# La mentira corre más que la verdad

En tiempo reciente, la difusión de noticias falsas ha demostrado ser capaz de influir en política, economía y bienestar social. Según resultados publicados por la revista *[Science](http://science.sciencemag.org/content/359/6380/1146" \t "_blank)*, entre 2006 y 2017, más de 3 millones de personas compartieron 126.000 rumores en Twitter. Entre las historias con mayor repercusión, la mentira alcanzó entre 1000 y 100.000 usuarios, mientras que la verdad raramente sobrepasó el millar de impactos. El grado de novedad y las emociones suscitadas por la falsedad podrían explicar su rápida propagación.

**Calentamiento global sin fin**

De acuerdo con una investigación, publicada por la revista *[Proceedings of the National Academy of Sciences](https://www.pnas.org/content/115/33/8252" \t "_blank)*, sin una notable intervención que reduzca las emisiones, el calentamiento global entrará en un peligroso bucle de retroalimentación. En concreto, si el aumento global de la temperatura fuera mayor de 2 grados Celsius, el nivel del mar incrementaría hasta niveles nunca vistos desde el Holoceno. Asimismo, el termómetro alcanzaría los valores más altos de los últimos 1,2 millones de años.

**Más y más plástico en el Pacífico**

La isla de plástico del océano Pacífico, localizada entre California y Hawái, ocupa una extensión de 1,6 millones de quilómetros cuadrados. Y no para de crecer a una velocidad alarmante. Mediante varios buques y aeronaves los científicos estimaron la cantidad de residuos acumulados. Por desgracia, la cifra resultó mucho mayor, entre 4 y 16 veces, de lo esperado. Es decir, unas 79.000 toneladas de redes de pesca, microplásticos y otras piezas de este material. La revista *[Scientific Reports](https://www.nature.com/articles/s41598-018-22939-w" \t "_blank)* publicó la investigación.

**Ataque por sulfatos**

4.2.3.1. Introducción

Probablemente, el ataque de los sulfatos constituya una de las formas más difundidas en el mundo de agresión química al hormigón.

Ámbitos propicios donde encontrar sulfatos:

- Se encuentran presentes en el suelo, particularmente en los arcillosos.

- Disuelto en el agua de las capas freáticas.

- En al agua de mar.

- Otra fuente de aporte la constituyen los ambientes de descomposición orgánica, en procesos anaerobios donde se forma H2S compuesto que puede transformarse posteriormente en ácido sulfúrico (H2SO4) por acción bacteriológica.

- Ambientes urbanos o industrializados, con altos grados de polución ambiental (lluvia ácida).

- Puede formarse a partir de ciertos procesos biológicos que degradan lentamente al hormigón, incluso en aquellas estructuras que no se hallan en contacto directo con el suelo.

Los efectos negativos del ataque por sulfatos se atribuyen generalmente a la formación de etringita expansiva y yeso, que precipitan en el interior por un mecanismo de disoluciónprecipitación.

Los iones de sulfato que penetran en el hormigón tienen mayor afinidad para reaccionar con la portlandita (CH), que se forma como una de las fases principales del cemento durante el proceso de hidratación. Como resultado de esta reacción se forma yeso (CaSO4 · 2H2O),

según la siguiente reacción:

Ca(OH)2 + Na2SO4 · 10H2O Æ CaSO4 · 2H2O + 2 NaOH + 8H2O

El yeso así liberado reacciona con el aluminato tricálcico (C3A) formando etringita sulfoenriquecida e insoluble:

3CaO · Al2O3 + 3(CaSO4 · 2H2O) + 26 H2O Æ 3CaO · Al2O3 · 3CaSO4 · 32H2O

Capítulo 4 Ensayos realizados

53

Para la realización de este ensayo se ha utilizado una disolución de sulfato de potasio

(K2SO4) al 5%. Después de cada ciclo se ha procedido a la renovación de la disolución.

4.2.3.2. Resultados obtenidos

A continuación se representan los resultados experimentales obtenidos.

Tabla 4.9: Evolución del peso sumergido de las probetas sometidas a ataque por sulfatos

12345678

1 1426.0 1428.2 1436.9 1441.7 1440.2 1441.9 1443.2 1444.8

0% 2 1423.3 1429.1 1434.0 1438.4 1438.2 1439.0 1439.7 1441.0

3 1421.4 1427.6 1432.3 1435.0 1435.6 1436.4 1437.0 1438.0

1 1262.7 1265.7 1273.3 1280.3 1285.5 1287.0 1288.7 1289.8

2.5% 2 1237.4 1242.1 1248.7 1255.5 1259.1 1261.3 1263.4 1264.4

3 1288.8 1291.9 1300.6 1306.8 1310.4 1310.6 1312.7 1313.9

1 1206.0 1212.1 1218.5 1224.4 1233.9 1236.1 1238.6 1239.0

5% 2 1193.0 1200.1 1206.4 1213.8 1220.6 1222.4 1225.7 1225.5

3 1184.1 1185.7 1198.6 1203.8 1213.1 1215.0 1218.7 1218.9

1 1149.4 1155.4 1163.0 1169.7 1182.0 1184.1 1188.0 1186.7

10% 2 1120.4 1124.0 1135.2 1143.7 1157.4 1159.9 1164.8 1162.7

3 1137.4 1145.9 1153.3 1161.8 1172.8 1173.8 1180.2 1177.6

Tabla 4.10: Evolución del peso saturado superficie seca de las probetas sometidas a ataque por sulfatos

12345678

1 2445.0 2448.0 2452.2 2455.8 2458.4 2460.0 2460.6 2462.6

0% 2 2436.7 2439.1 2444.2 2447.2 2449.9 2450.9 2451.8 2453.5

3 2436.2 2439.0 2444.3 2447.0 2449.5 2449.5 2450.2 2451.8

1 2270.0 2274.6 2279.1 2284.2 2291.4 2293.9 2293.8 2295.6

2.5% 2 2231.7 2234.5 2240.3 2245.4 2252.2 2253.8 2255.5 2257.4

3 2297.7 2301.5 2306.3 2311.2 2316.5 2317.1 2318.5 2319.9

1 2212.0 2216.4 2221.5 2226.8 2237.6 2238.7 2241.2 2240.4

5% 2 2188.6 2193.7 2198.8 2204.8 2213.6 2215.0 2219.1 2217.9

3 2182.9 2188.2 2194.0 2199.8 2210.2 2210.4 2214.3 2214.7

1 2141.8 2145.4 2149.6 2156.9 2169.5 2171.4 2175.0 2173.9

10% 2 2117.2 2123.1 2128.1 2135.7 2150.5 2152.4 2157.4 2155.2

3 2128.2 2134.7 2140.8 2148.0 2160.3 2162.6 2167.3 2164.9

Capítulo 4 Ensayos realizados

54

4.2.3.3. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en este ensayo han sido los esperados. En todos lo hormigones tenemos un aumento progresivo del peso de las probetas, aunque este aumento se produce cada vez a una velocidad menor. Este aumento de peso es debido a los cristales de sulfatos (principalmente cloroaluminatos y etringita) que se van formando y van cerrando los poros. Al ser el hormigón con lodos un material más poroso, los sulfatos pueden penetrar más fácilmente y se pueden producir más cristales antes que los poros lleguen a colmatarse.

Este aumento de peso, en una primera fase puede ser positivo, pero a largo plazo, pueden llegar a producirse presiones de cristalización que provocarían la fisuración del hormigón. Aunque esto es lo que ocurre con hormigones sin adición de lodos, habría que comprobar si sucede lo mismo con estos hormigones con lodos que son mucho más porosos y por tanto, tienen más capacidad para absorber estas presiones de cristalización. Por este motivo sería recomendable realizar un ensayo de estabilidad volumétrica para detectar posibles expansiones.

**ENSAYO DE CARBONATACIÓN**

4.4.1. Introducción

La carbonatación es una alteración superficial del hormigón por acción de la atmósfera que implica una pérdida de su capacidad protectora sobre las armaduras y en nuestro país constituye una de las principales causas de deterioro de las estructuras de HA.

En el proceso de carbonatación se produce una reacción química entre el dióxido de carbono (CO2) contenido en el aire y el hidróxido de calcio (Ca[OH]2) contenido en la pasta

de cemento.

Inicialmente, el CO2 reacciona con los hidróxidos de sodio y de potasio, procedentes del

cemento Pórtland, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2), los cuales por ser los alcalinos más

solubles de la pasta de cemento, normalmente se encuentran ya disueltos como iones.

2 KOH + CO2 Æ K2CO3 + H2O (1)

2 NaOH + CO2 Æ Na2CO3 + H2O (2)

Posteriormente, reacciona el CO2 con el hidróxido de calcio de solubilidad menor que

los otros alcalinos del cemento, encontrándose normalmente en forma de cristales y cuya

ecuación es:

2 Ca(OH)2 + CO2 Æ CaCO3 + H2O (3)

Como resultado de estas reacciones se originan los carbonatos como consecuencia del

proceso llamado carbonatación.

La carbonatación comienza sobre la superficie del hormigón y se propaga lentamente en

profundidad. Al colmar los poros, tiene una influencia positiva aumentando la resistencia

mecánica y la durabilidad del hormigón haciendo las veces de protección natural contra la

penetración de gases y líquidos. Sólo el hormigón en masa goza entonces de estas ventajas de

la carbonatación.

Para el hormigón armado, por el contrario, el mismo fenómeno de carbonatación puede

ser el origen de serios daños estructurales. En efecto, gracias a la elevada alcalinidad que le

confiere el cemento (pH>12), el hormigón protege al acero de la corrosión. La carbonatación

reduce la alcanidad (pH<9) y si el “frente de carbonatación” alcanza la zona de la armadura,

Capítulo 4 Ensayos realizados

70

ésta comienza a oxidarse. Dado que la formación de óxido se acompaña siempre con un

aumento de volumen, esto acarrea generalmente la disgregación del hormigón que cubre al

hierro. Entonces, la armadura deja de estar protegida y el hormigón armado comienza a perder

su capacidad portante.

Para que tenga lugar la carbonatación, es necesaria la presencia de humedad. La

reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa se encuentra

entre el 50 y el 55 %. Si la humedad es menor, no hay suficiente agua en los poros del

hormigón para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Por encima

del 75%, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente por la presencia del

agua.

La permeabilidad del hormigón influye negativamente en el proceso de carbonatación.

El hormigón permeable se carbonatará rápidamente. El hormigón armado puede tener muchos

años de protección frente a al carbonatación si los constructores siguen las normas de buena

práctica para producir hormigón de baja permeabilidad. Entre estas normas se incluye:

relaciones bajas de agua / cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas

tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen

la permeabilidad del hormigón y dificultan la difusión del dióxido de carbono a través de él.

La velocidad de penetración del frente de carbonatación al interior del hormigón es

proporcional a su porosidad. La velocidad disminuye con el paso del tiempo debido a que el

estrato carbonatado protege al resto del hormigón del contacto con el exterior.

La carbonatación también puede causar problemas de corrosión aun en hormigón de

alta calidad. Un recubrimiento bajo y defectos de superficie tales como grietas y pequeños

hoyos proporcionan un acceso directo a la armadura. [27]

4.4.2.Descripción del ensayo

Para reproducir el proceso de carbonatación de una manera acelerada hemos utilizado

una mezcla de gases formada por CO2 (20%) y aire comprimido (80%). Cabe destacar que en

la atmósfera hay sólo un 0,033% de CO2. Utilizando una concentración elevada de dióxido de

carbono se puede simular en pocos días el efecto de la carbonatación de varios años.

Hemos colocado las 12 probetas en un recipiente de plástico de 50 x 35 cm y 30 cm de

altura al que hemos hecho un agujero para permitir la entrada del gas procedente de la

Capítulo 4 Ensayos realizados

71

bombona. En la cara opuesta del recipiente, hemos hecho otro agujero al que hemos acoplado

un regulador de caudal para que a medida que el gas vaya entrando, el aire contenido en el

interior del recipiente pueda ir saliendo por este segundo agujero. En la parte superior de la

caja hemos colocado una tapa que ha sido sellada herméticamente. Hemos ido renovando

cada dos o tres días el gas del interior del recipiente por si la hermeticidad no fuera total y

poder mantener una concentración más o menos constante.

Al final del proceso, para medir la carbonatación, se rompen las probetas por la mitad

con la ayuda de una prensa y dos barras de acero. Las barras de acero se colocan en caras

opuestas y según la misma dirección. La prensa transmite la tensión a la probeta a través de

estas barras hasta la rotura de la misma. De este modo conseguimos una superficie de corte

bastante regular y plana.

Una vez rota la probeta y retirado el polvo residual, humedecemos una de las superficies

de rotura con una disolución de fenolftaleina al 1%. Las áreas carbonatadas del hormigón no

cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor que 9 adquirirán un color

rosáceo brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra la progresión del frente de

carbonatación dentro del hormigón. Existen otros métodos y otros indicadores para detectar la

carbonatación, pero éste es, con mucho, el método más fácil y común de detección.

Inicialmente se pensó que a los 30 días las probetas podían estar suficientemente

carbonatadas como para obtener resultados significativos. Al cabo de este tiempo se midió la

carbonatación de una probeta de cada tipo pero se consideró oportuno dejar el resto de

probetas 30 días más para obtener una carbonatación mayor.

4.4.3.Resultados obtenidos

Para la medición de la profundidad de carbonatación se ha hecho una foto con una

cámara digital, procurando la máxima ortogonalidad de la cámara respecto a la superficie de

rotura. Para compensar las distorsiones provocadas por las lentes de la cámara y la falta de

perpendicularidad se ha utilizado un programa informático de retoque fotográfico para reparar

estas distorsiones hasta que conseguimos un contorno de la probeta perfectamente cuadrado y

de dimensiones 10 x 10 cm. Con la ayuda de un programa de dibujo asistido por ordenador,

hemos reseguido el frente de carbonatación con una curva. Después se ha medido el área

encerrada por esta curva y se ha hallado las dimensiones de un cuadrado con la misma área.

Capítulo 4 Ensayos realizados

72

La profundidad media la tomaremos como:

A continuación presentamos las fotos de las 12 probetas una vez realizado todo el

postproceso. En color verde está representado el frente de carbonatación.

Figura 4.30: Penetración del frente de carbonatación de las 12 probetas ensayadas

30 días, 0% 30 días, 2.5% lodo

30 días, 5% 30 días, 10% lodo

2

10 lado cuadrado equivalente Profundidad media de carbonatación − =

Lado cuadrado equivalente = Area

Capítulo 4 Ensayos realizados

73

P

60 días, 0% lodo (1) 60 días, 2.5% lodo (1)

60 días, 5% lodo (1) 60 días, 10% lodo (1)

60 días, 0% lodo (2) 60 días, 2.5% lodo (2)

Capítulo 4 Ensayos realizados

74

Tabla 4.31: Área no carbonatada y profundidad media de penetración del frente de carbonatación

% Lodo Tiempo ensayo

(días)

Área no

carbonatada (mm2)

Profundidad

carbonatación (mm)

30 9407 1,51

0% 60 (1) 9341 1,68

60 (2) 9235 1,95

30 9238 1,94

2,5% 60 (1) 8920 2,78

60 (2) 8840 2,99

30 9175 2,11

5% 60 (1) 7729 6,04

60 (2) 7685 6,17

30 8602 3,63

10% 60 (1) 7643 6,29

60 (2) 7345 7,15

4.4.4.Análisis de los resultados

Hacemos la media de los resultados de profundidades de carbonatación de las muestras

sometidas al ensayo de carbonatación durante 30 y 60 días (tabla 4.32) y representamos los

resultados en un gráfico (gráfico 4.33).

Tabla 4.32: Media de las profundidades medias de carbonatación

0% 2,5% 5% 10%

30 días 1,51 1,94 2,11 3,63

60 días 1,81 2,88 6,11 6,72

60 días, 5% lodo (2) 60 días, 10% lodo (2)

Capítulo 4 Ensayos realizados

75

En el gráfico podemos observar que el porcentaje de lodo influye directamente en la

profundidad de carbonatación. Al aumentar la cantidad de lodo, el hormigón aumenta su

porosidad con lo que el CO2 tiene más facilidad para penetrar en el interior de la probeta. Esto

conlleva una penetración del frente de carbonatación mayor que en el caso del hormigón con

un 10% de lodos llega a ser casi cuatro veces superior a la penetración que en el caso del

hormigón sin lodos.

Como ya hemos indicado anteriormente, la carbonatación del hormigón tiene una

influencia muy negativa en la corrosión del acero de las armaduras, por lo que el uso de este

hormigón con lodos quedaría restringido exclusivamente al hormigón en masa.

Gráfico 4.33: Profundidad media de penetración del frente de carbonatación en función

del porcentaje de lodos añadido después de 30 y 60 días

0,00

1,00

2,00

3,00

4,00

5,00

6,00

7,00

8,00

0% 2,5% 5% 10%

Porcentaje de lodo

Profundidad media de carbonatación (mm)

30 días

60 días

Otro parámetro que puede resultar de interés es la velocidad de propagación del frente

de carbonatación. En un hormigón normal, la velocidad de carbonatación va disminuyendo

con el tiempo ya que el propio frente de carbonatación supone una cierta barrera a la entrada

del propio CO2. En la tabla 4.34 representamos el aumento relativo (en porcentaje) de la

profundidad de carbonatación durante el segundo mes de ensayo respecto a la profundidad de

carbonatación durante el primer mes. Un aumento relativo de un 100% indicaría una

velocidad constante de carbonatación.

Capítulo 4 Ensayos realizados

76

Tabla 4.34: Aumento relativo de la penetración del frente de carbonatación

durante los el segundo mes para los distintos hormigones

0% 2,5% 5% 10%

20 % 48 % 190 % 85 %

Según esta tabla parece que la velocidad de propagación del frente de carbonatación

disminuye más lentamente conforme crece el porcentaje de lodo. En el caso del 5% de lodo en

lugar de una disminución de la velocidad se produce un aumento. Esto puede ser debido a la

poca fiabilidad estadística debido al reducido número de probetas ensayadas y a los errores

inherentes a los métodos de medida y ensayo.

**ESTUDIO DE LOS PRODUCTOS DE HIDRATACIÓN POR DIFRACCIÓN DE**

**RAYOS X**

4.5.1.Introducción

El estudio consiste en determinar cualitativamente la presencia y la formación de

determinadas fases formadoras de los diferentes hormigones. Para este estudio se ha realizado

el análisis de muestras correspondientes a probetas con un 0% y un 10% de lodos sometidas a

los ensayos de carbonatación, ataque por sulfatos, ataque por agua de mar y probetas no

sometidas a ningún ataque que nos servirán de referencia. En total son 8 muestras. En los

gráficos de las difracciones que encontramos en el anejo, se han superpuesto para cada ensayo

los resultados de los dos tipos distintos de hormigones.

Esta técnica requiere una preparación minuciosa. La muestra debe estar bien triturada

hasta un tamaño pequeño, hay que evitar los contaminantes del laboratorio y hay que

colocarla con cuidado en el porta-muestra, evitando irregularidades en la superficie.

La difracción tiene una serie de limitaciones y ventajas. Entre las limitaciones más

importantes está el hecho de que sólo es válida para fases cristalinas y además sólo detecta a

partir del 1 % de la fase. Las ventajas son que no requieren mucha muestra y que el ensayo no

es destructivo.

Para los análisis se ha utilizado un difractómetro Siemens D-500, con radiación Kα Cu

(λ=1,5418Å), monocromador de grafito y detector de centelleo, bajo unas condiciones del

tubo de rayos X de 30 mA y 40 kV. La velocidad angular de 0,05 (2θ) cada 3 segundos, con

un rango de 2θ entre 4º y 70º.

El reconocimiento de las fases formadoras es posible a partir de las fichas del JCPDS

[10] (Joint Committee for Powder Diffraction Standards), en las cuales se describe la celda

primitiva, los índices de Miller (hkl), el espacio reticular (d) y la intensidad porcentual de la

difracción experimental (I). En los difractogramas se representa la intensidad de difracción en

función de 2θ, donde θ es el ángulo entre el haz de rayos y el plano cristalino que difracta. El

ángulo de difracción θ se relaciona con la distancia entre planos, d, y la longitud de onda del

rayo incidente, λ, mediante la fórmula de Bragg: λ=2 d sinθ .

Capítulo 4 Ensayos realizados

78

4.5.2.Estudio de los productos de hidratación

Las fases formadoras que se pueden detectar por la técnica de análisis son:

Anhídridos:

- Silicatos bicálcicos y tricálcicos (C2S y C3S respectivamente)

- Aluminato tricálcico (C3A)

- Aluminato férrico tetracálcico (C4AF)

- Yeso

Hidratos:

- Portlandita (CH)

- Etringita

El resto de fases como el CSH son amorfas y no se pueden determinar por difracción de rayos X, aunque se dispone de correlaciones directas entre fases amorfas y fases cristalinas como, por ejemplo, la proporcionalidad entre la cantidad de CSH y la cantidad de CH.

En todas las muestras aparece el silicato bicálcico en poca cantidad, portlandita y etringita. Se observa como ya no hay silicatos ni aluminatos tricálcicos, tampoco aluminato férrico tetracálcico, éstos anhídridos son los primeros en desaparecer y al contrario que ocurre con el silicato bicálcico que tarda mucho en hacerlo, desaparece en los primeros días de curado.

Destacamos el hecho de la gran aparición de calcita (CaCO3) en todos los ifractogramas. Esto es debido a que para realizar el análisis con un percutor se tritura la muestra de forma suficientemente pequeña para que pueda ser analizada, y al ser los áridos de origen calizo quedan reflejados al realizar esta técnica en los picos de calcita.

También se aprecia que la fase amorfa es superior en aquellas muestras que contienen fangos, esto queda denotado en la zona izquierda del difractograma que es más elevada a mayor cantidad de fango, sin destacar los picos que están muy juntos y más o menos igualados sin que se distinga ningún componente cristalino.

La principal diferencia reside en que la hidratación del cemento en el hormigón con adición de lodos es más lenta y esto se detecta en una mayor presencia de larnita (C2S), que todavía no se ha hidratado completamente. También hay una mayor presencia de portlandita y Capítulo 4 Ensayos realizados

79

etringita que en la de referencia ya que estas han aparecido más tarde y todavía no hanreaccionado.

Finalmente, con los análisis realizados, concluimos que el hormigón con la inclusión de fangos secos de depuradora como adición no presenta ninguna anomalía respecto al hormigón de referencia en ninguno de los ensayos de durabilidad realizados en lo que a componentes cristalinos se refiere.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3387/40862-7.pdf?sequence=7&isAllowed=y>