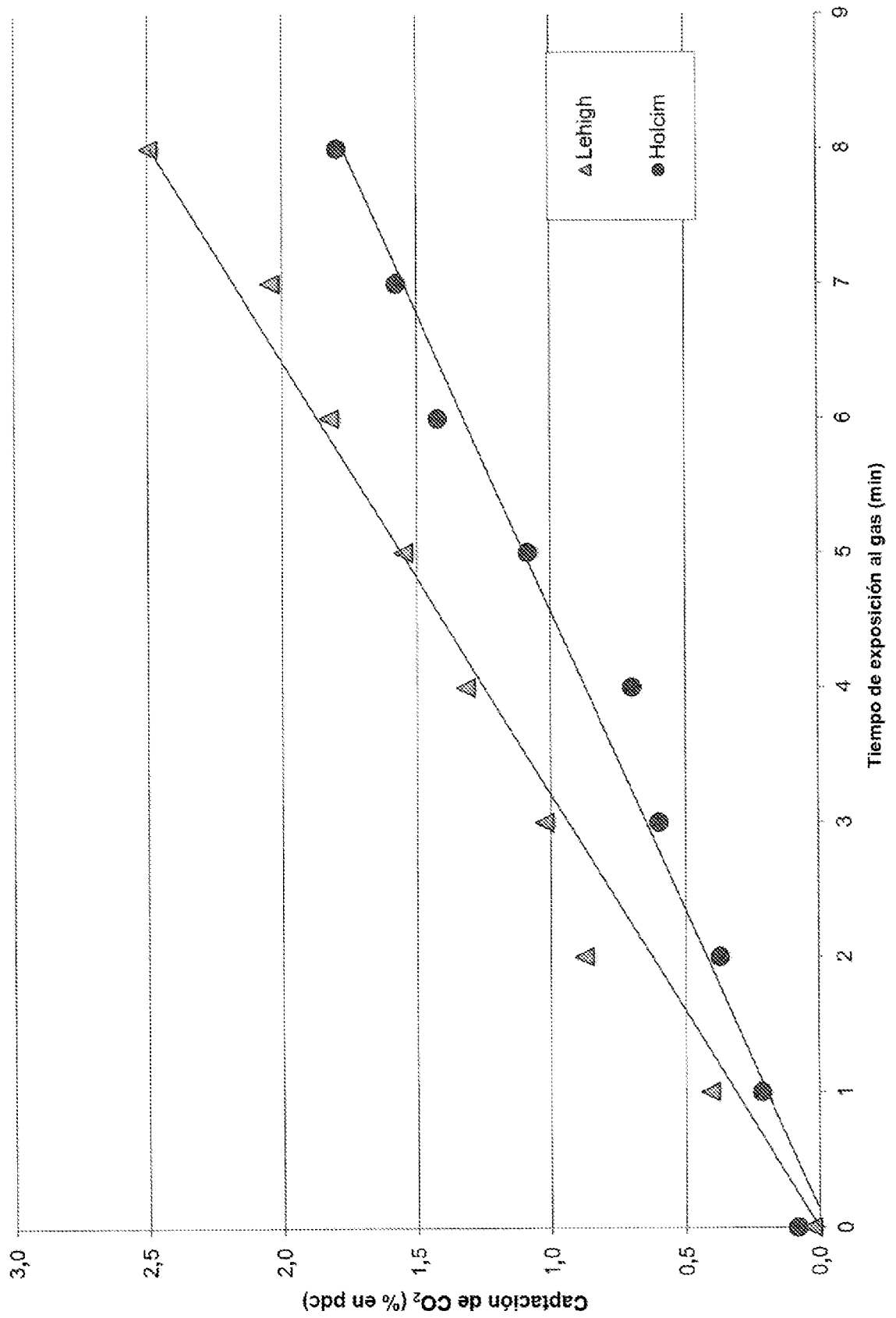


Figura 43

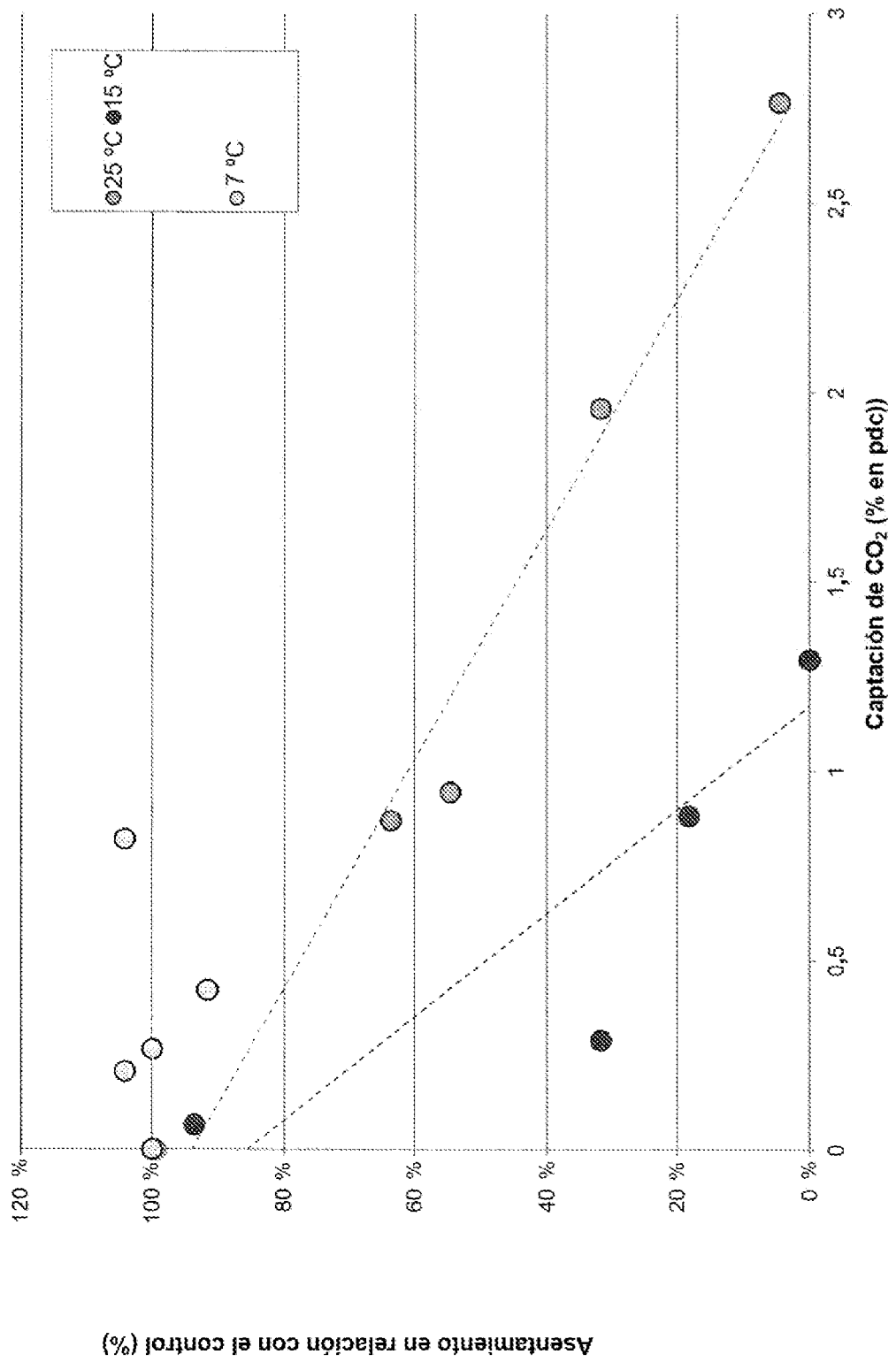


Figura 44

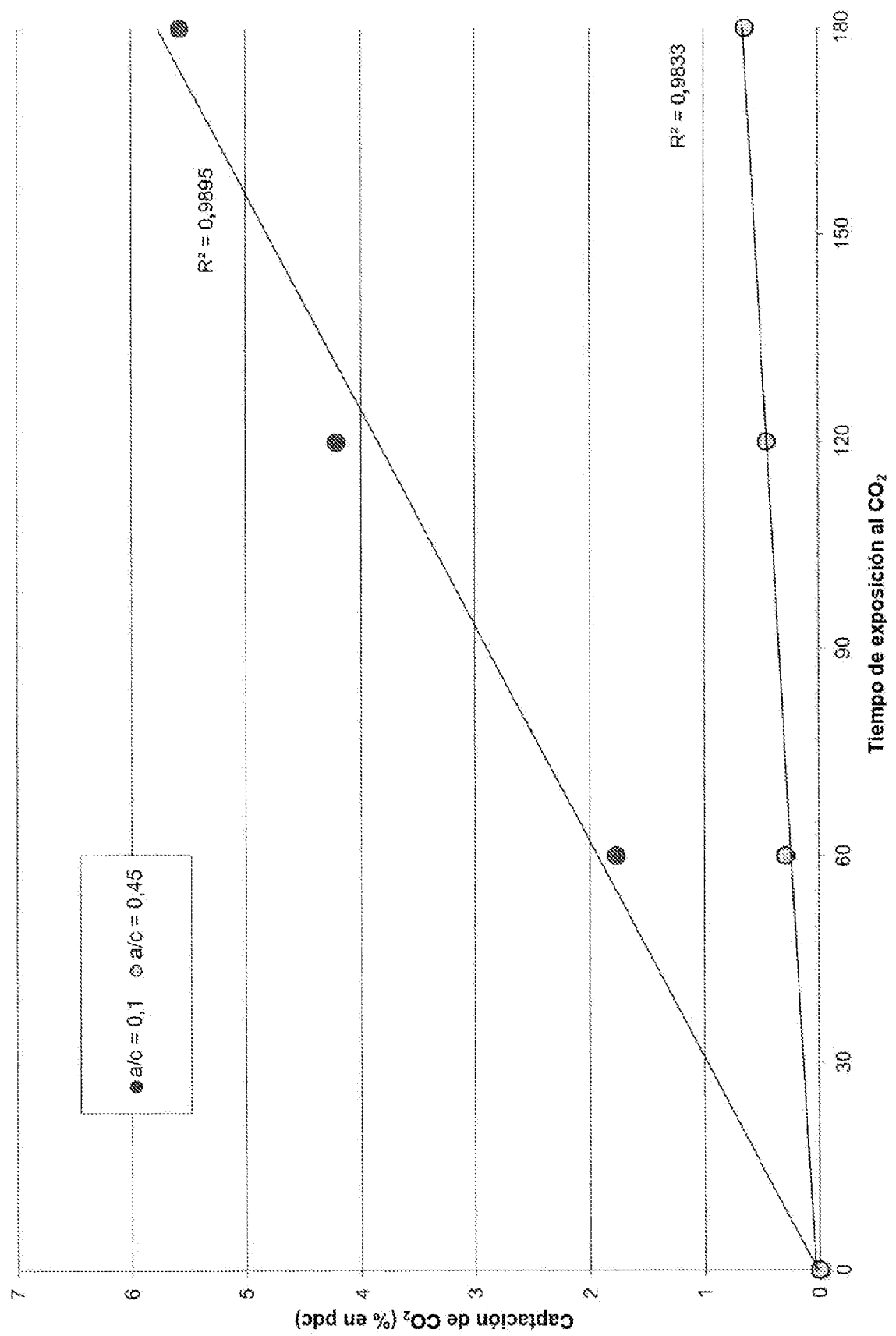


Figura 45

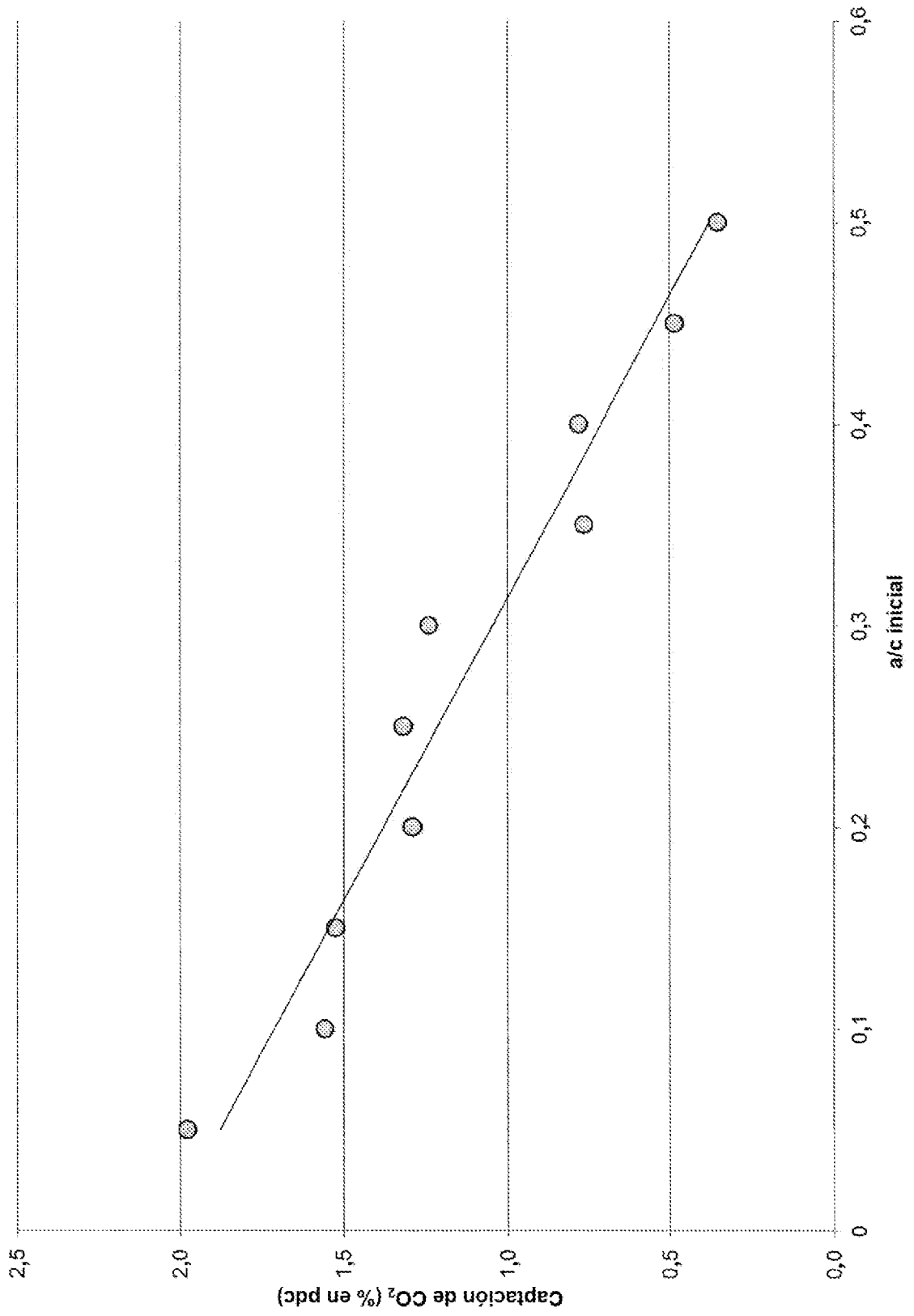


Figura 46

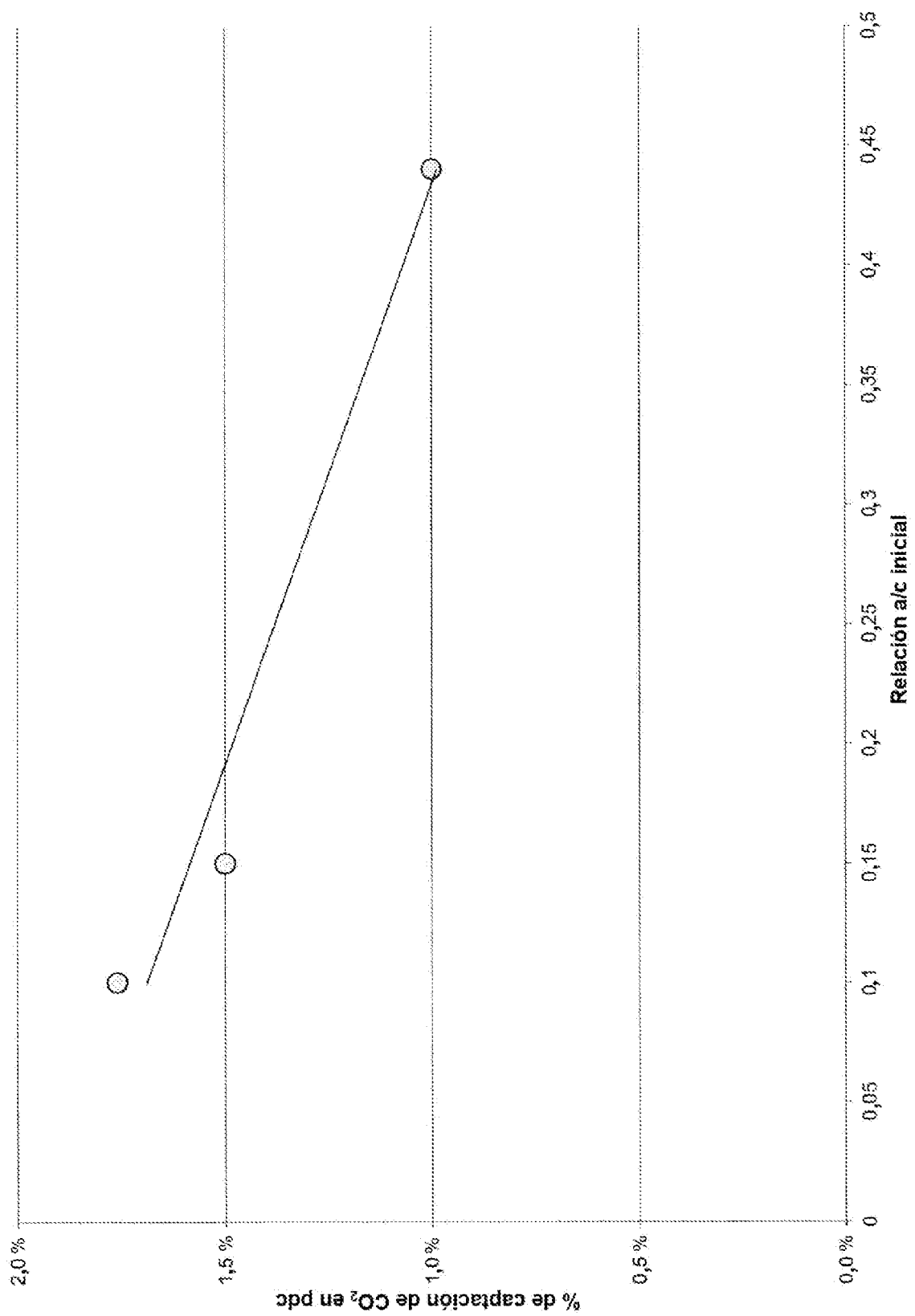


Figura 47

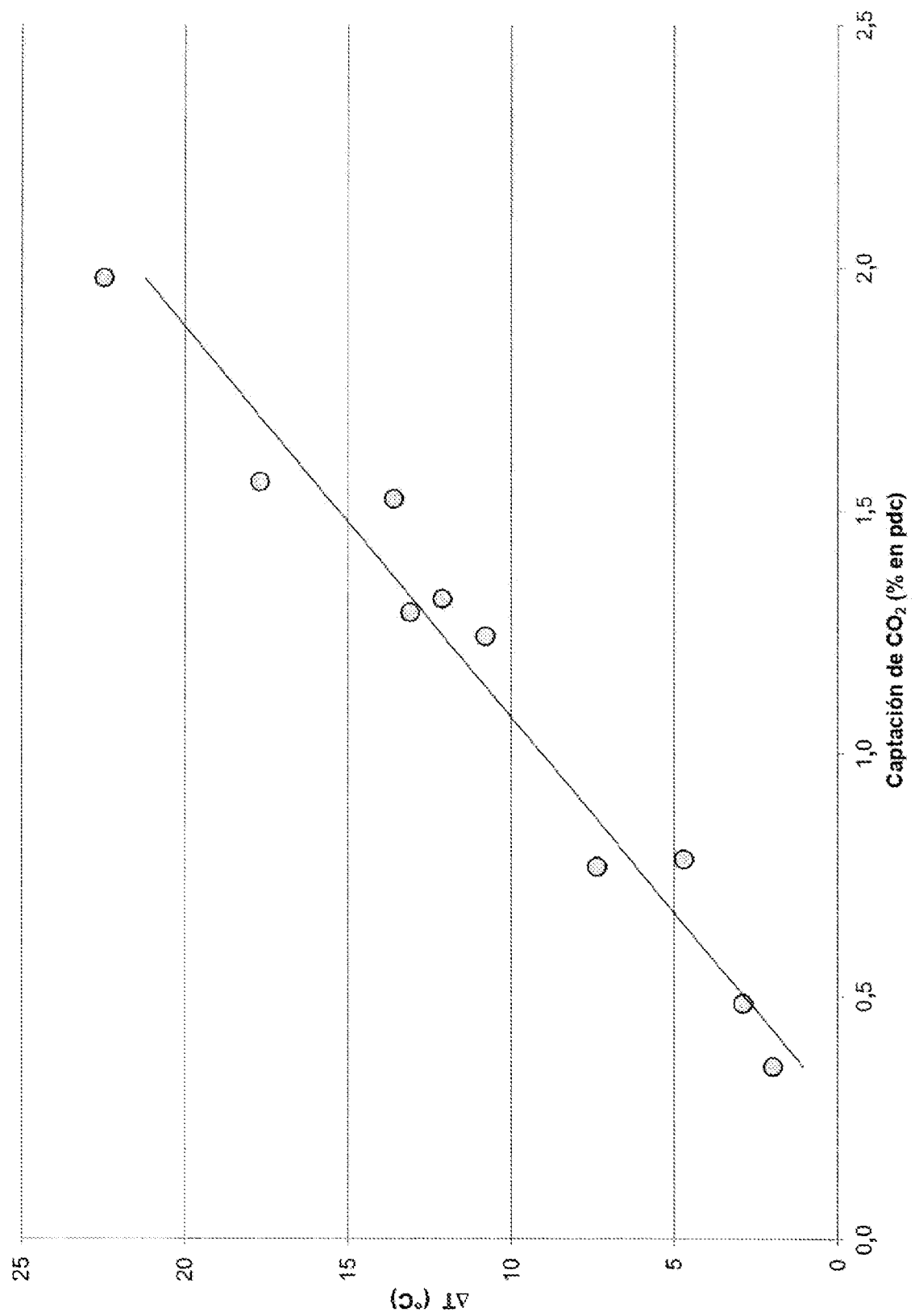


Figura 48

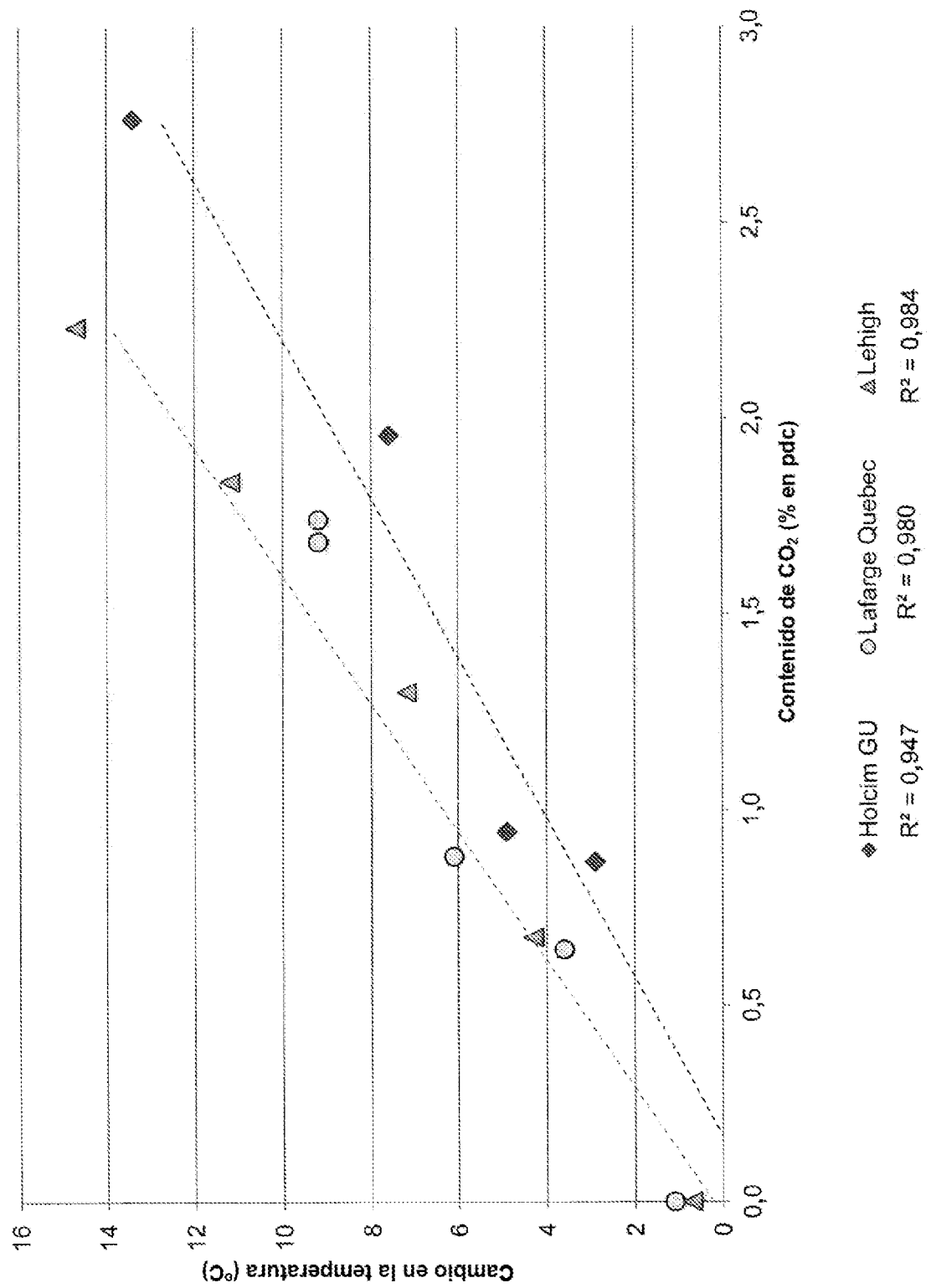


Figura 49

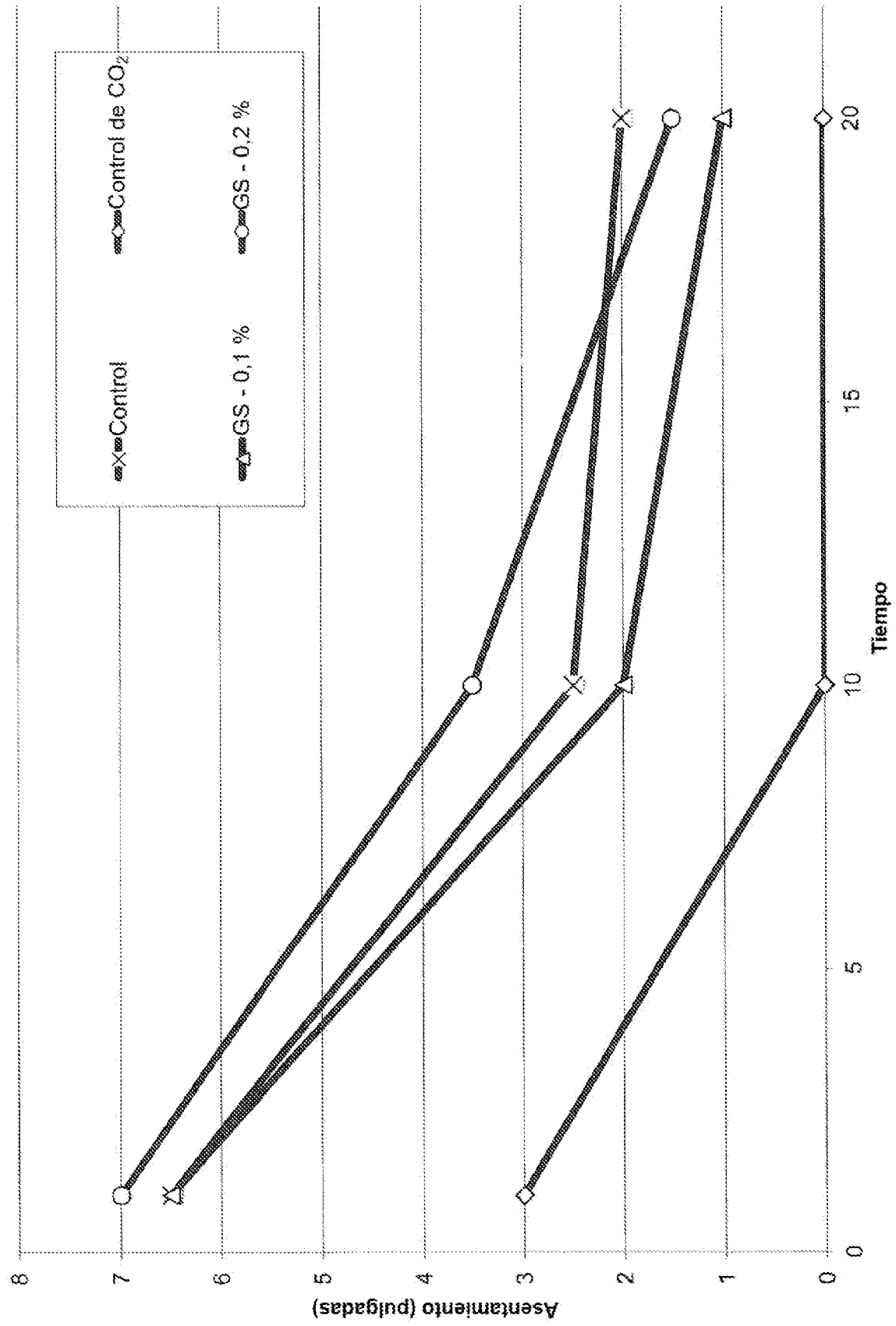


Figura 50

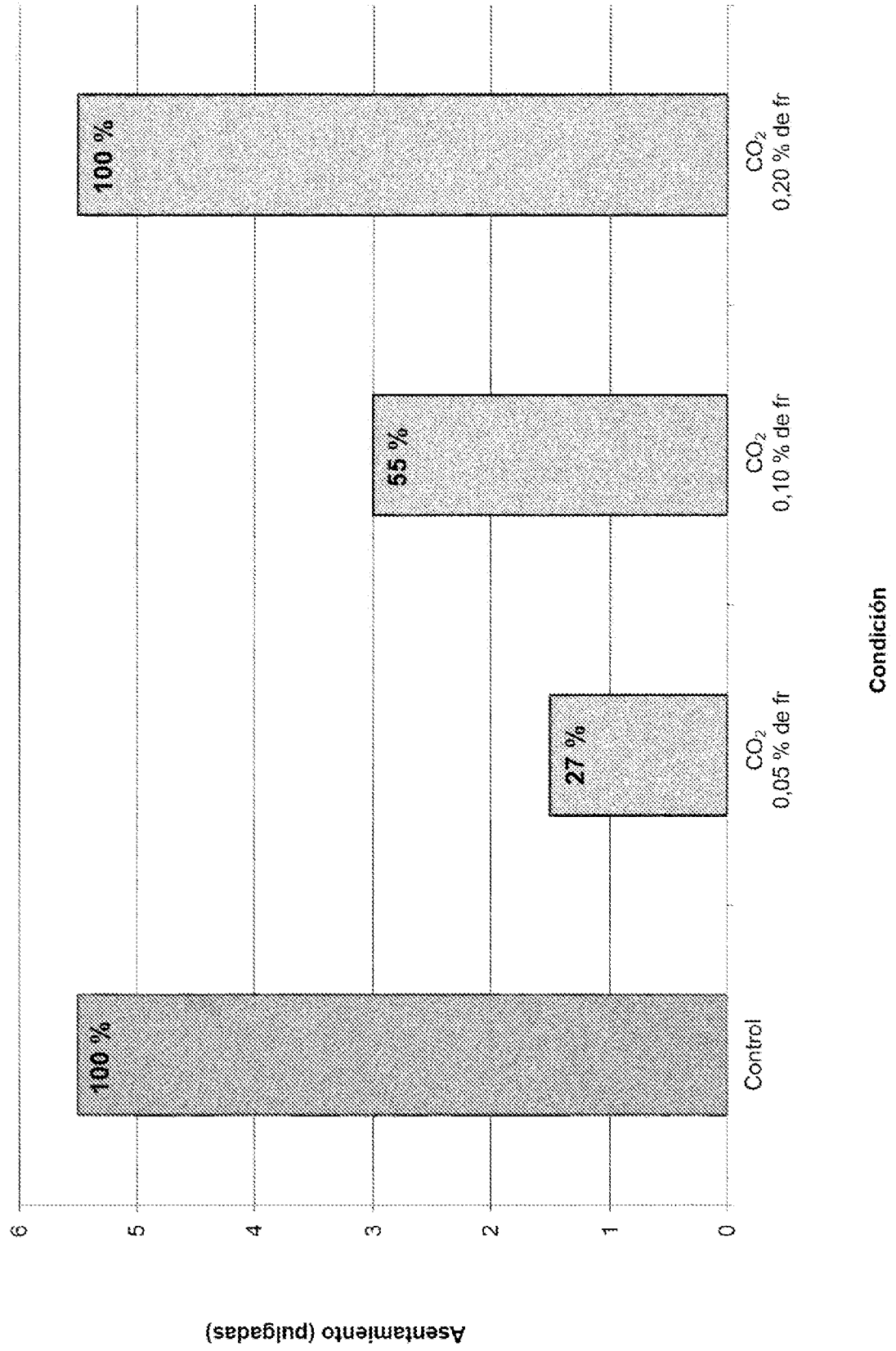


Figura 51

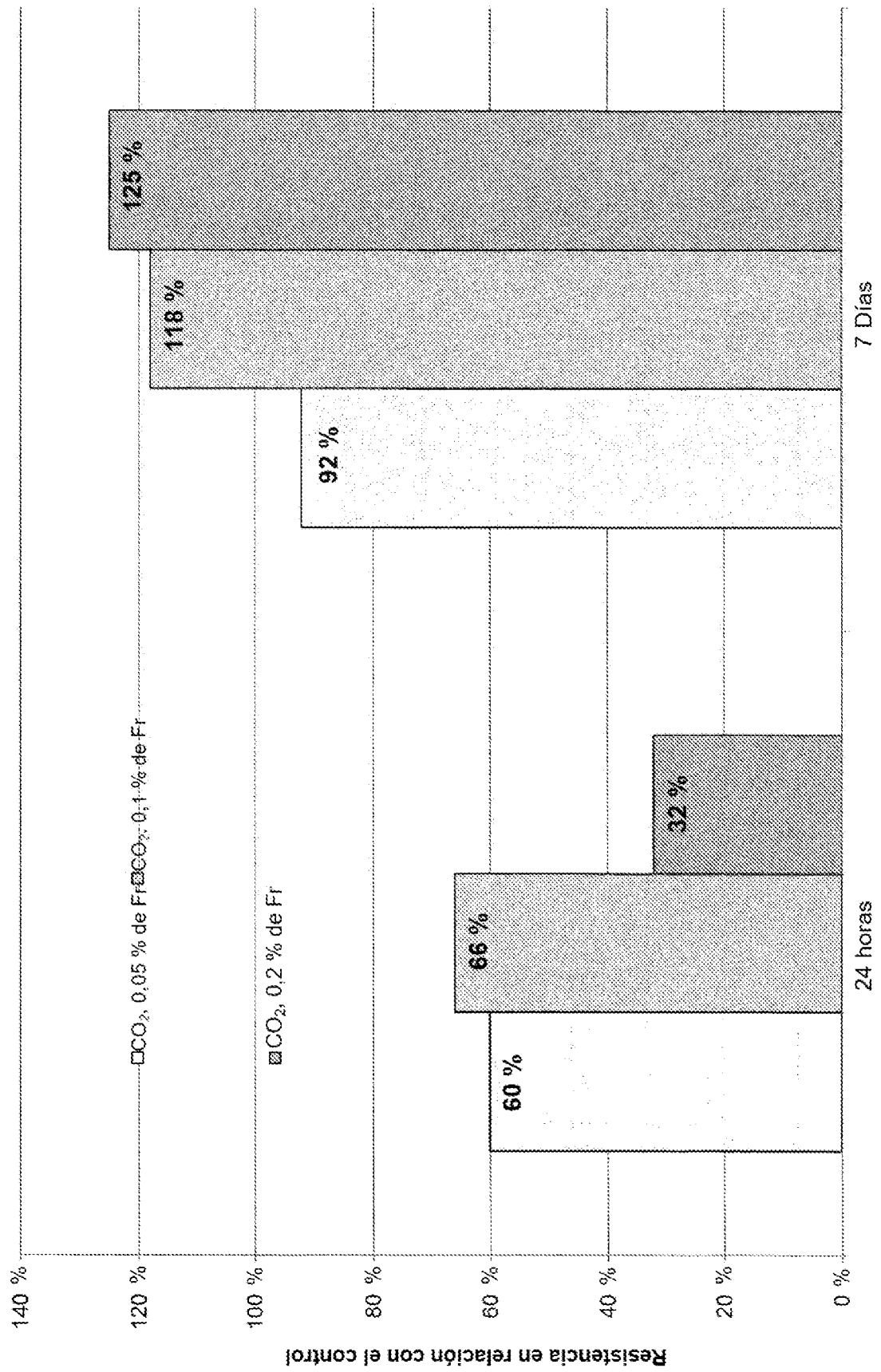


Figura 52

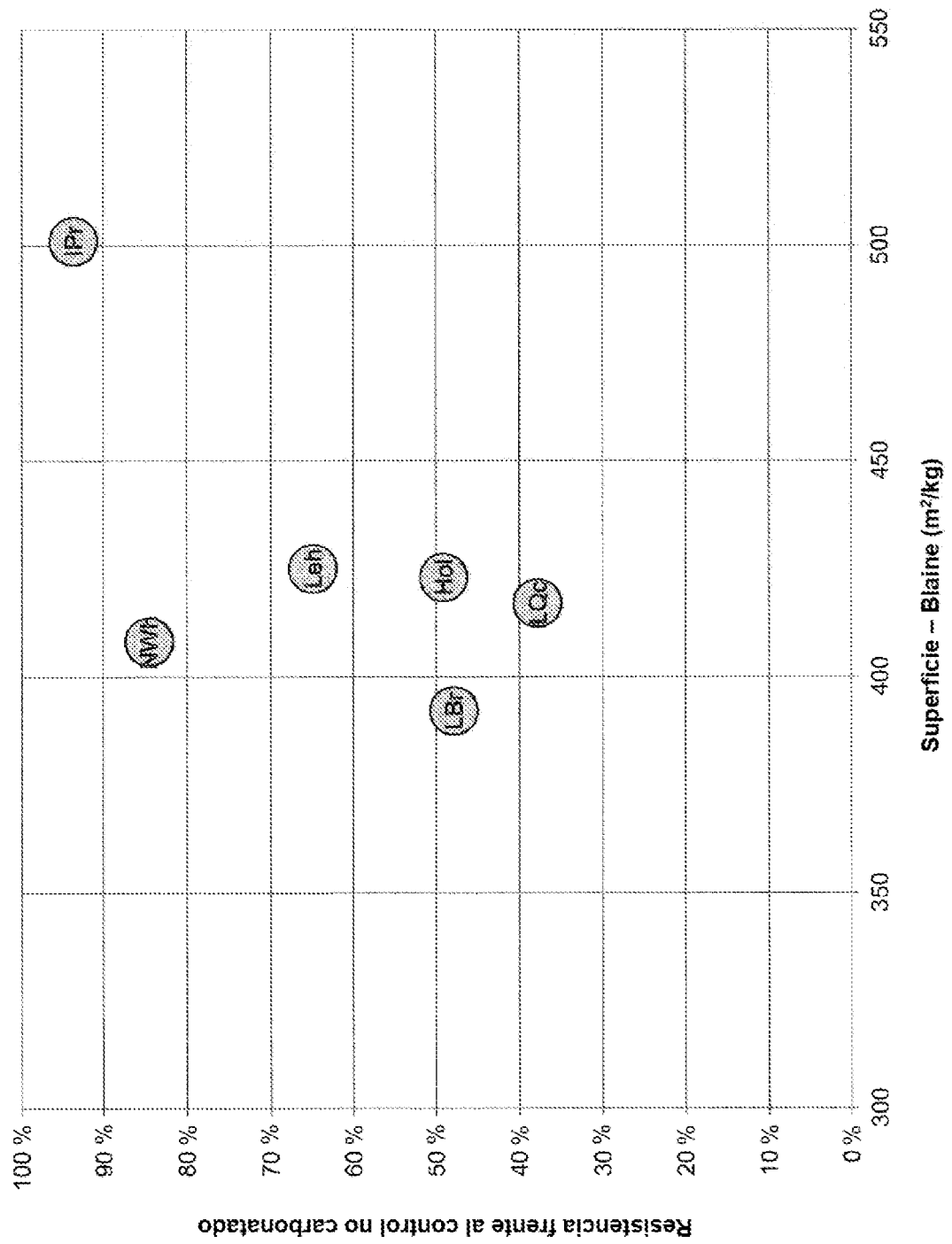


Figura 53

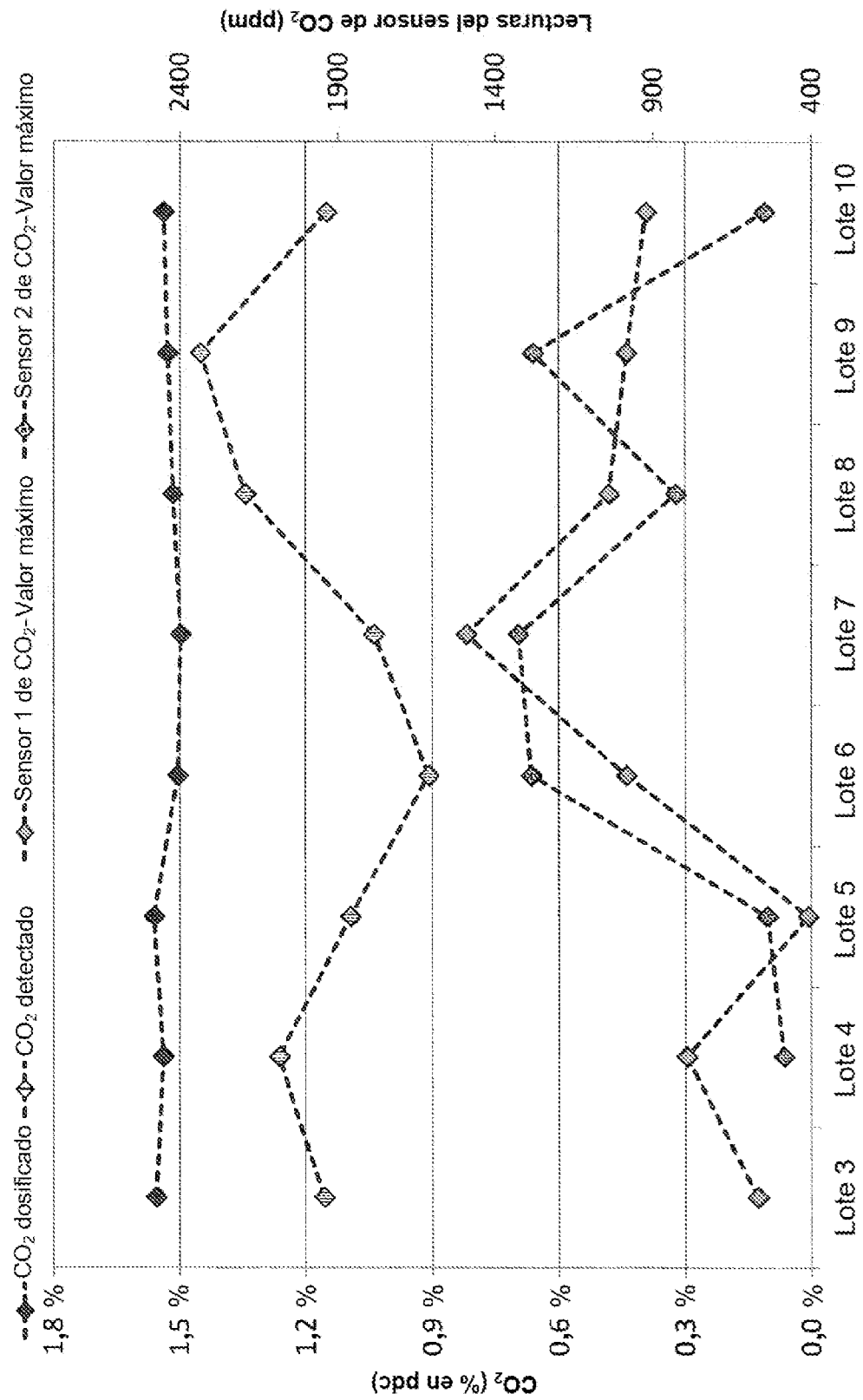


Figura 54

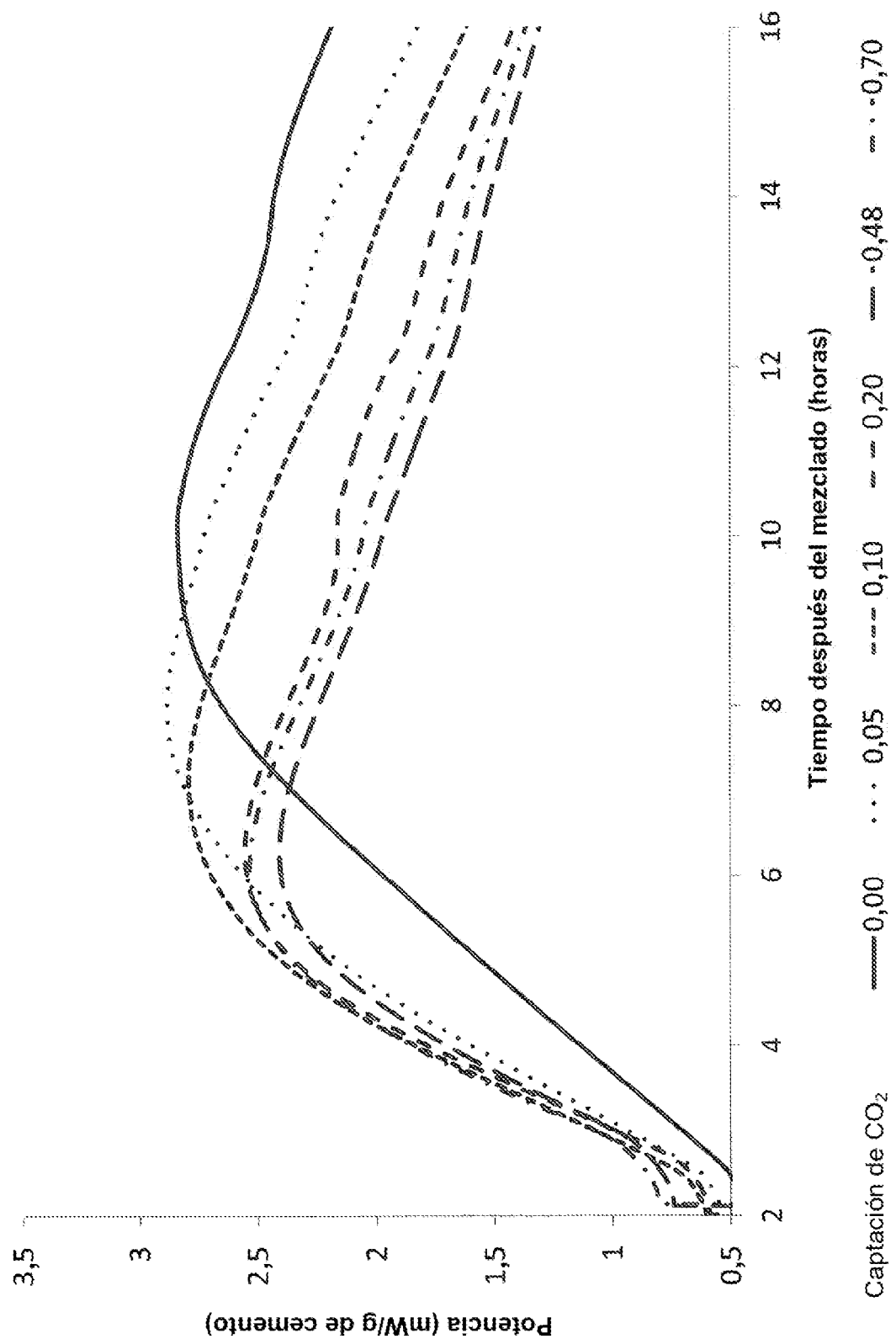


Figura 55

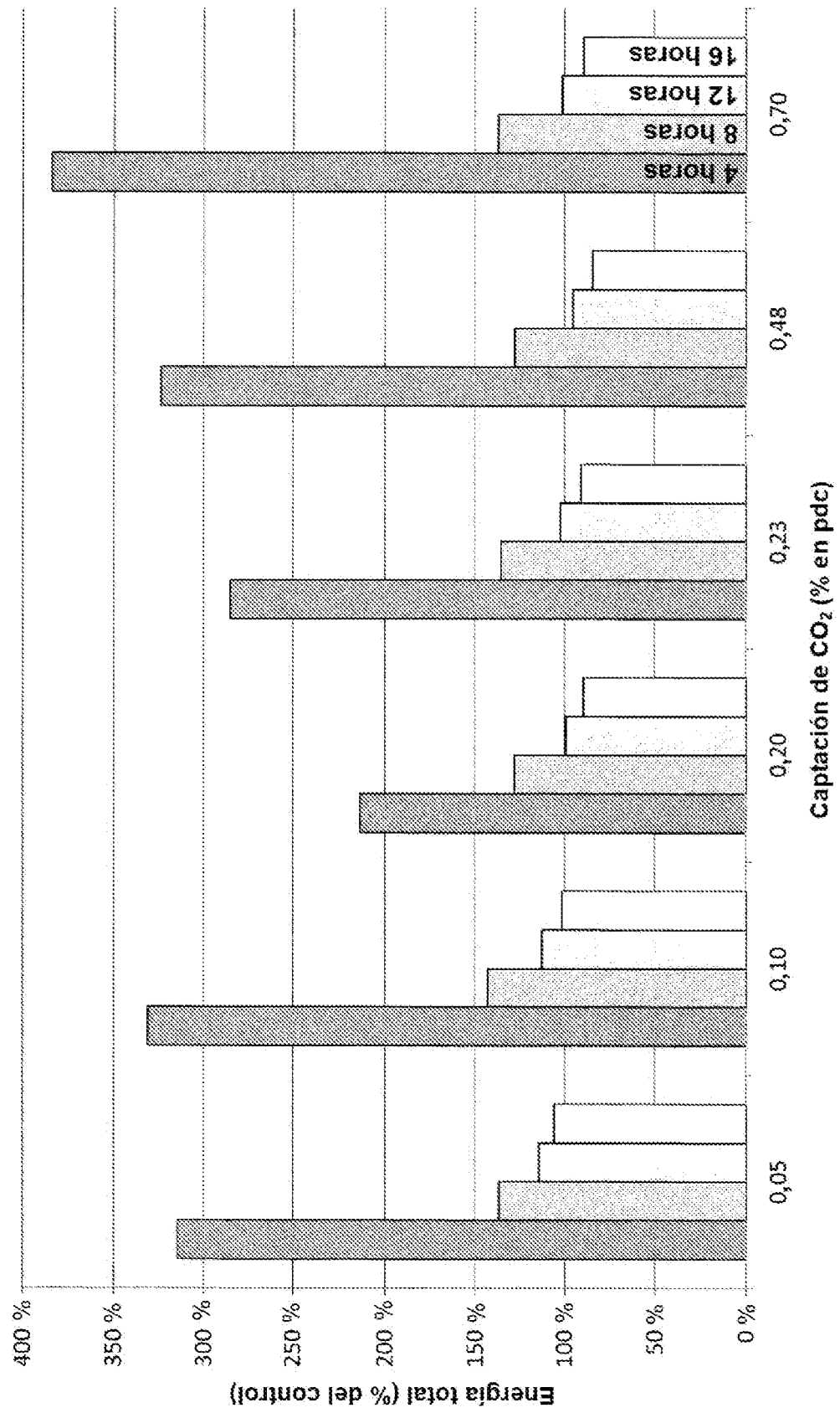


Figura 56

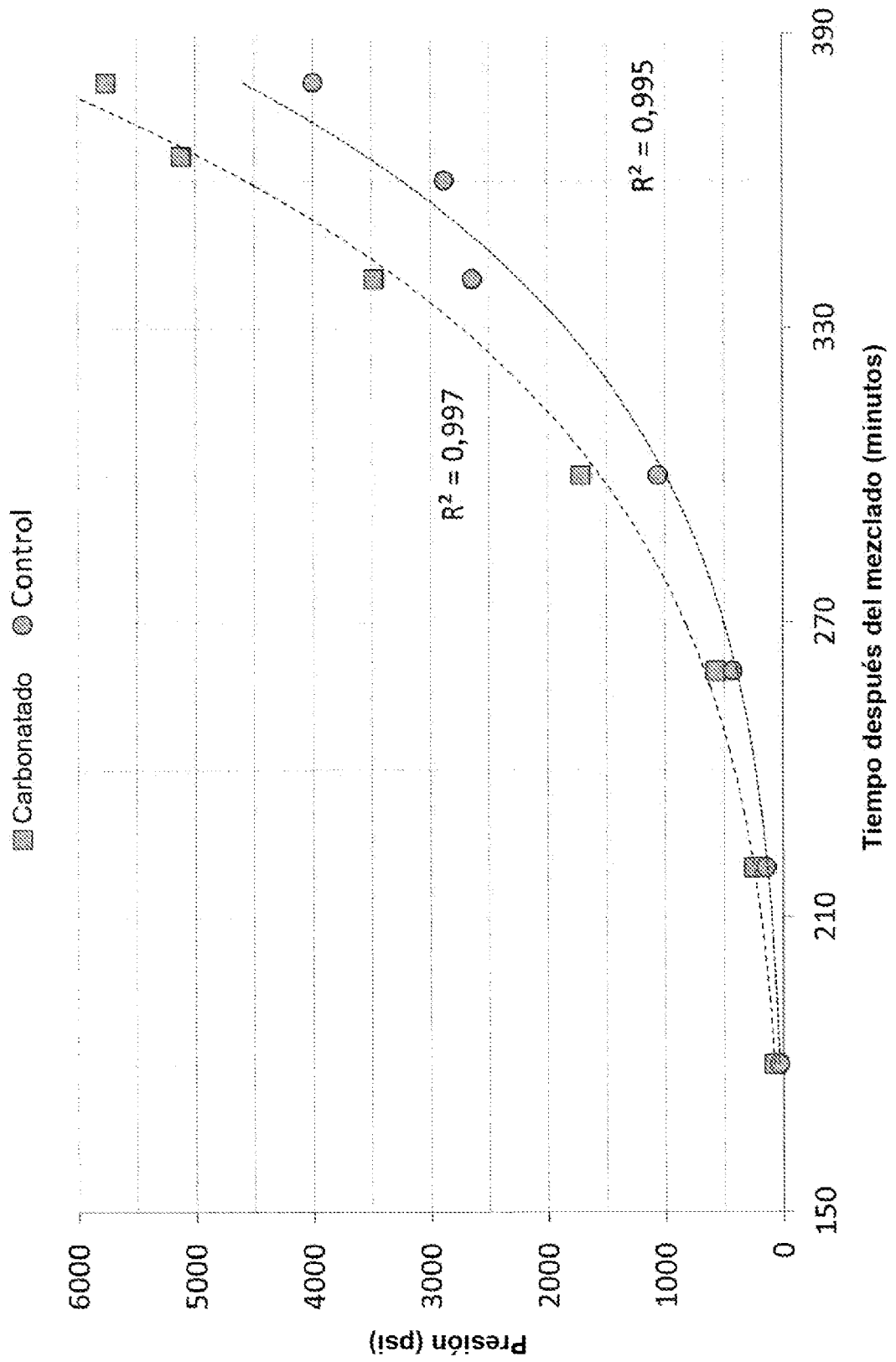


Figura 57

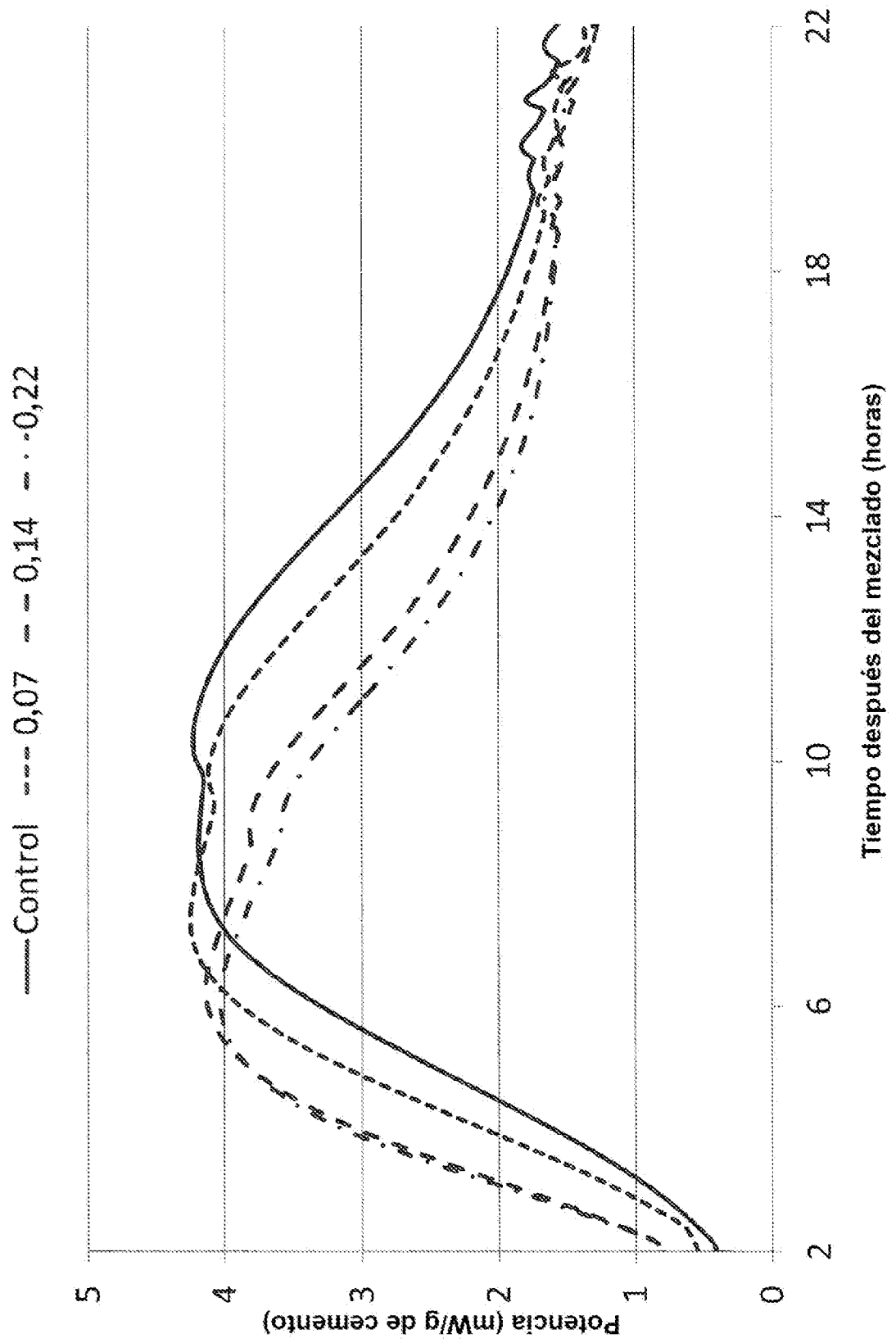


Figura 58

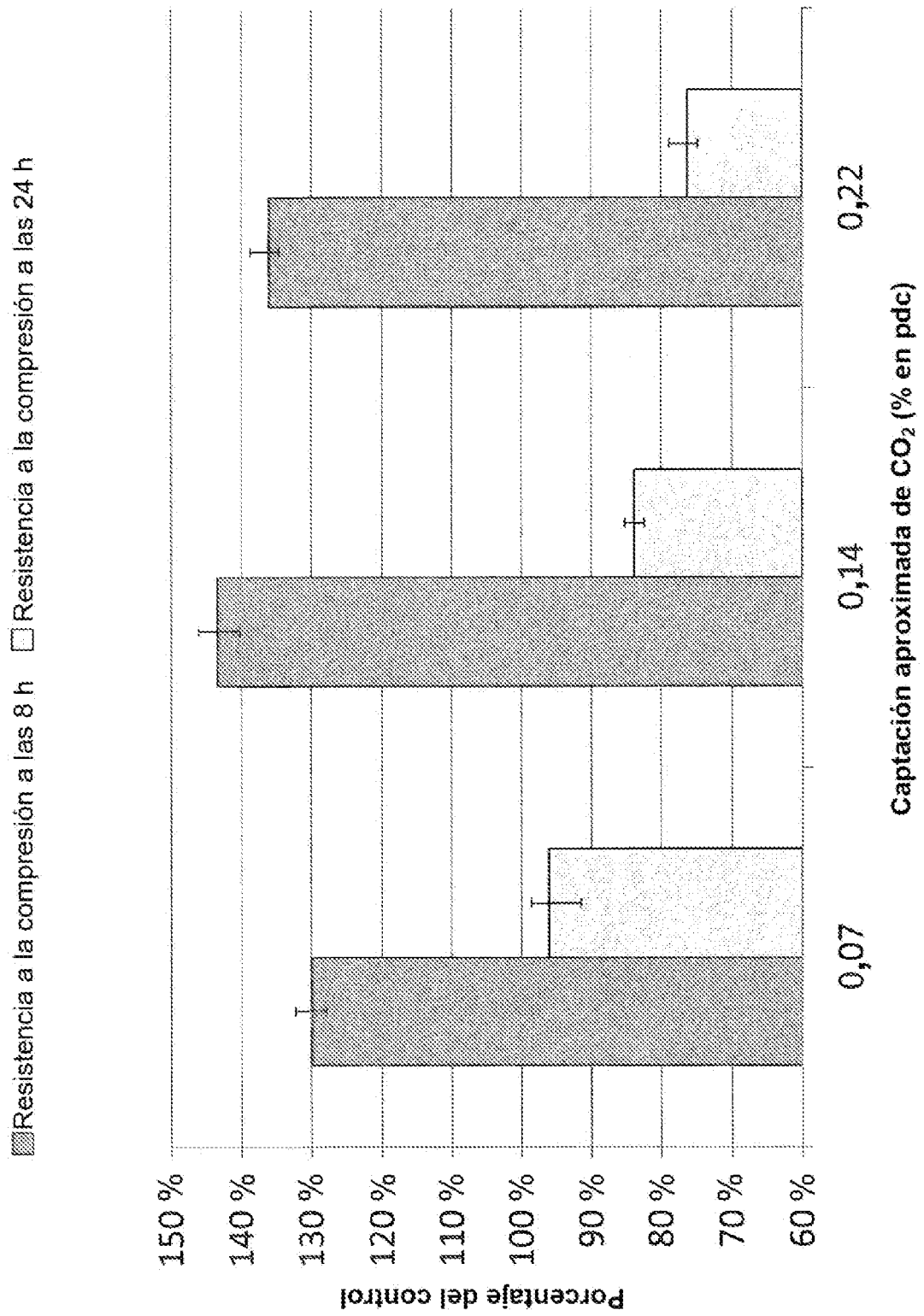


Figura 59

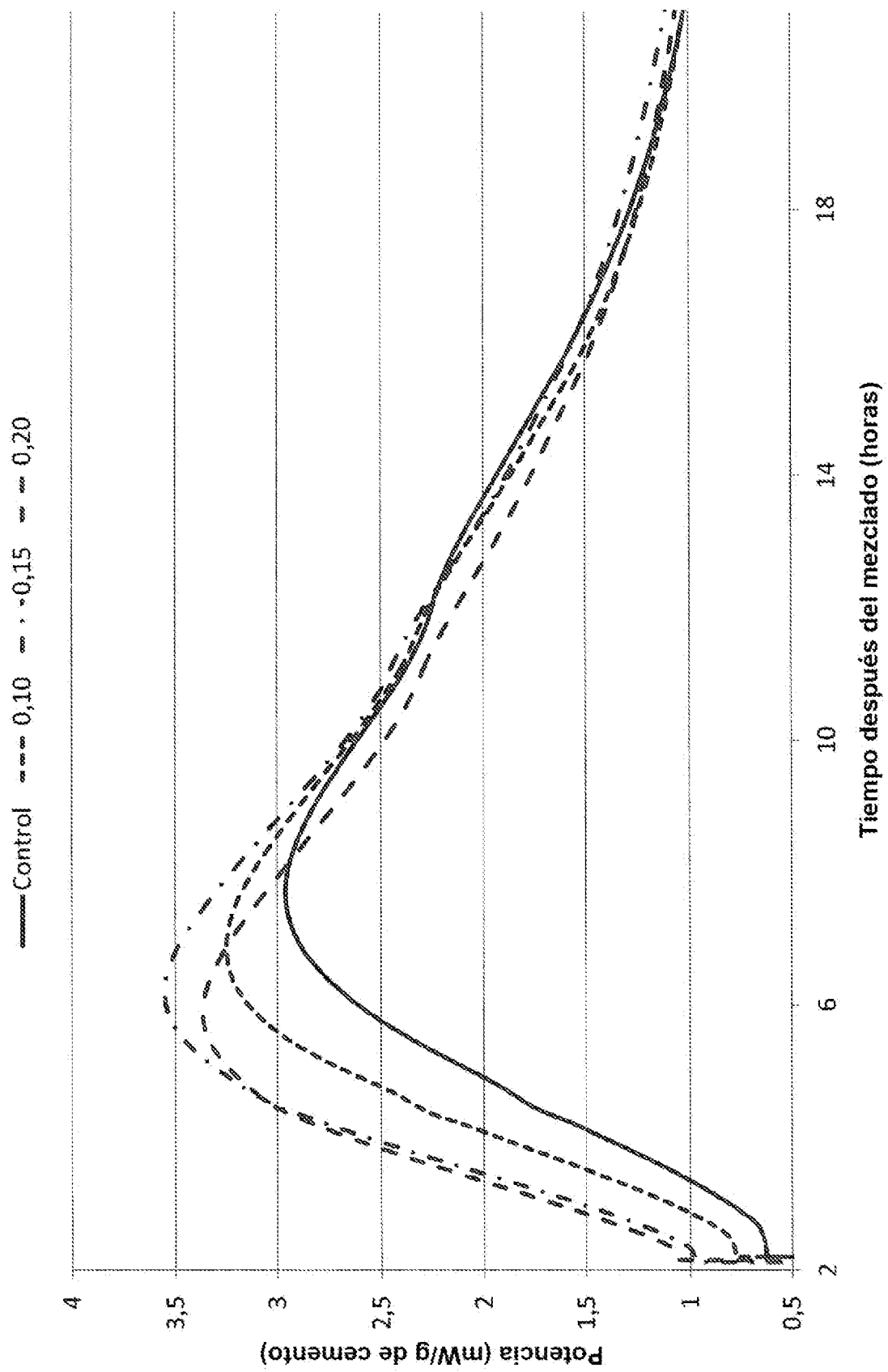


Figura 60

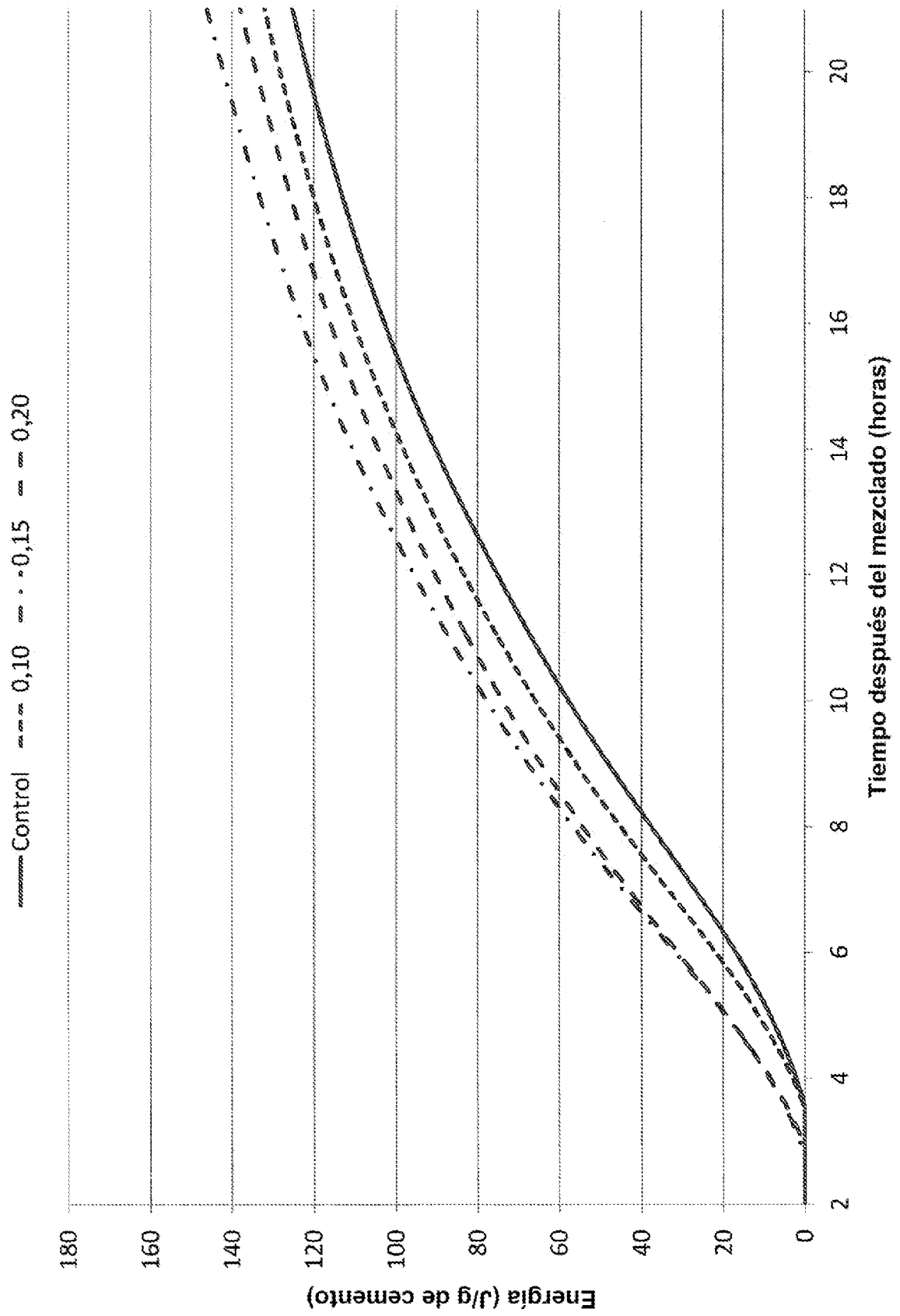


Figura 61

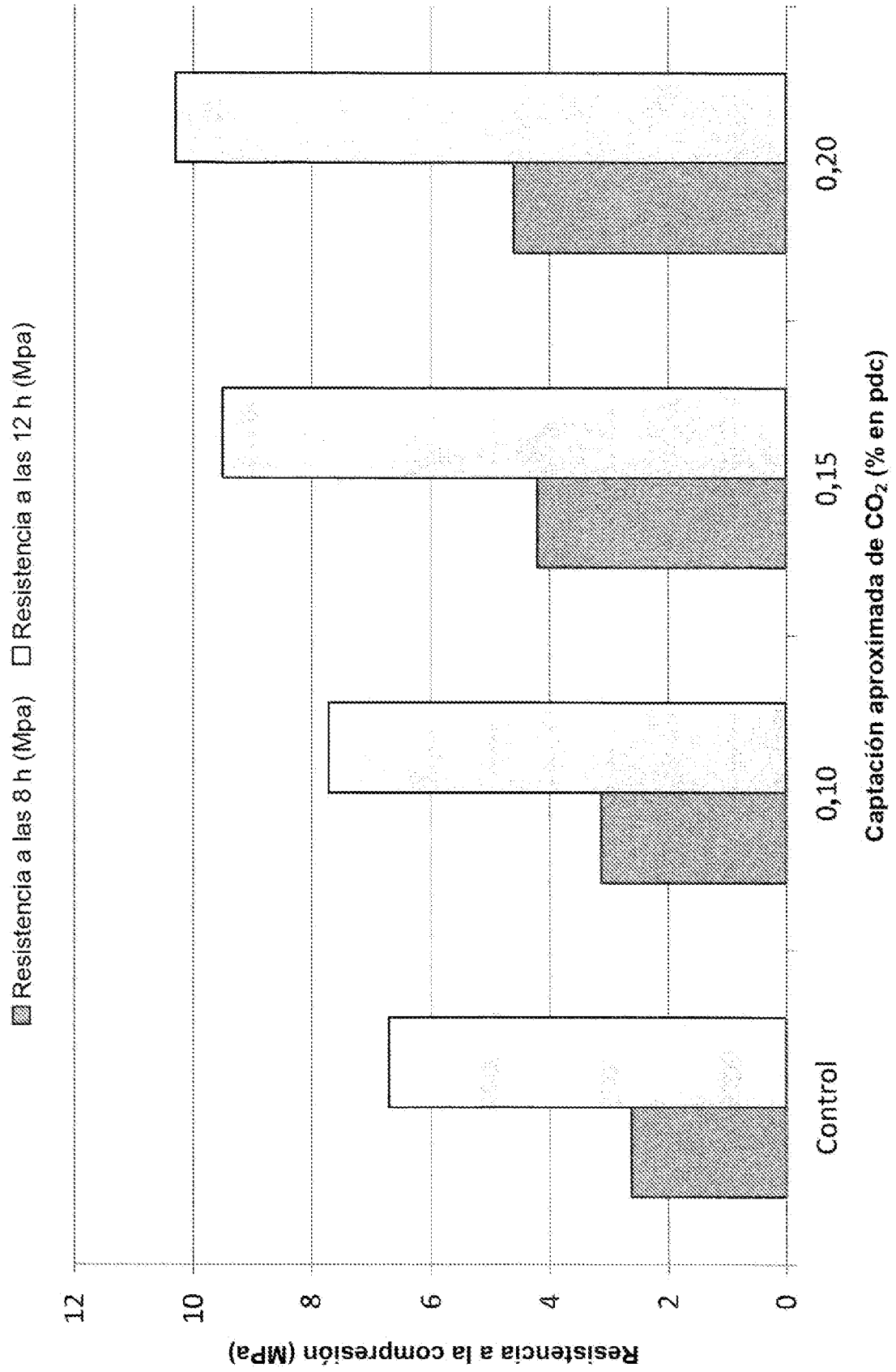


Figura 62

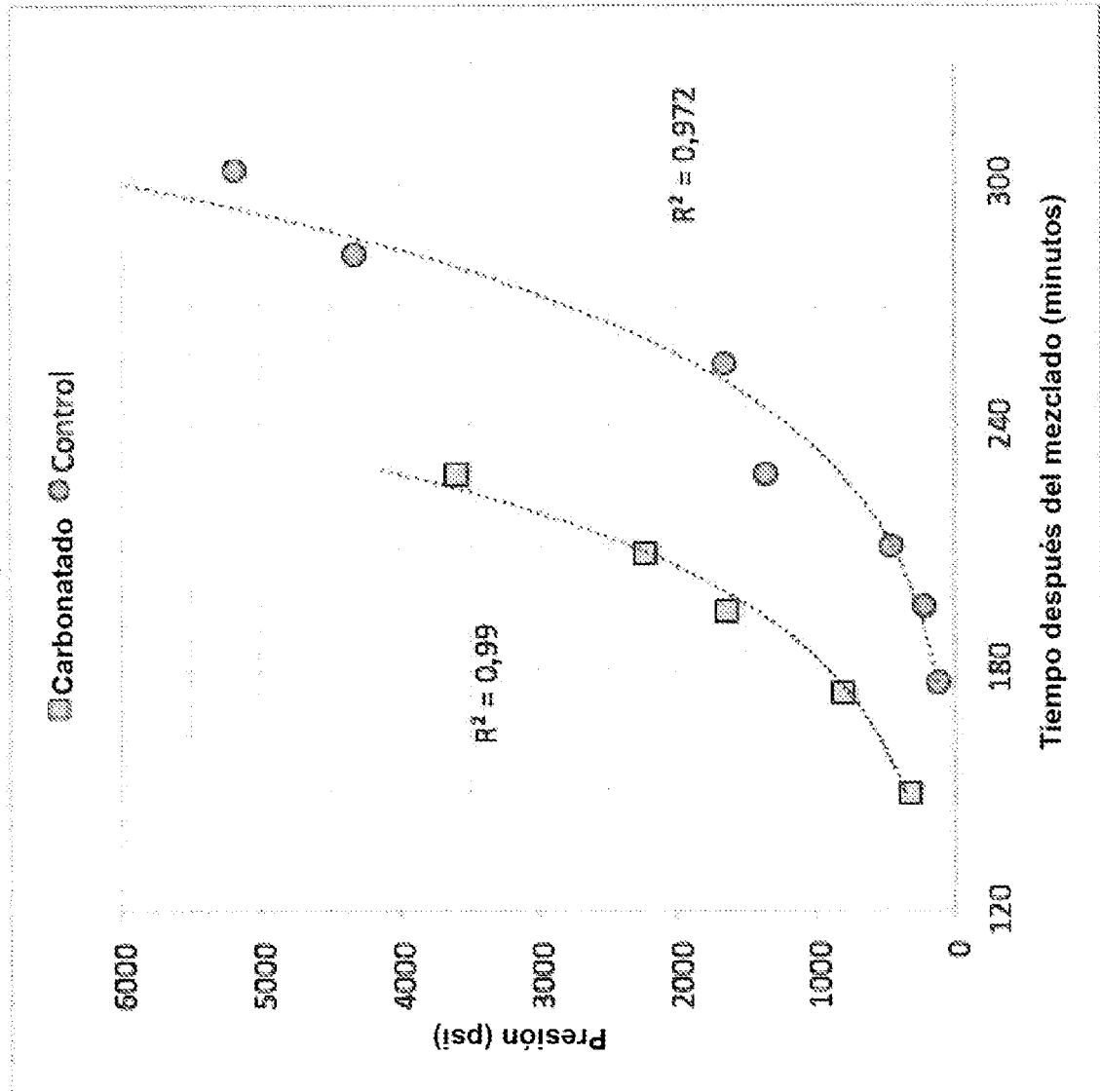


Figura 63

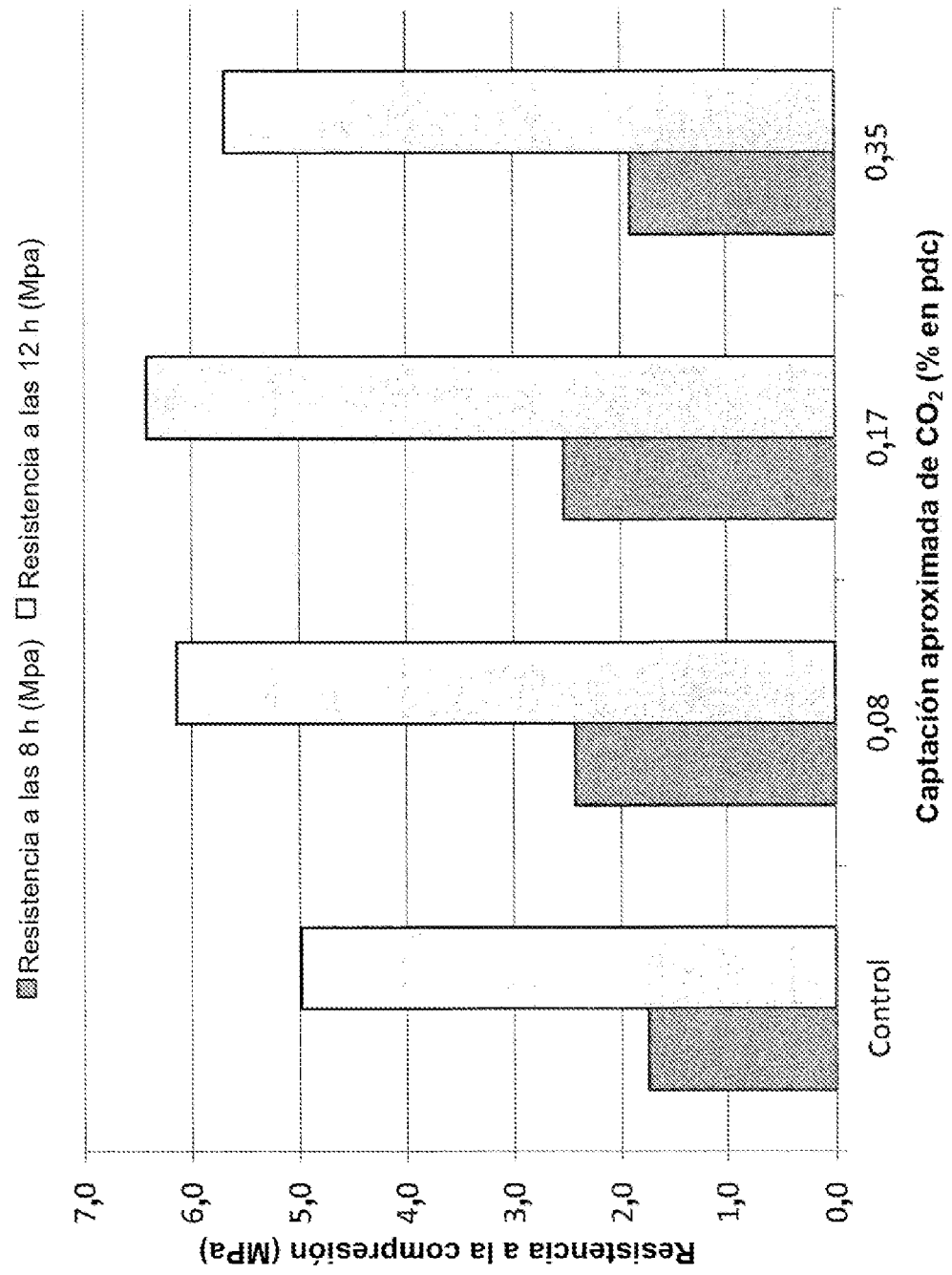


Figura 64

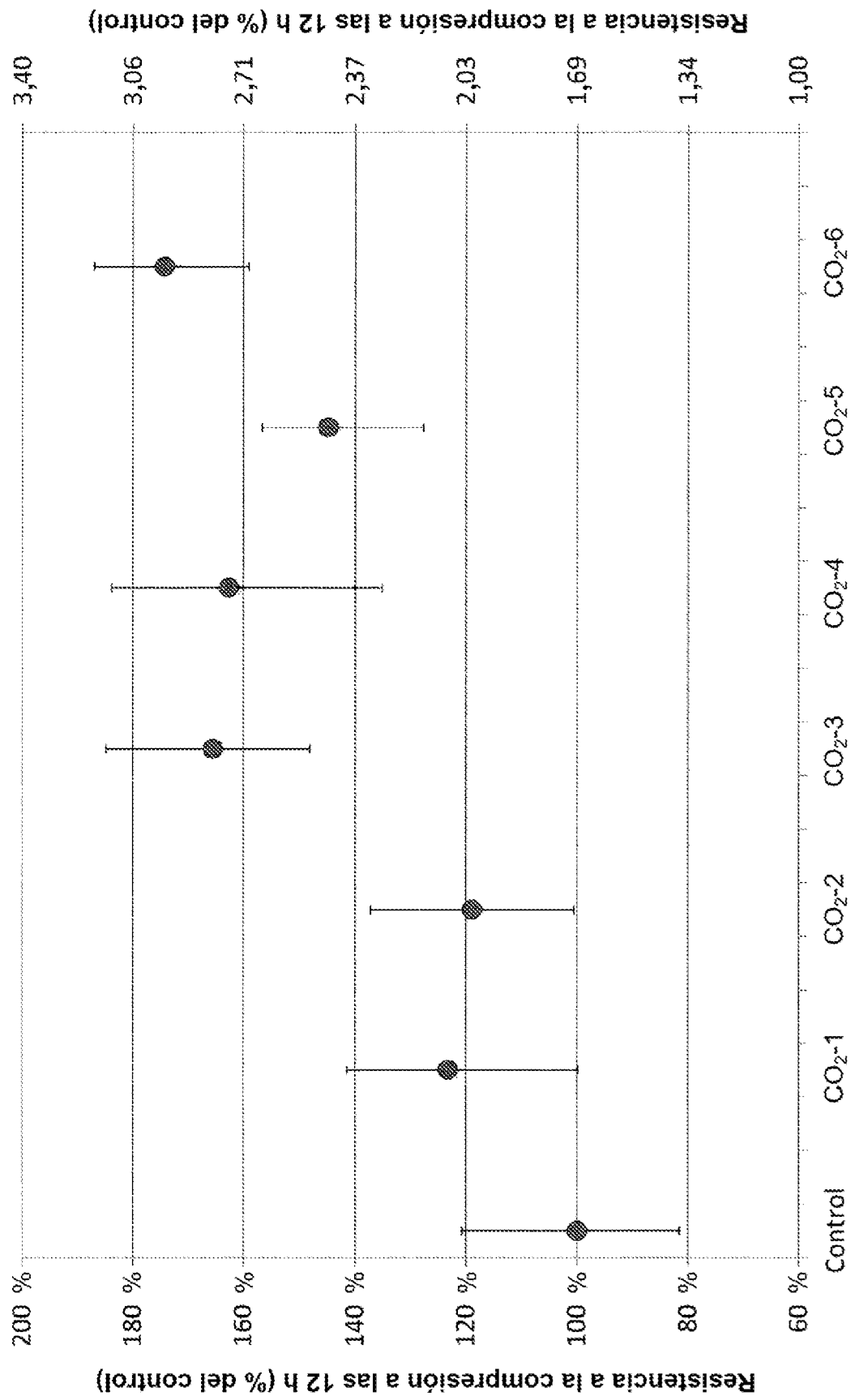


Figura 65

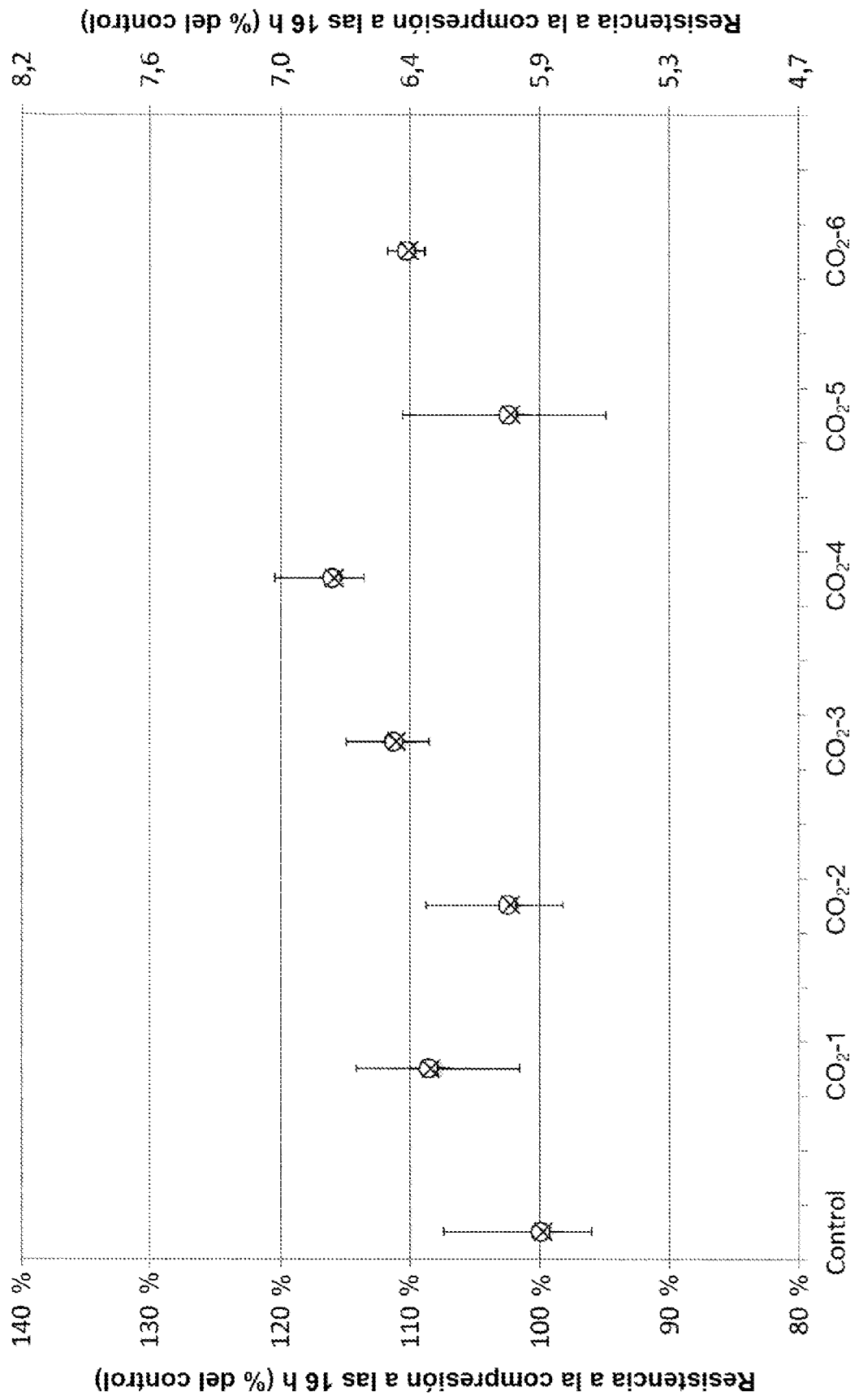


Figura 66

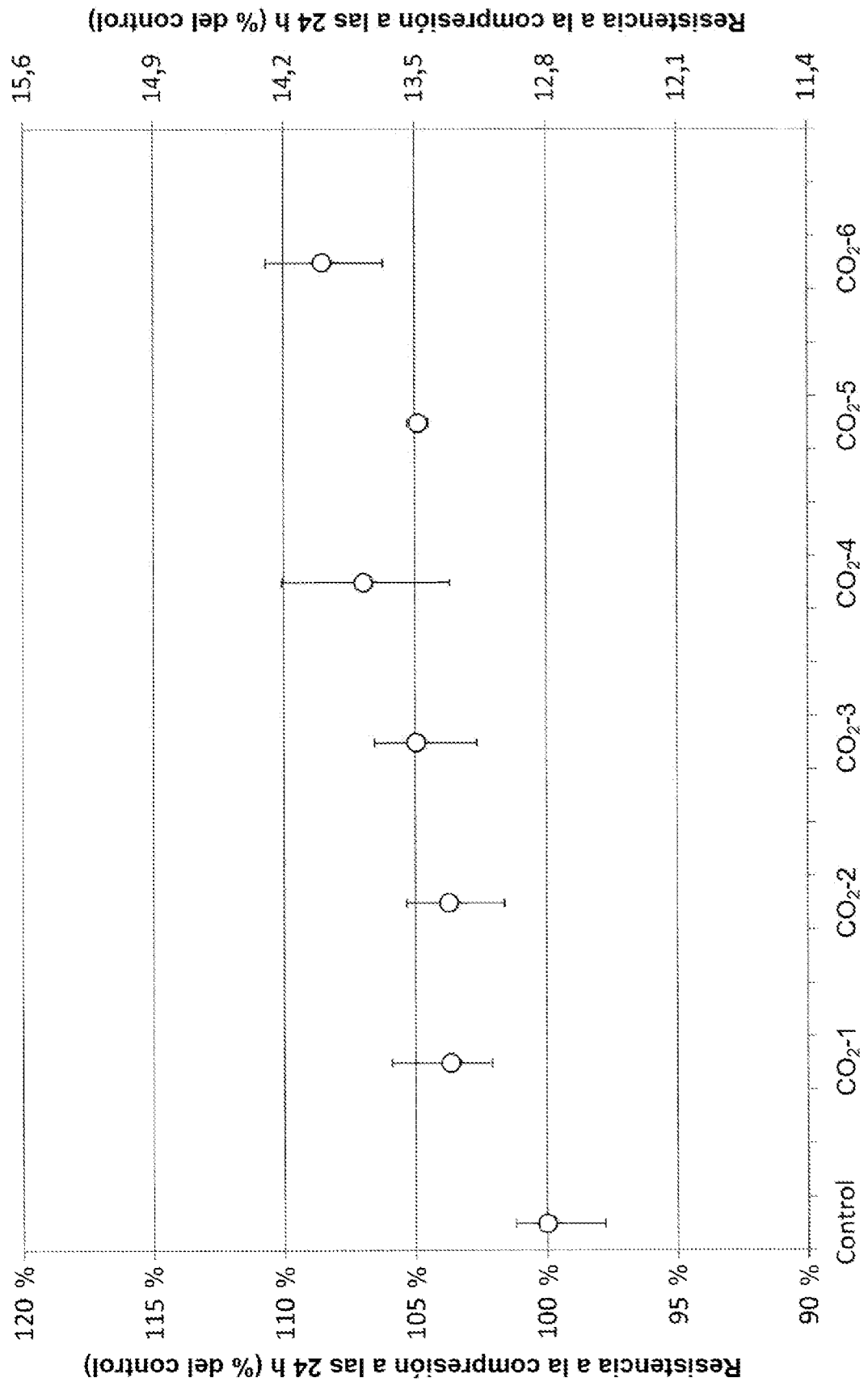


Figura 67

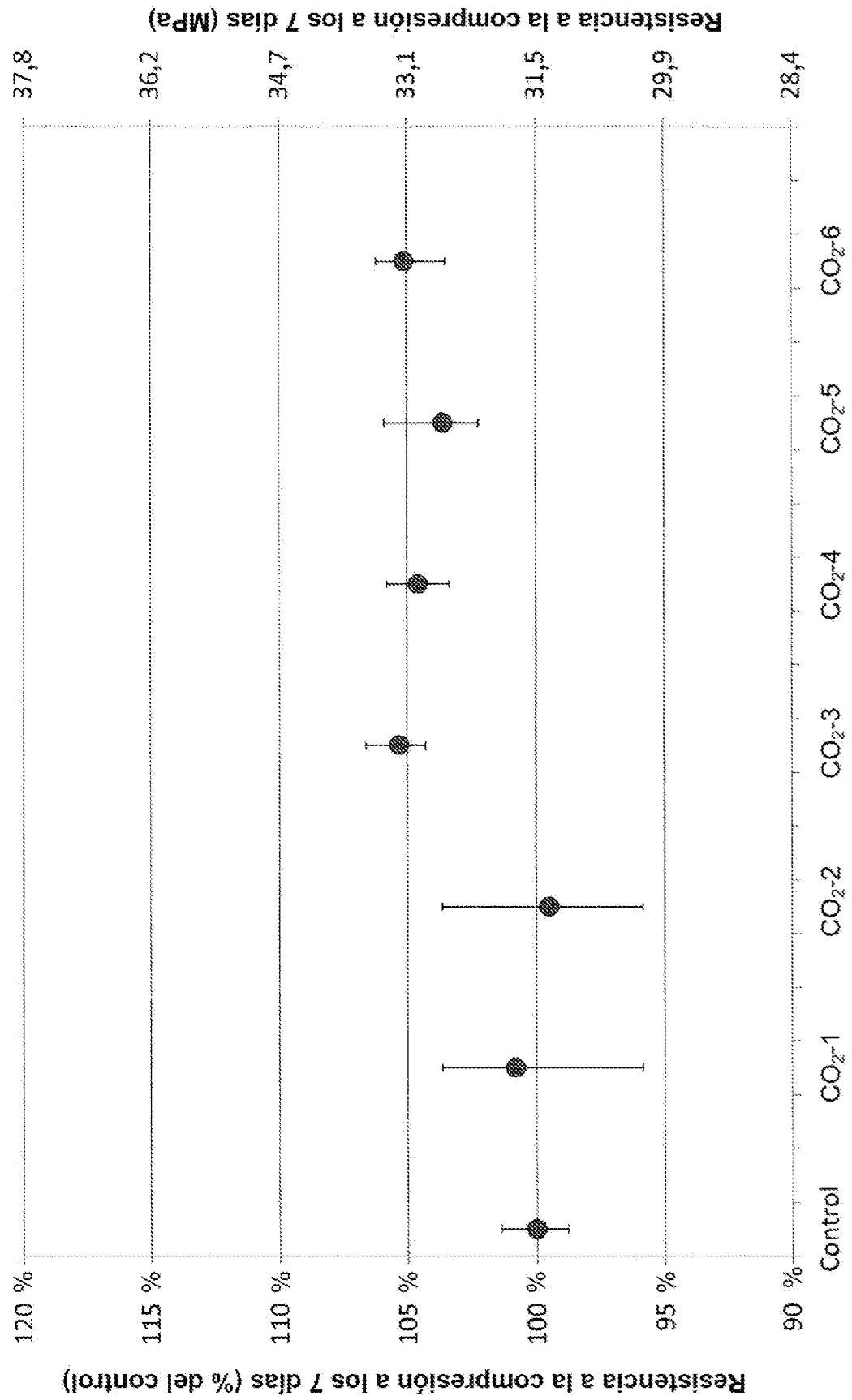


Figura 68

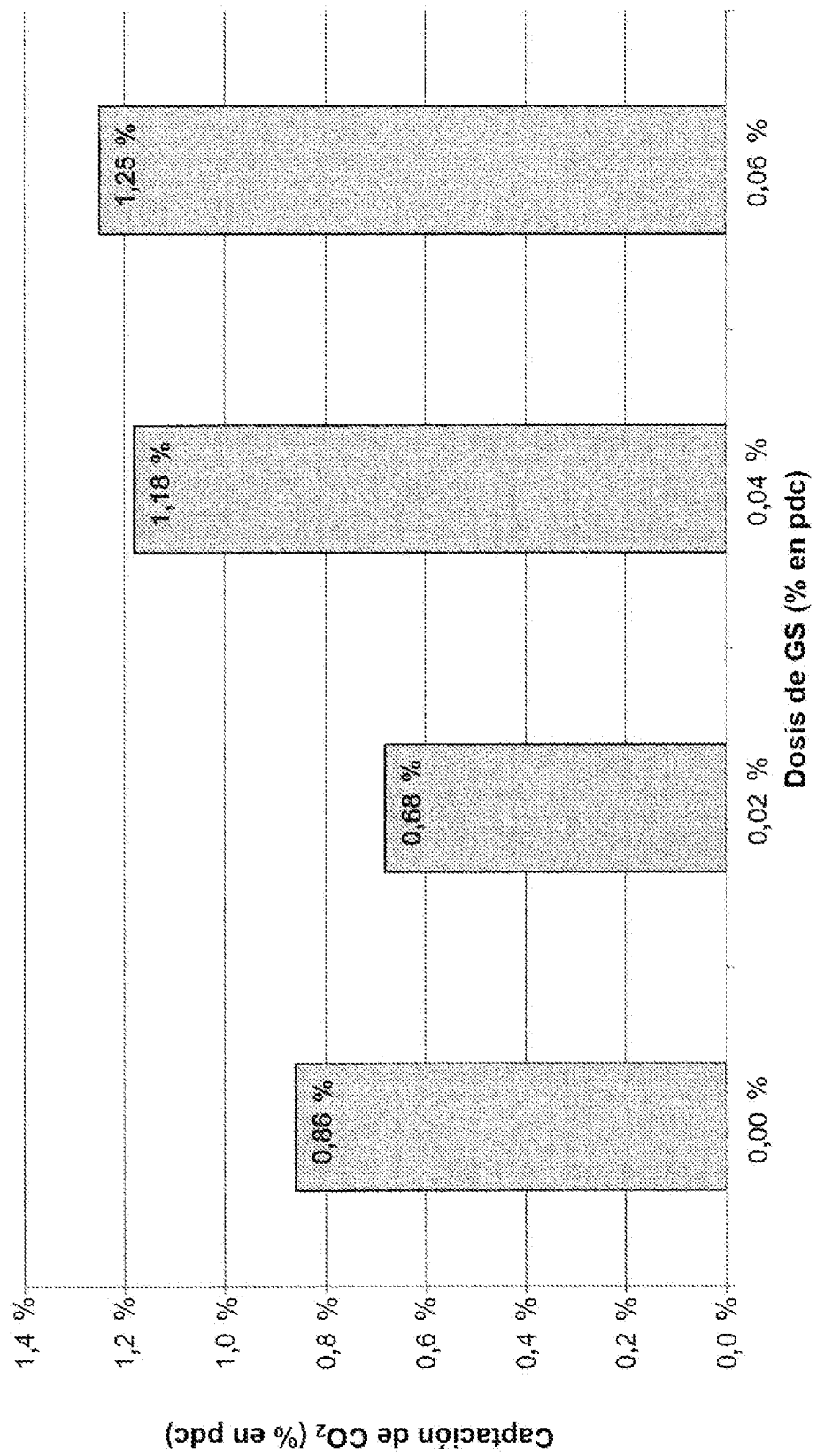


Figura 69

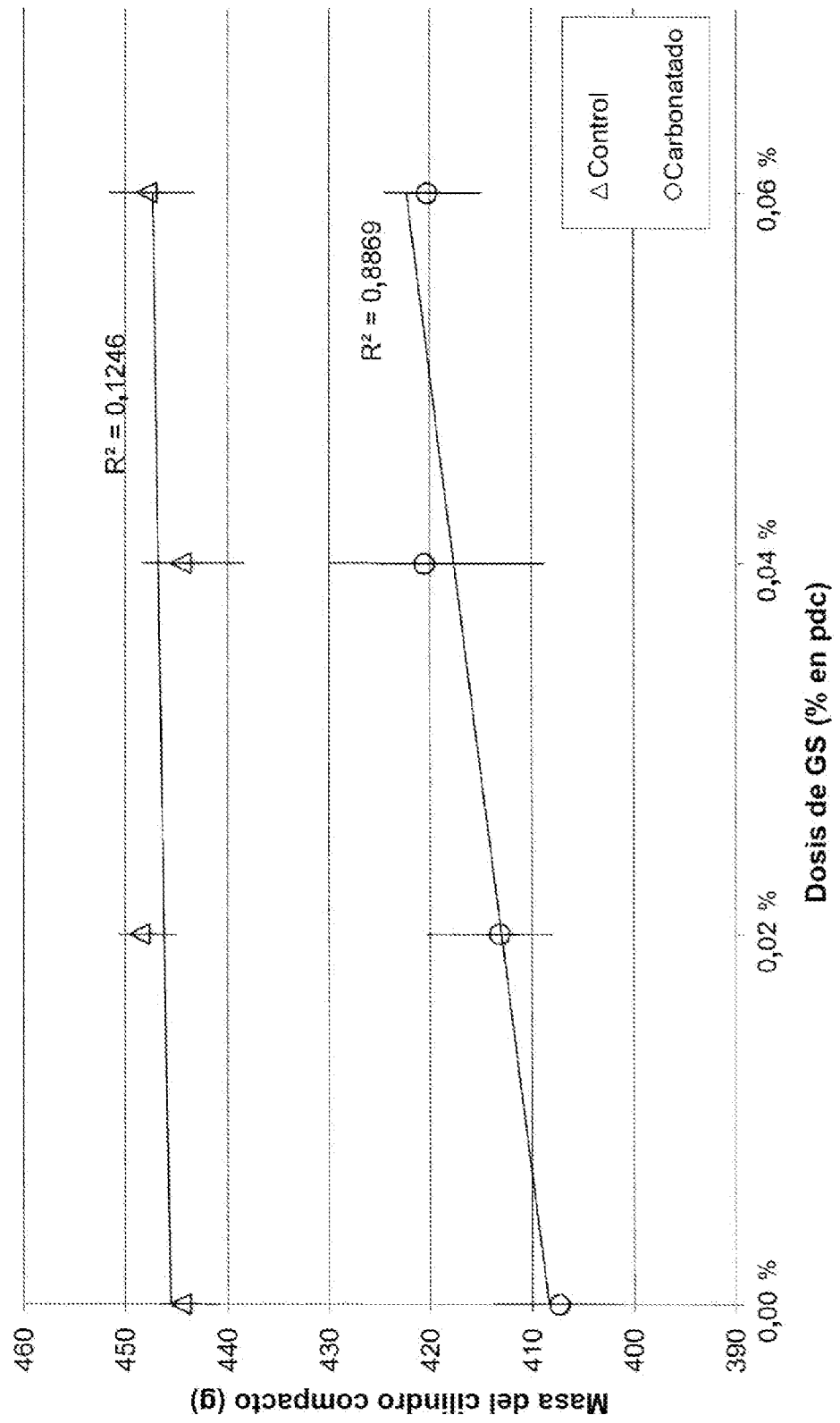


Figura 70

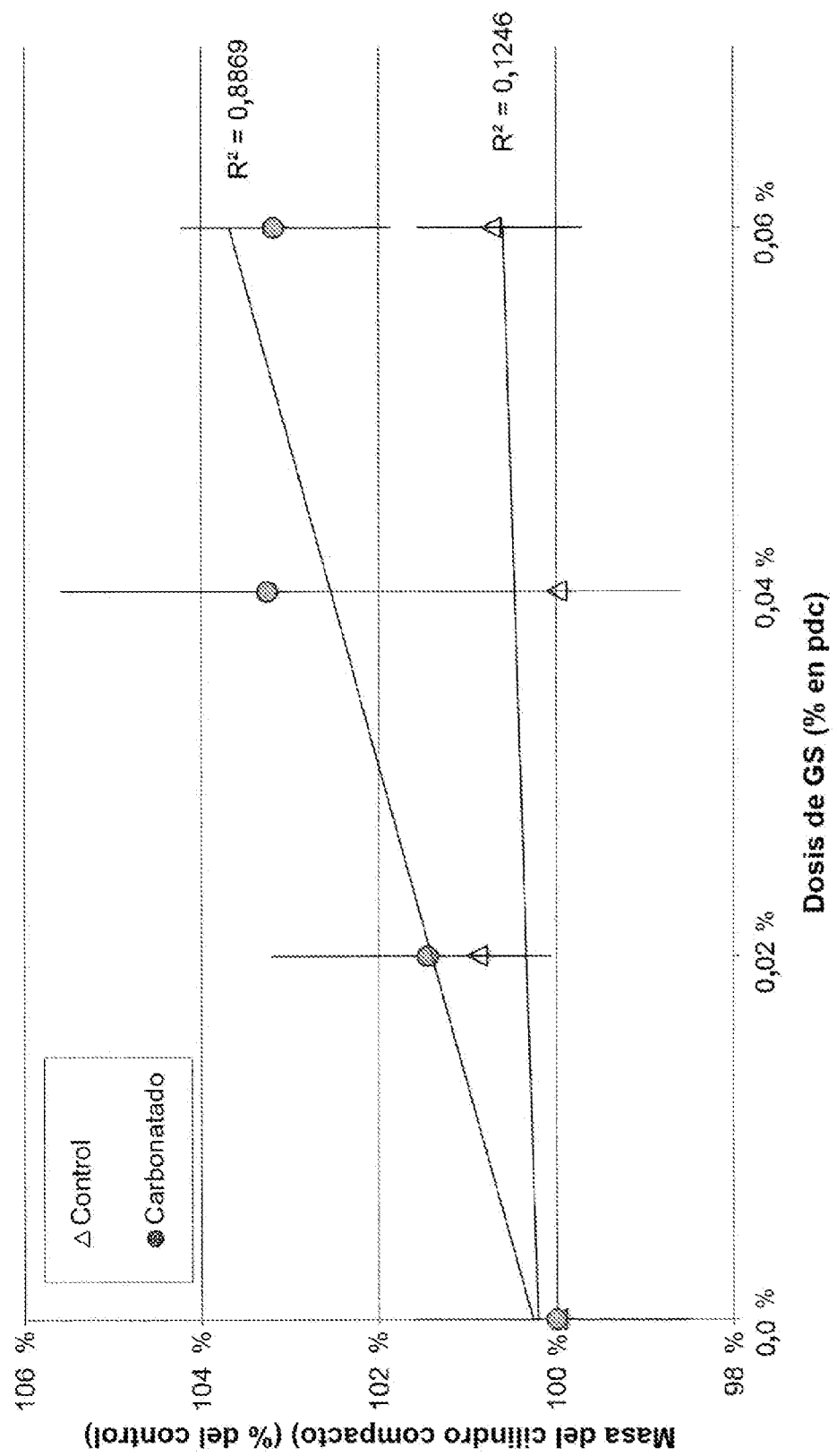


Figura 71

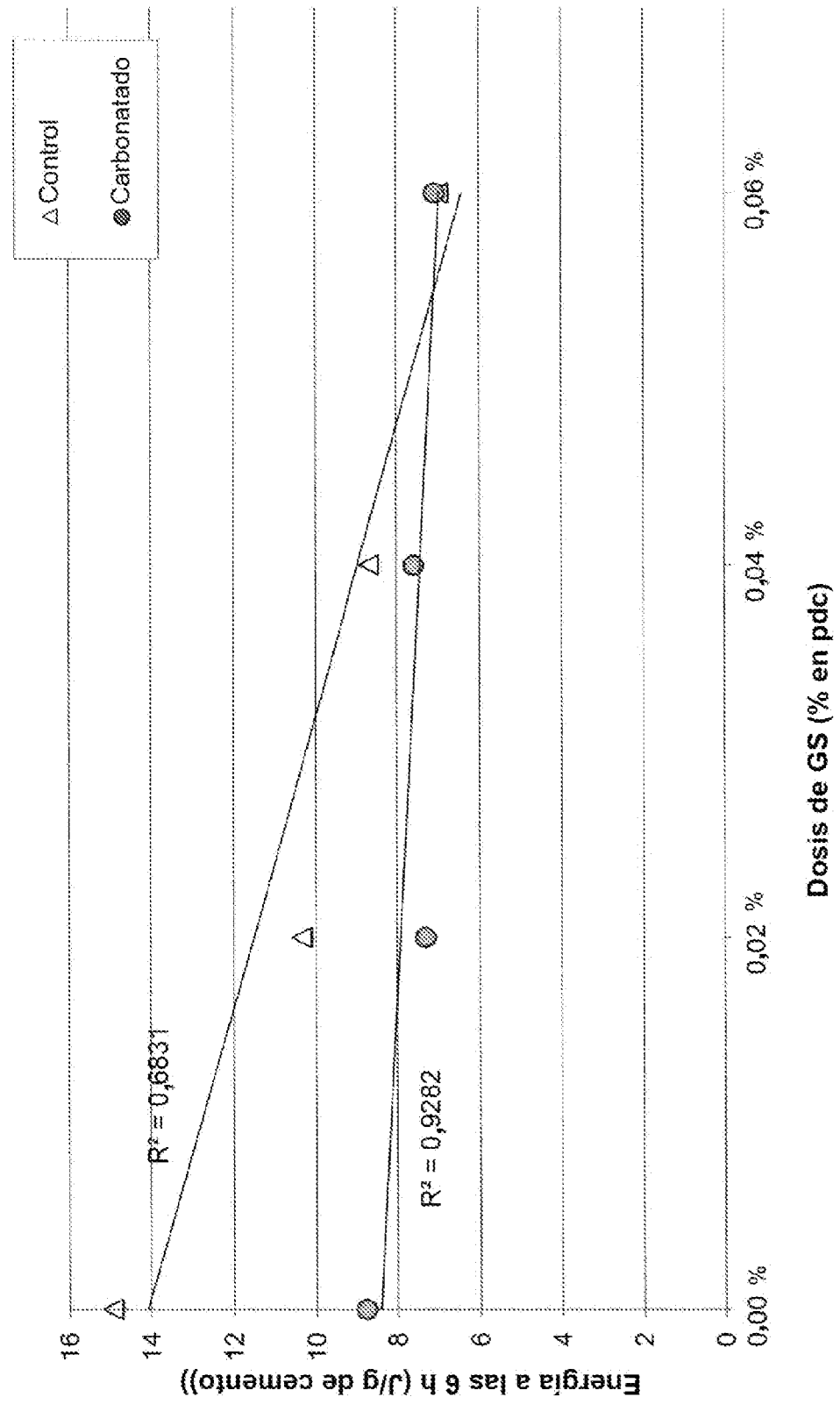


Figura 72

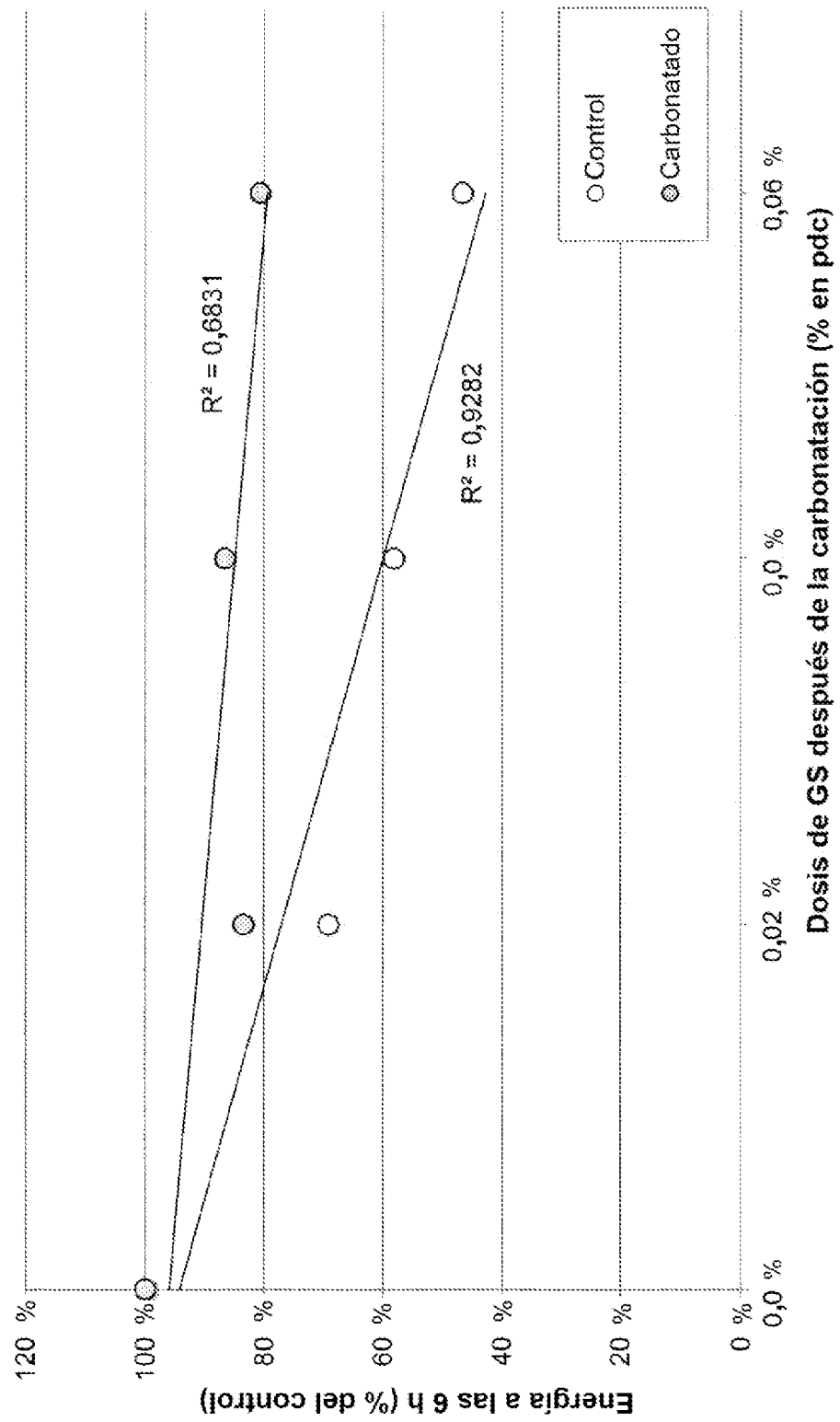


Figura 73

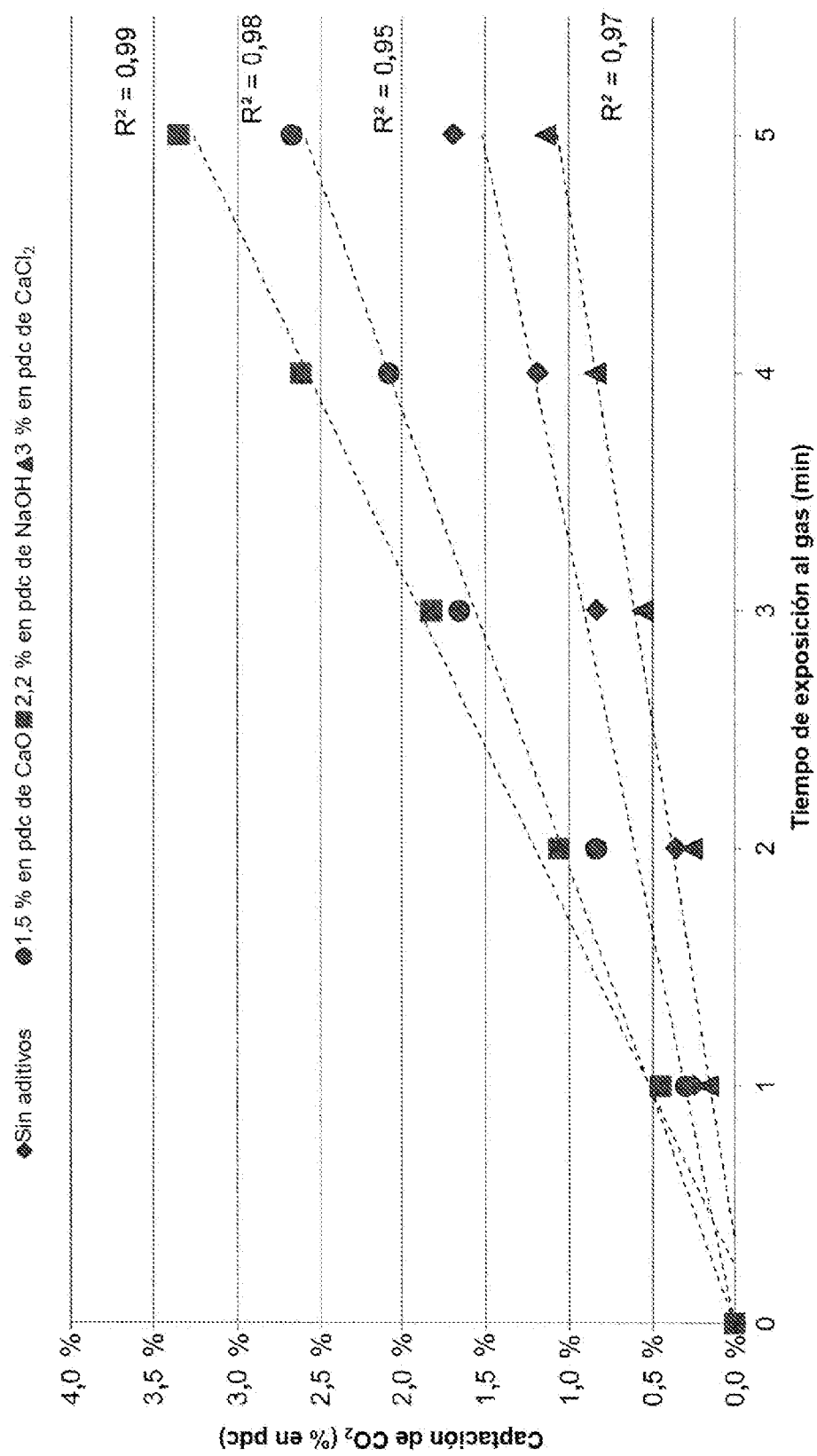


Figura 74

		Energía (J/g de cemento)							
Mezcla y condición		Control Sin CO ₂	Control 30 s de CO ₂	Control 60 s de CO ₂	Control 90 s de CO ₂	Dopado con CaO Sin CO ₂	Dopado con CaO 30 s de CO ₂	Dopado con CaO 60 s de CO ₂	Dopado con CaO 90 s de CO ₂
6	Tiempo después del mezclado (horas)	13,15	15,69	16,22	15,96	12,76	18,87	21,55	19,63
12		70,12	70,69	68,17	65,82	69,17	82,27	83,24	76,66
18		118,13	112,75	106,37	100,75	116,33	128,35	126,03	113,82
24		150,34	140,42	132,25	124,63	145,56	155,38	151,72	135,92
Captación de CO ₂ en pdc		-	0,22 %	0,31 %	0,51 %	-	0,35 %	0,78 %	1,18 %

Figura 75

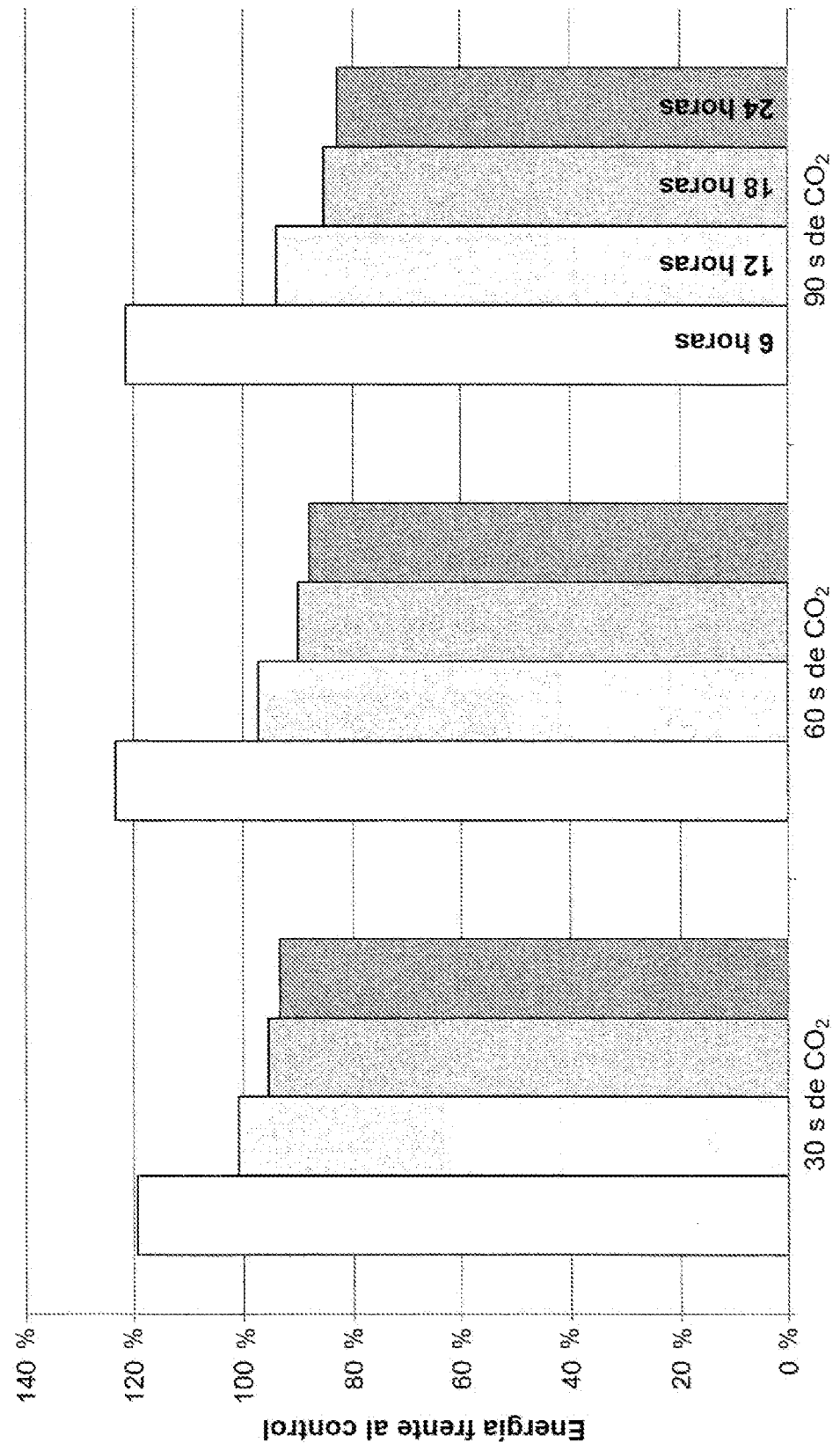


Figura 76

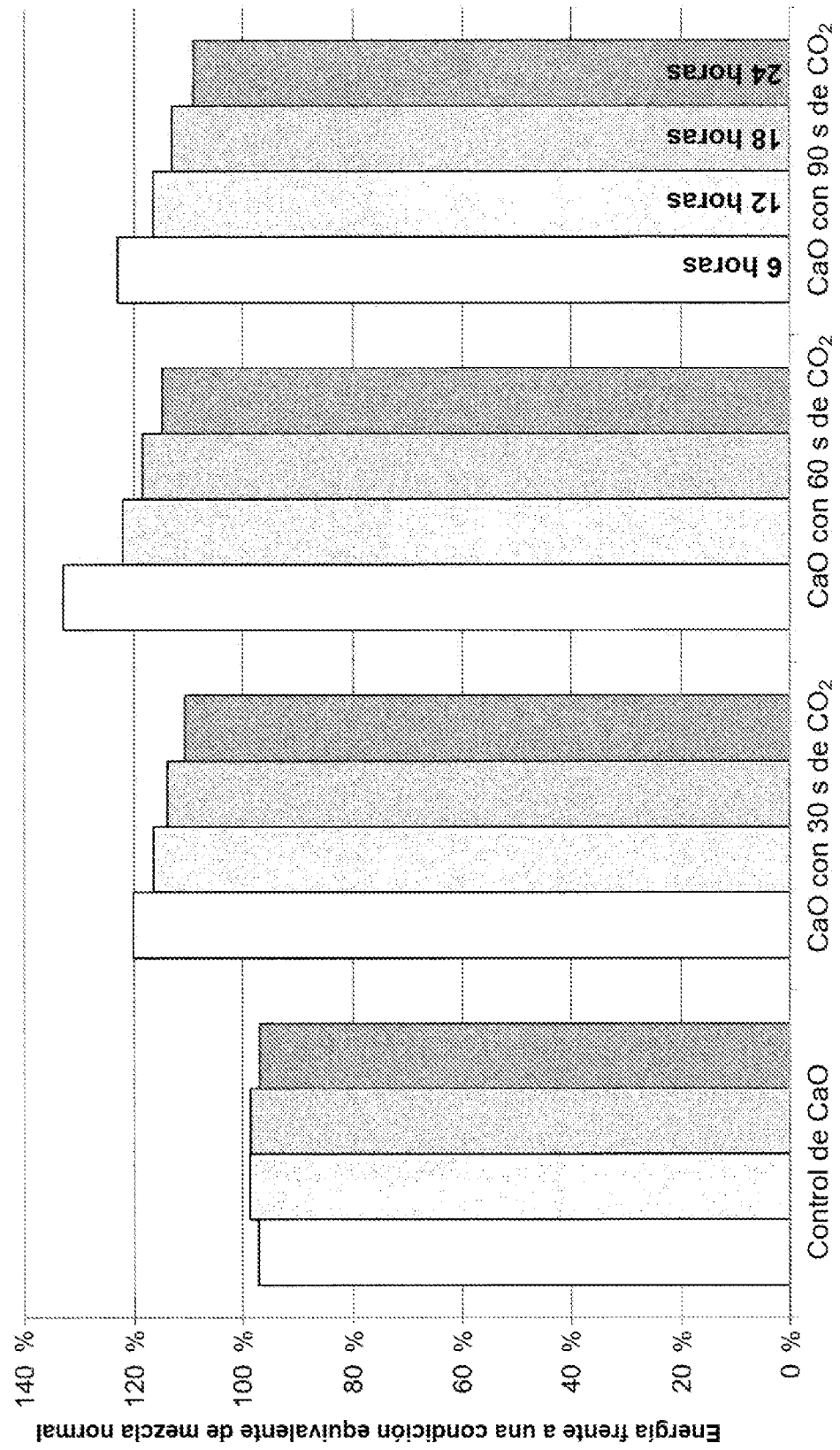


Figura 77A

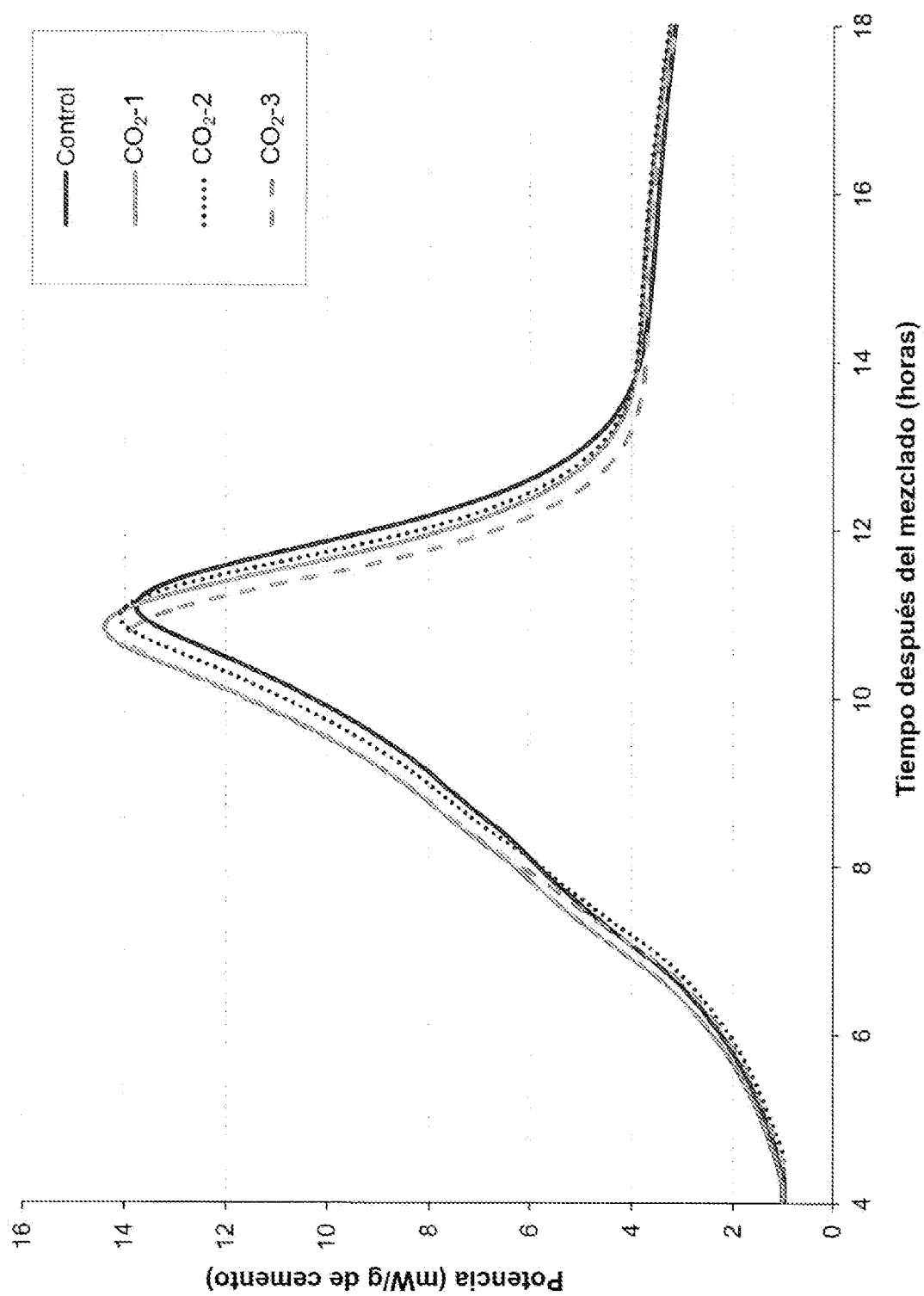


Figura 77B

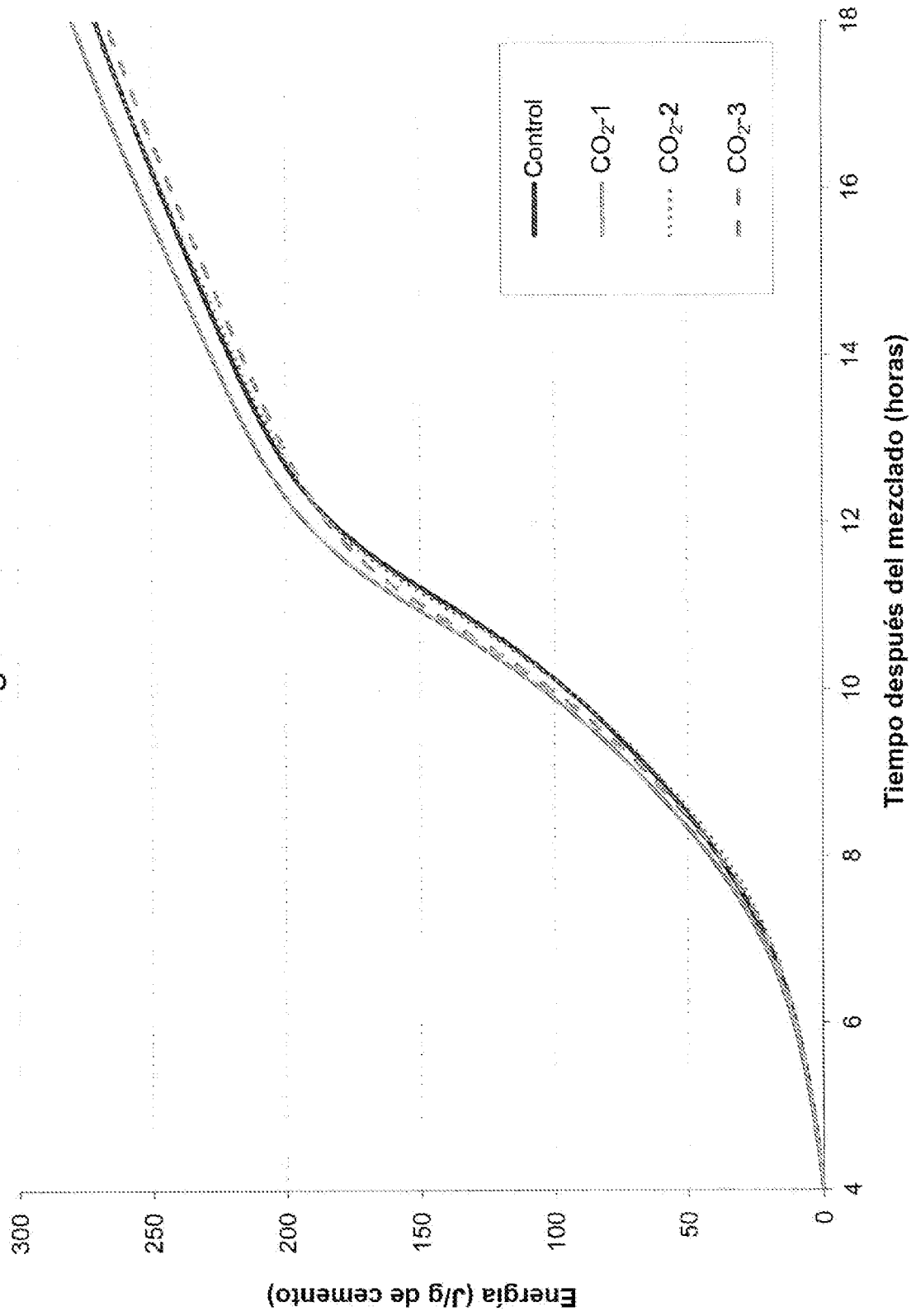


Figura 78A

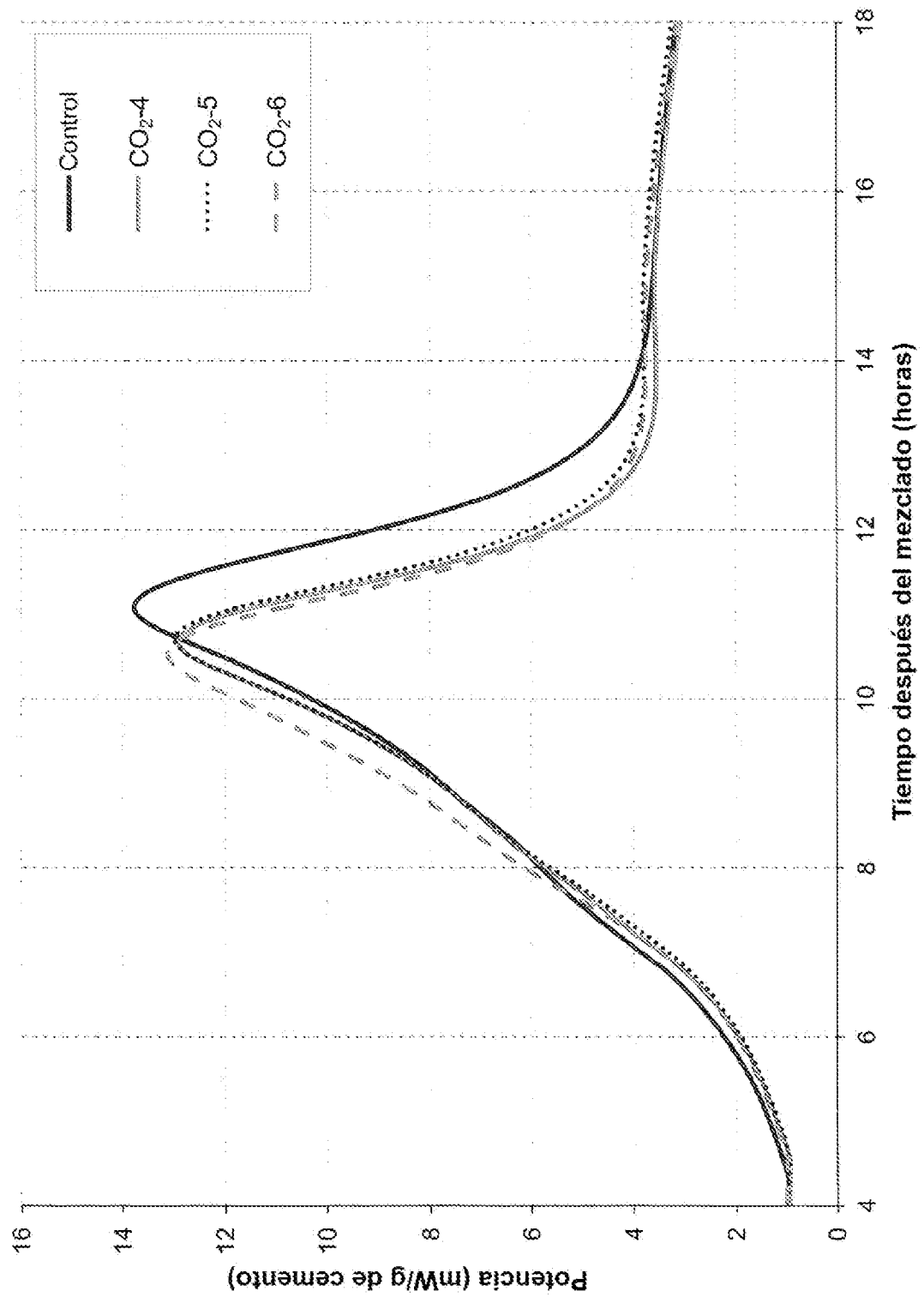


Figura 78B

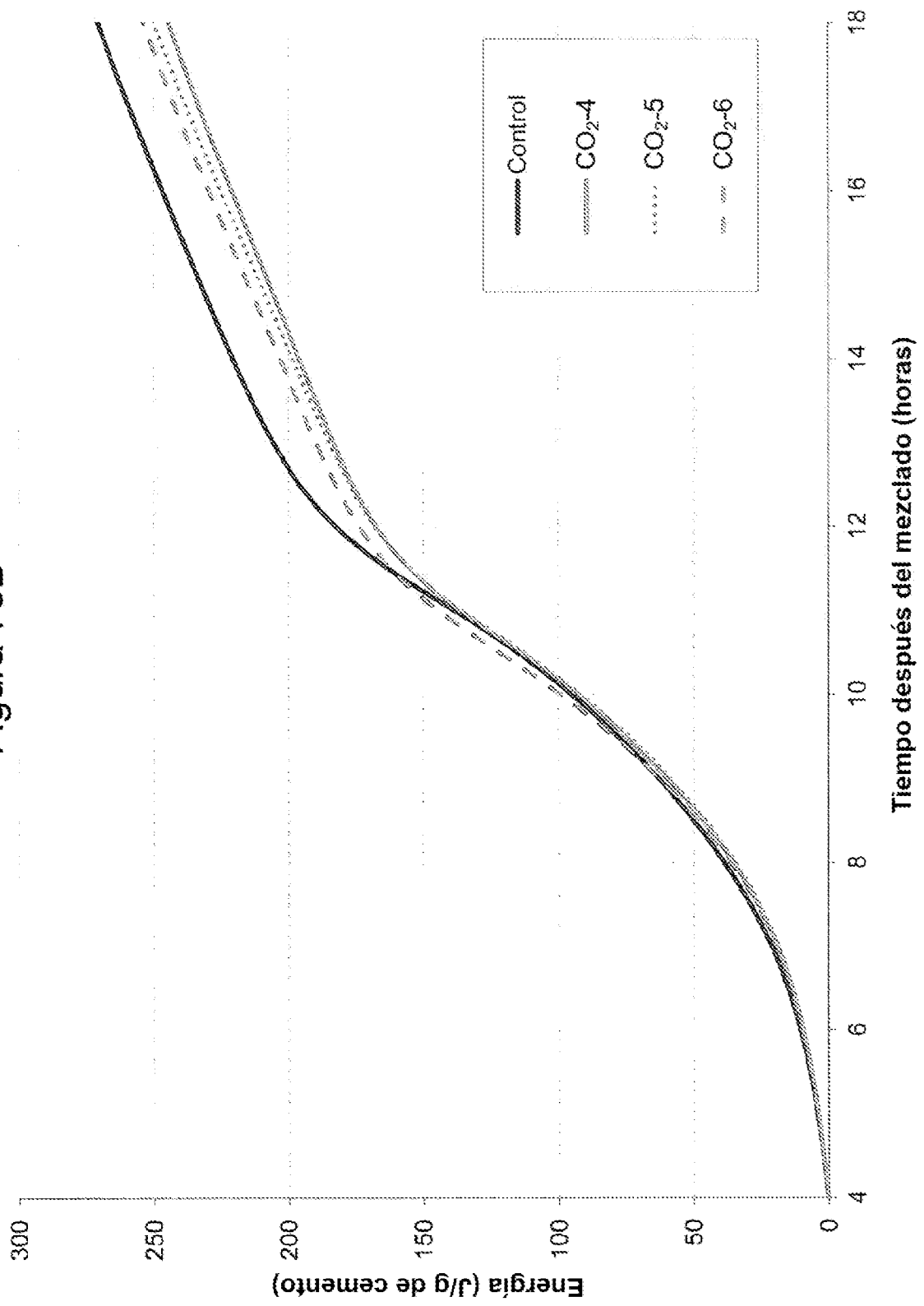


Figura 79A

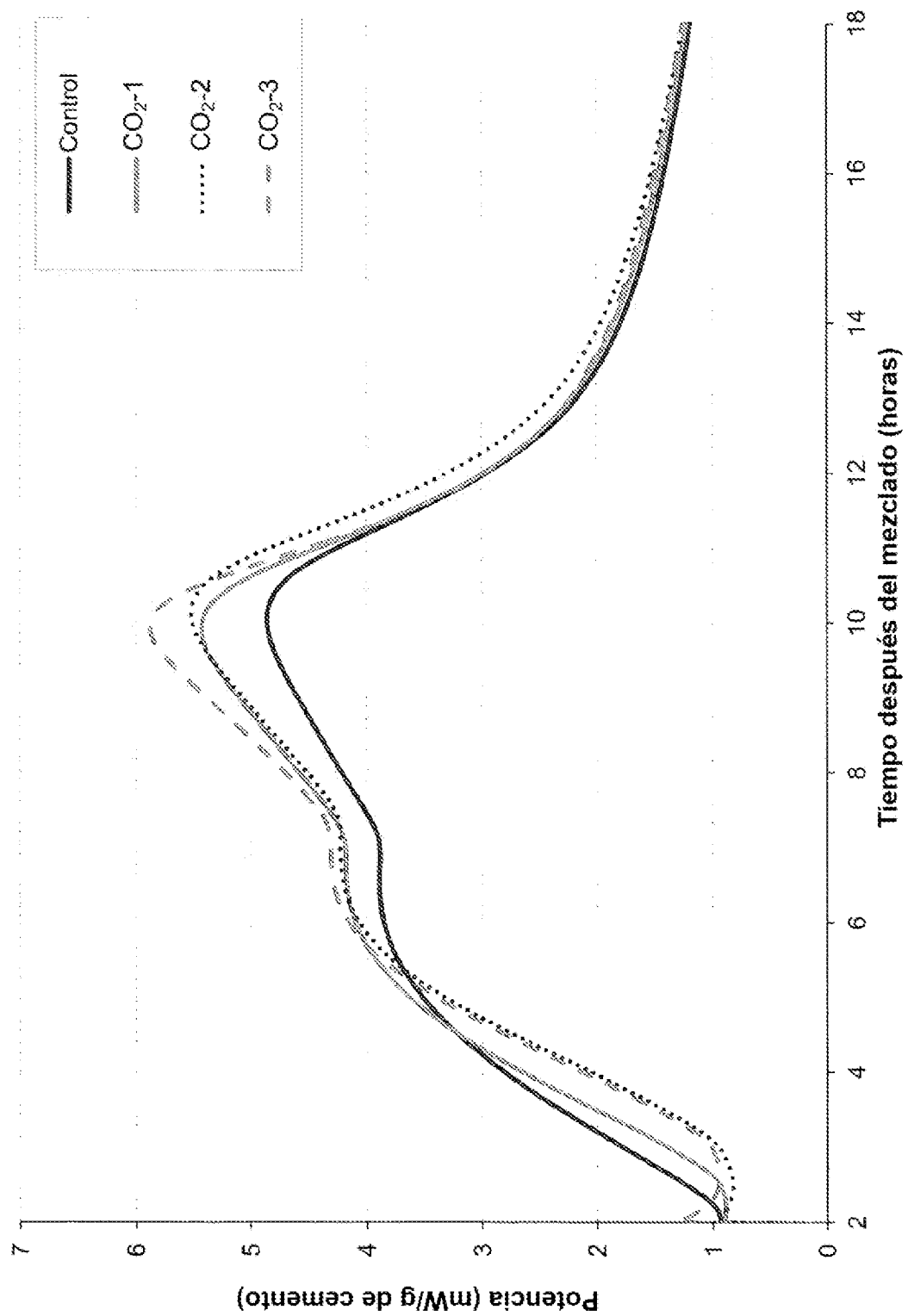


Figura 79B

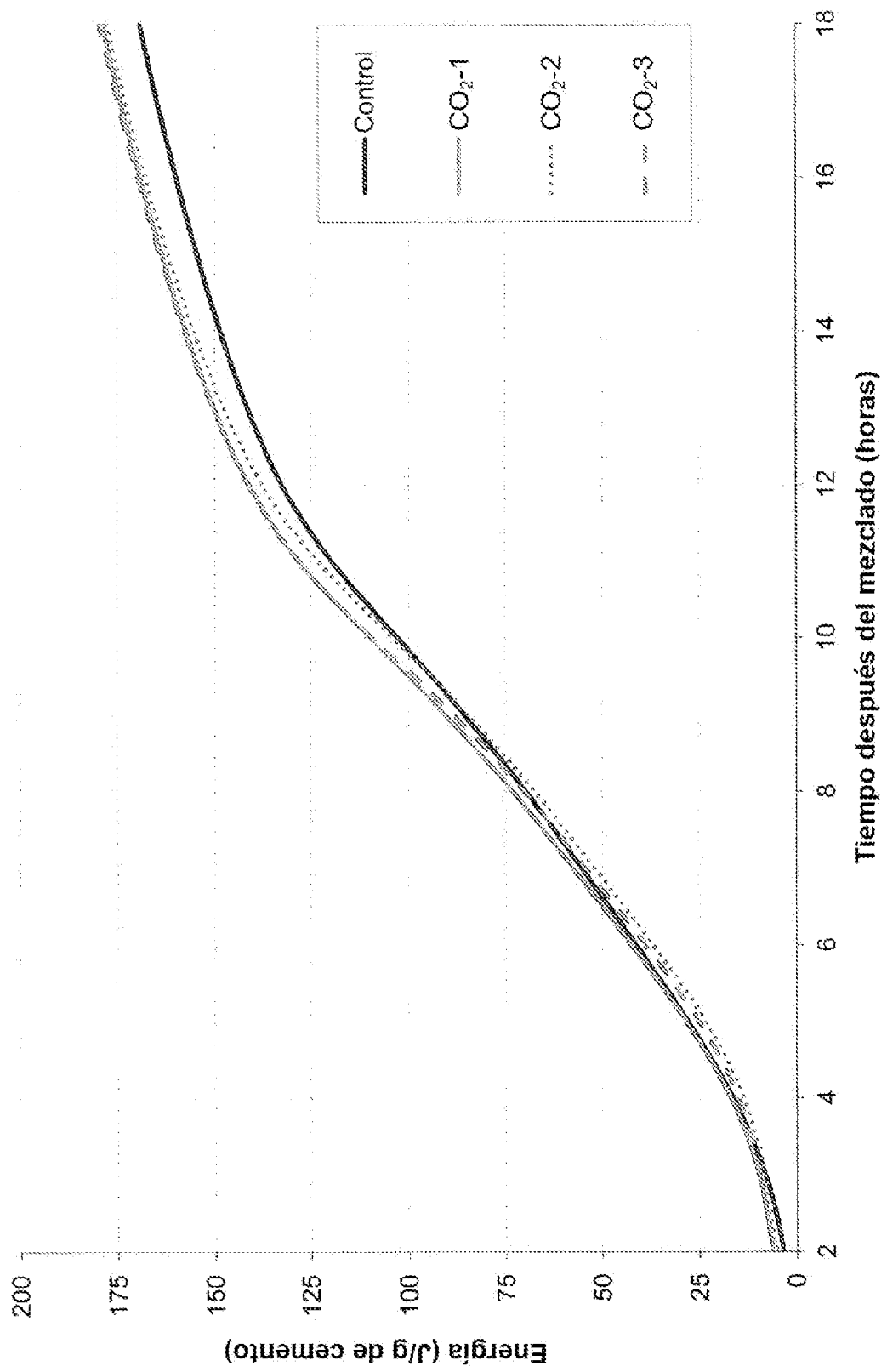


Figura 80A

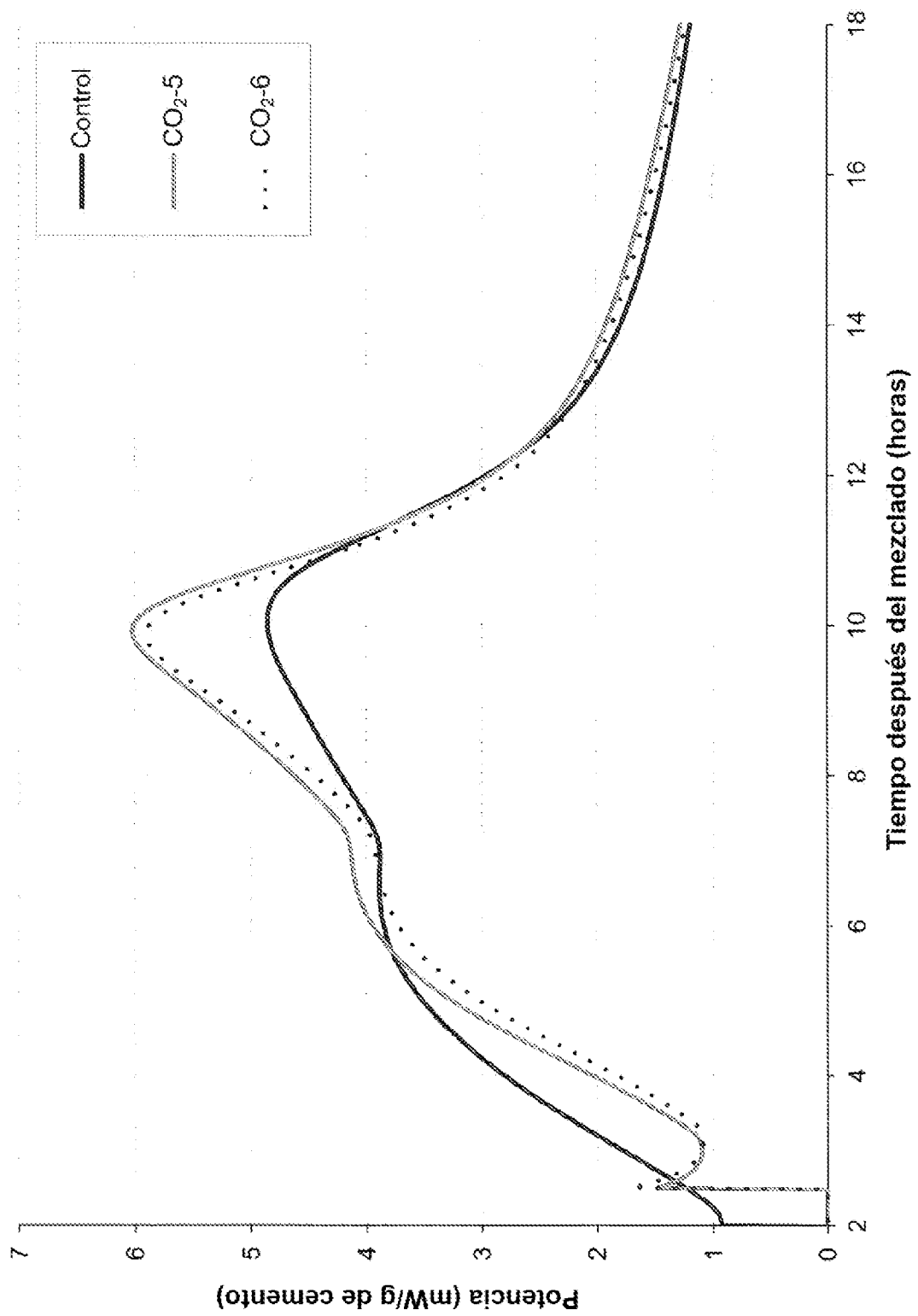


Figura 80B

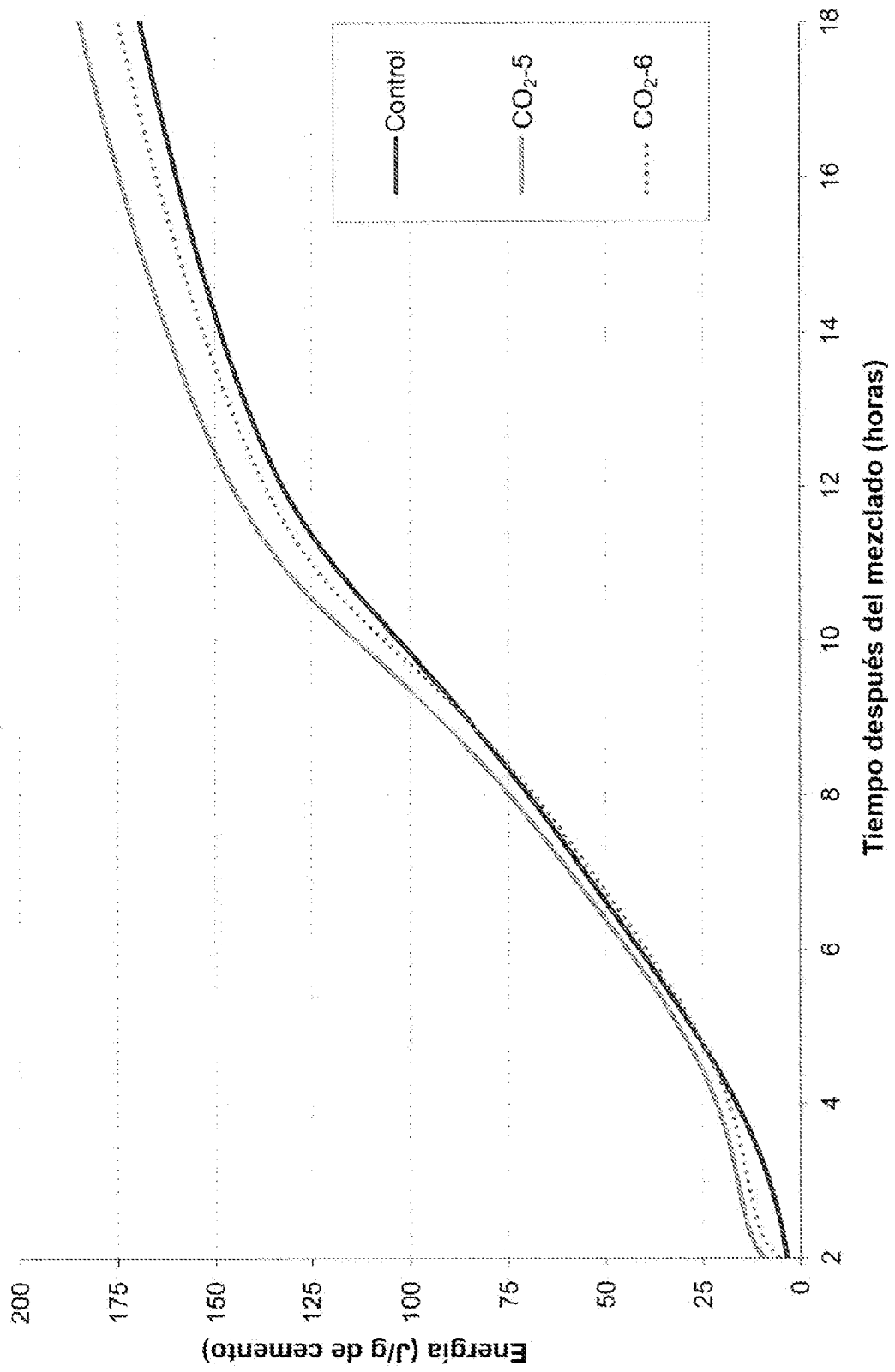


Figura 81

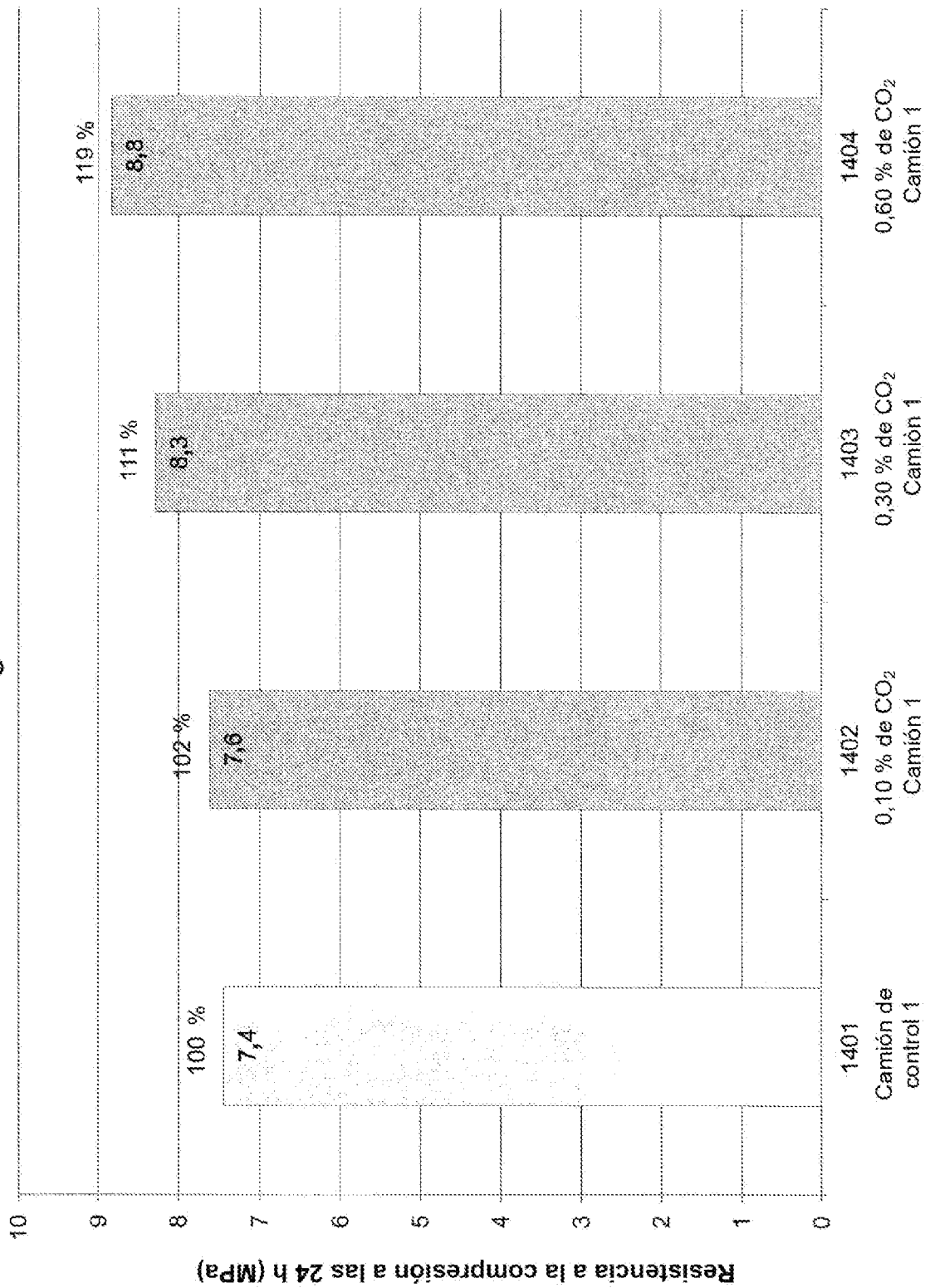


Figura 82

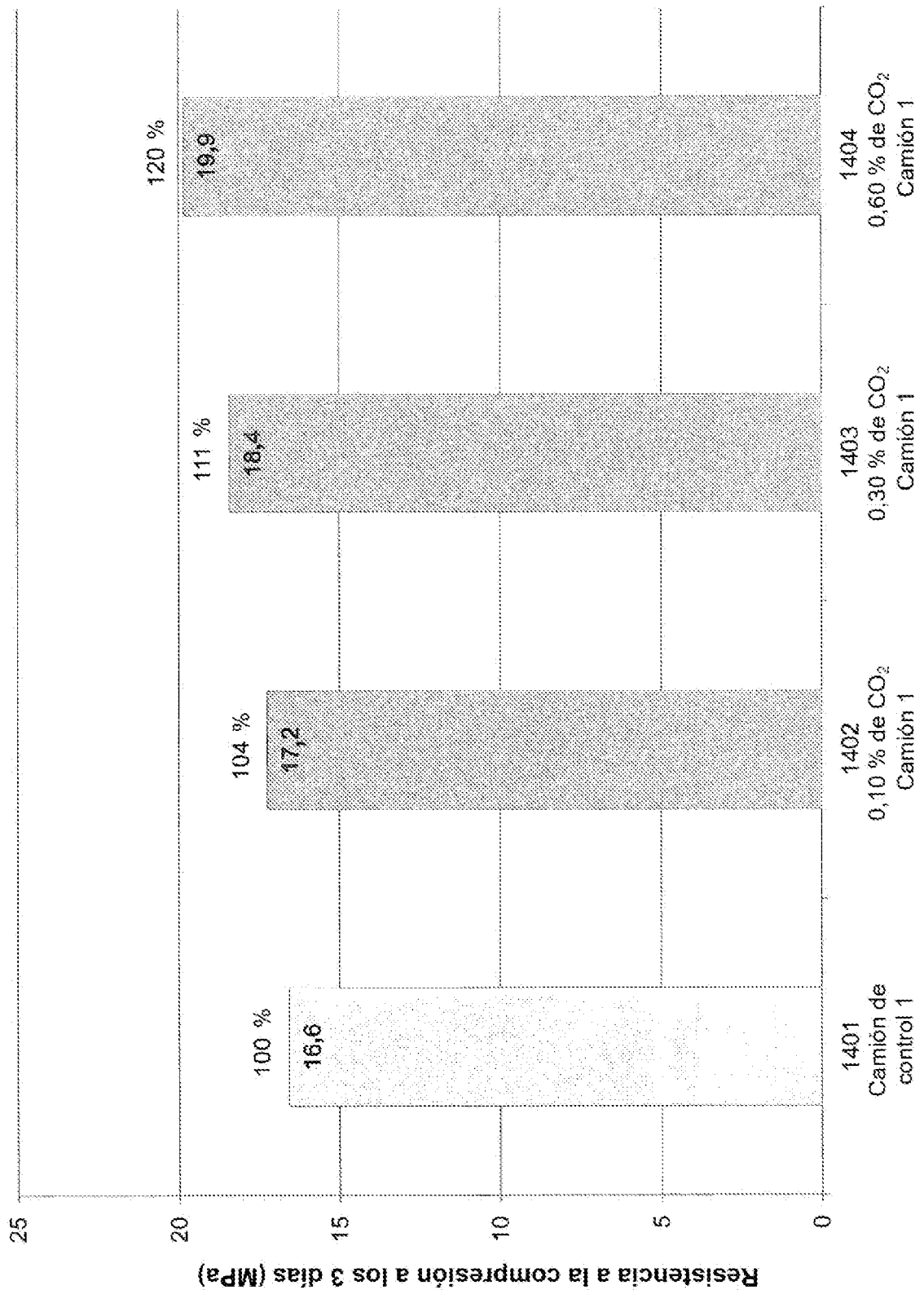


Figura 83

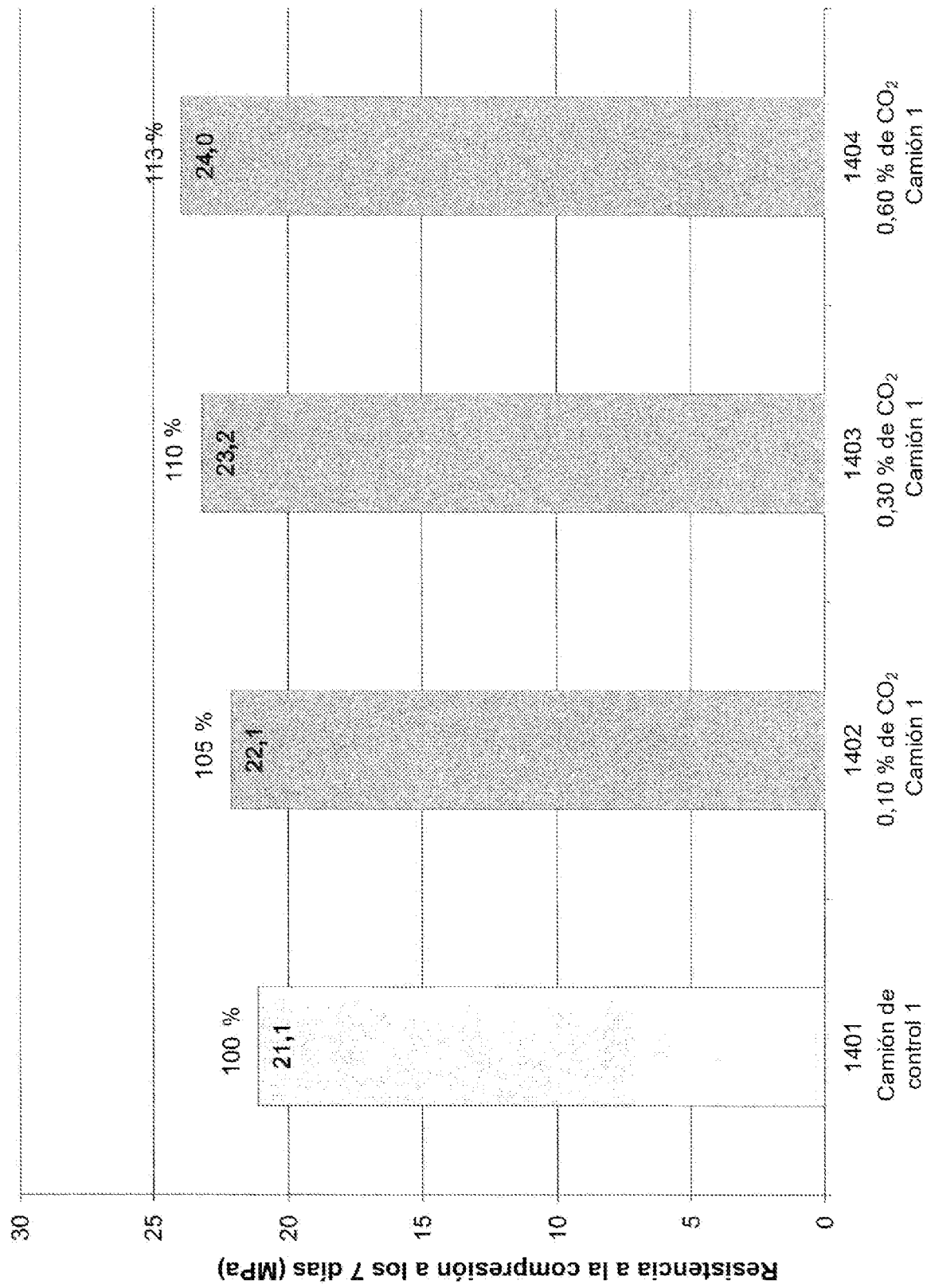


Figura 84

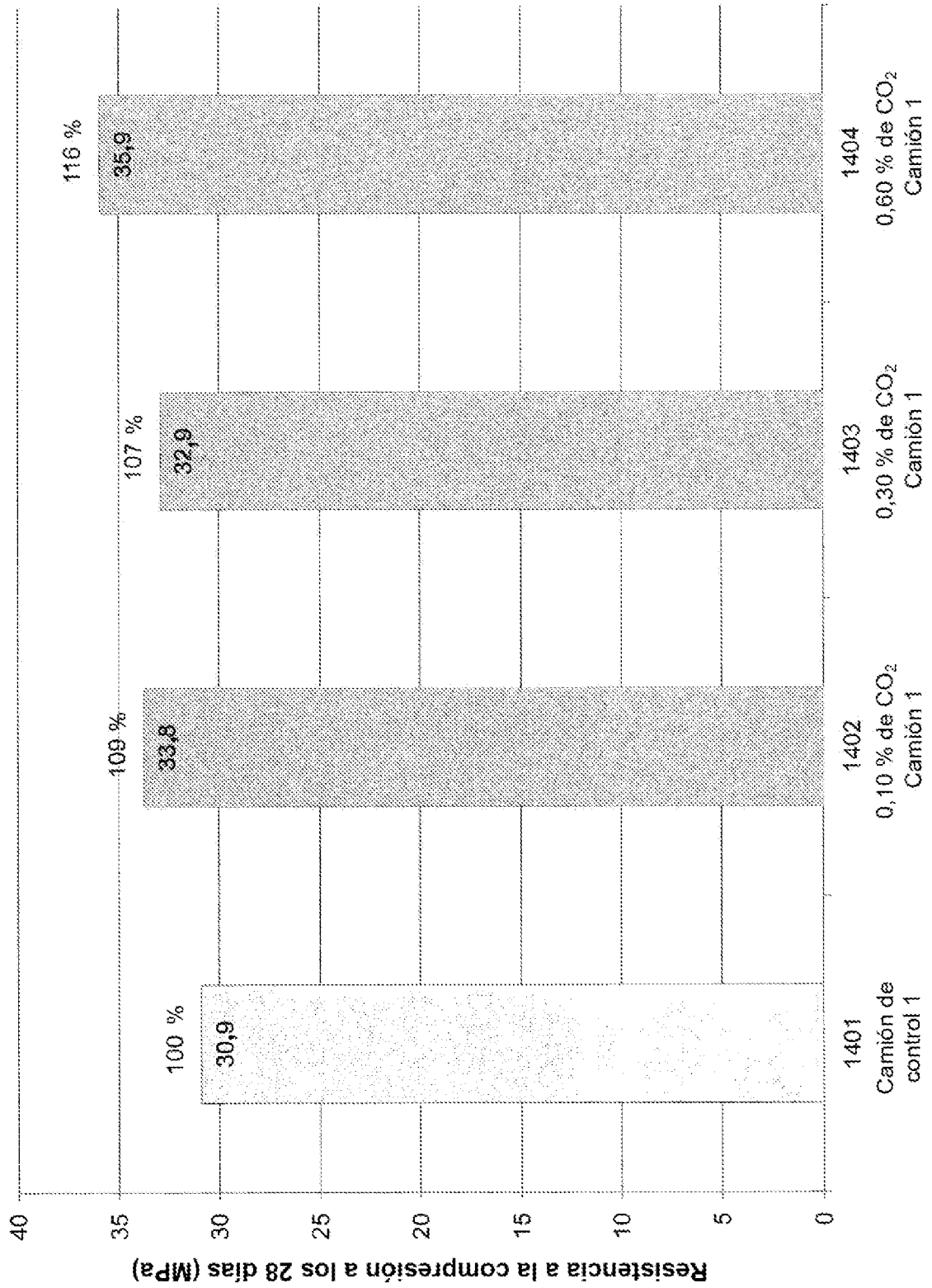


Figura 85

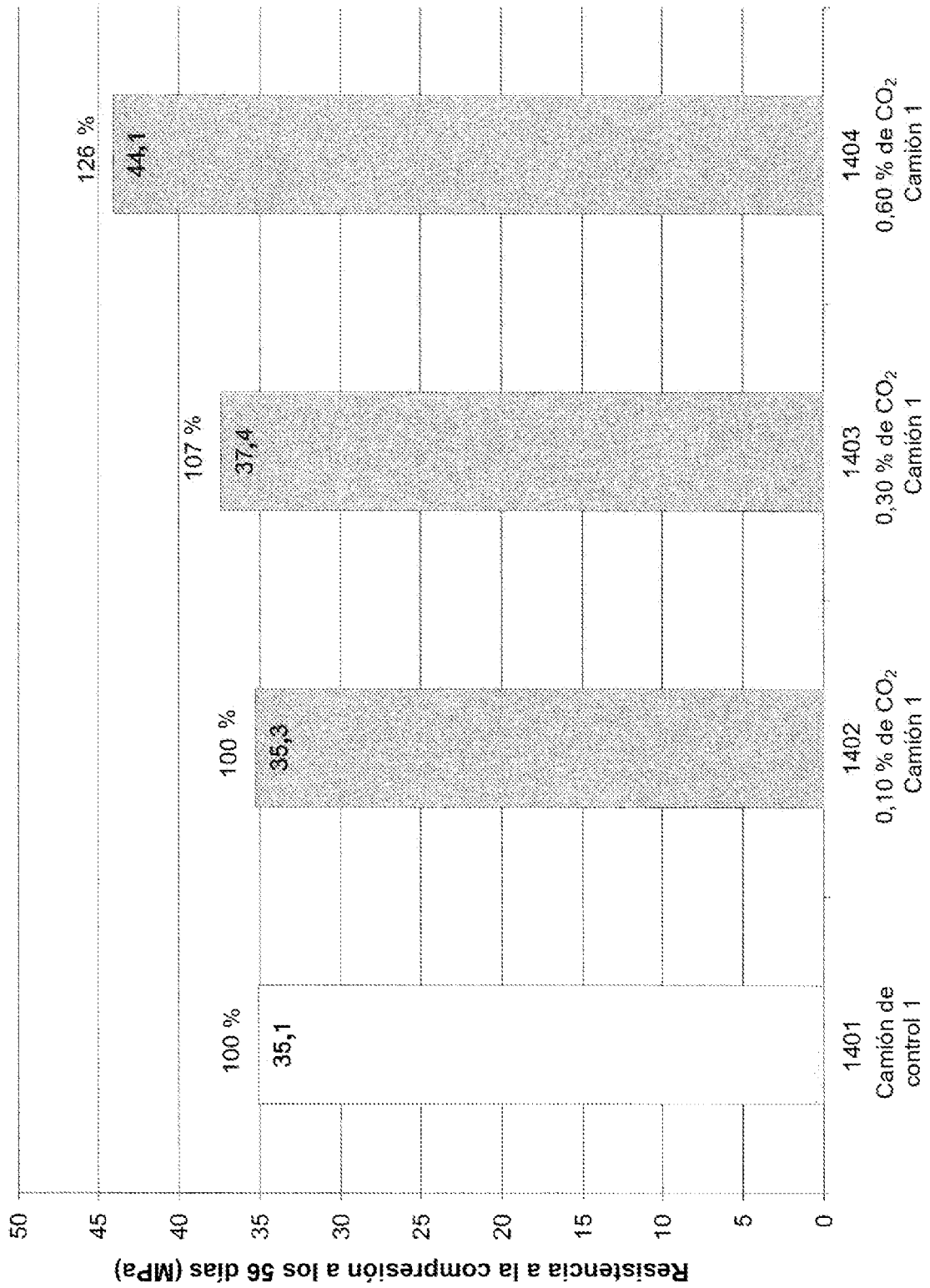


Figura 86A

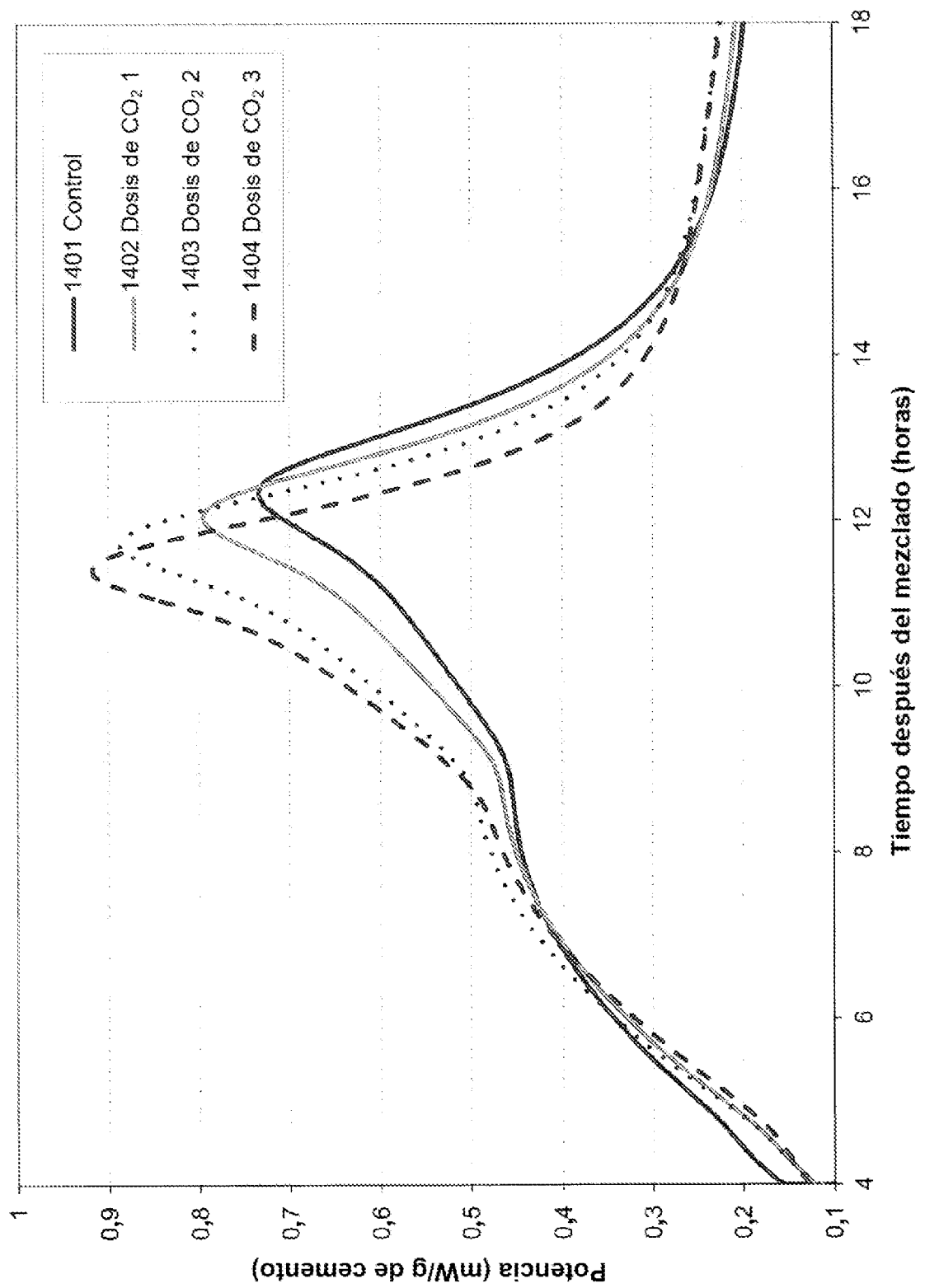


Figura 86B

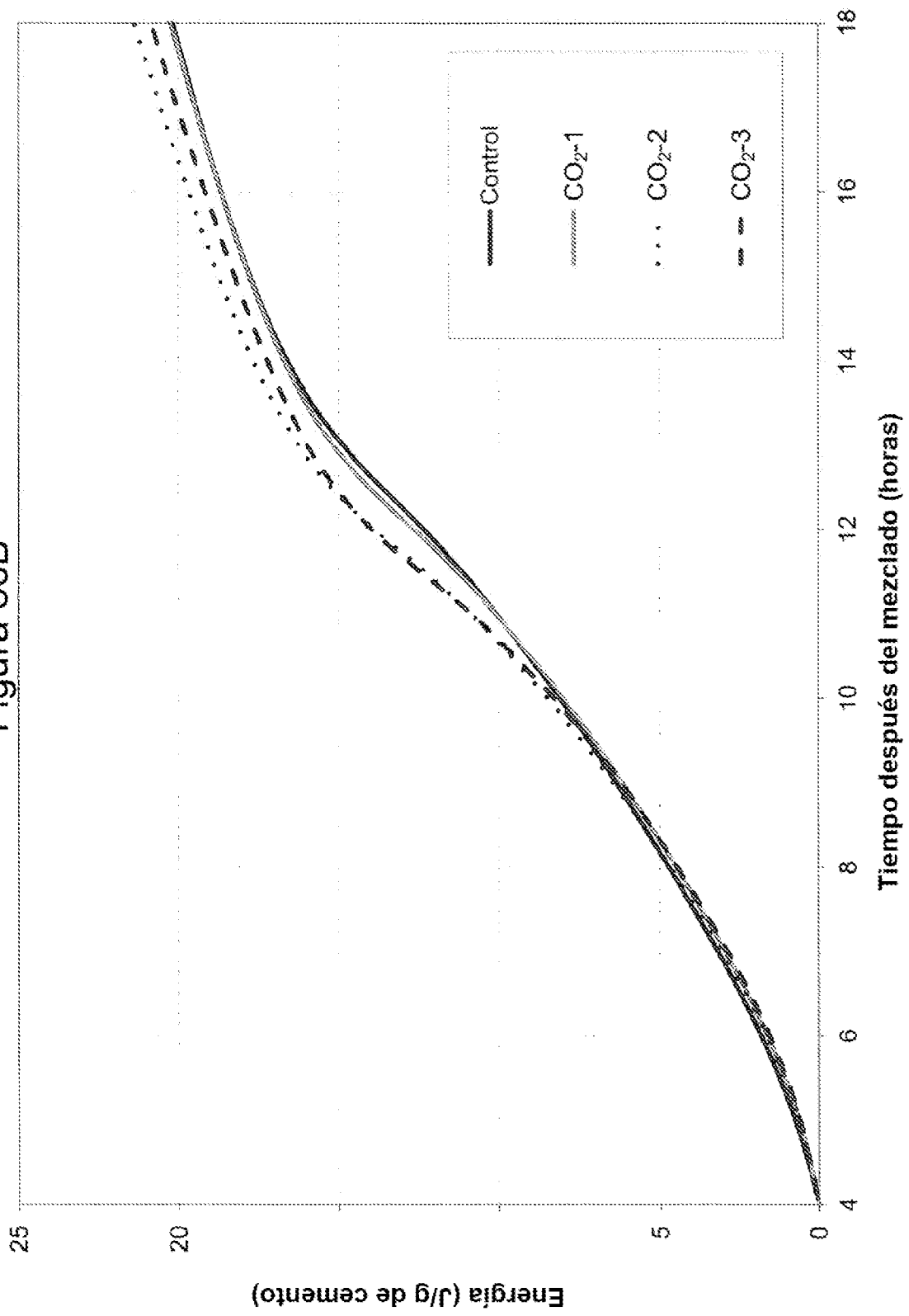


Figura 87

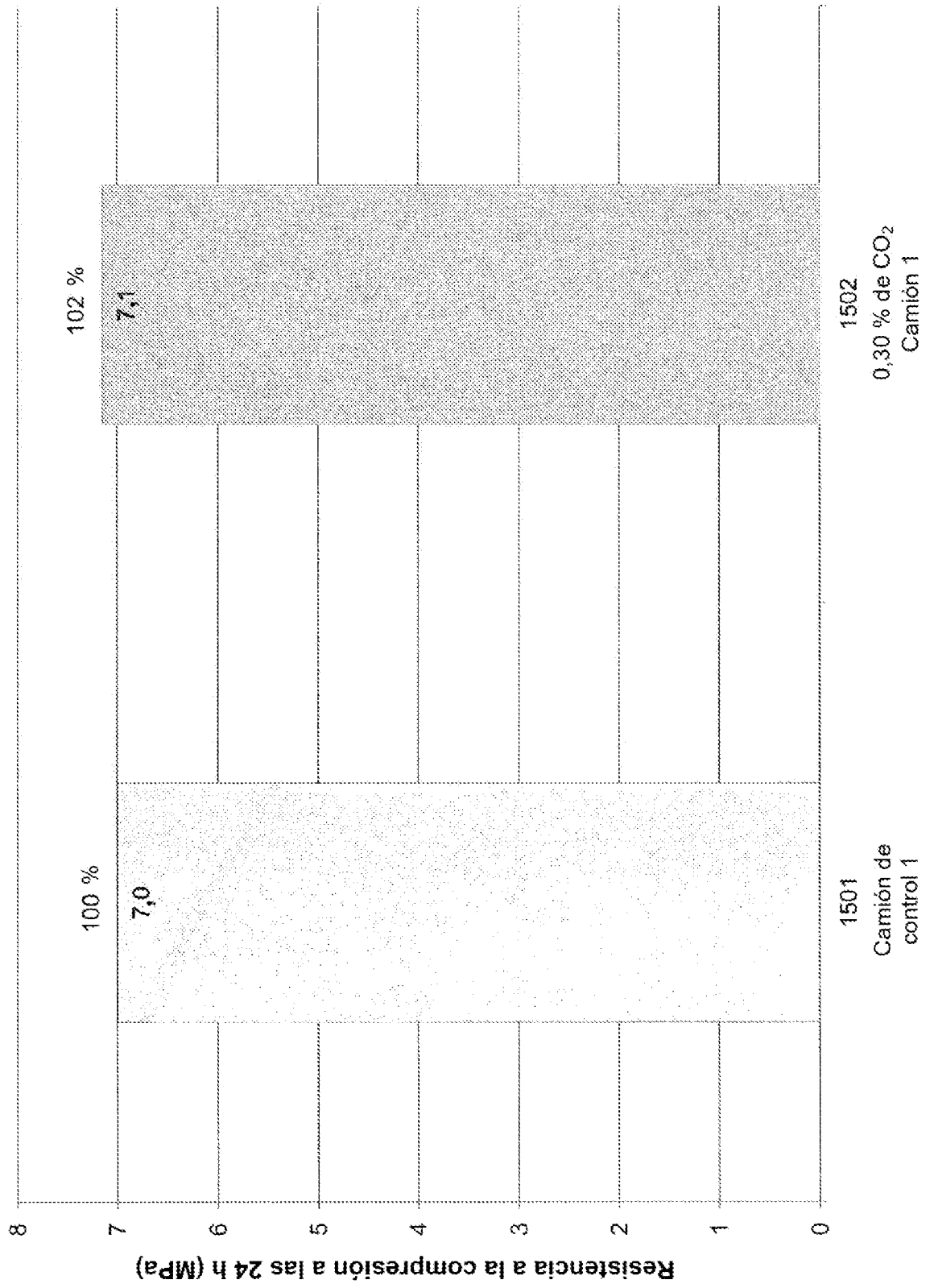


Figura 88

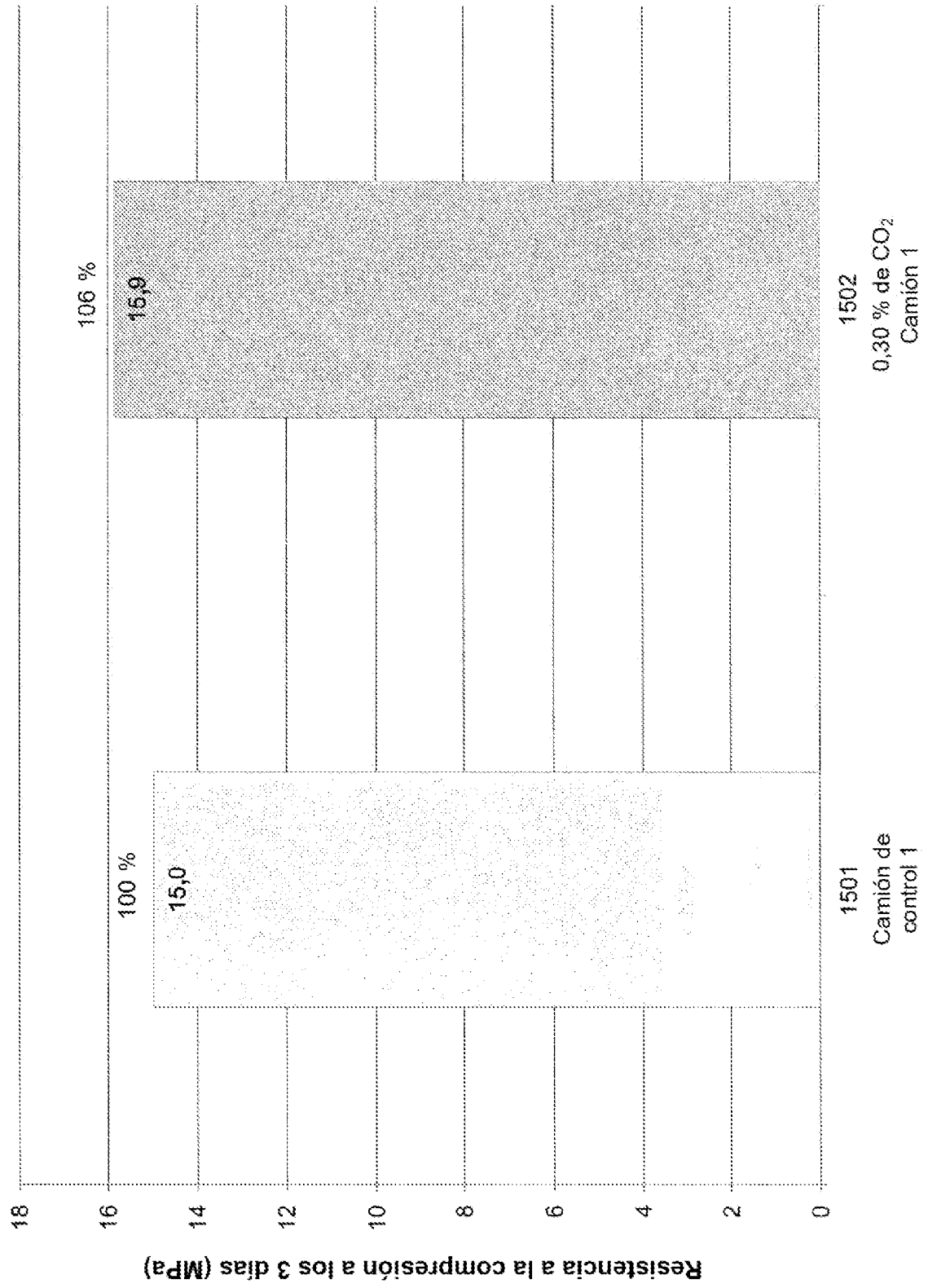


Figura 89

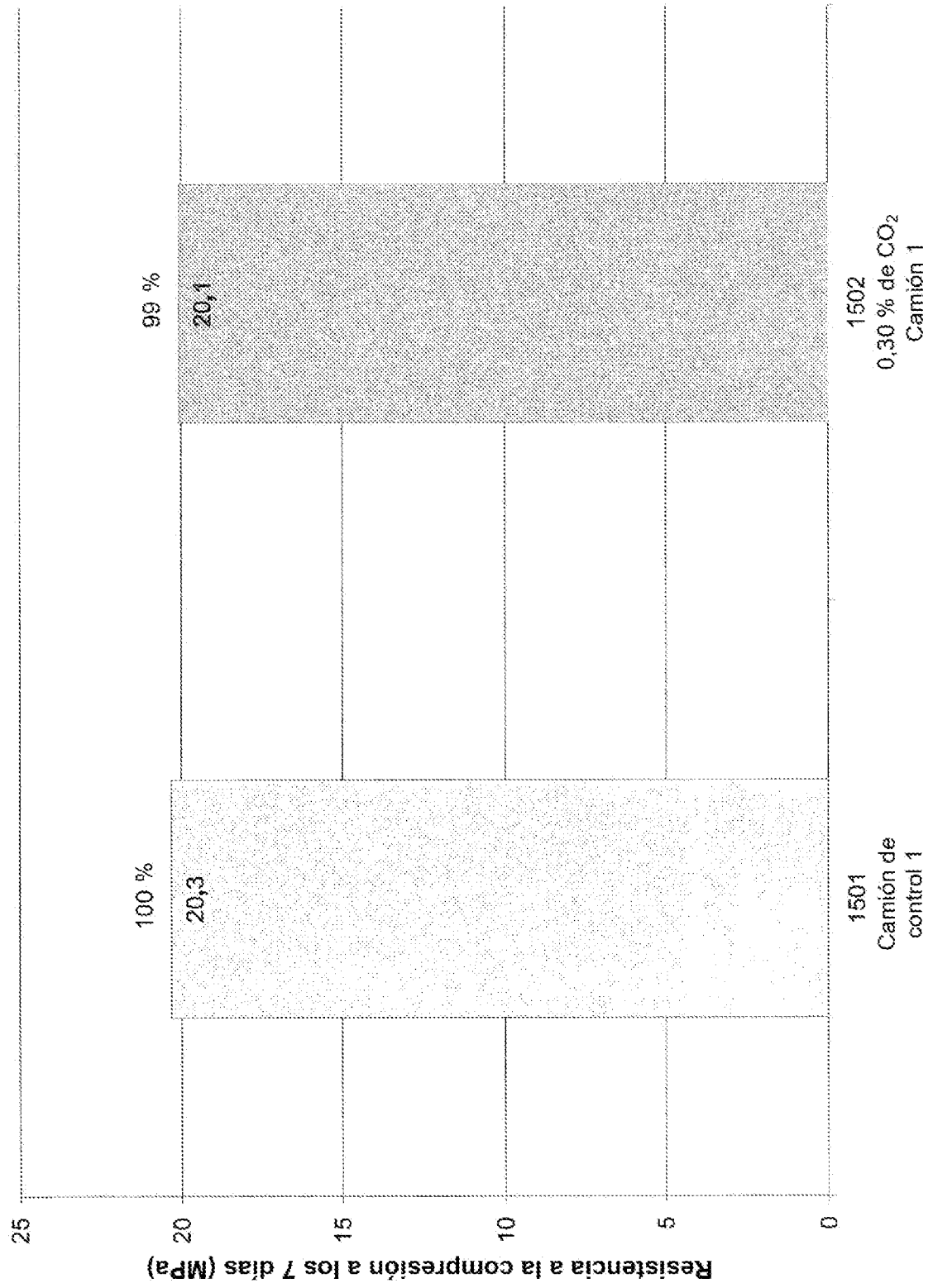


Figura 90

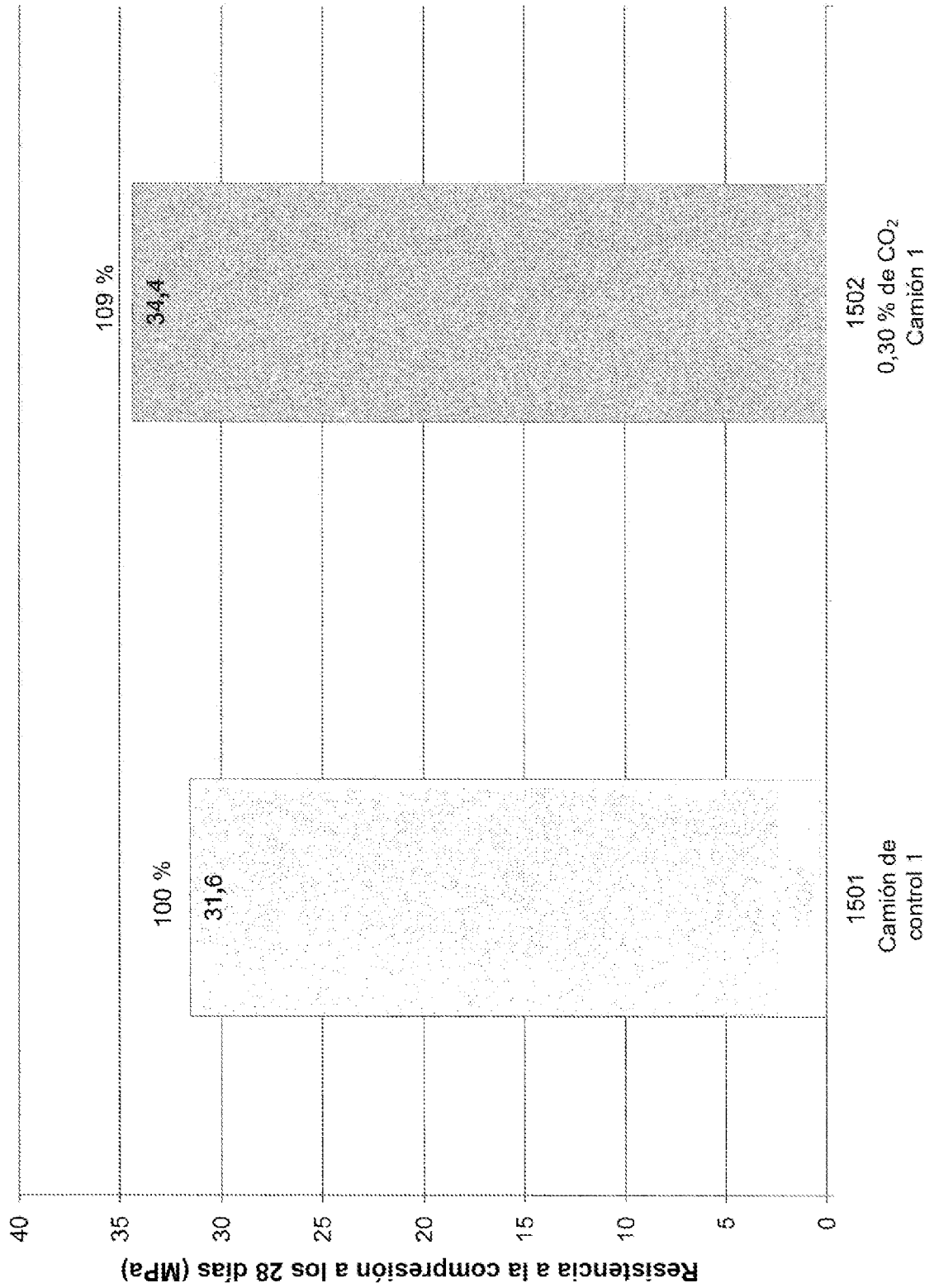


Figura 91

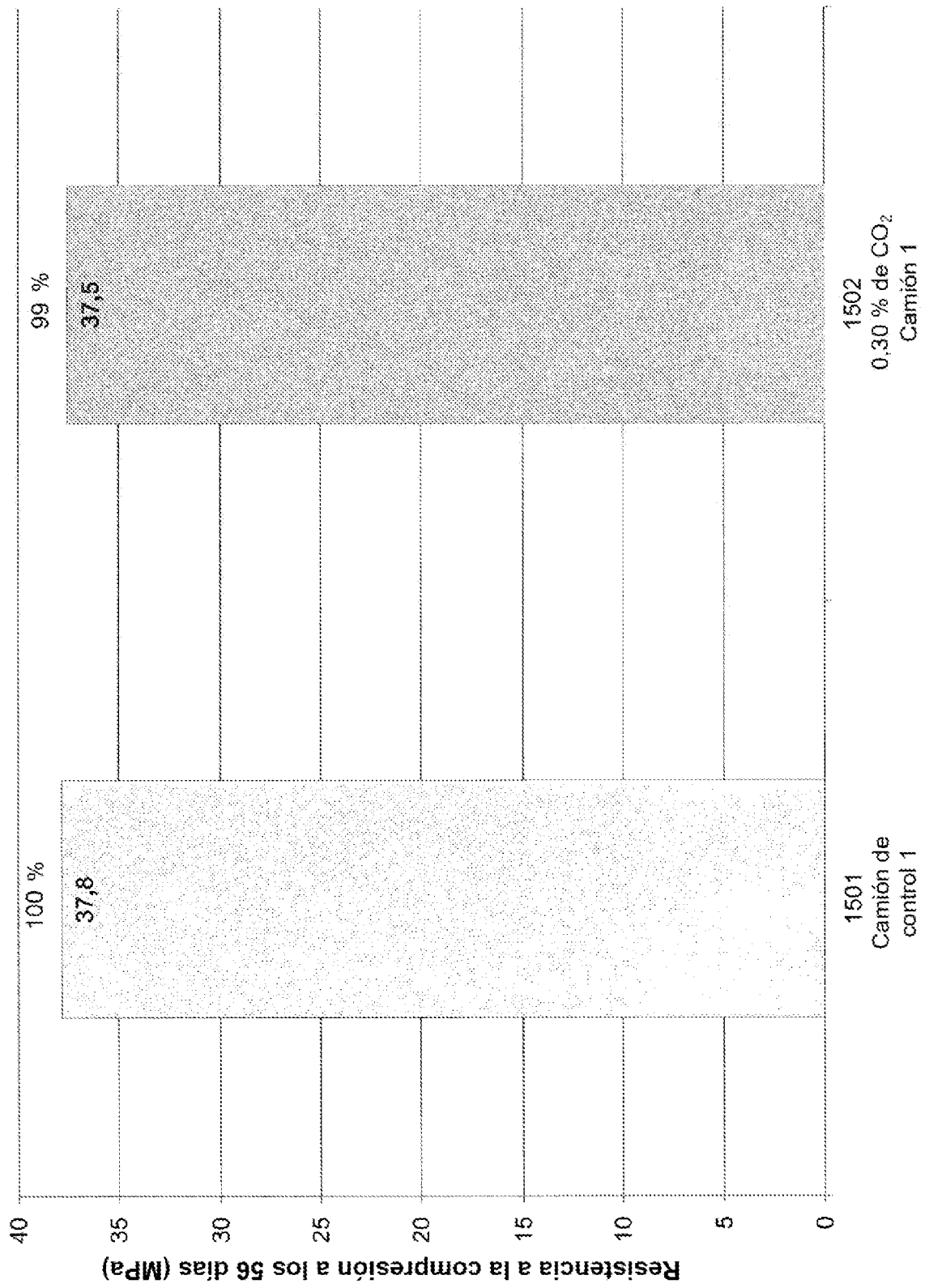


Figura 92A

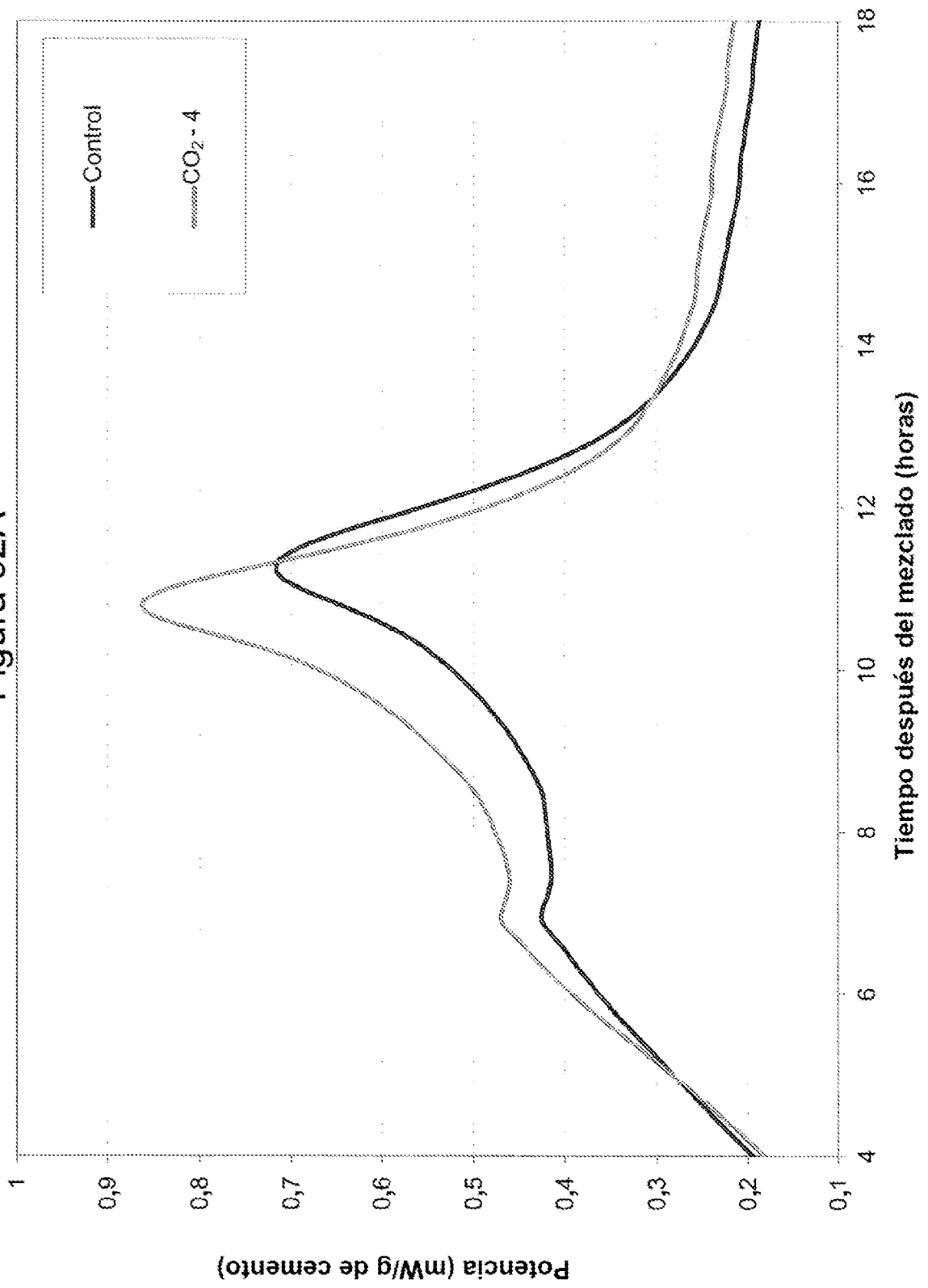


Figura 92B

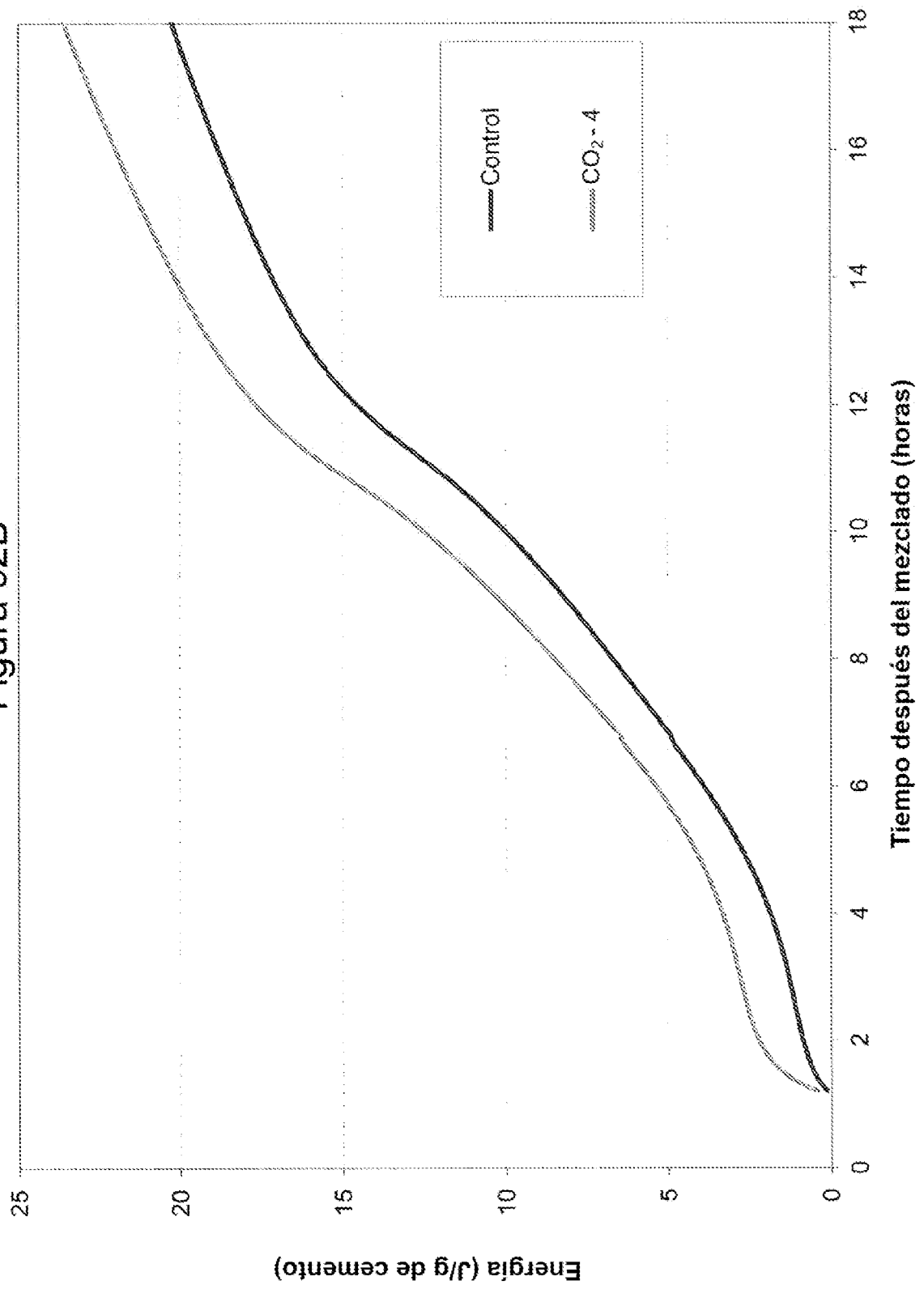


Figura 93A

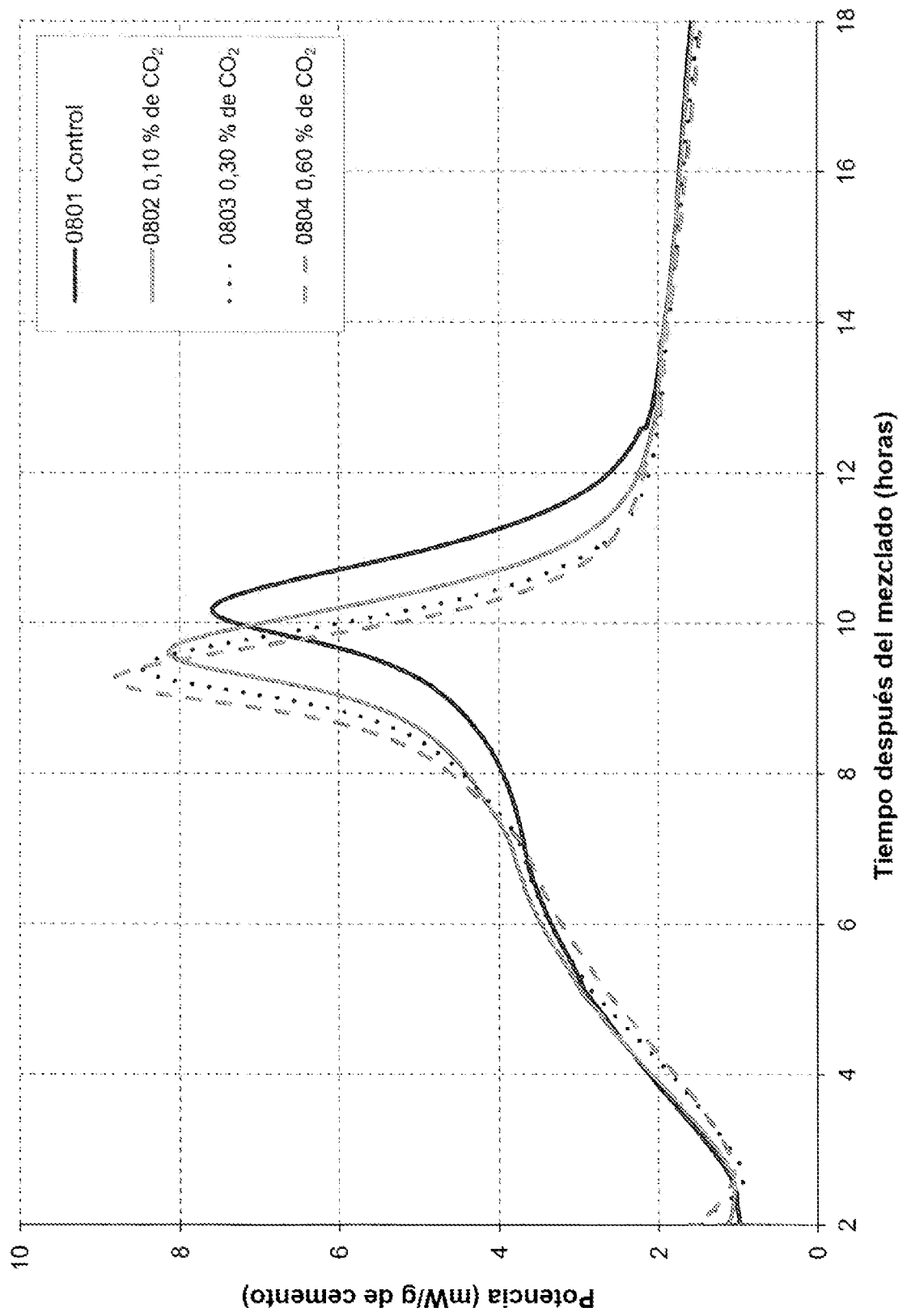


Figura 93B

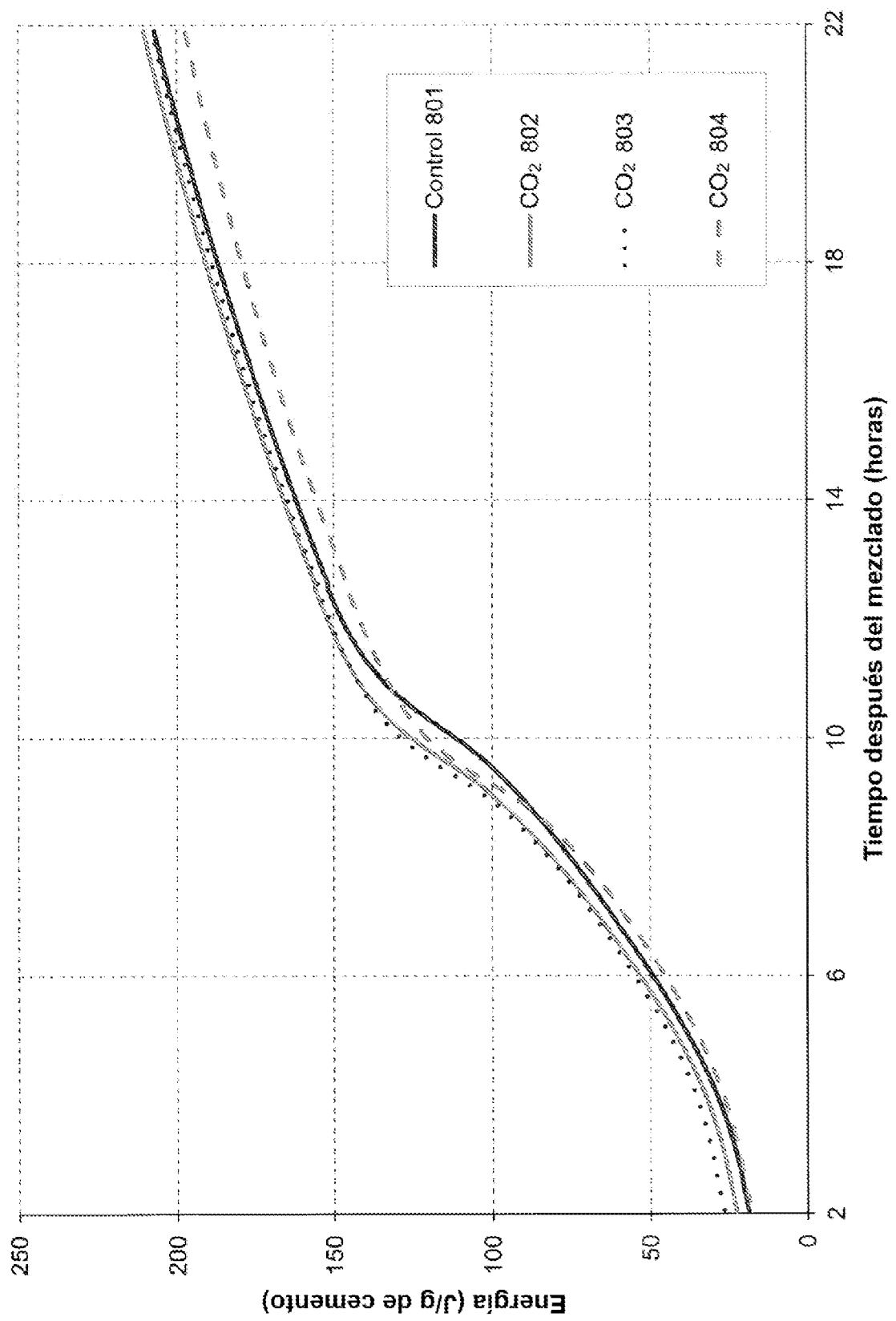


Figura 94A

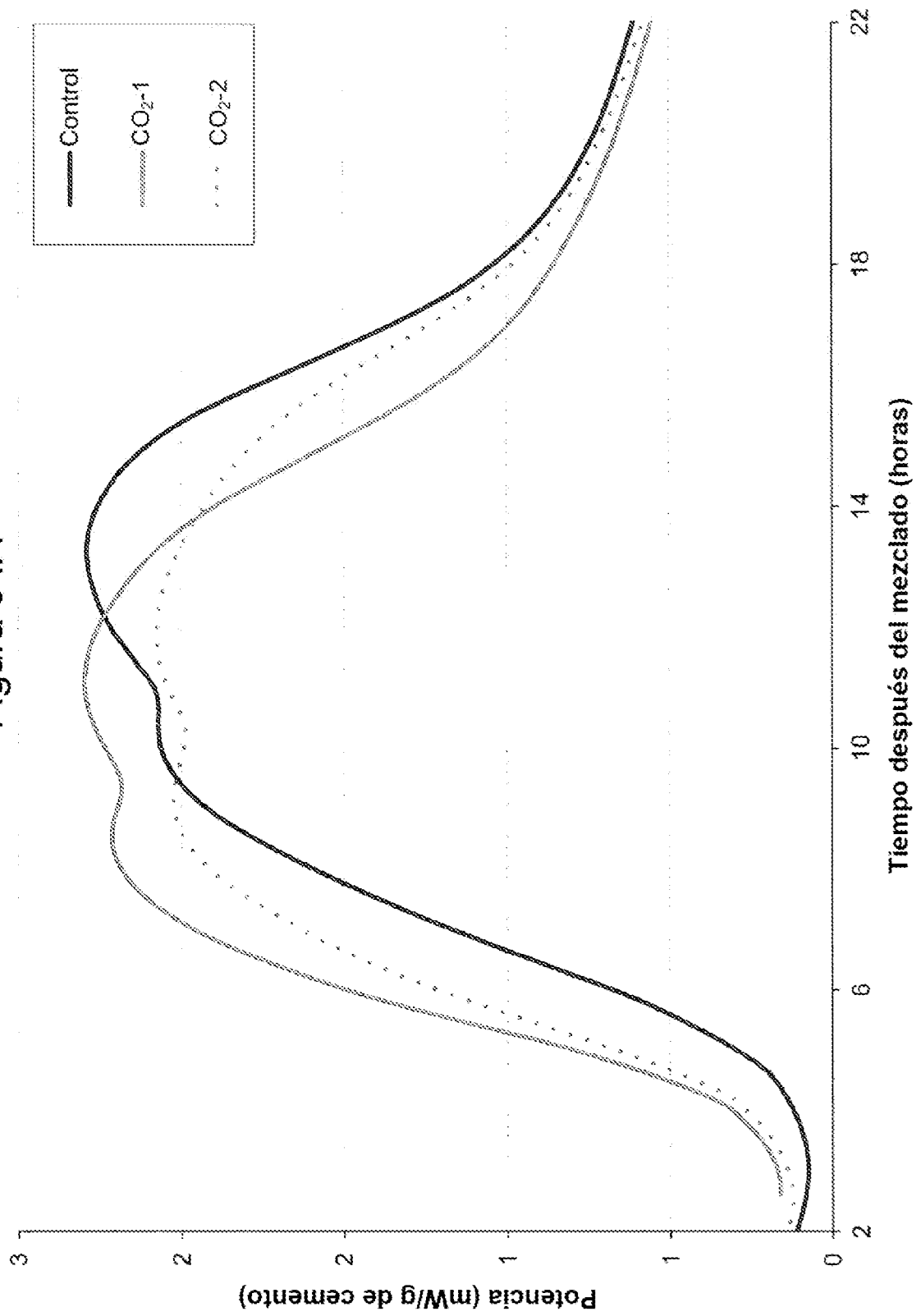


Figura 94B

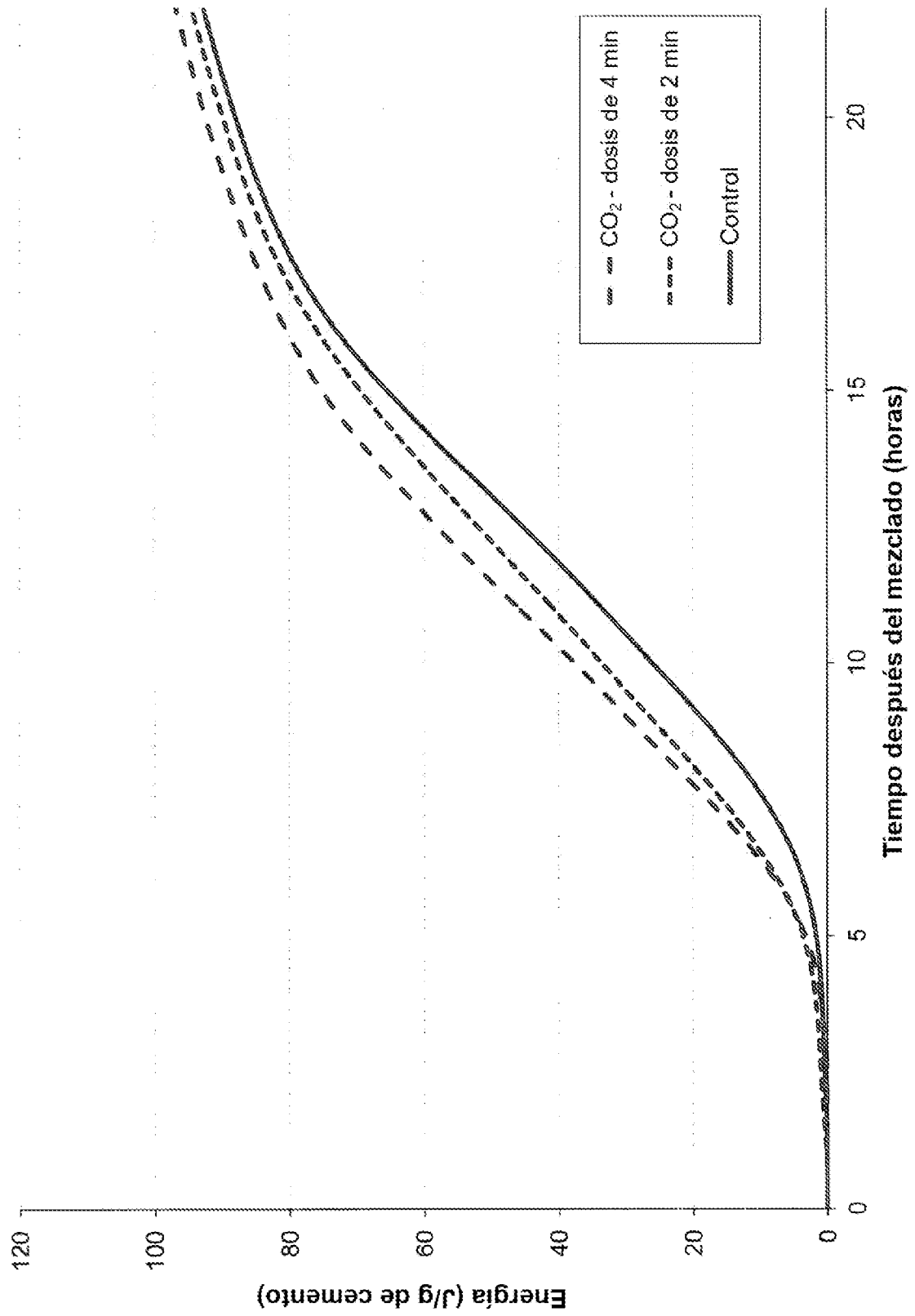


Figura 95

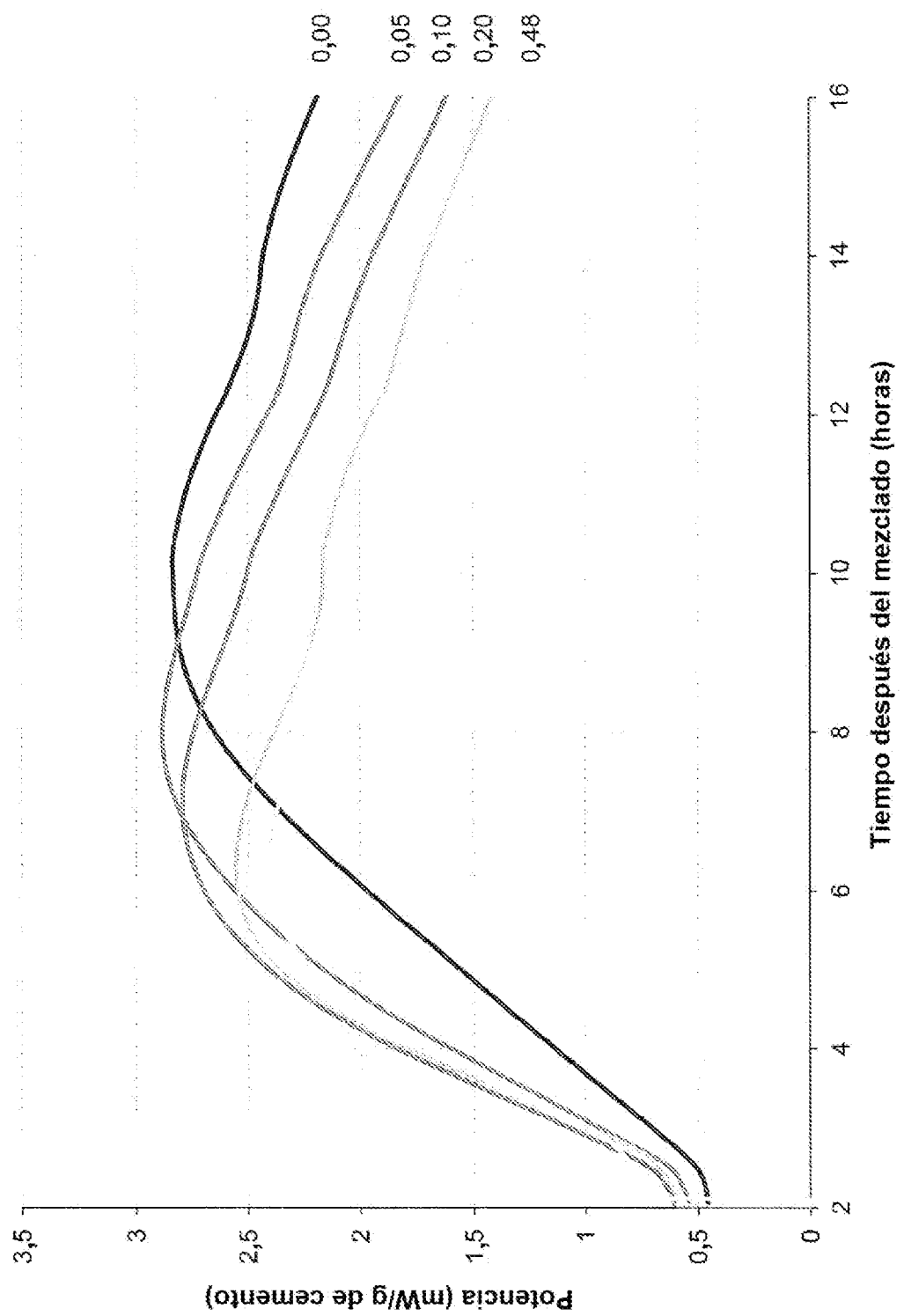


Figura 96

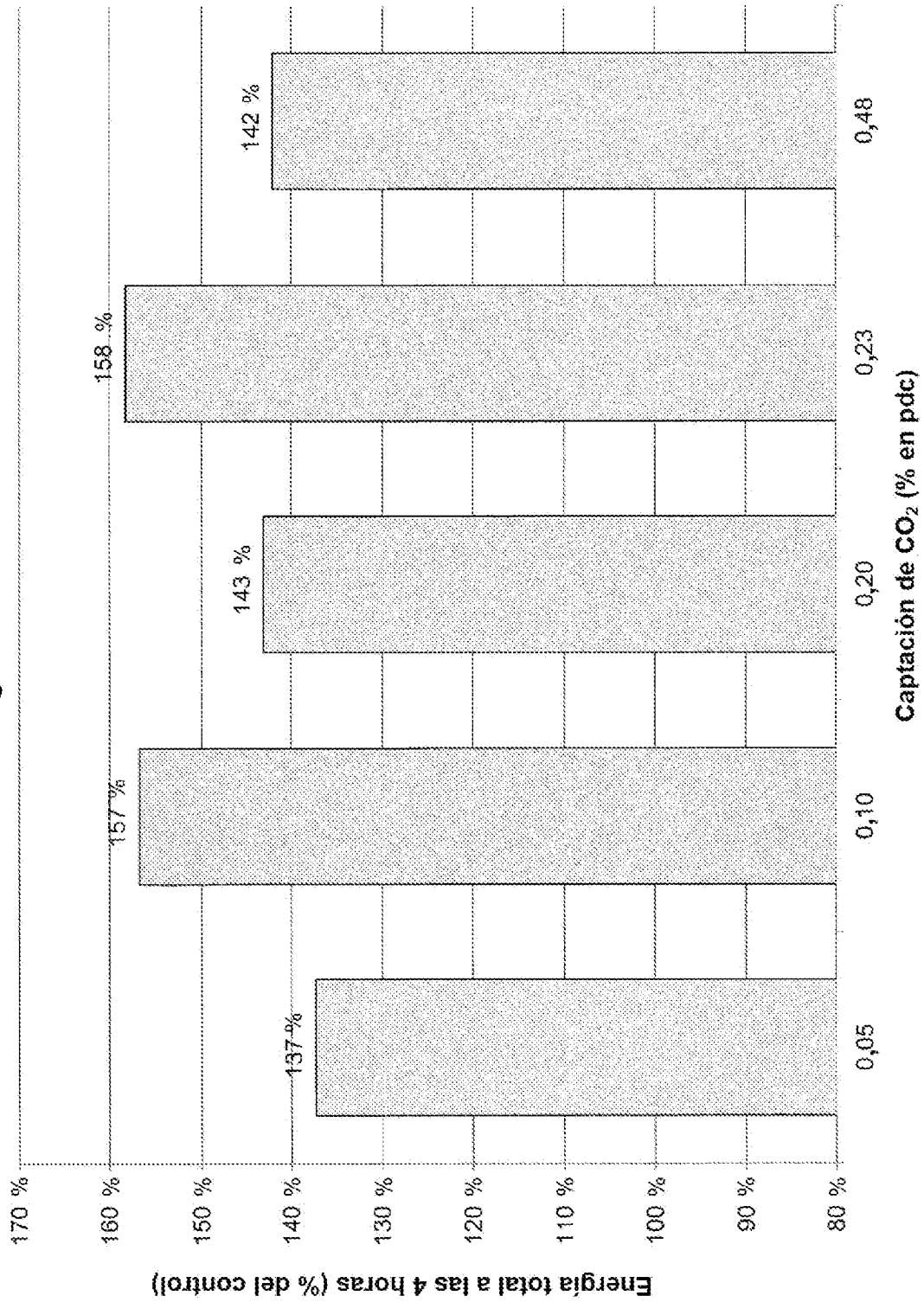


Figura 97

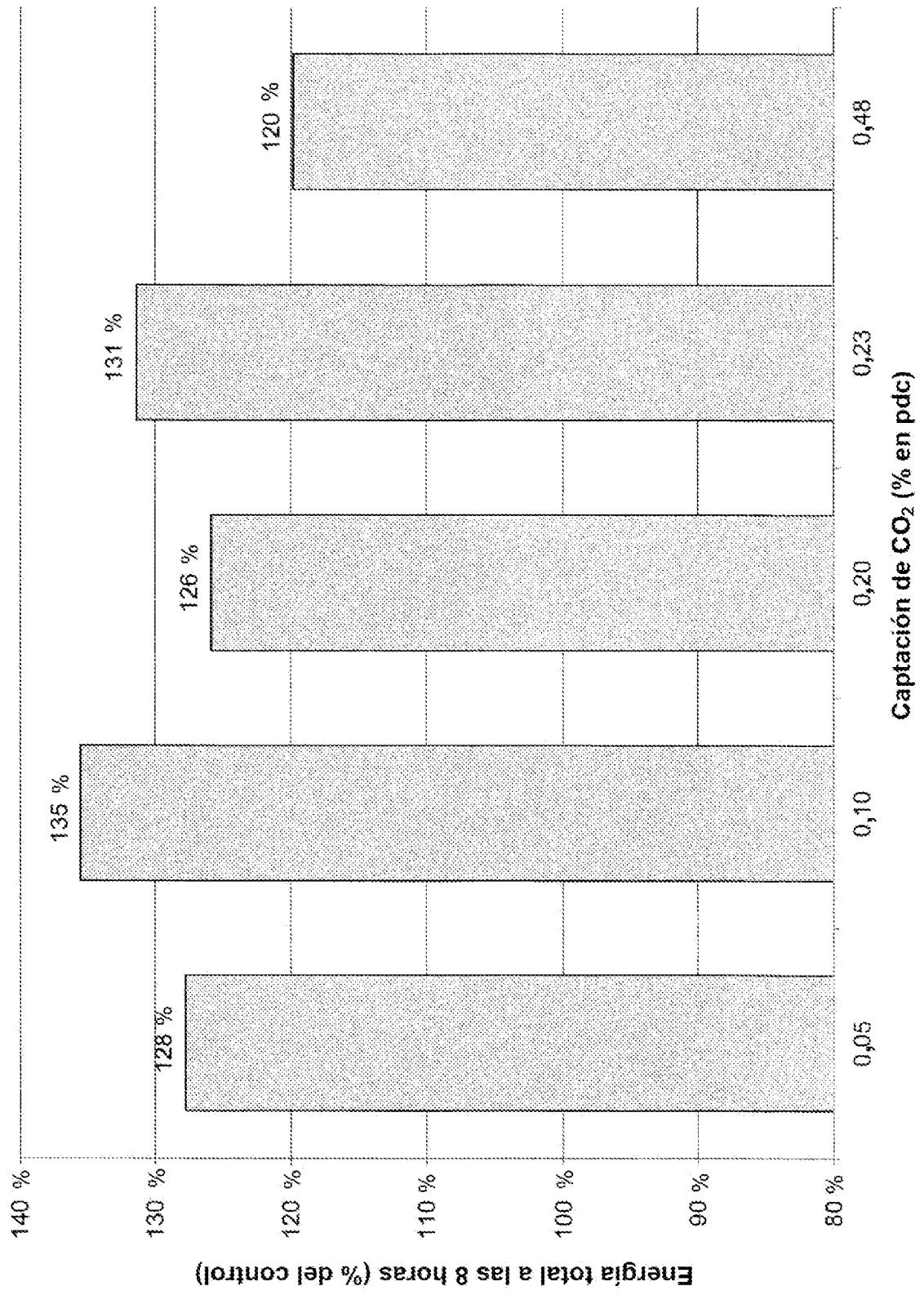


Figura 98

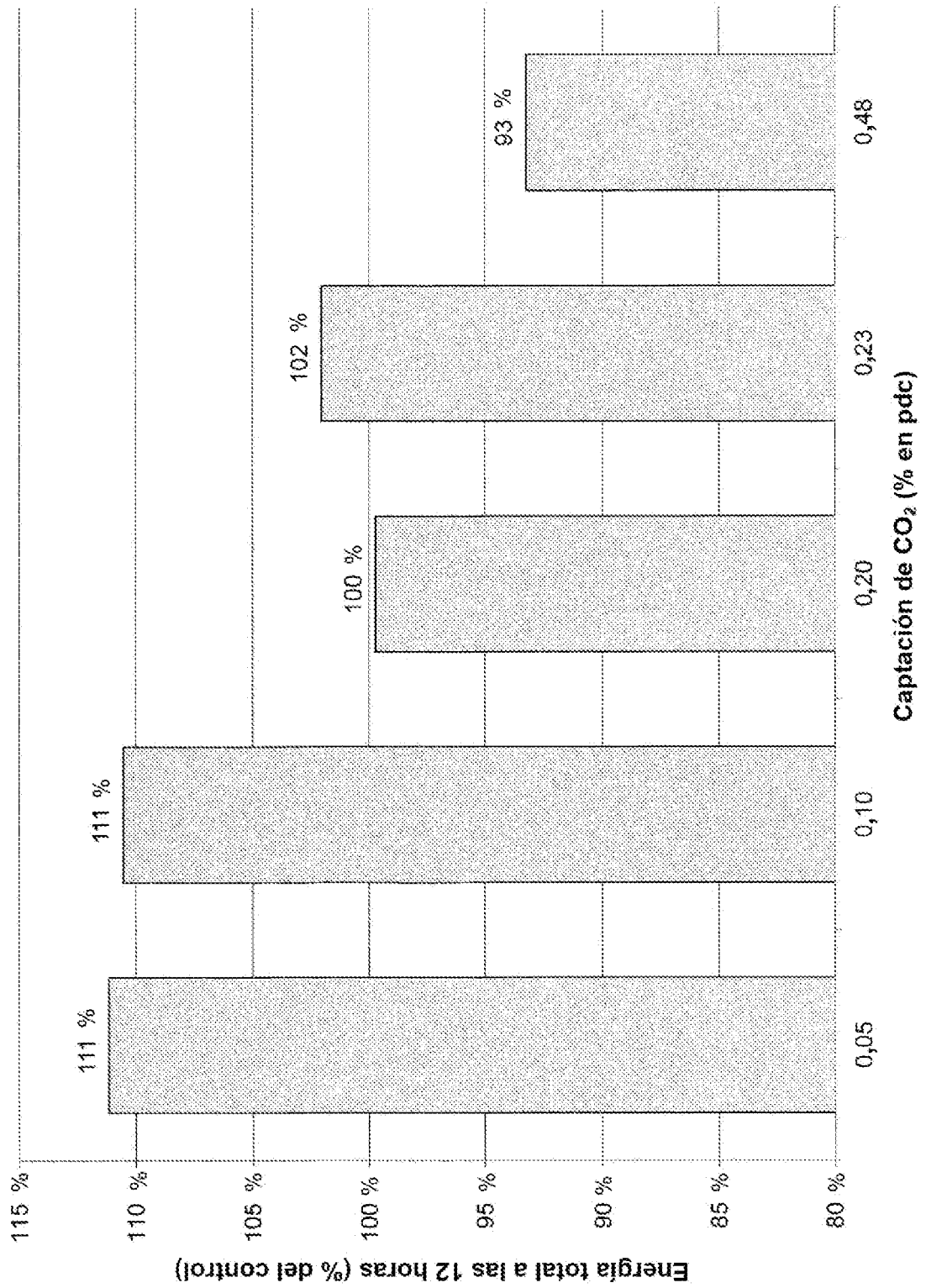


Figura 99

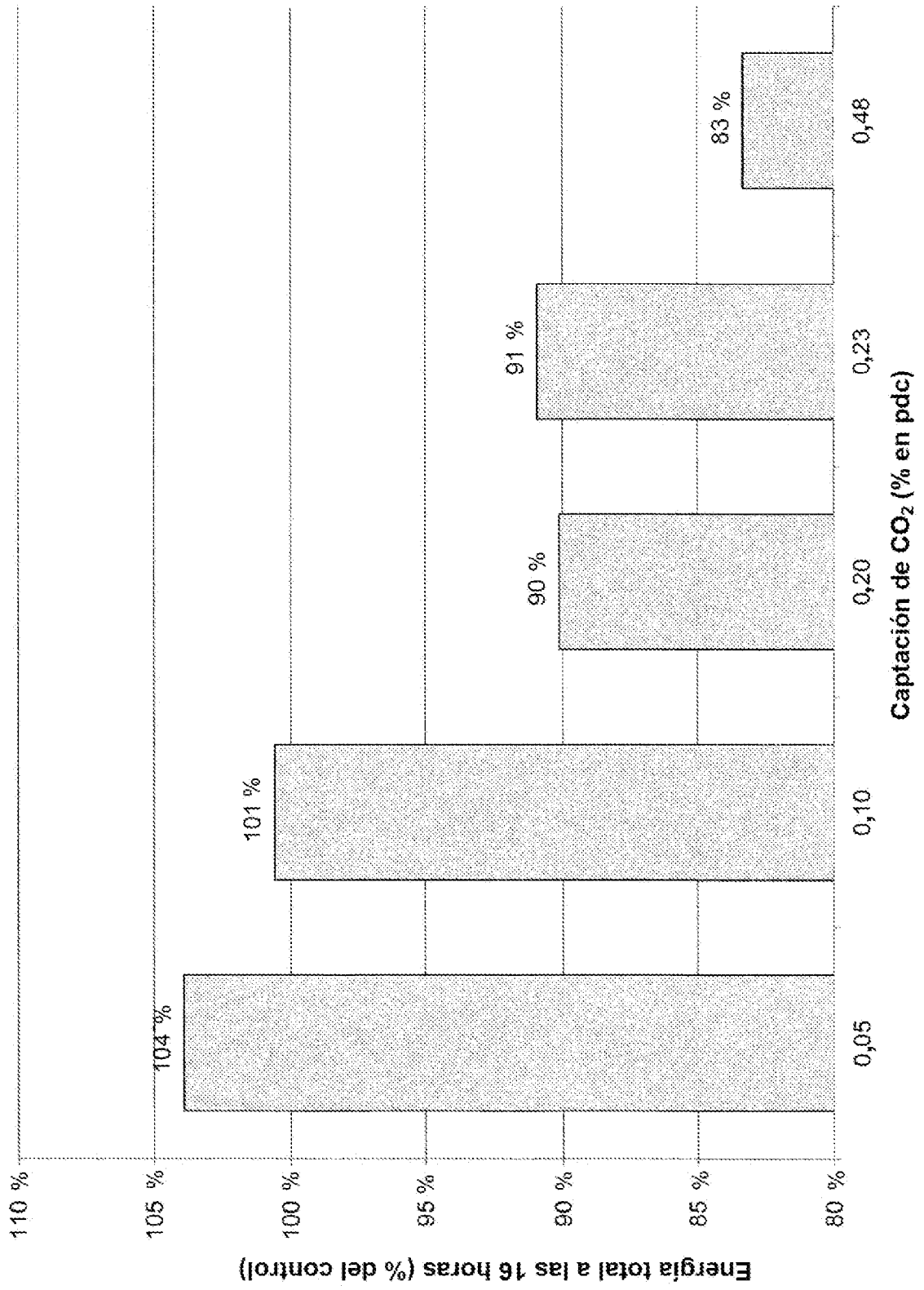


Figura 100

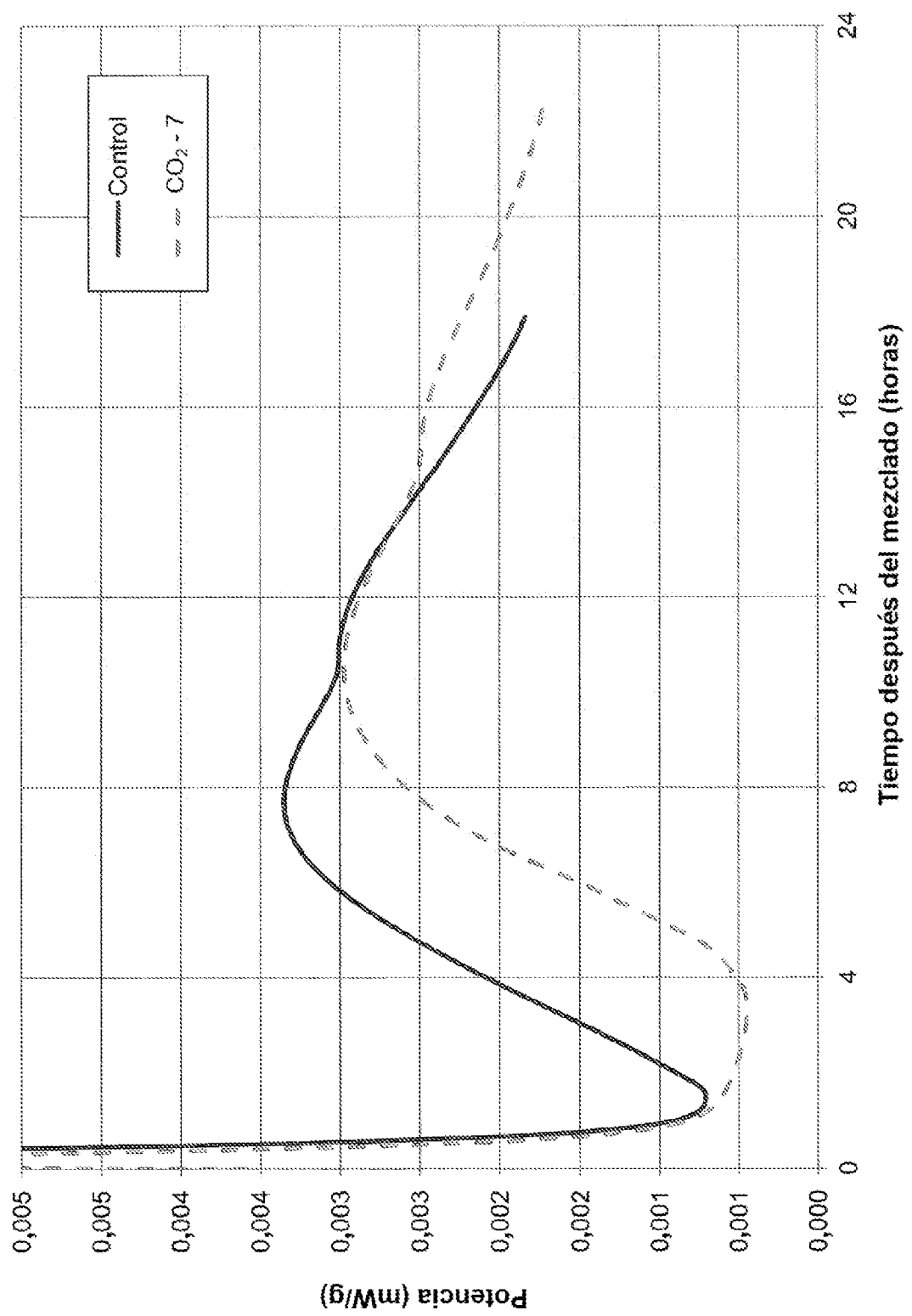


Figura 101

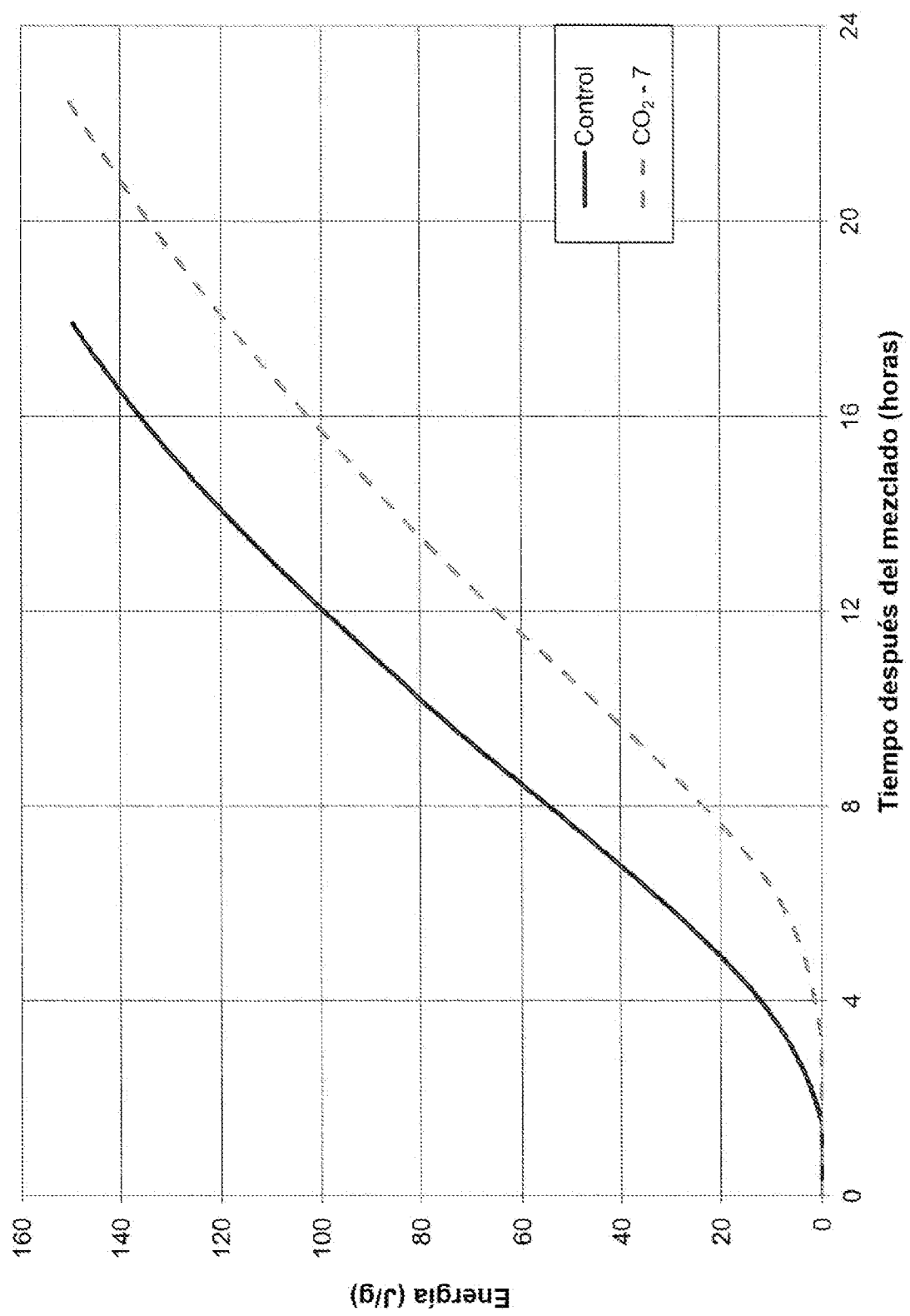


Figura 102

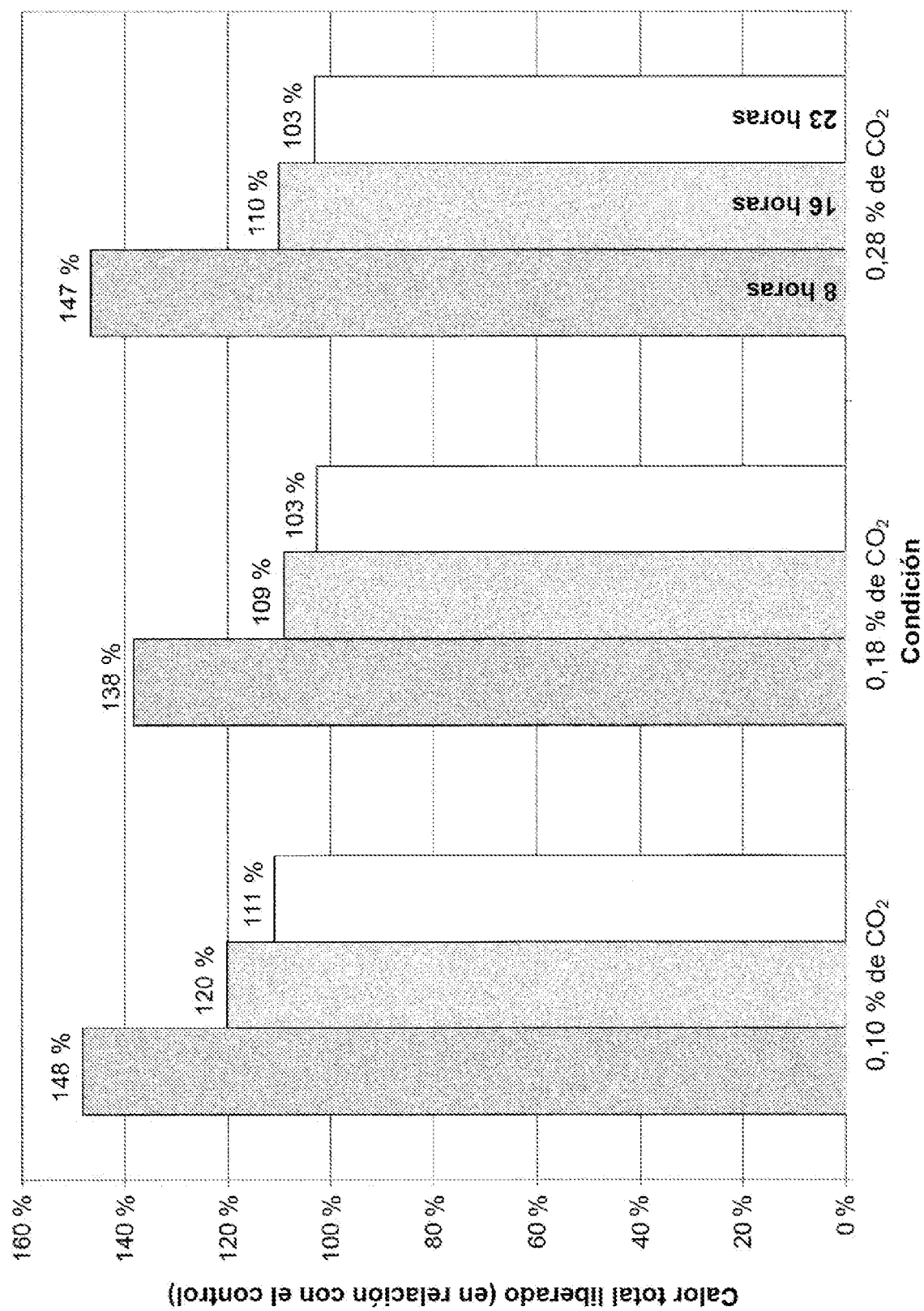


Figura 103

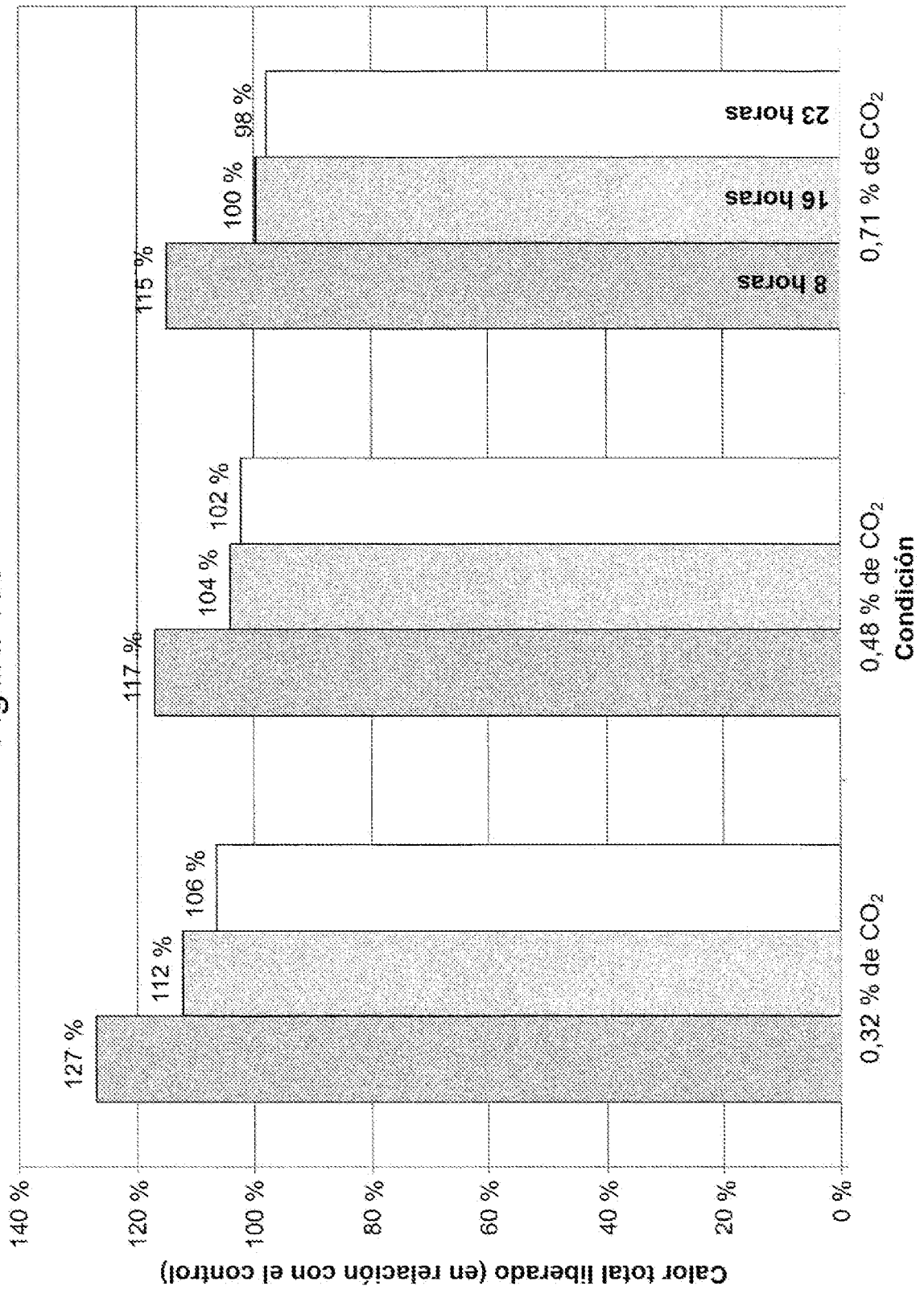


Figura 104

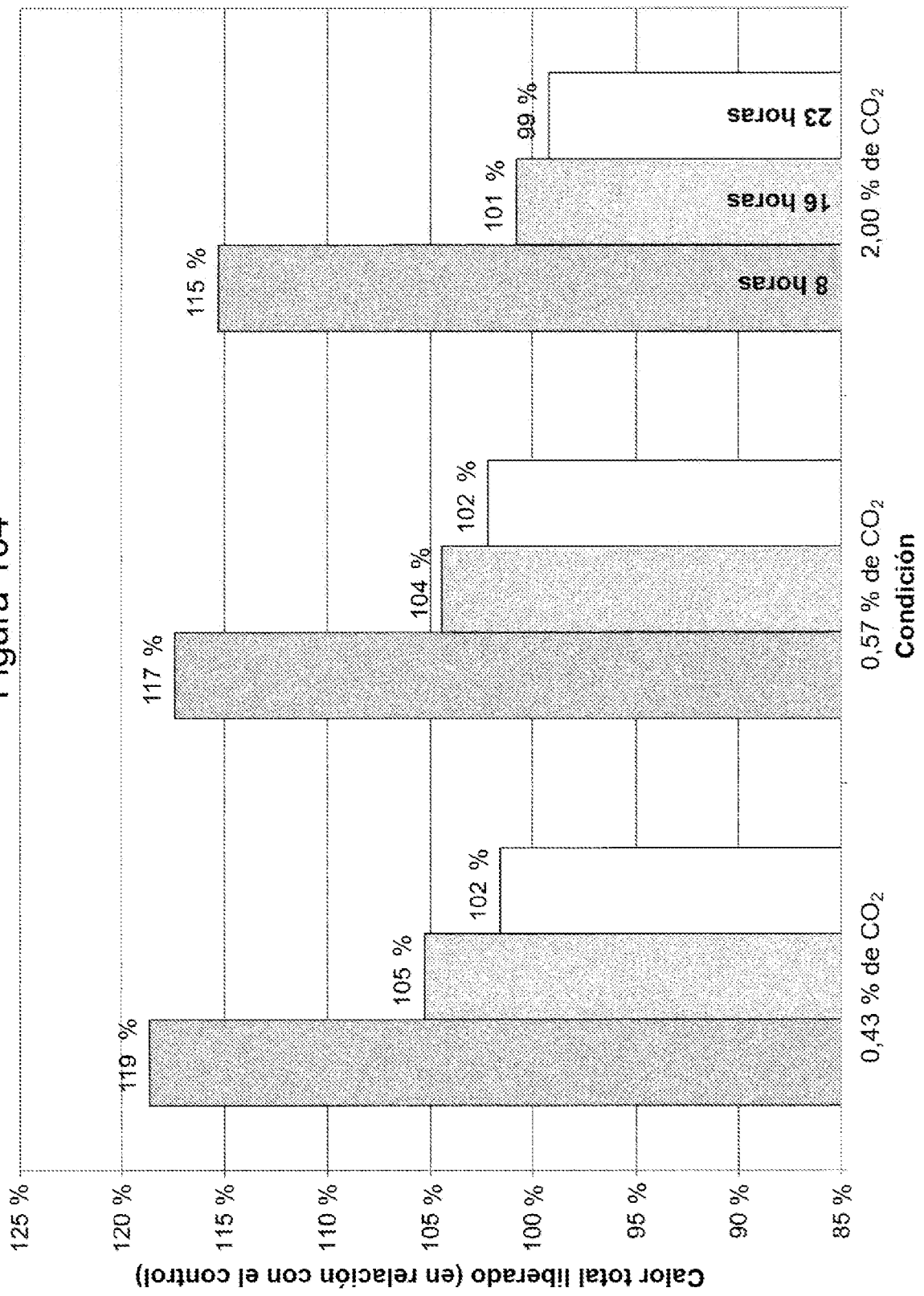


Figura 105

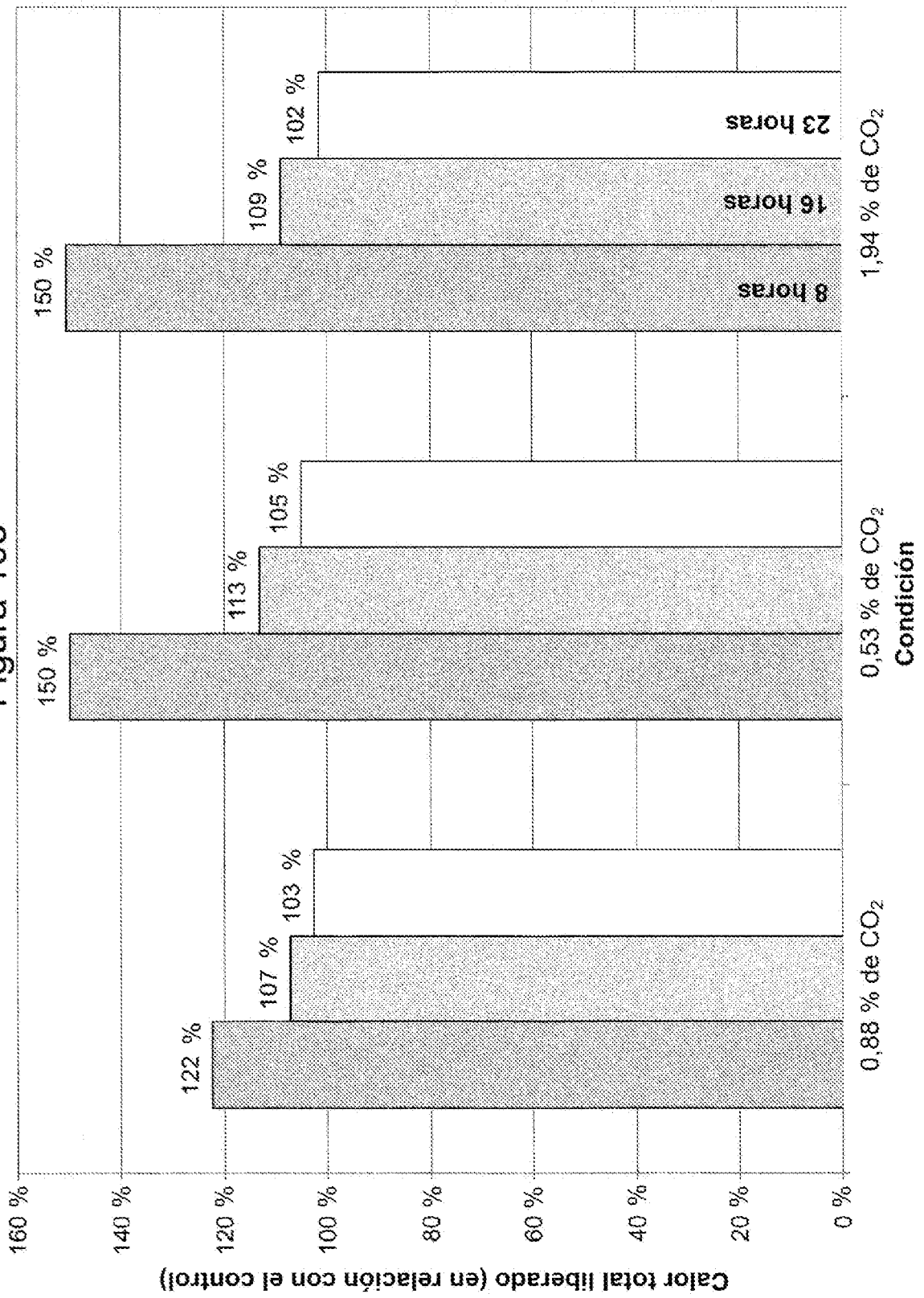


Figura 106

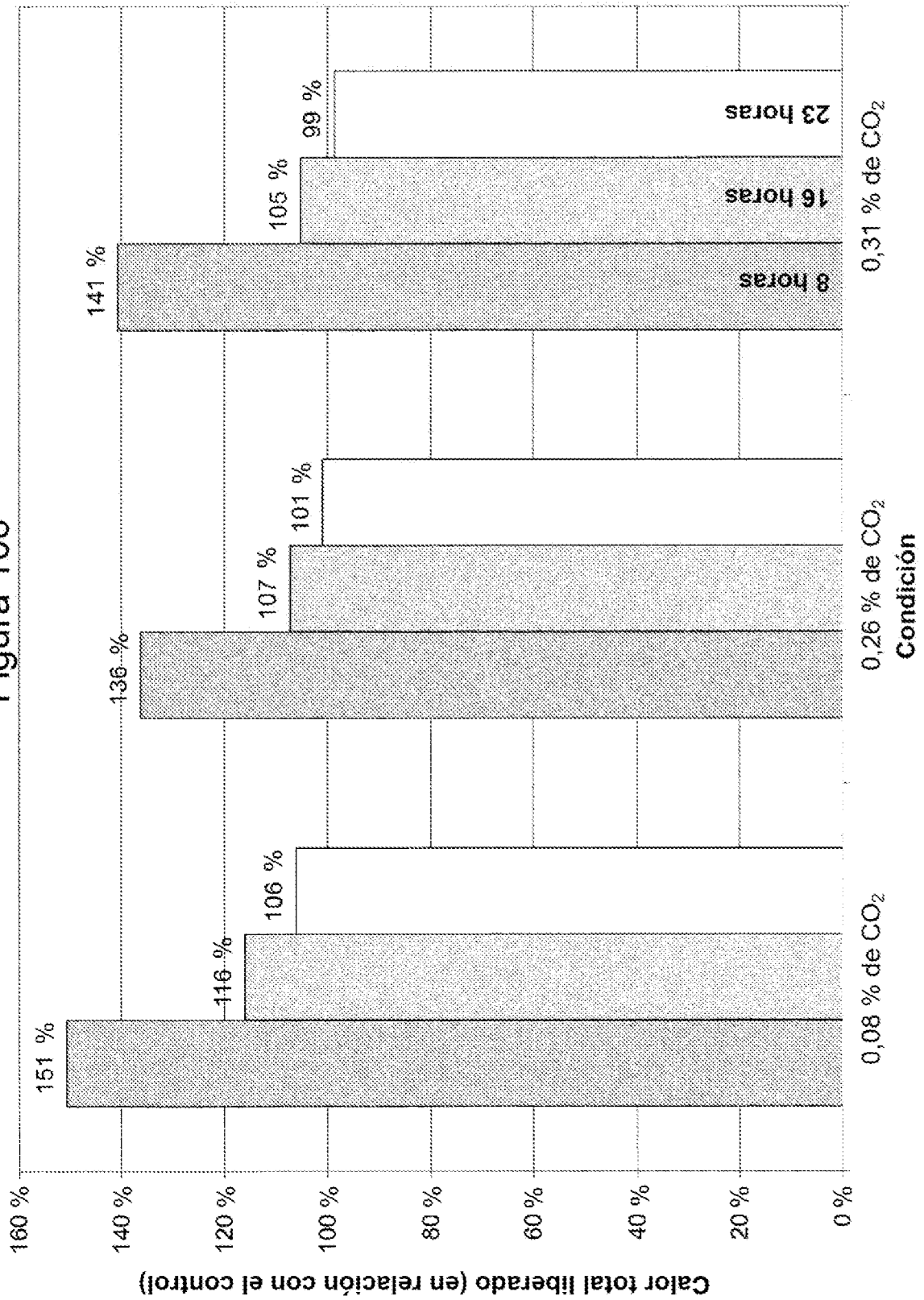


Figura 107

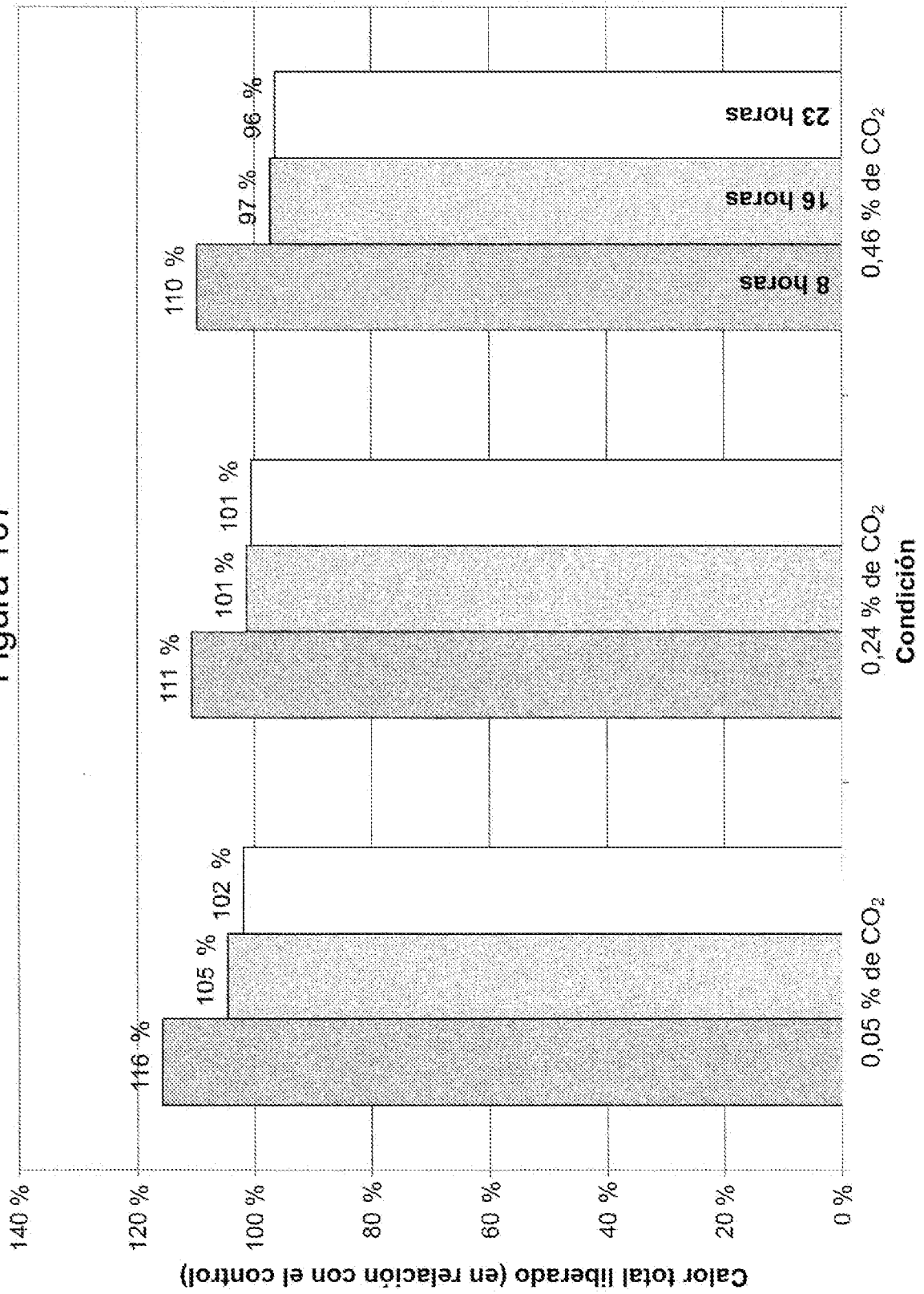


Figura 108

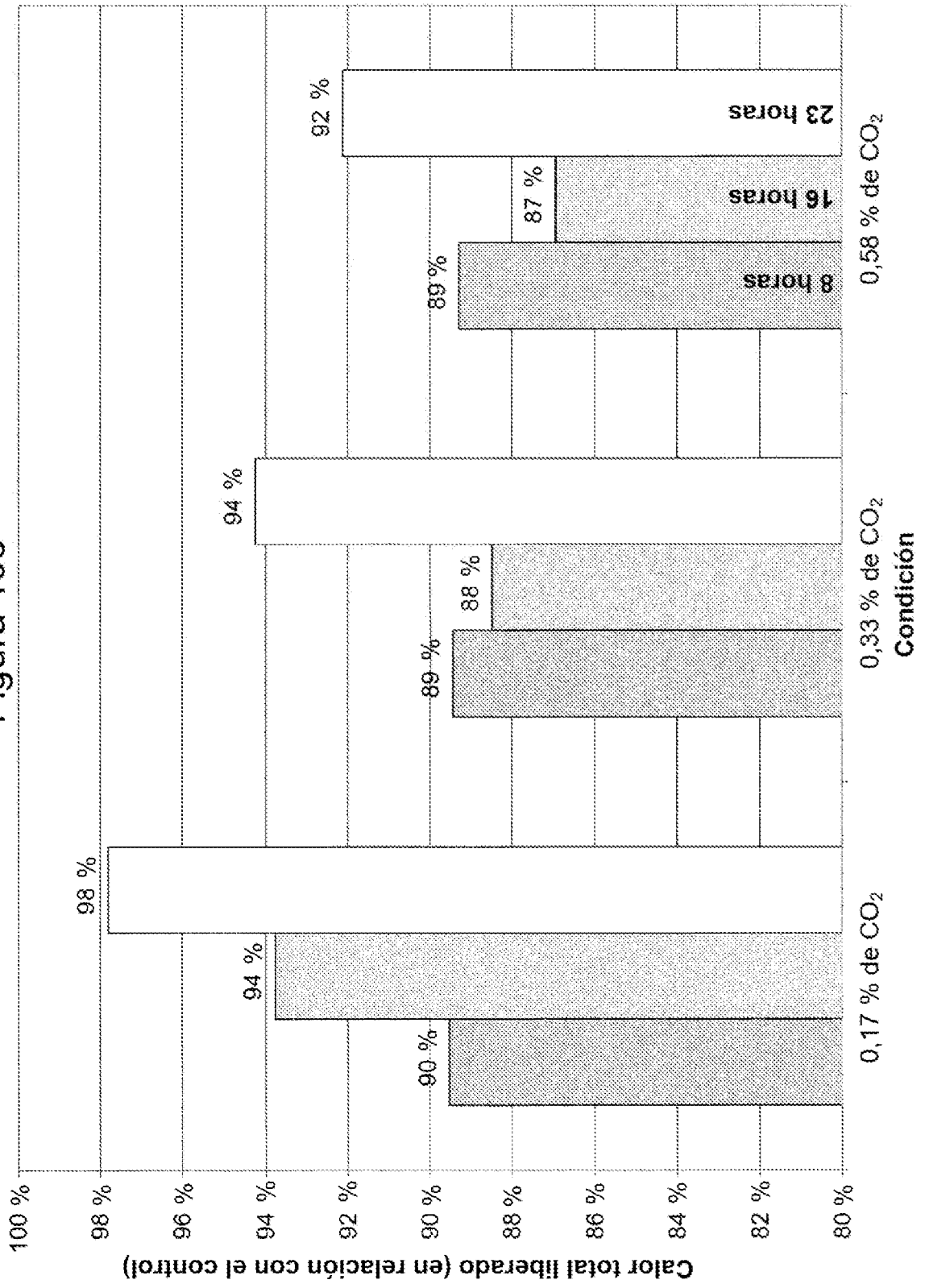


Figura 109

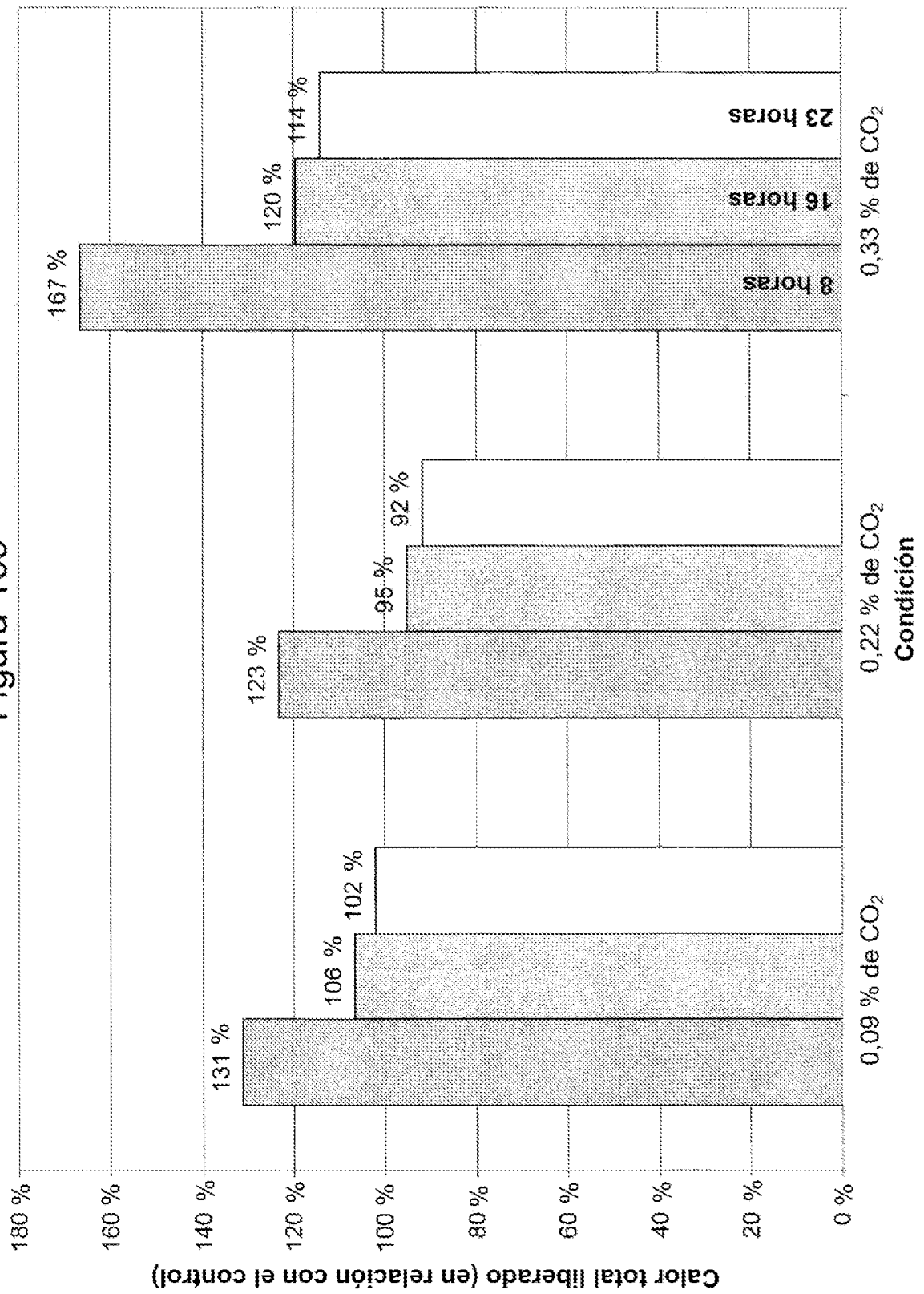


Figura 110

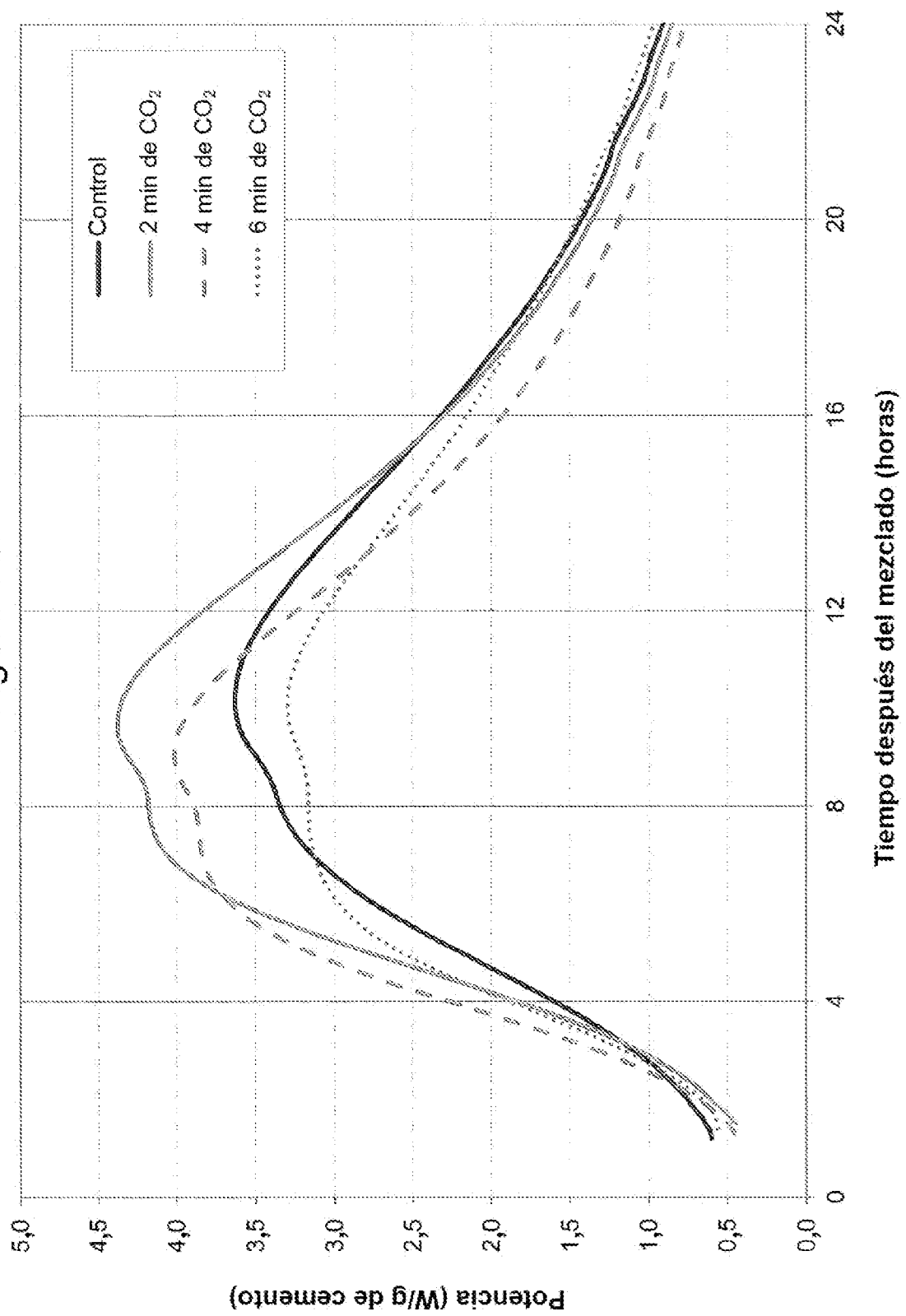


Figura 111

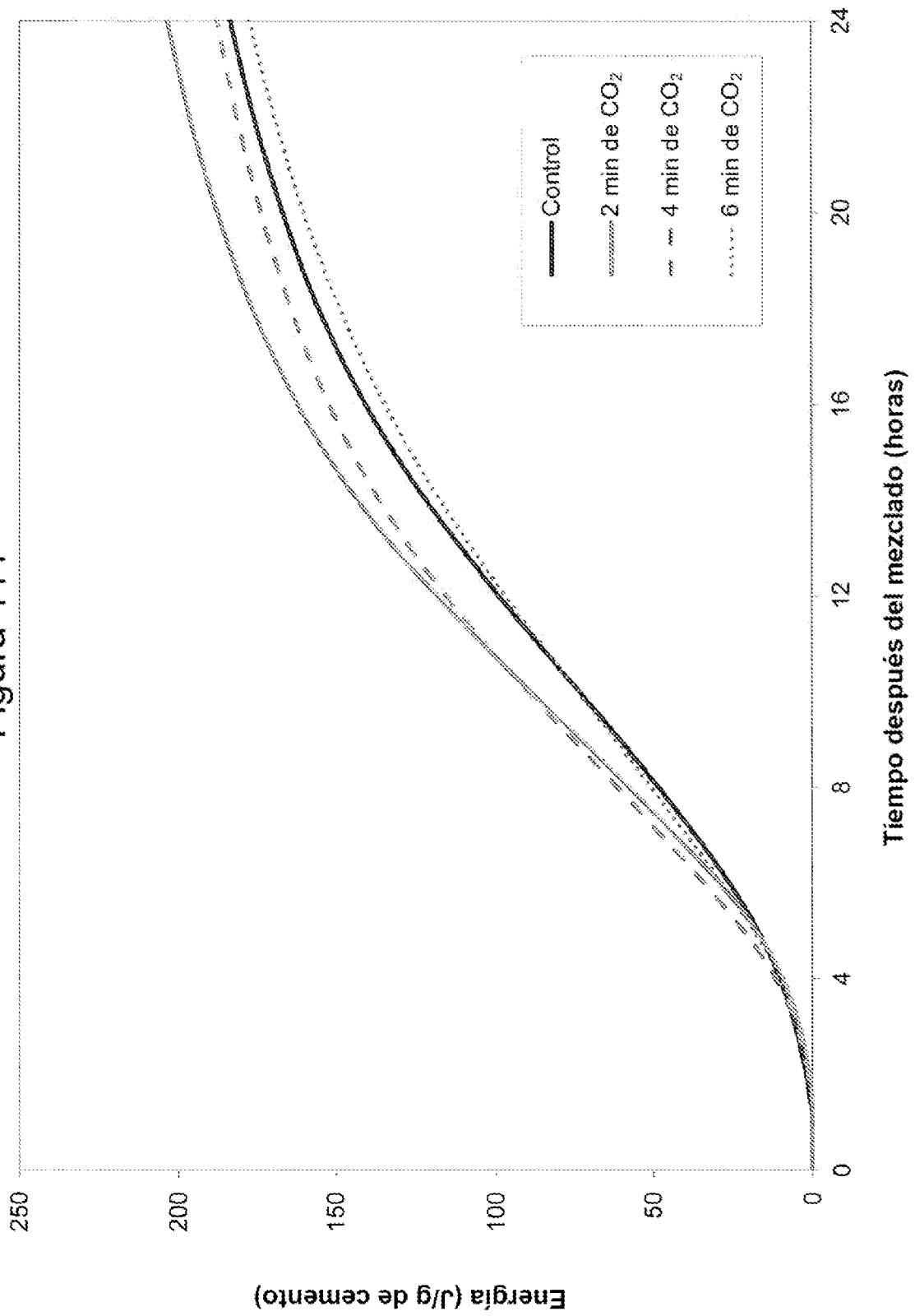


Figura 112

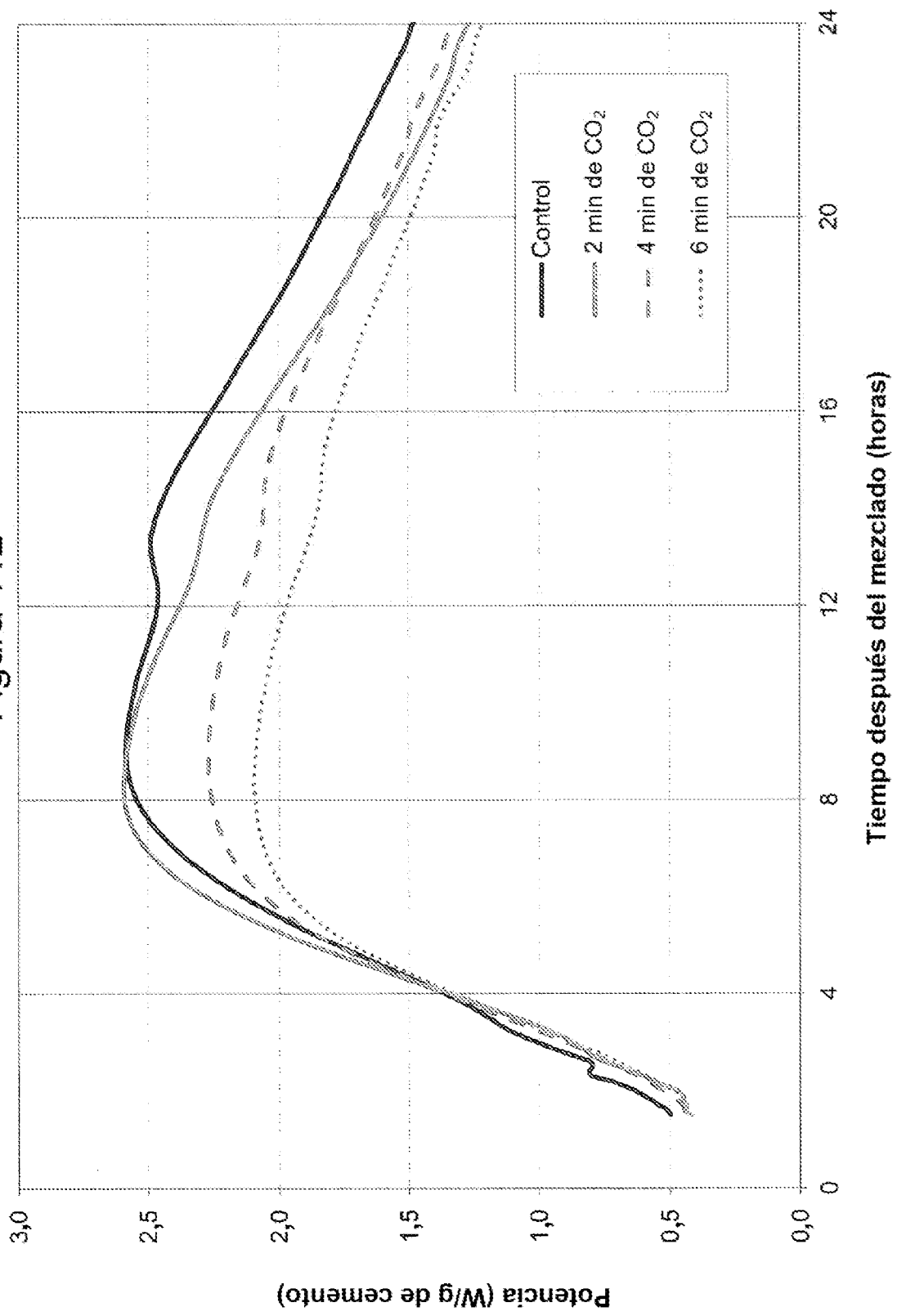


Figura 113

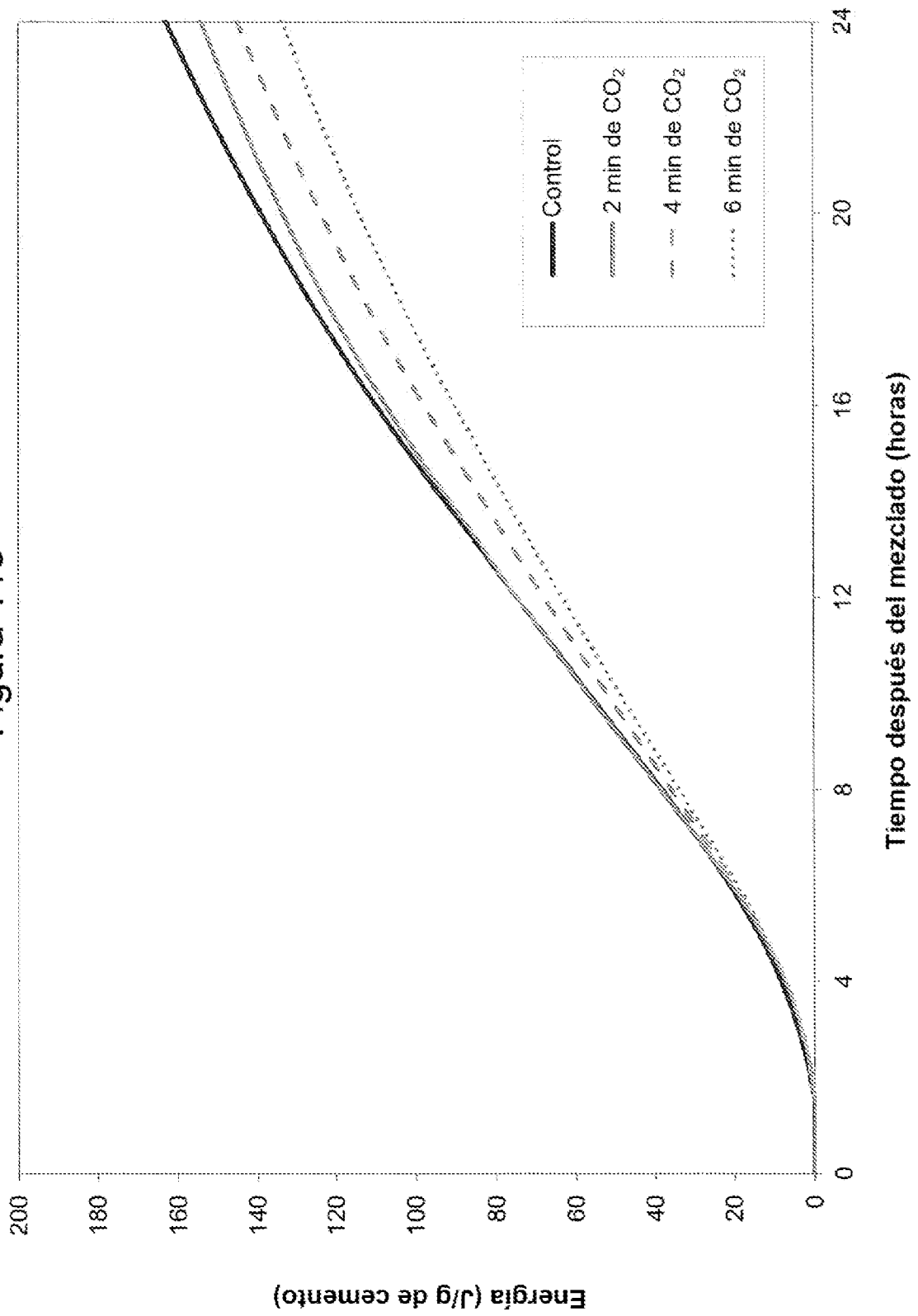


Figura 114

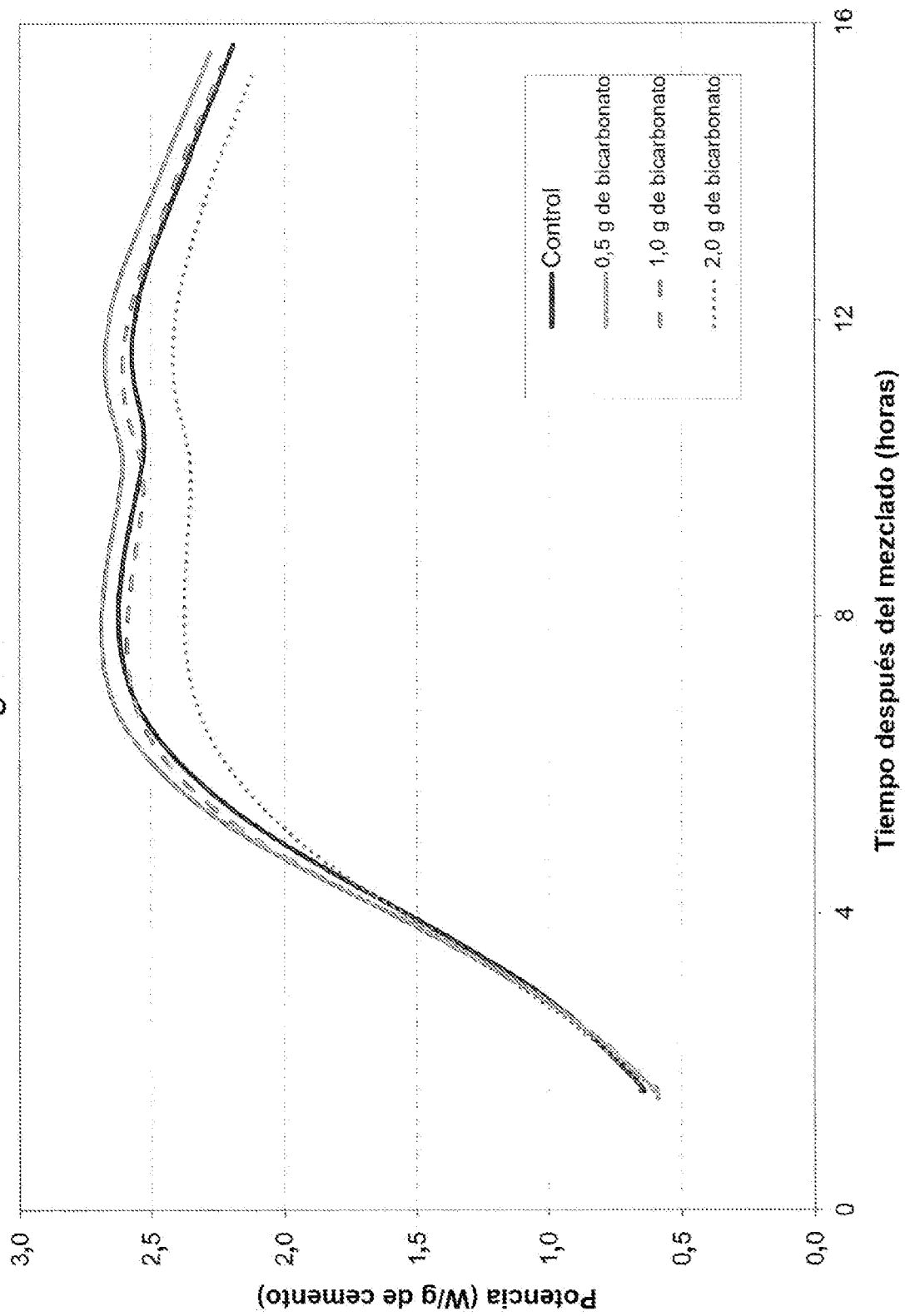


Figura 115

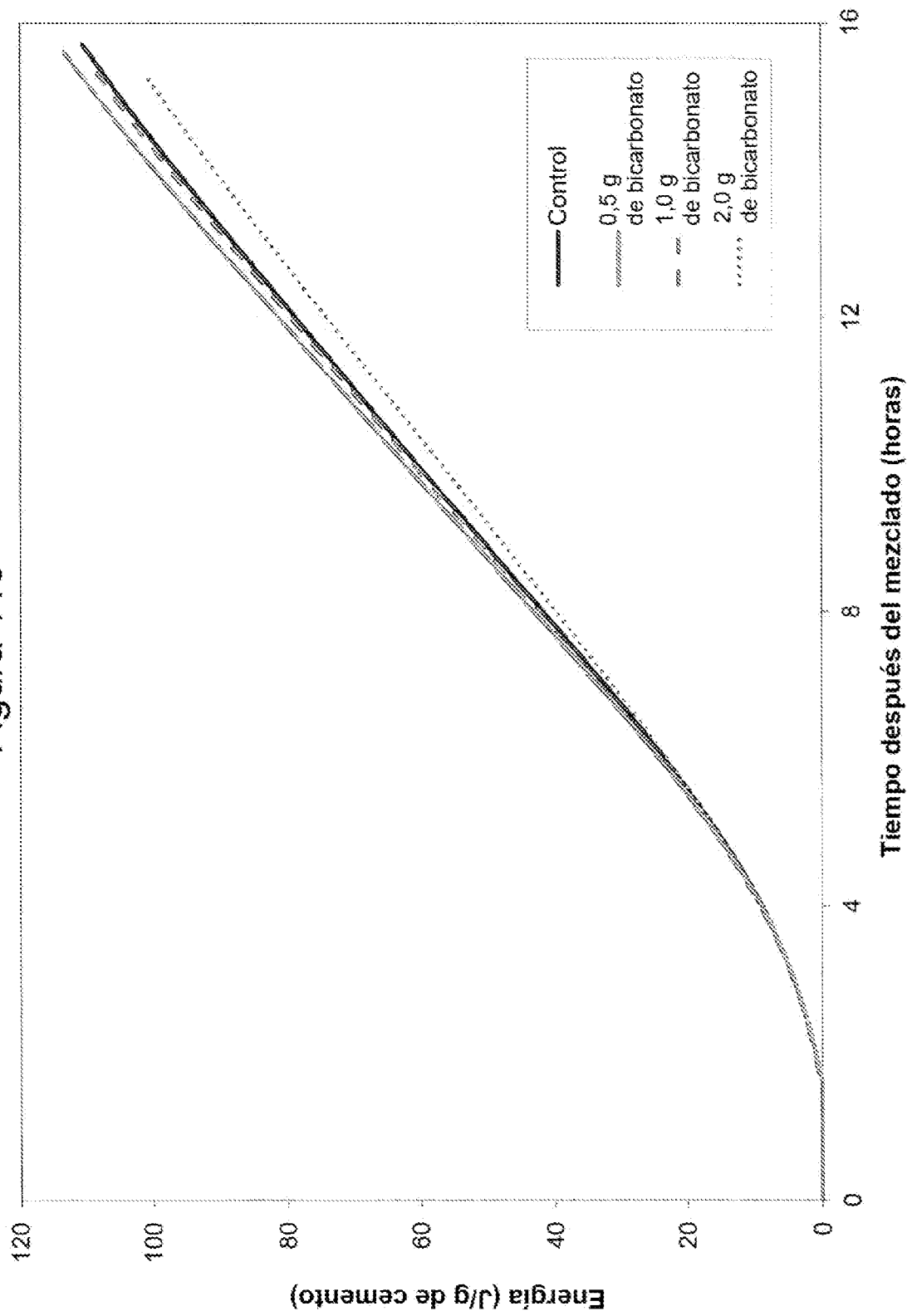


Figura 116

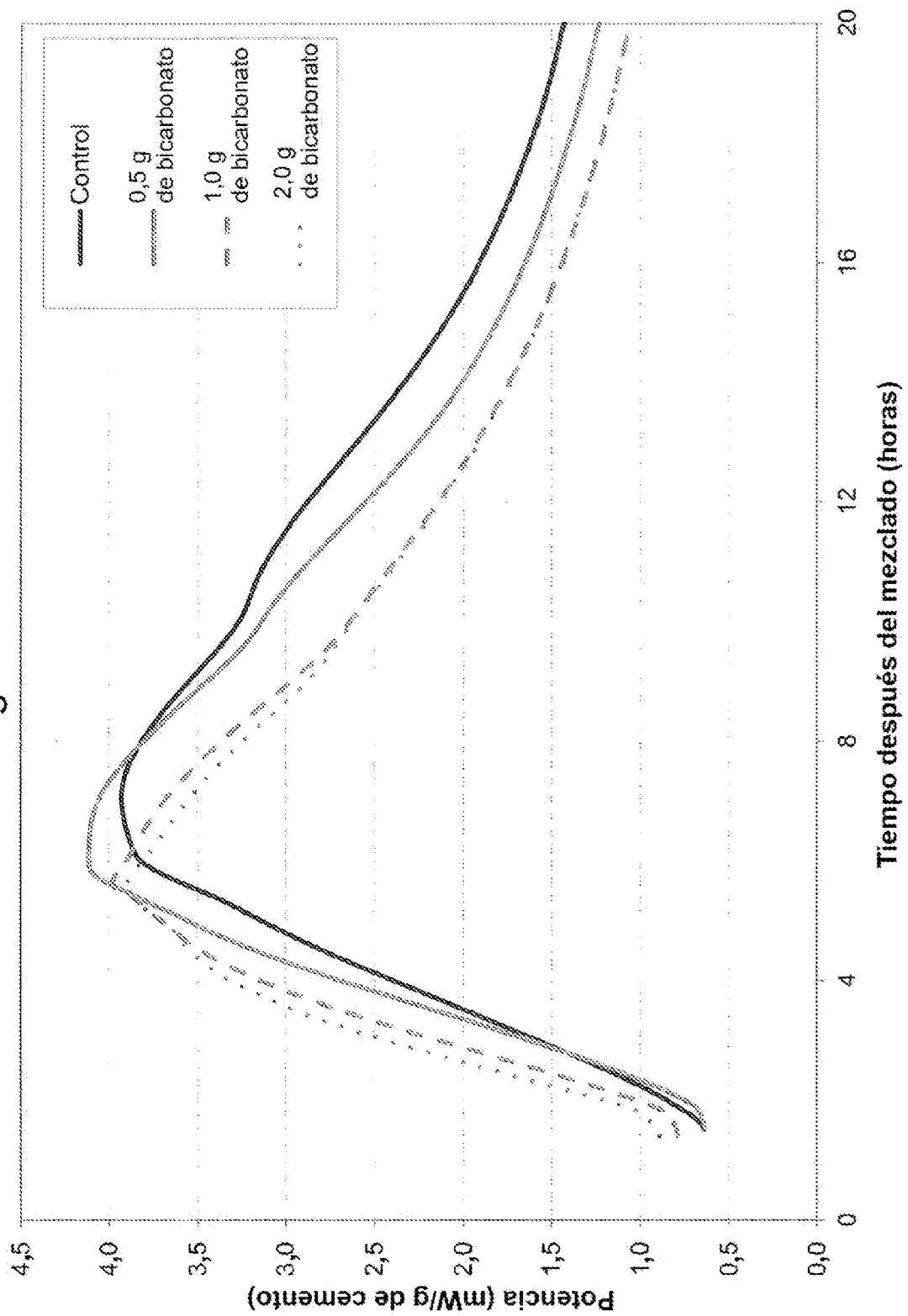


Figura 117

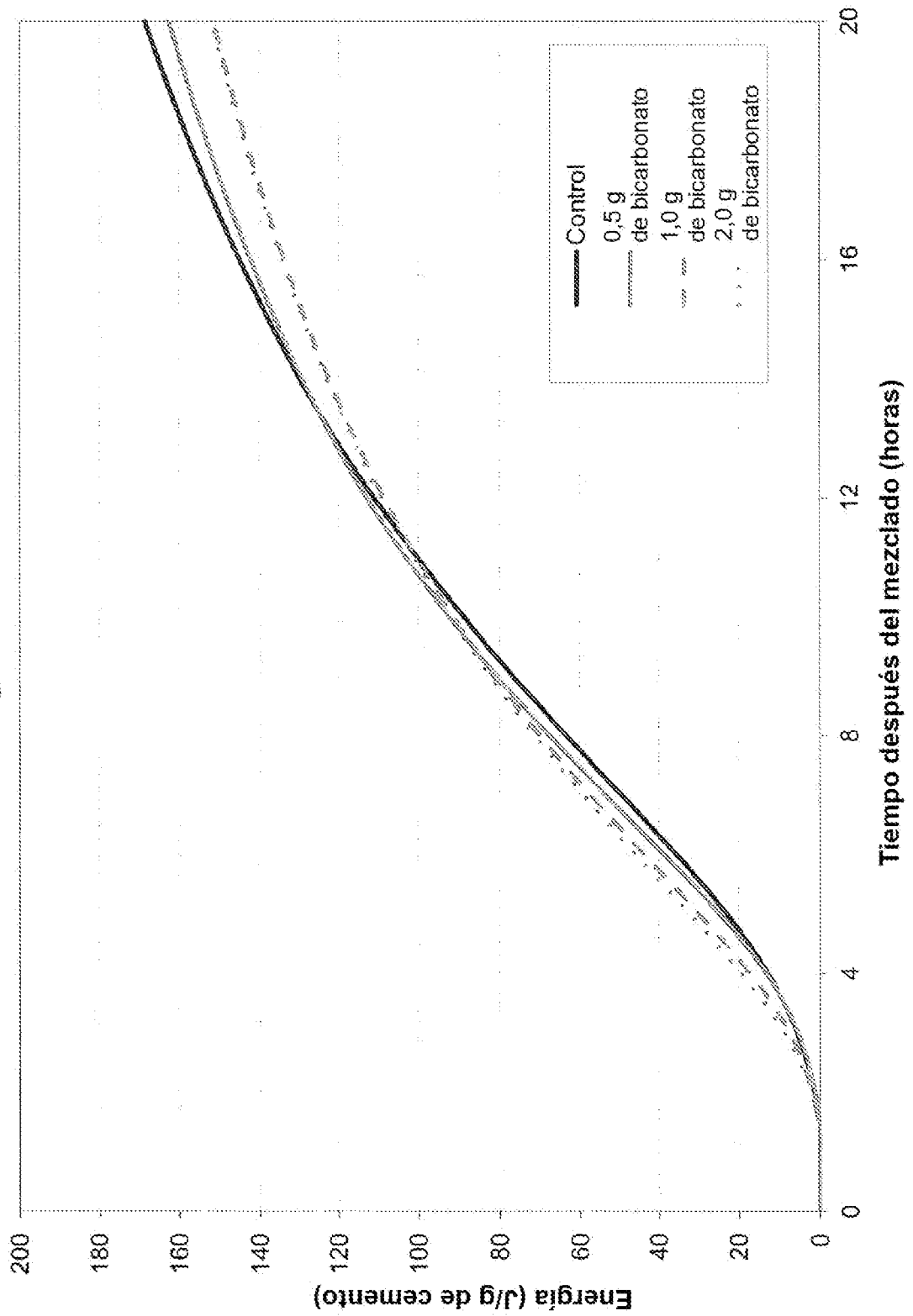


Figura 118

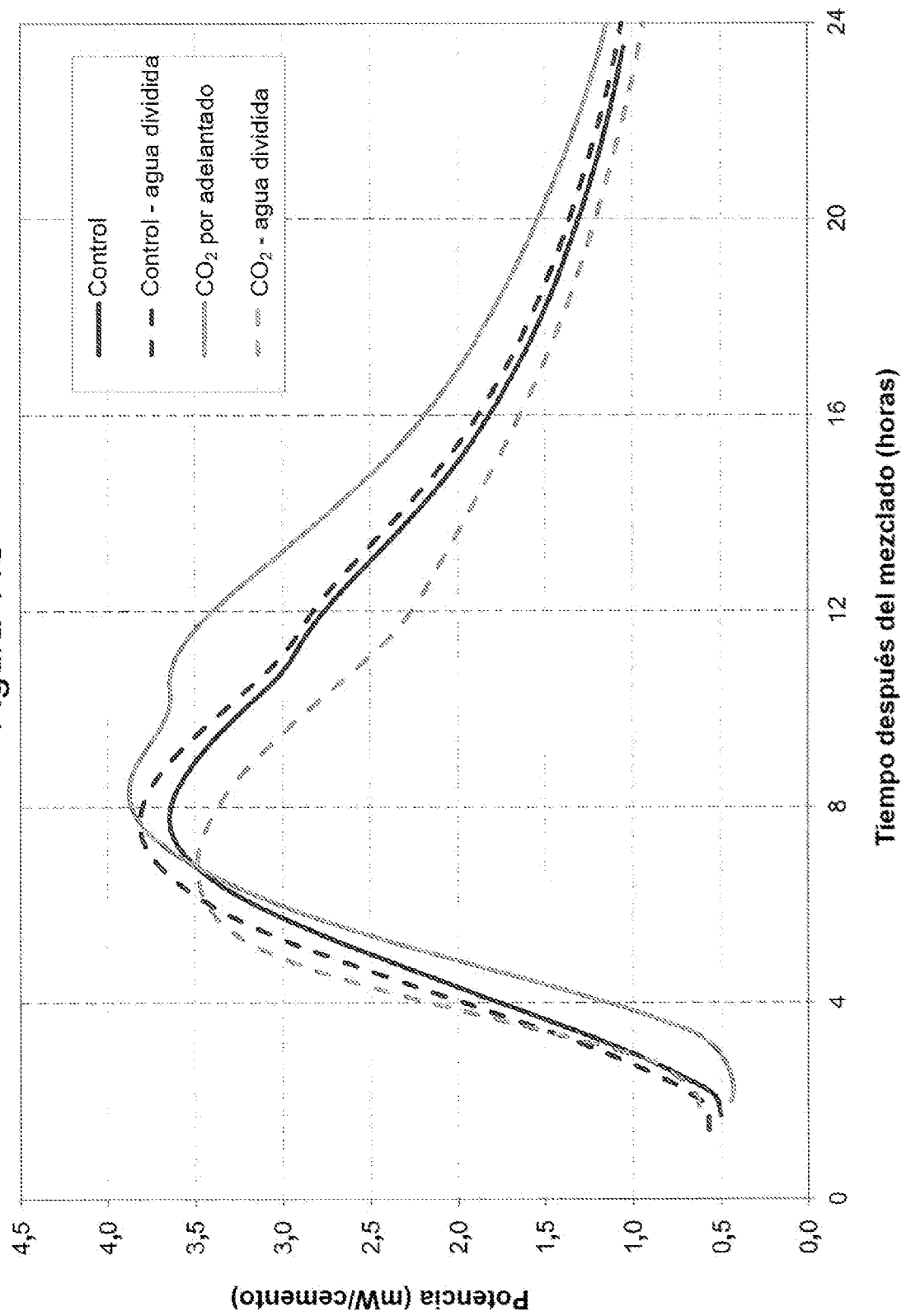


Figura 119

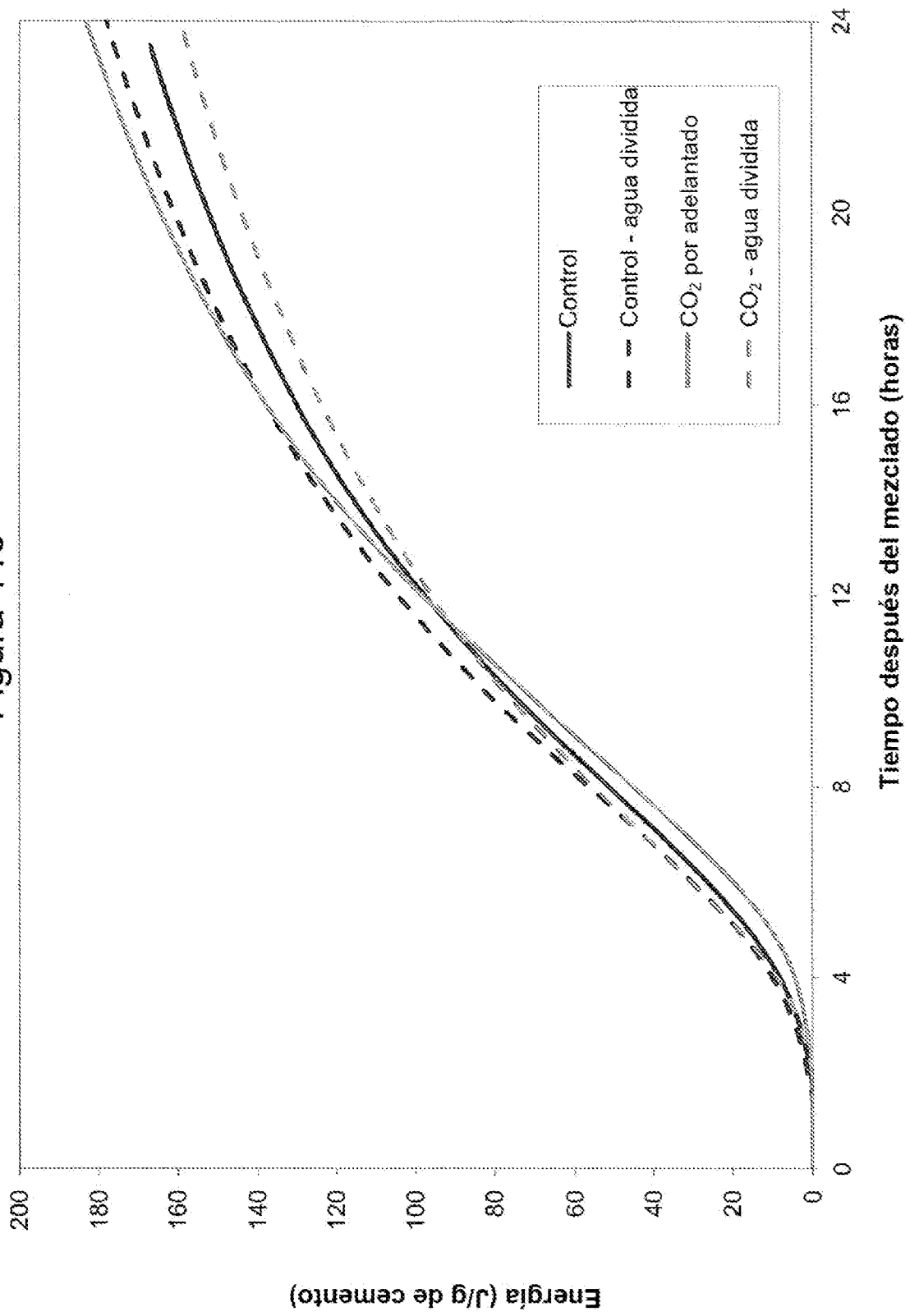


Figura 120

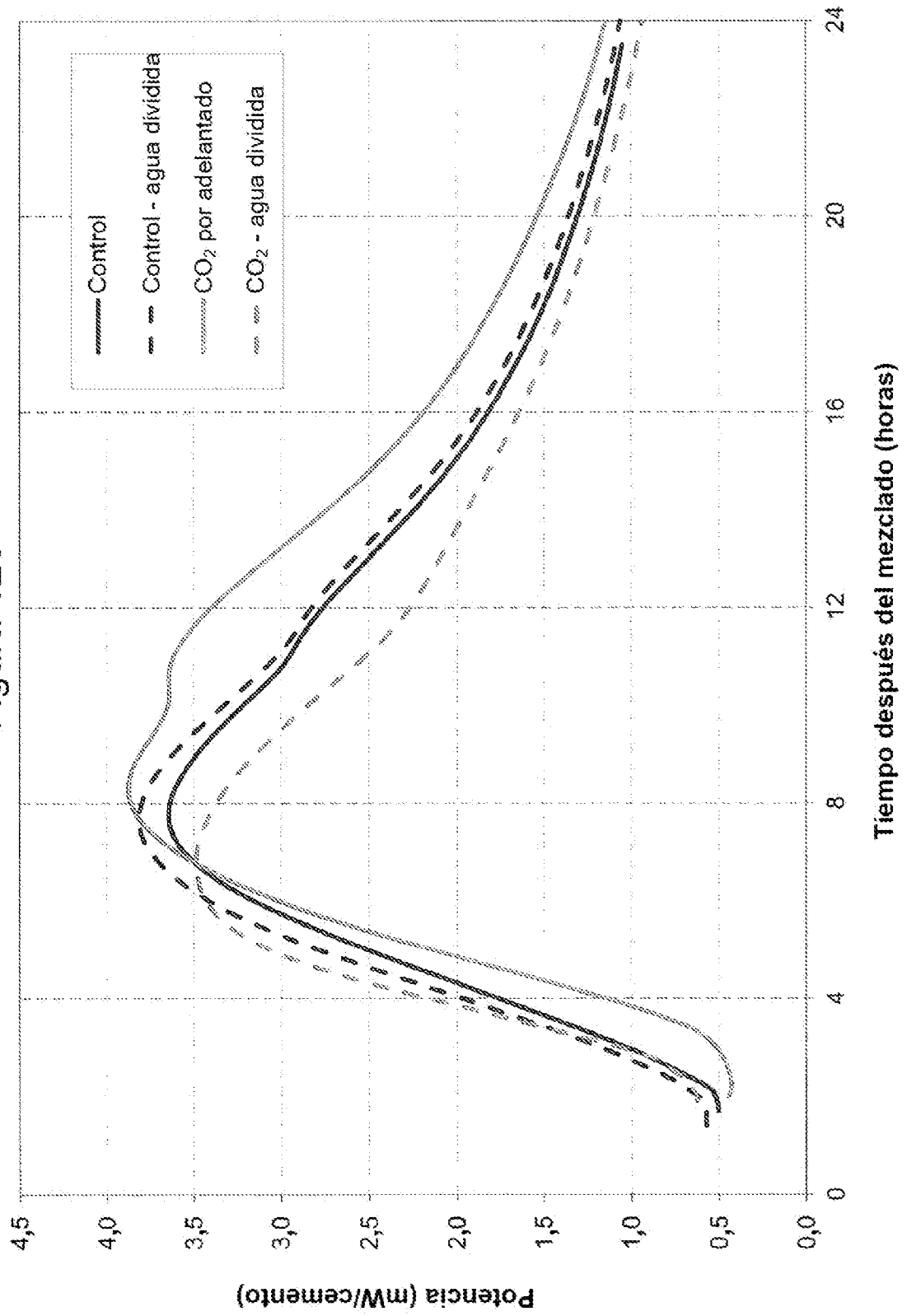


Figura 121

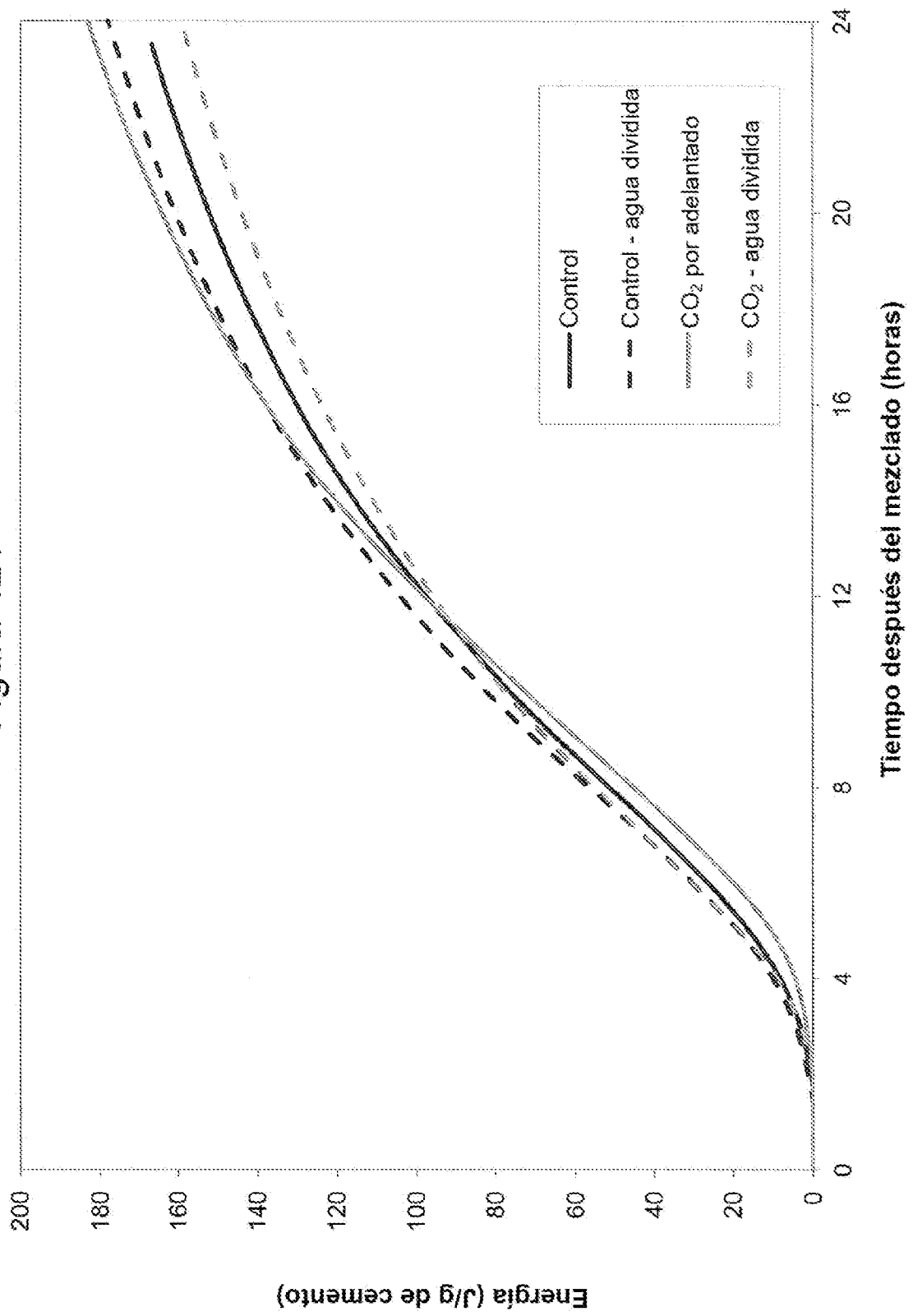


Figura 122

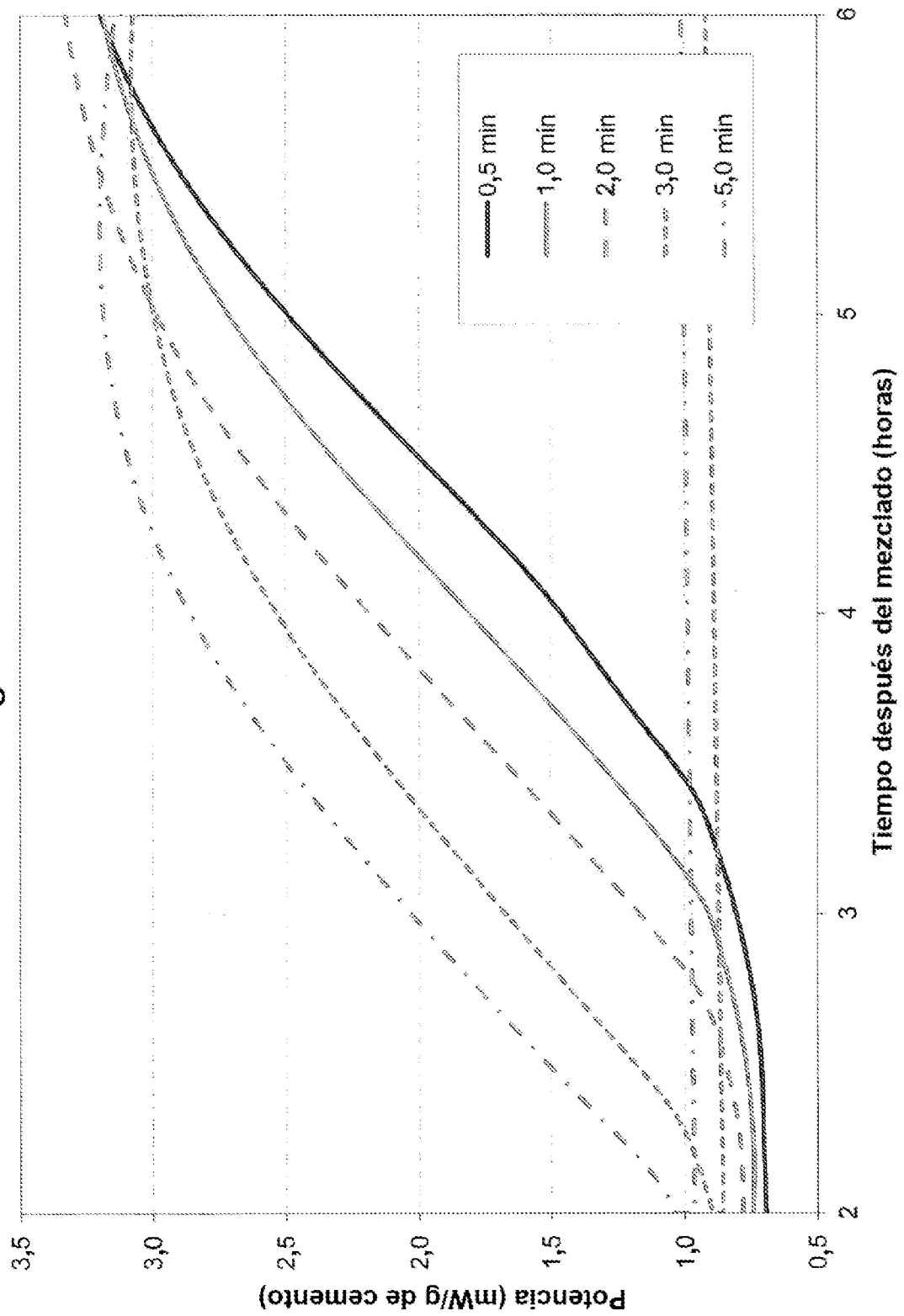


Figura 123

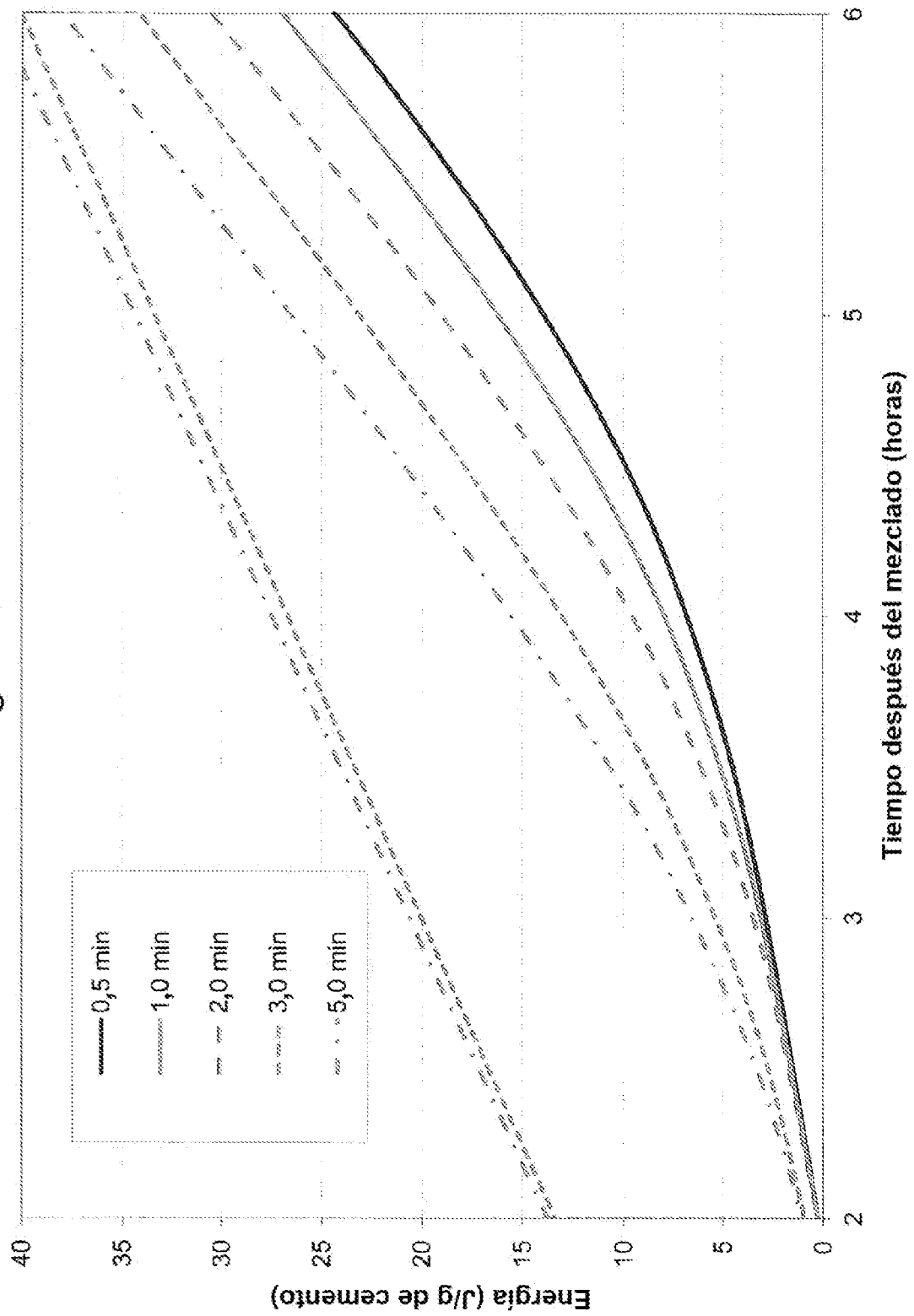


Figura 124

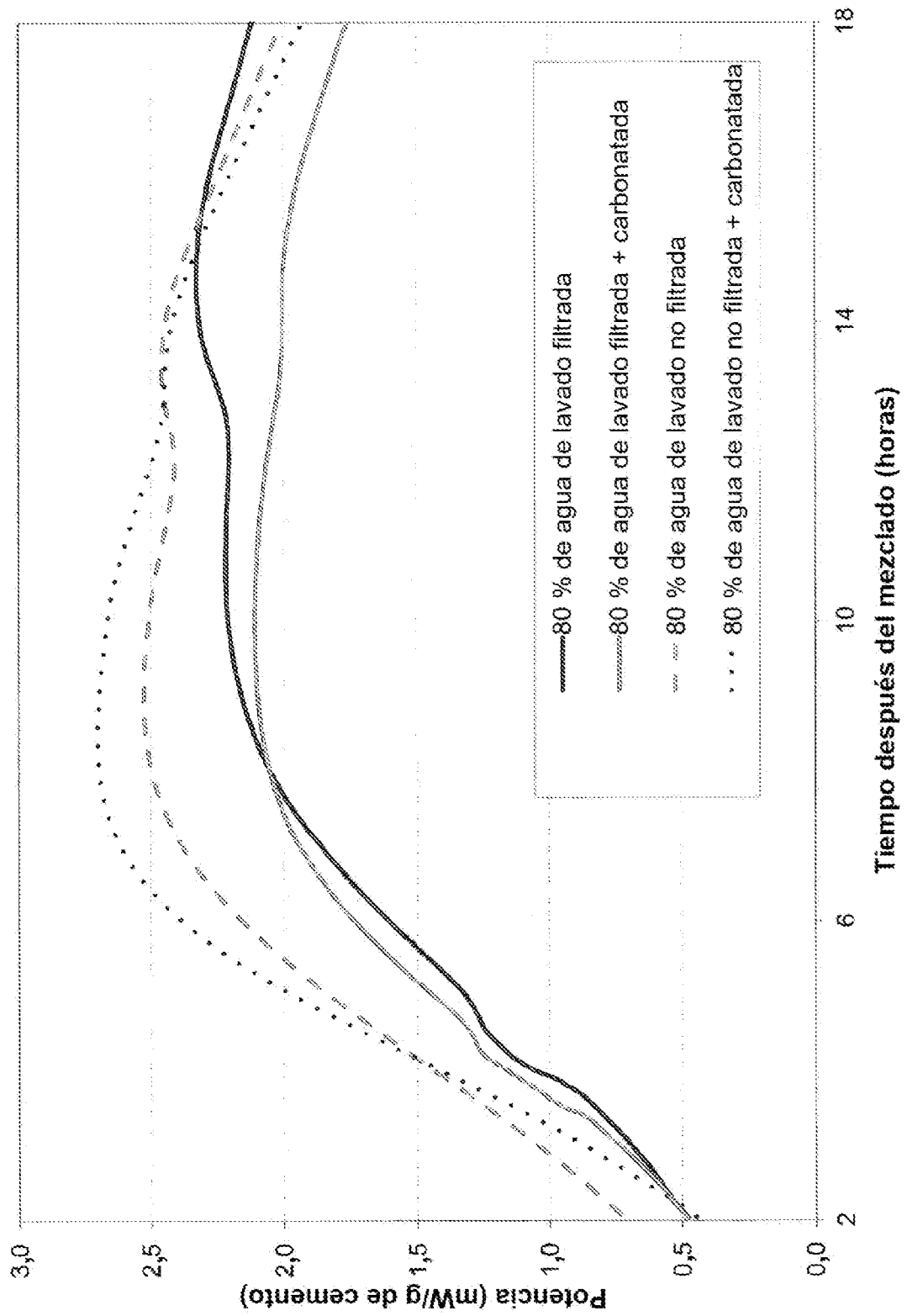


Figura 125

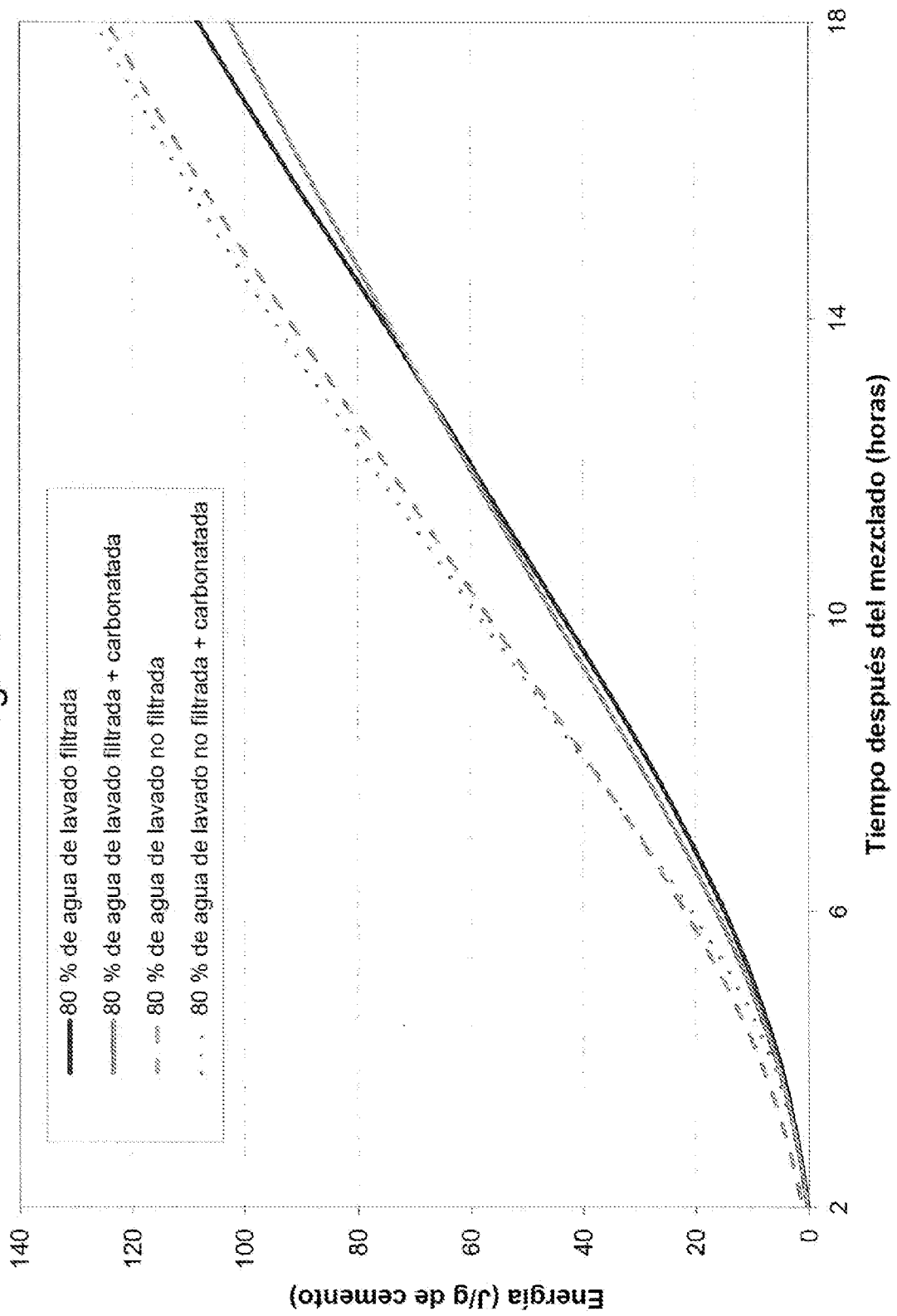


Figura 126

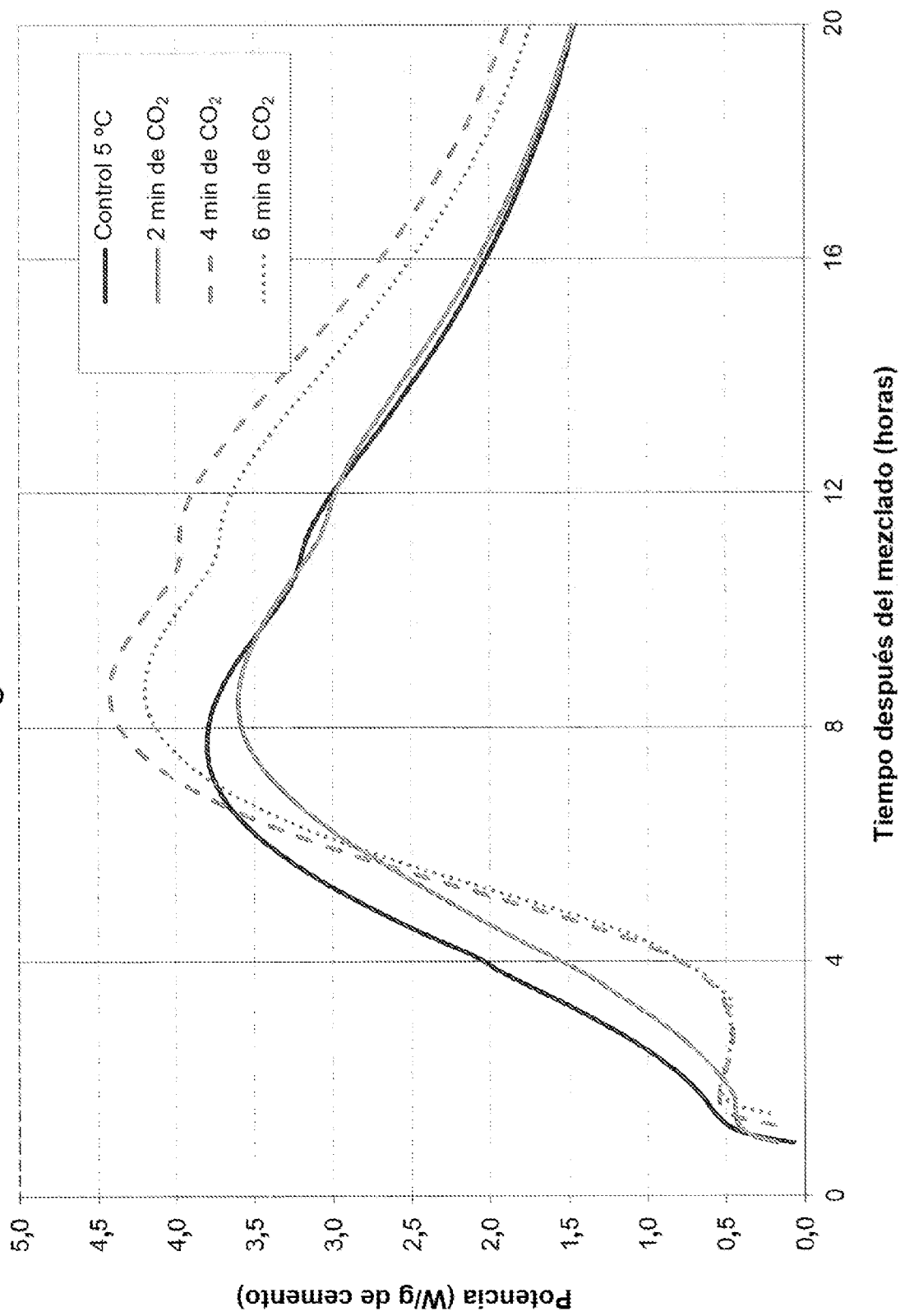


Figura 127

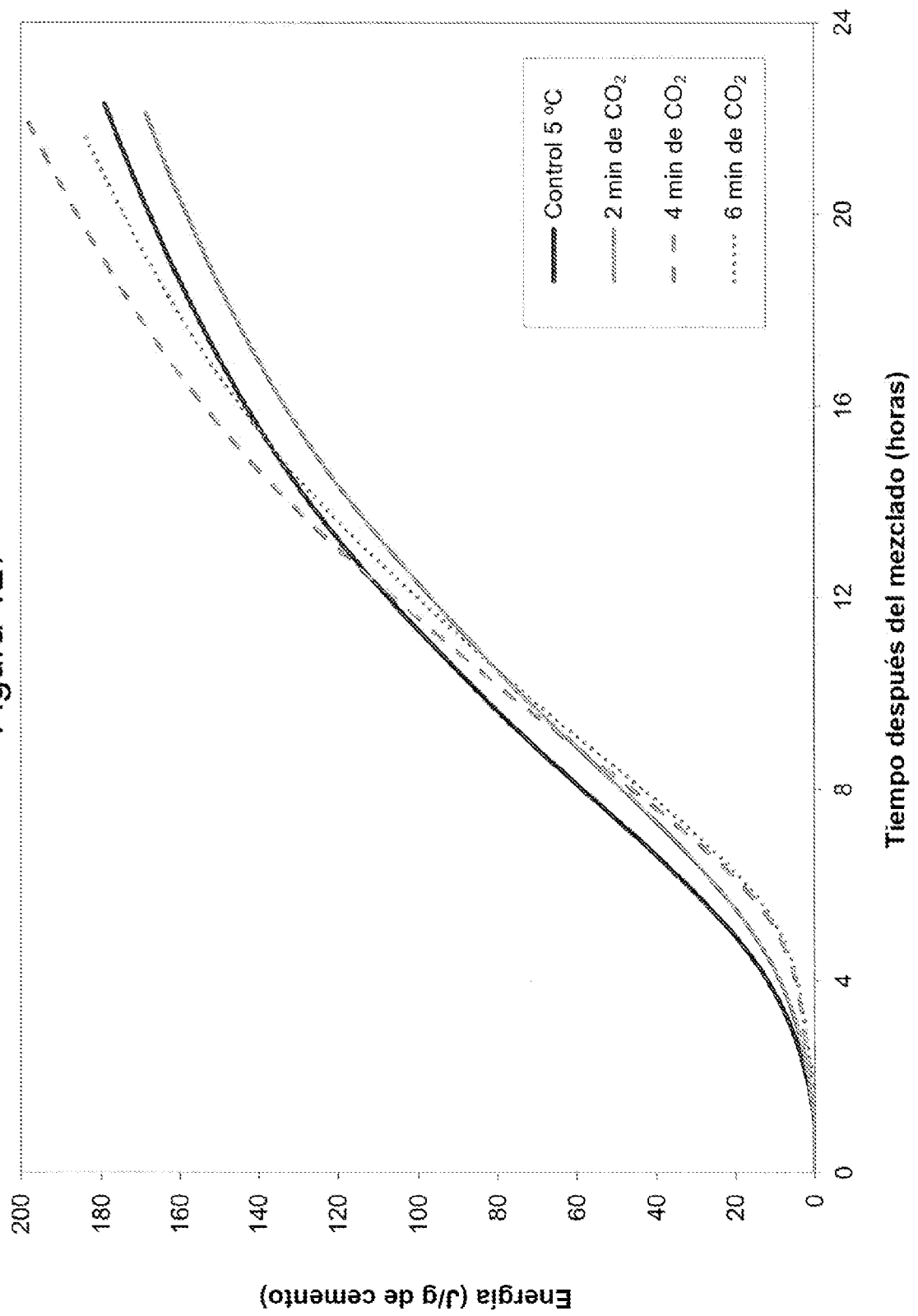


Figura 128

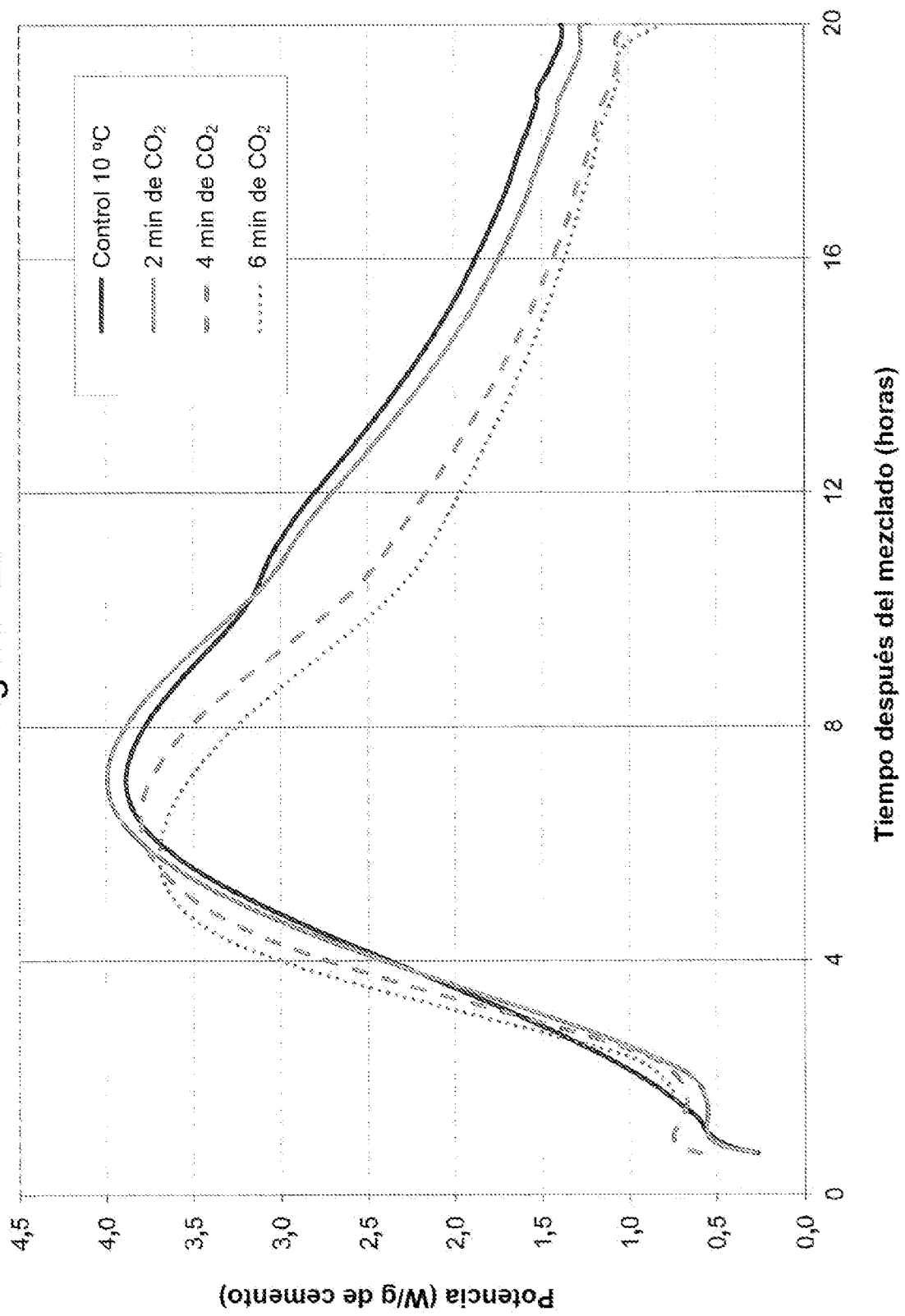


Figura 129

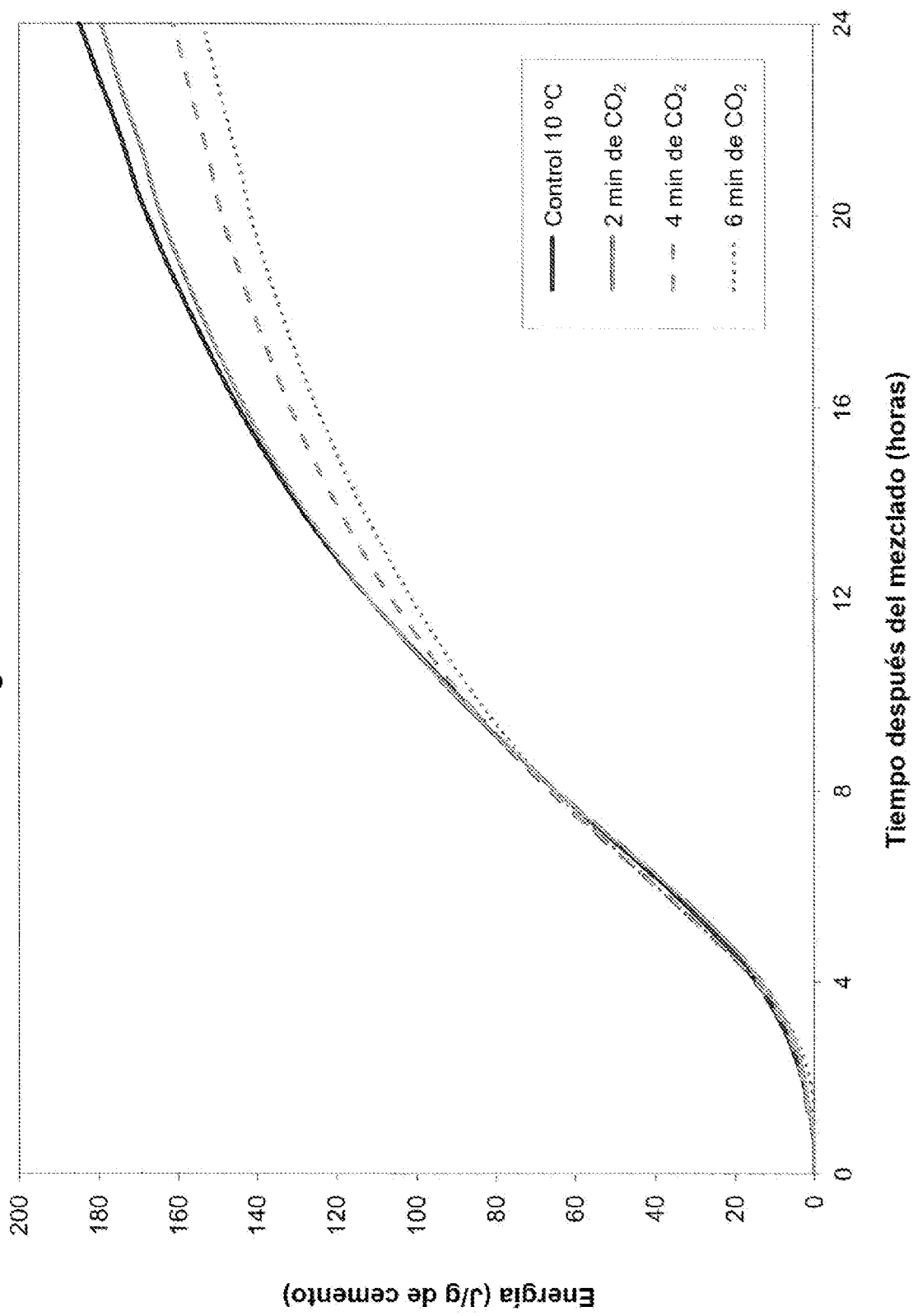


Figura 130

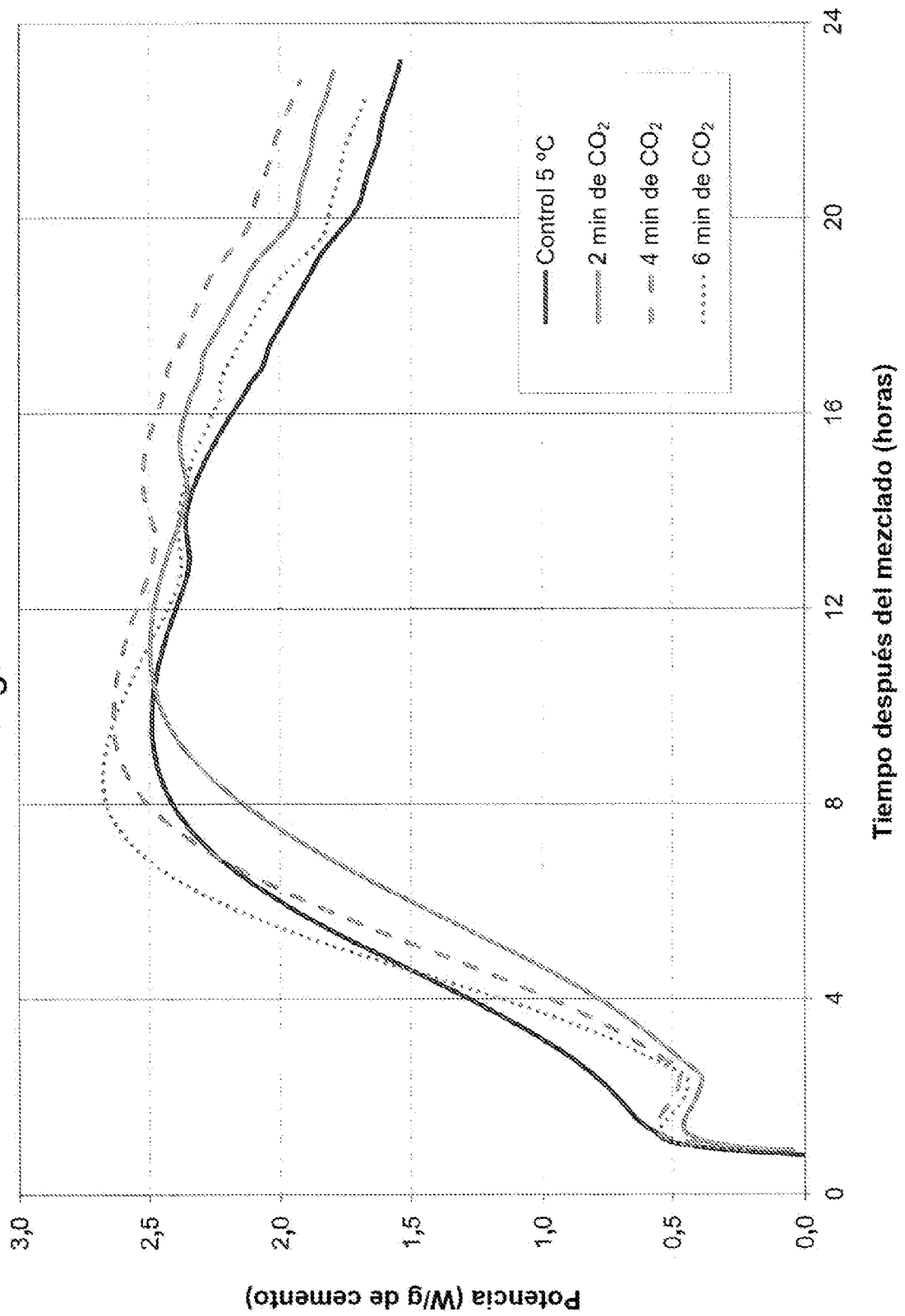


Figura 131

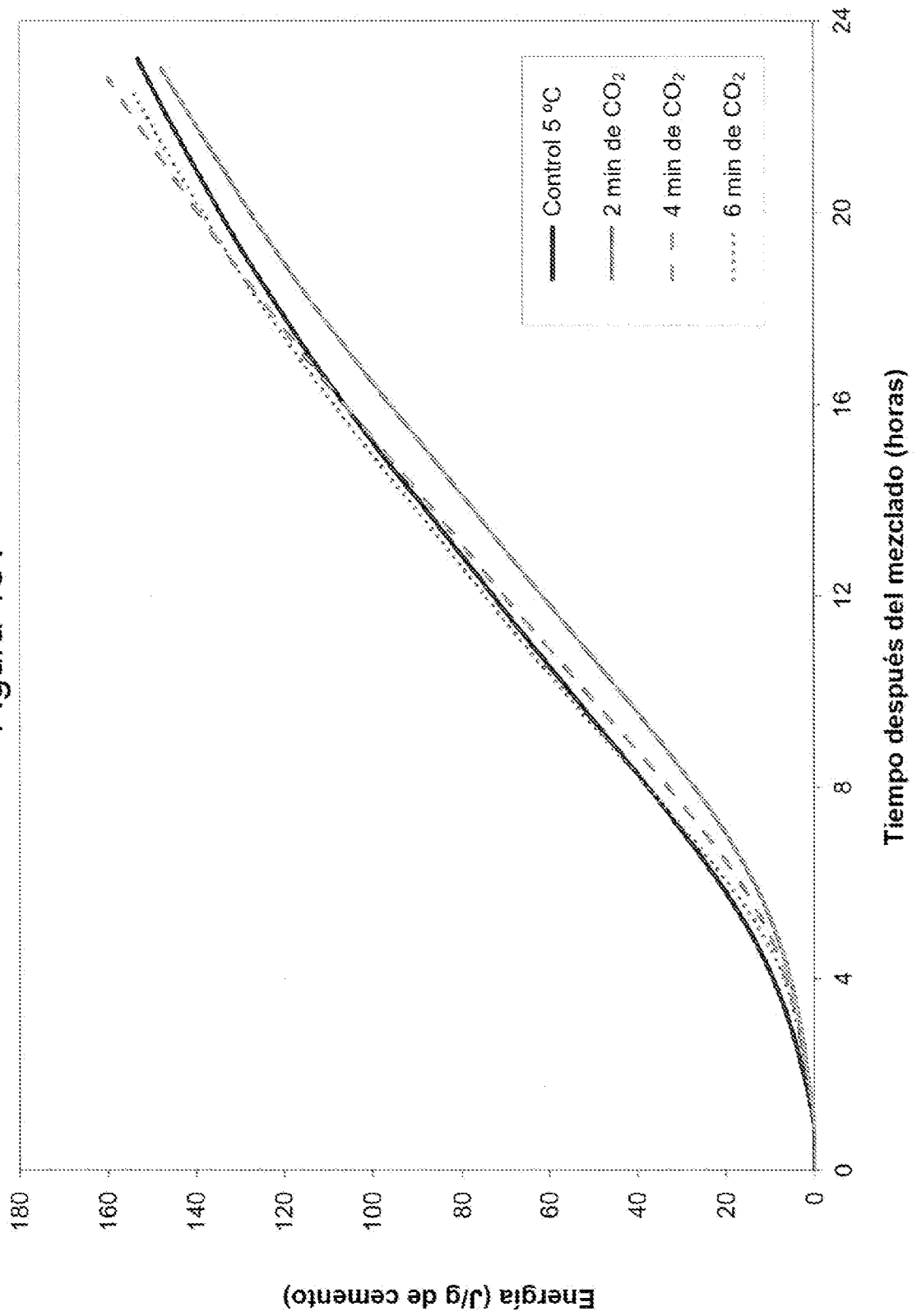


Figura 132

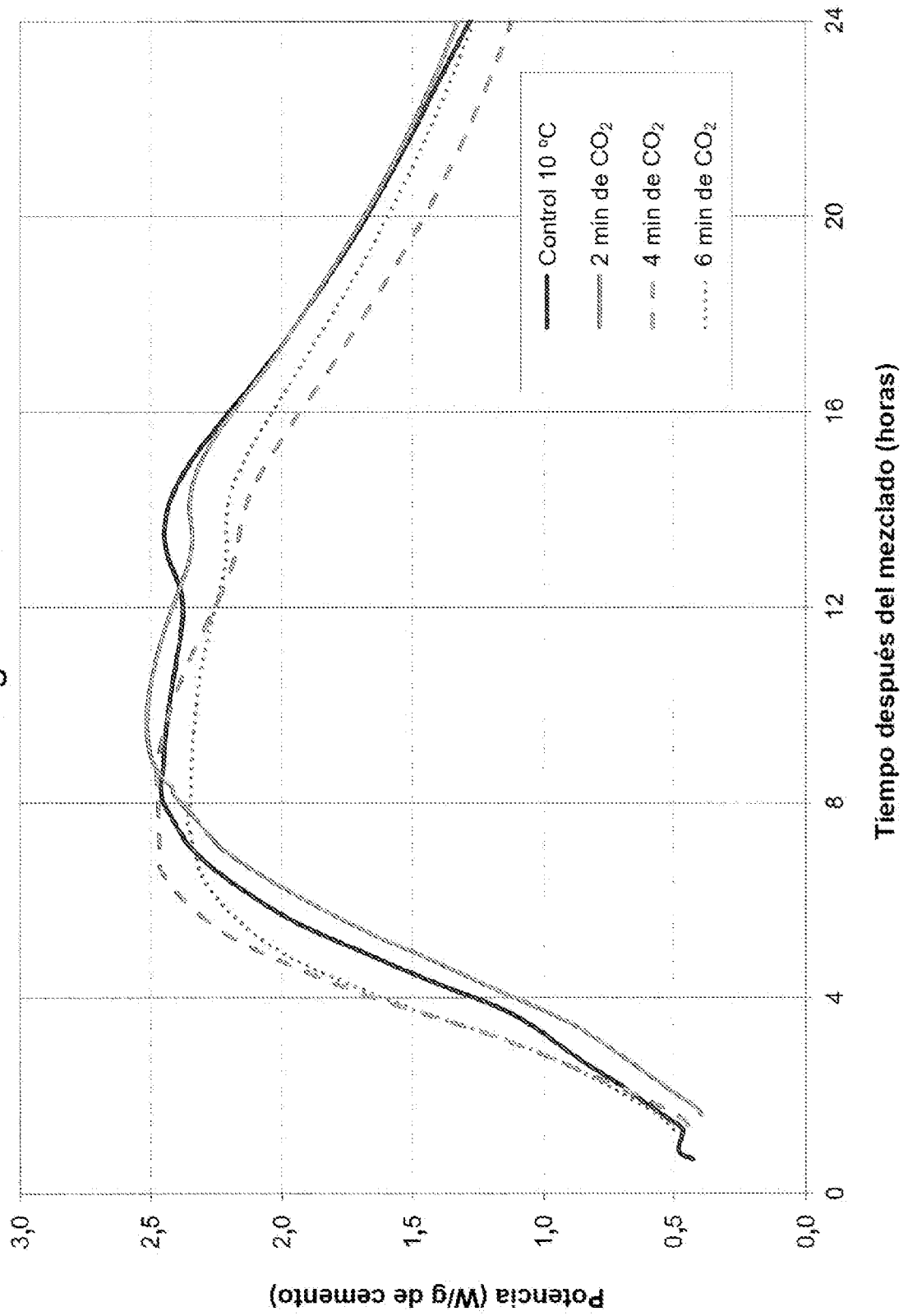


Figura 133

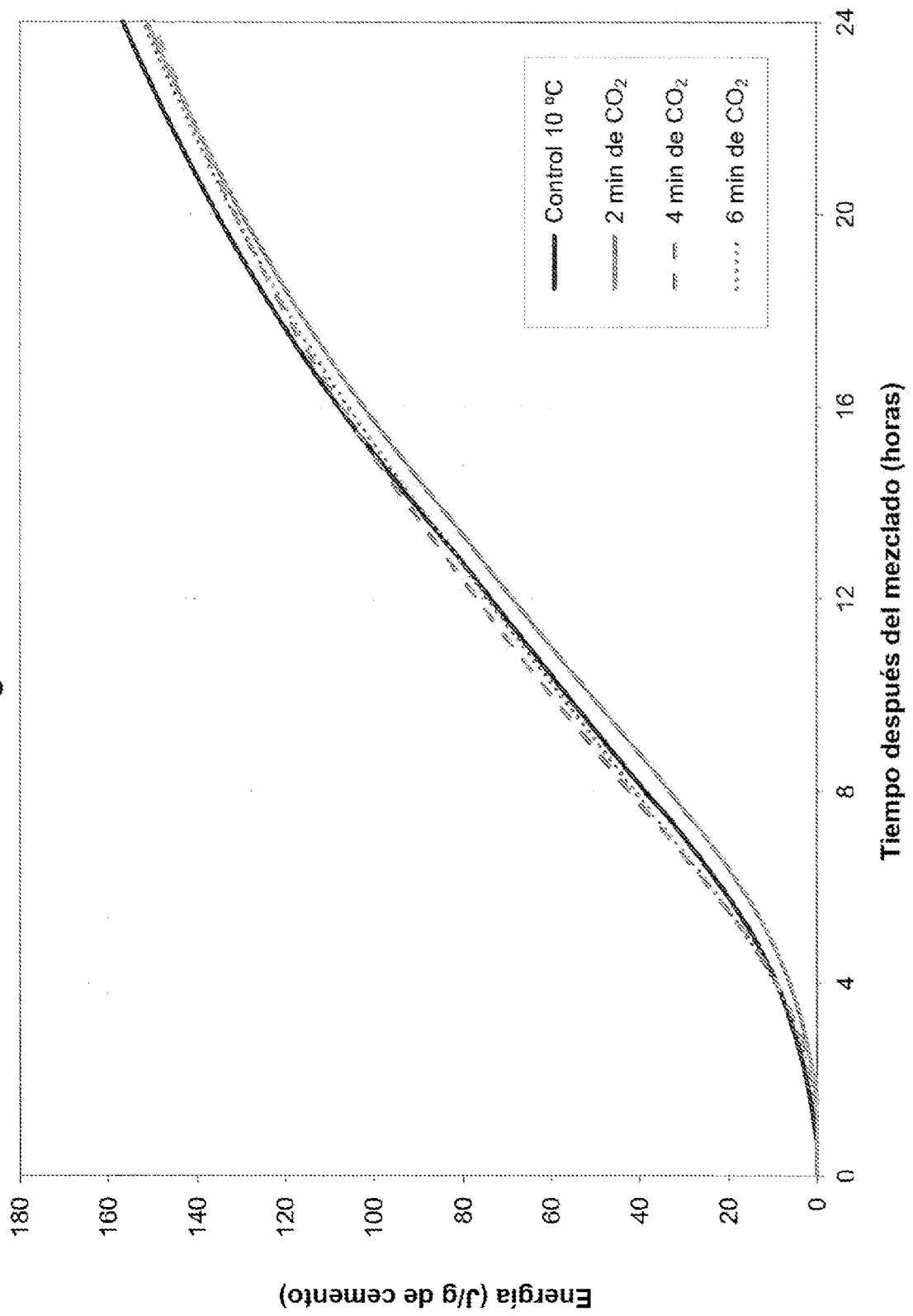


Figura 134

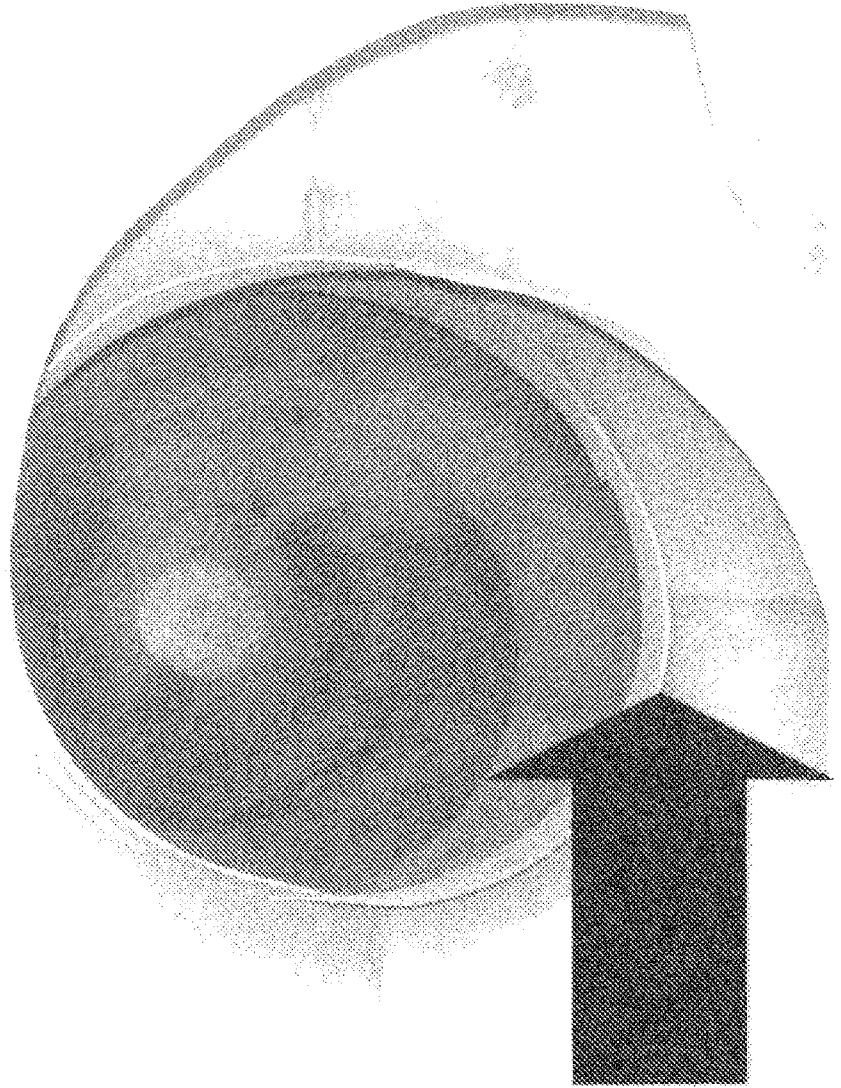


Figura 135

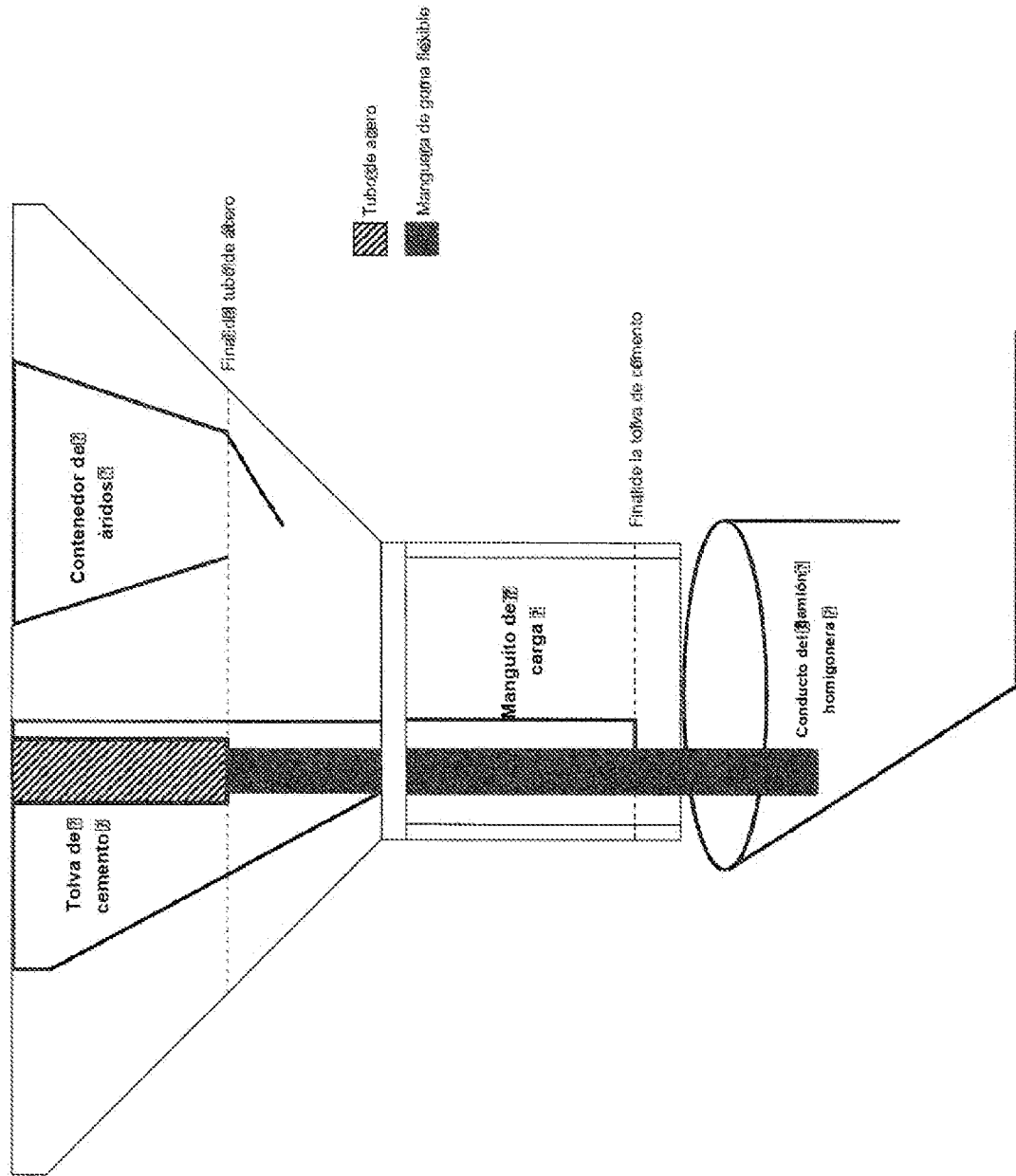


Figura 136

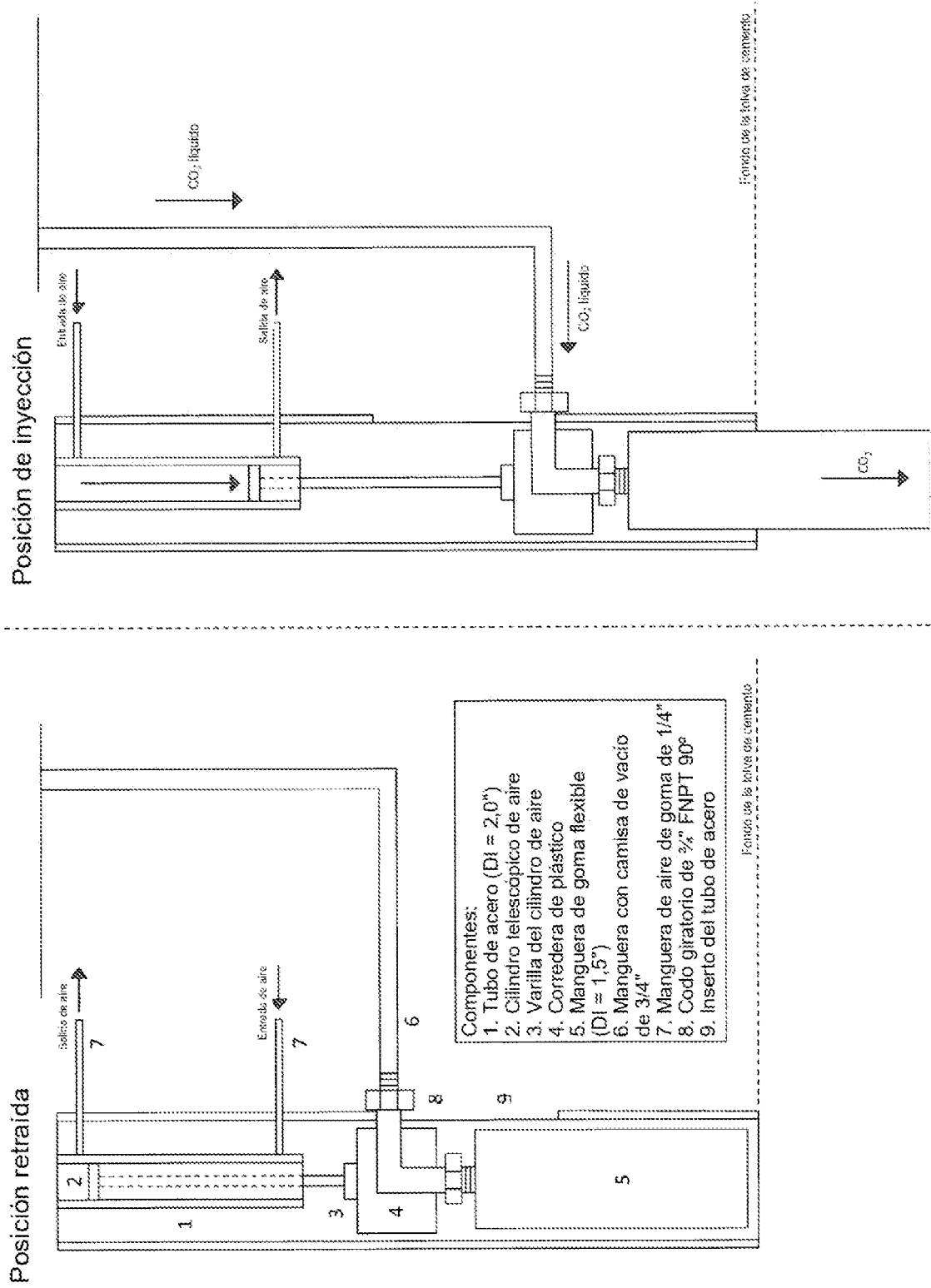
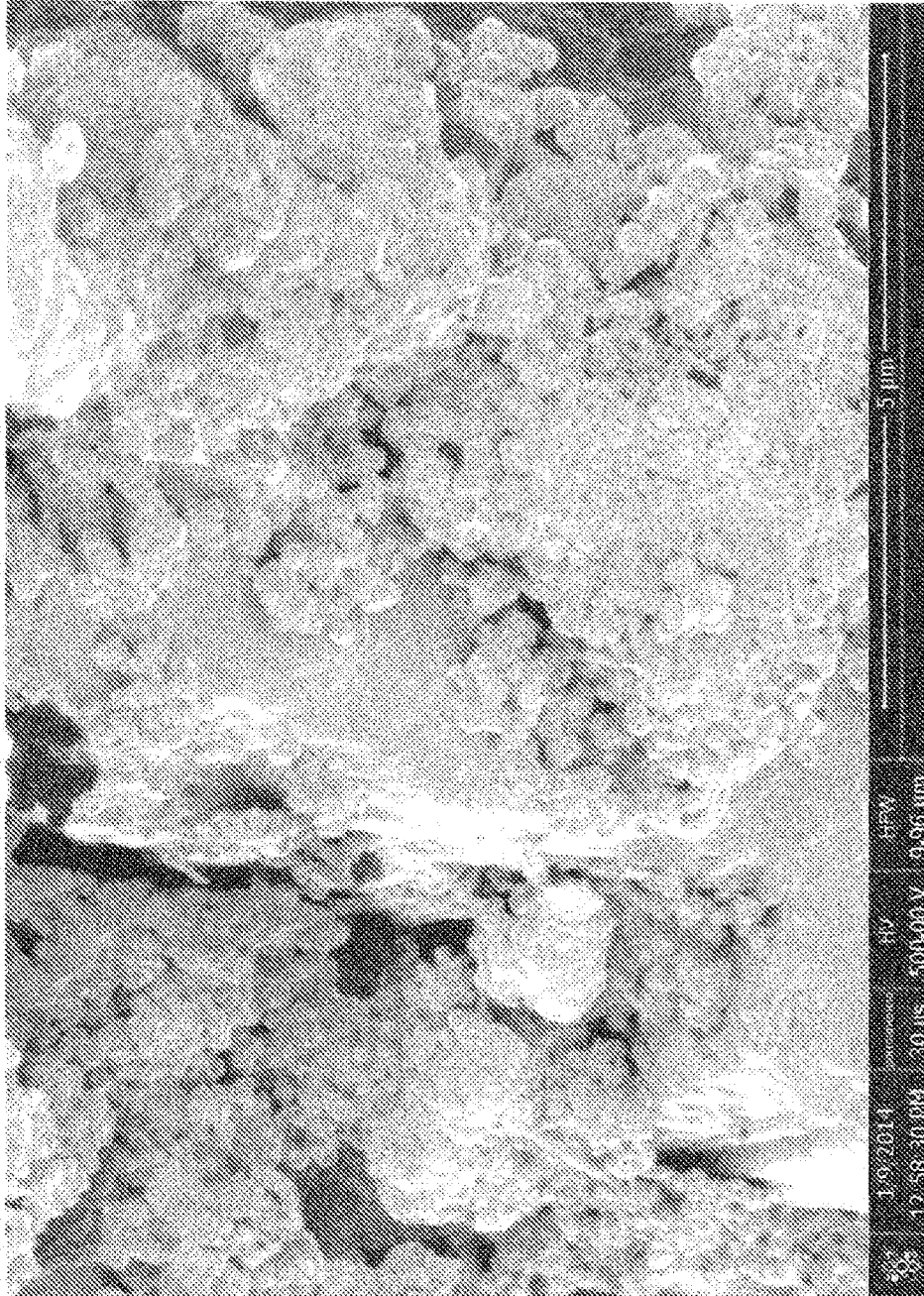


Figura 137



Productos de la reacción de carbonato de calcio romboédricos a nanoescala (10-150 nm) producidos mediante la carbonatación de cemento recién hidratado

Figura 138

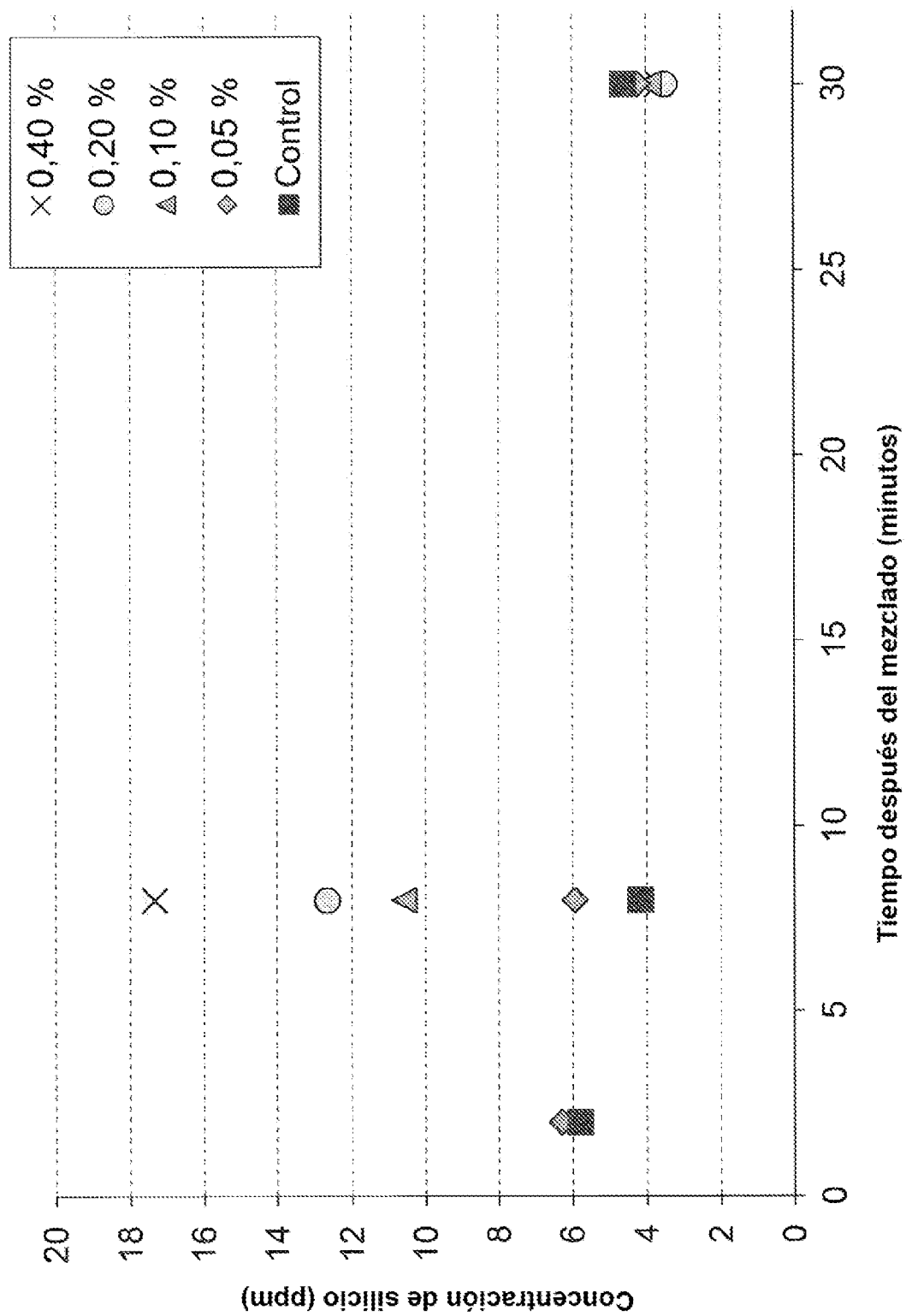


Figura 139

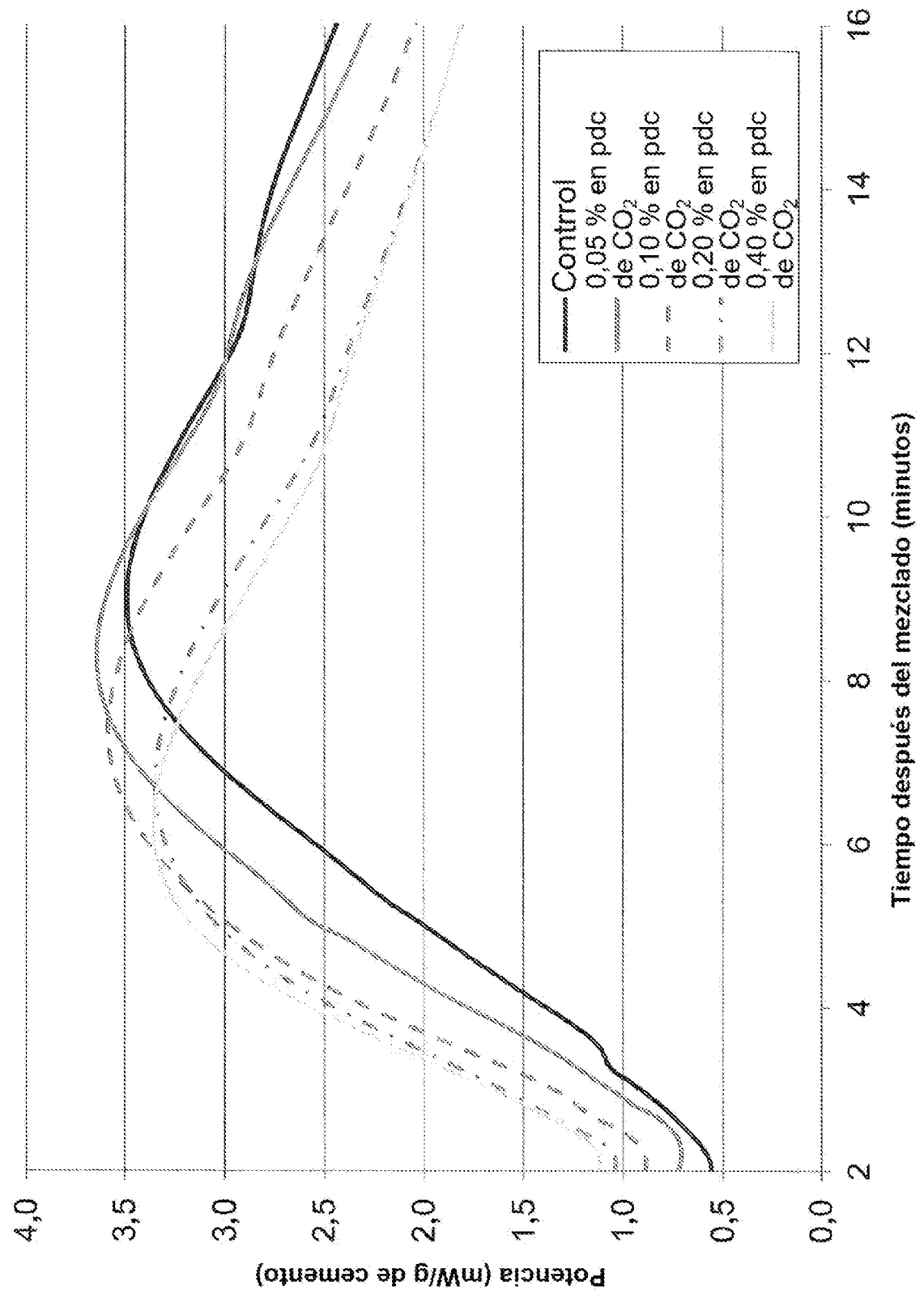


Figura 140

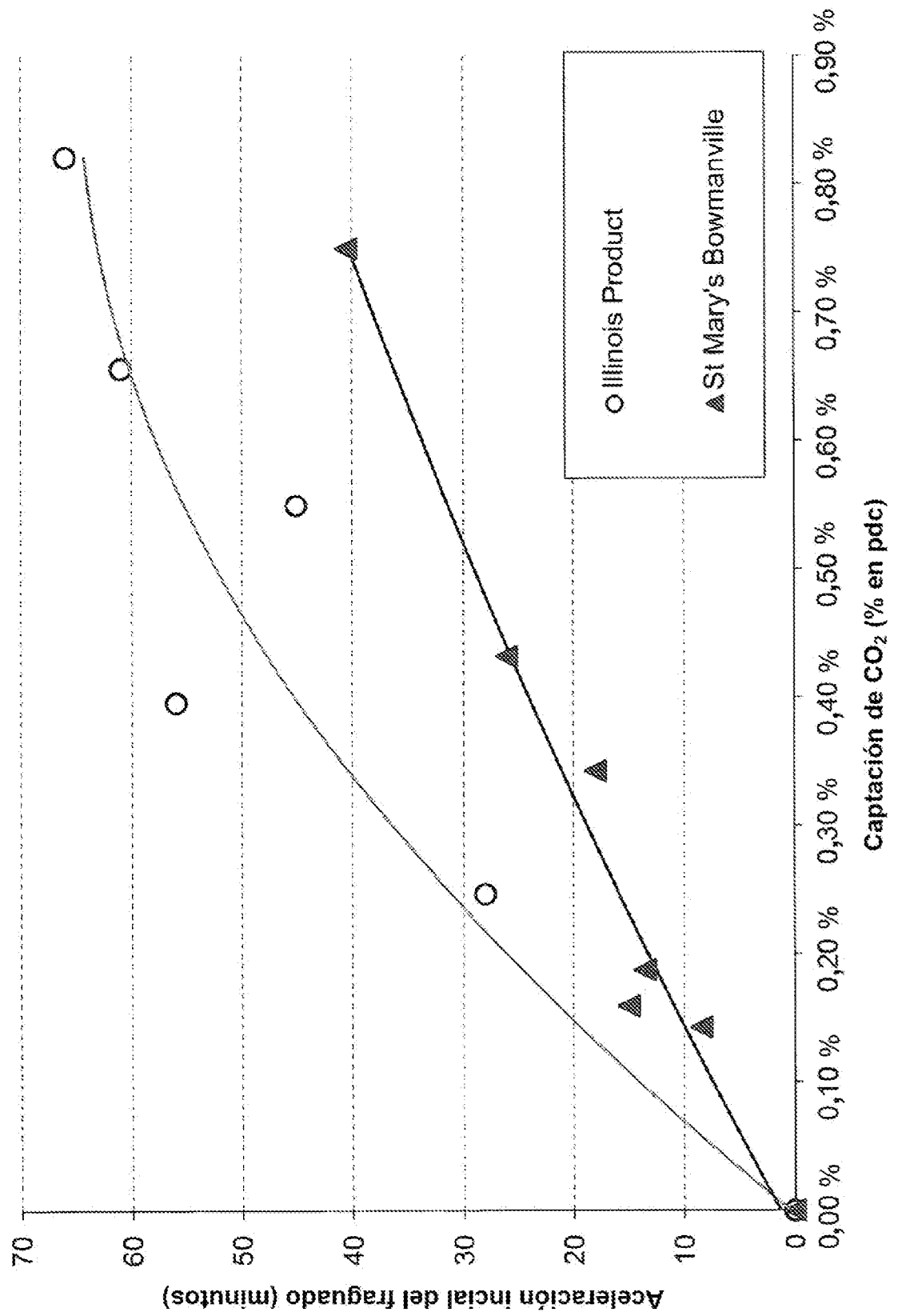


Figura 141

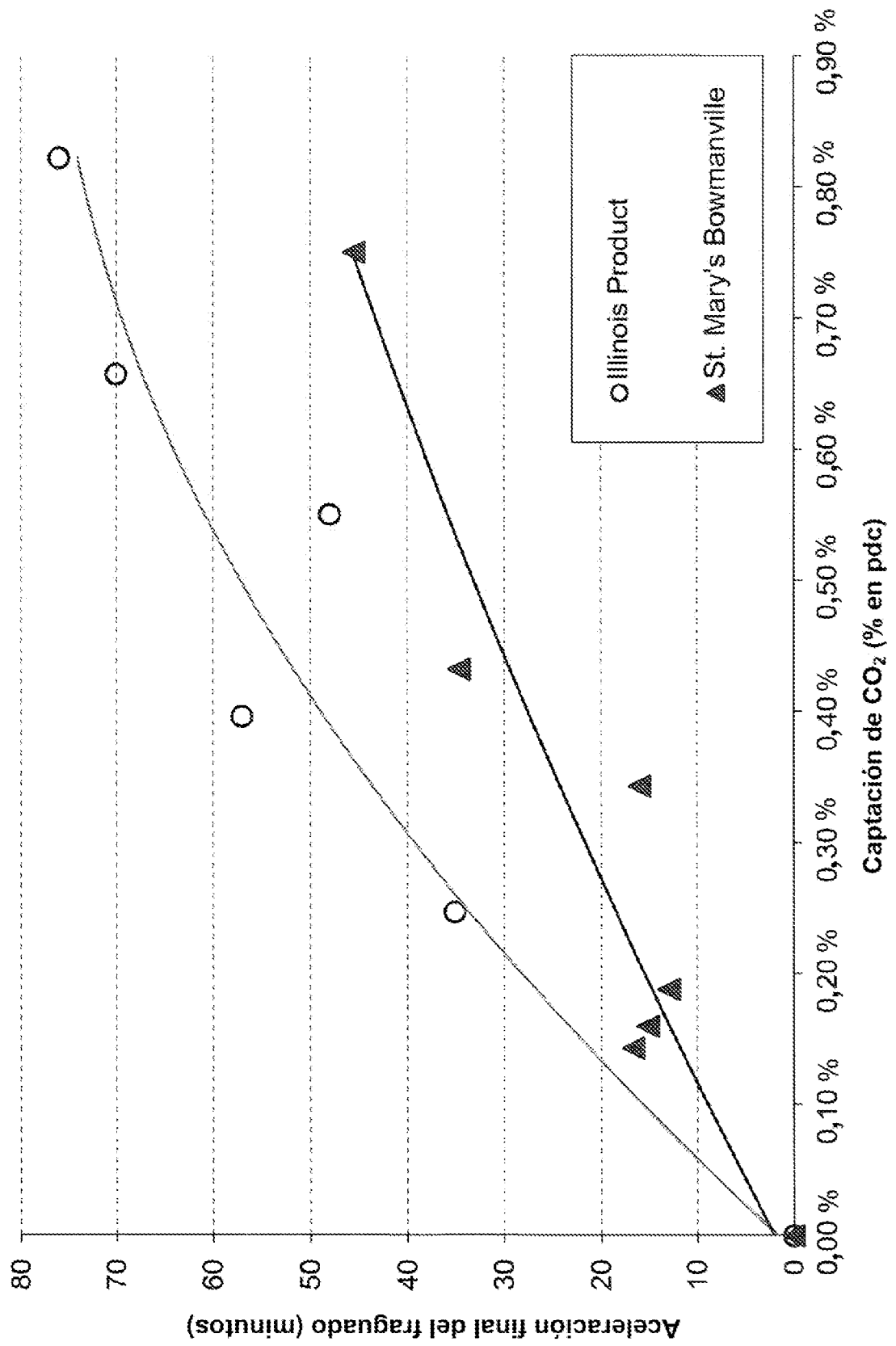


Figura 142

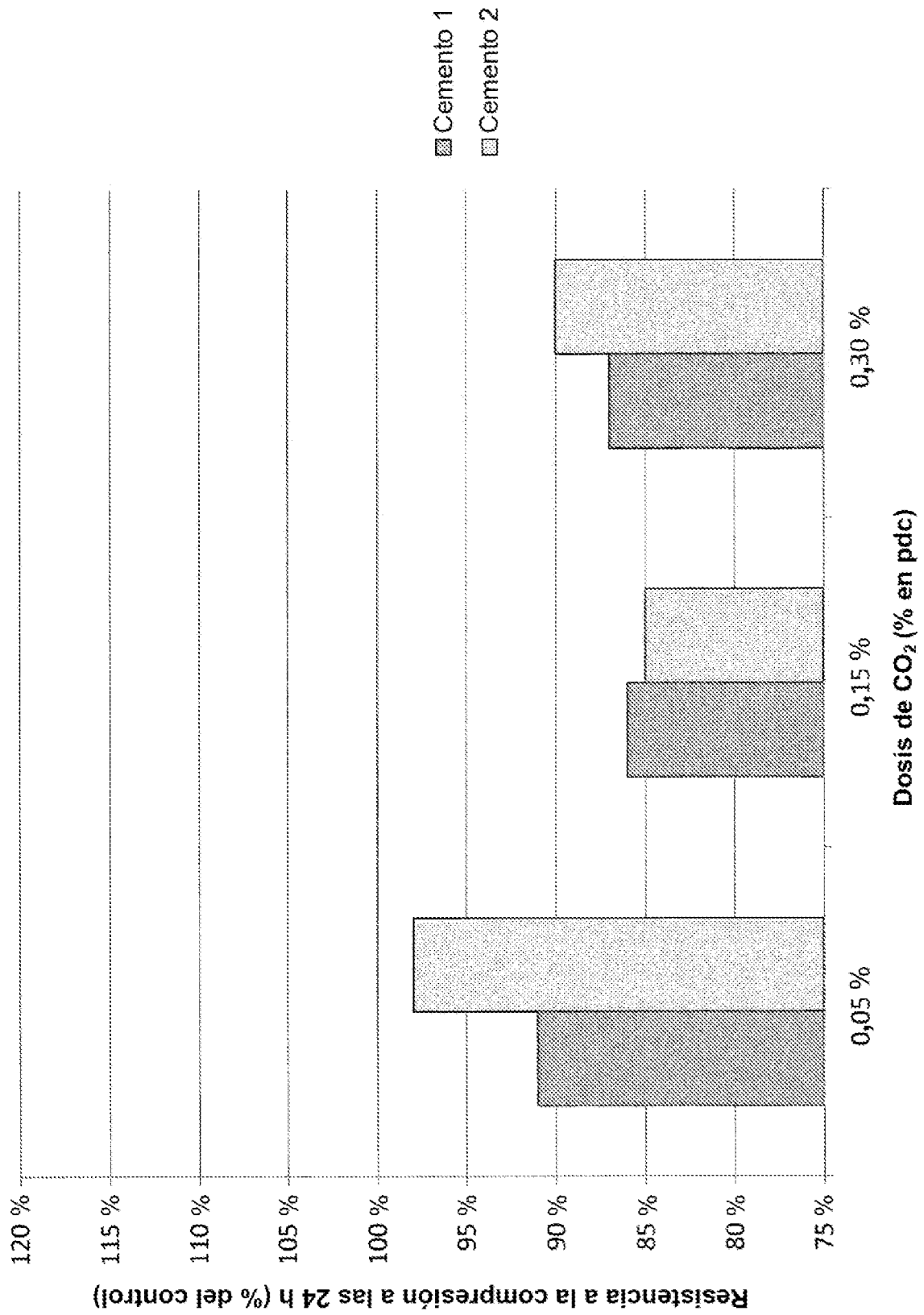


Figura 143

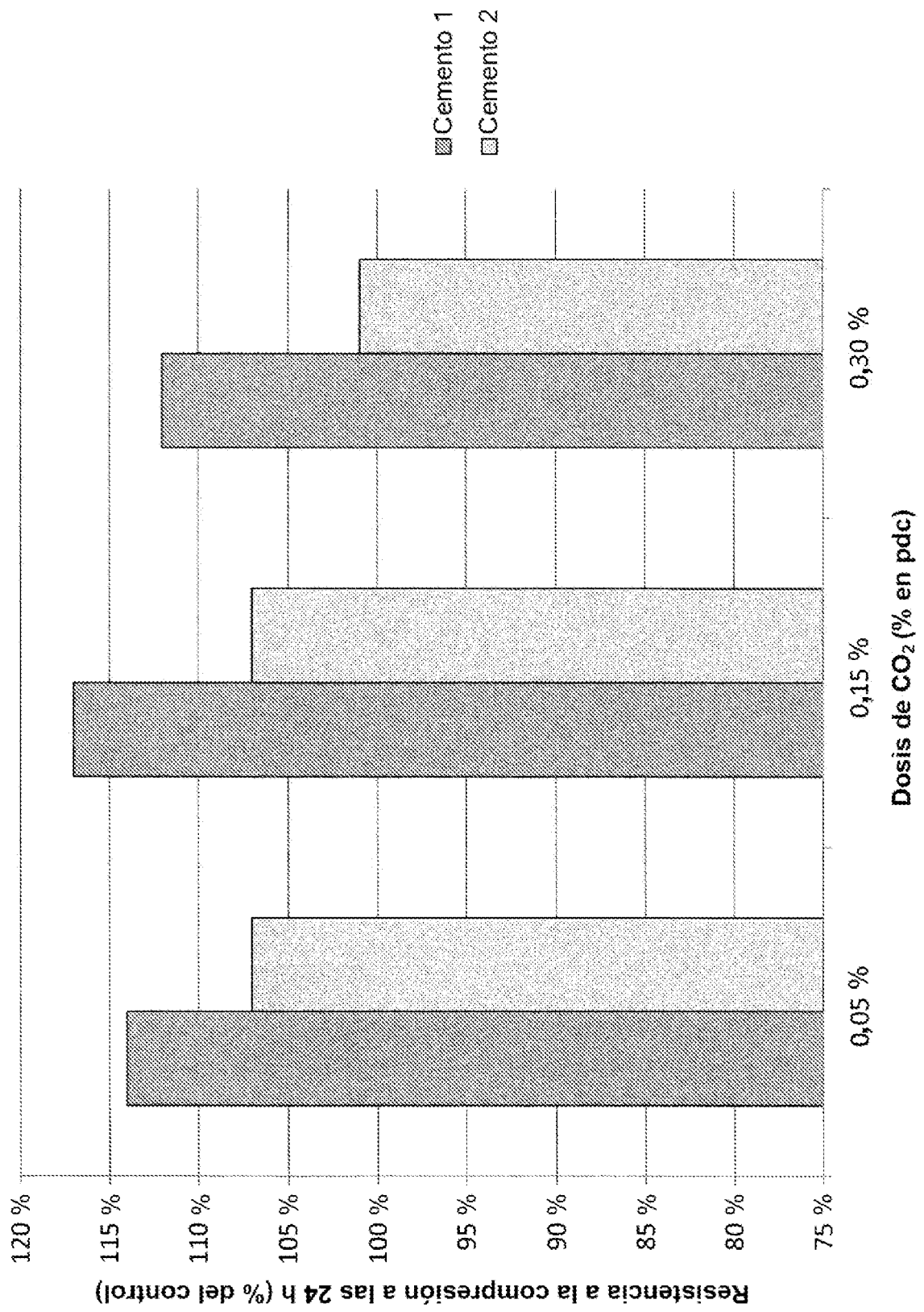


Figura 144

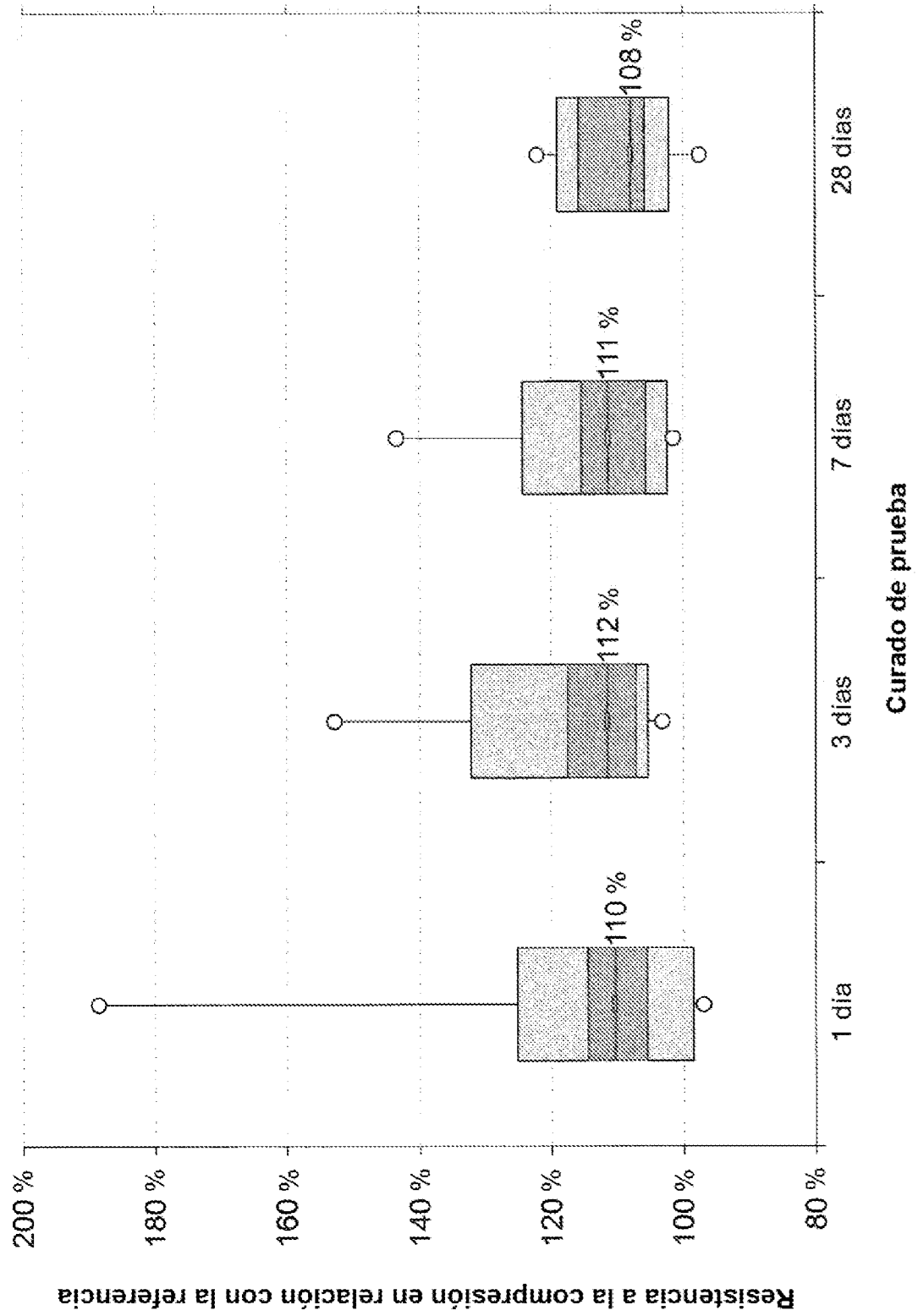


Figura 145

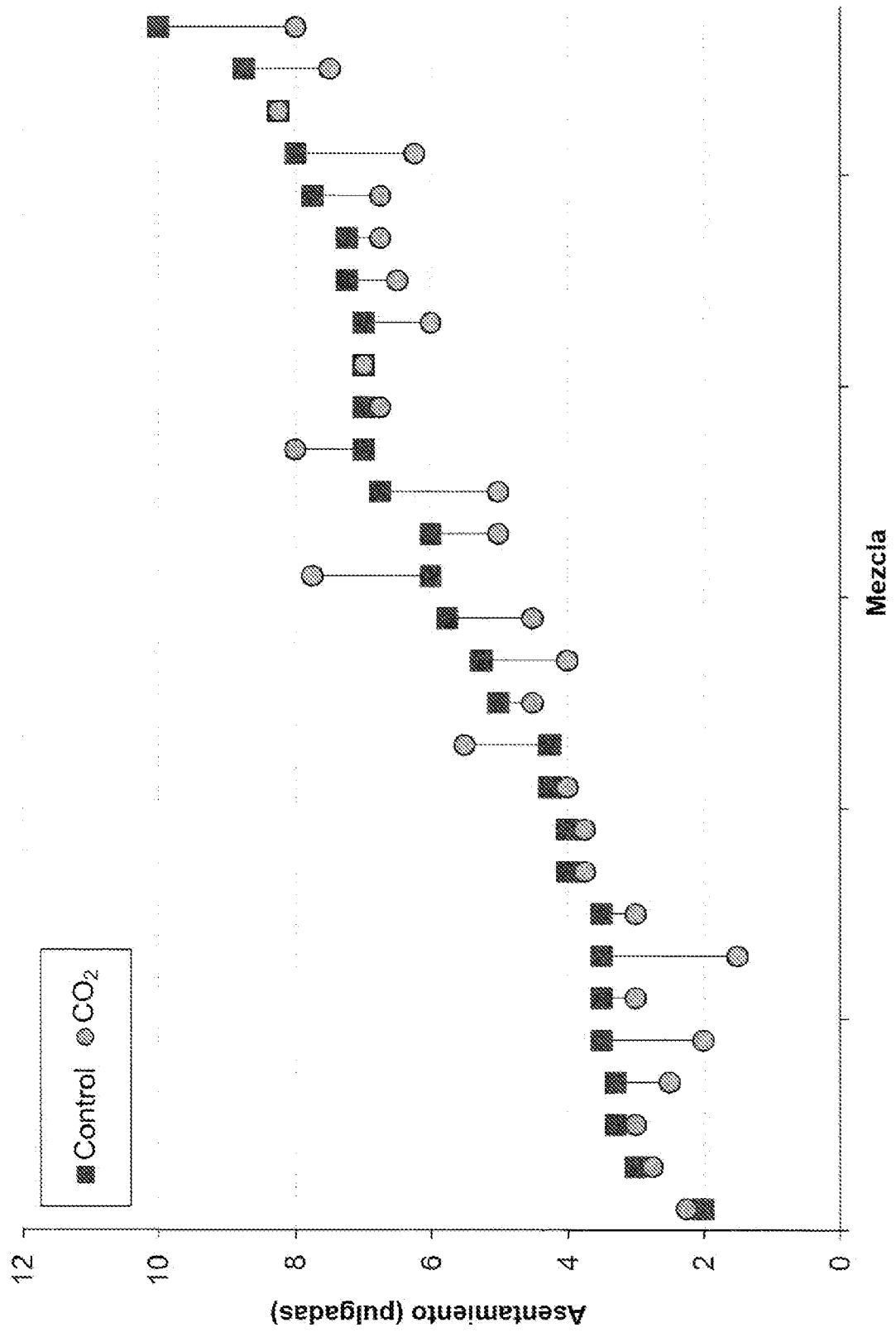


Figura 146

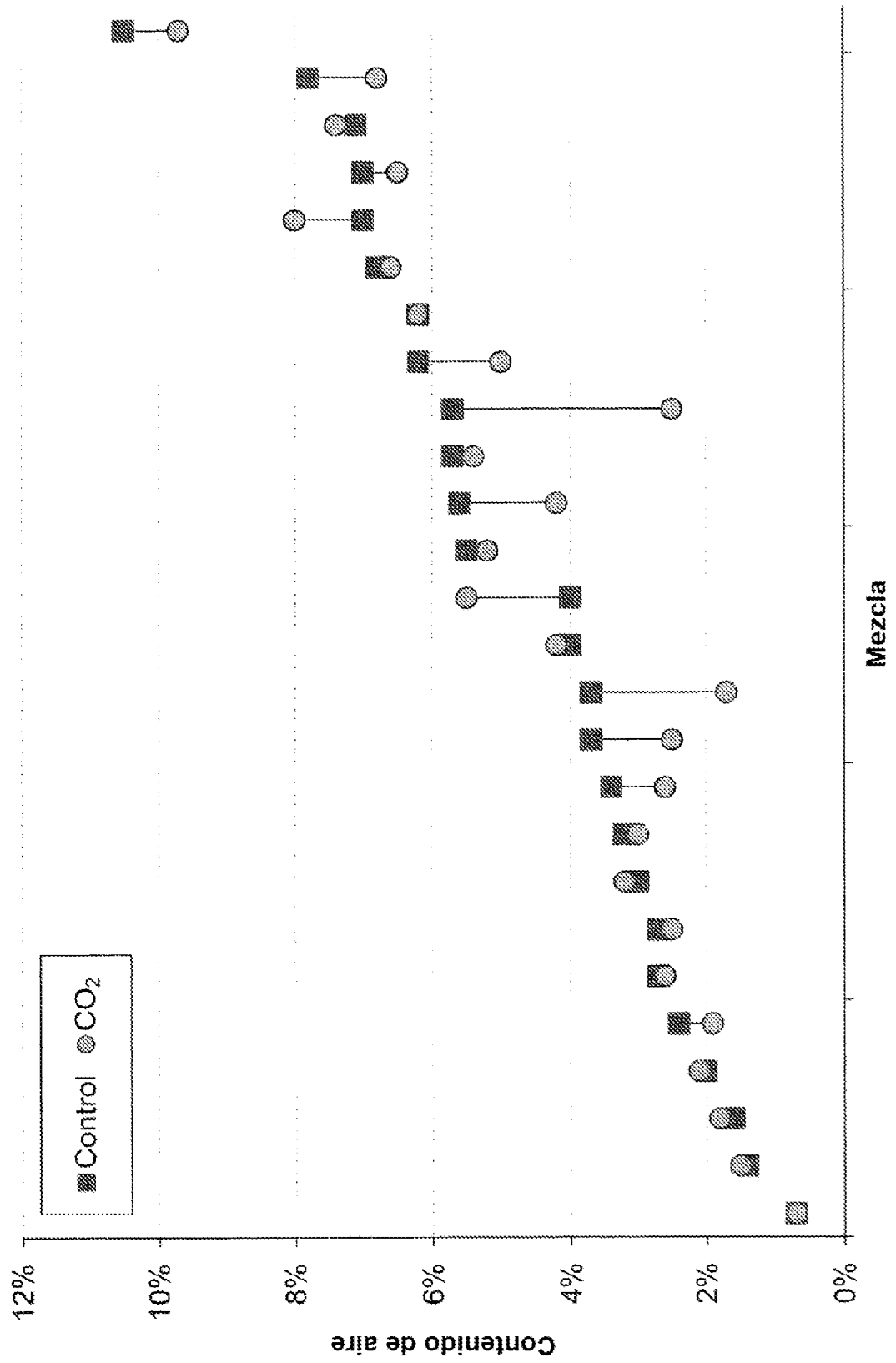


Figura 147

