

Artículo Técnico: “Ettringita Diferida en cimentaciones de aerogeneradores”



José Luis Rivas Meco

Ingeniero Técnico de Obras Públicas.

Experto en Control de Ejecución de Procesos Críticos en Obra Civil en Parques Eólicos.

1. Objeto de este artículo técnico

-Dar a conocer que es la Ettringita Diferida de forma somera y que daños irreversibles puede ocasionar

en los hormigones de grandes estructuras con grandes volúmenes vertidos en una sola fase.

-Tendencia actual de esta preocupación real-existente de las Ingenierías en la redacción contractual de la obra civil en los proyectos eólicos. Y la exigencia in situ de las Asistencias Técnicas en el control de la ejecución.

-Importancia de evitar el potencial desarrollo de la Ettringita Diferida en las cimentaciones de los aerogeneradores y medidas preventivas a implementar en los grandes volúmenes de hormigón vertidos en una sola fase. (Estudio Teórico Adiabático, Monitorización de un mock-up, Monitorización de cimentaciones).

-Referencias de normas aplicables que exigen estos requisitos. Y recomendaciones complementarias de estas normas desarrolladas por instituciones gubernamentales, para tenerlas en cuenta en la defensa técnica de incumplimientos.

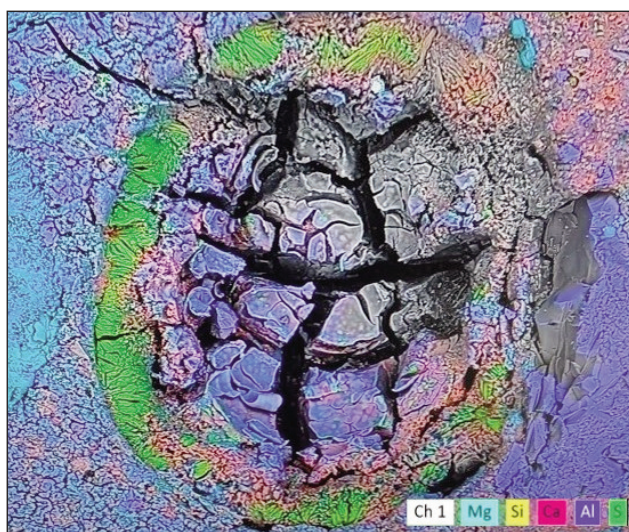
-Definición de los sistemas actuales de detección de la Ettringita Diferida en estructuras de hormigón.

-Compartir mis conocimientos y experiencia en Siemens Gamesa de toda esta dinámica técnica de control para evitar la Ettringita Diferida, vivida en la ejecución de la obra civil en parques eólicos en países con recursos tecnológicos, humanos y materiales muy limitados y/o expuestos a climatologías ambientales muy adversas. (África: Djibouti, Etiopía, Egipto, Marruecos).

2. Qué es la ettringita diferida y daños potenciales

La “Ettringita Diferida” empezó de forma silenciosa a darse a conocer en el año 1995 con la aparición de ciertos daños estructurales considerables en piezas pretendidas prefabricadas de hormigón. En estos últimos años, se ha consolidado como una nueva y potencial patología que podría conllevar en estructuras de relevancia y de gran importancia tecnológica, un posible daño y posterior colapso estructural.

La Ettringita se puede desarrollar en ciertos procesos



naturales formándose un mineral de sulfato de tono amarillento que cristaliza en un sistema cristalino trigonal, pero también se puede desarrollar mediante una reacción química forzada en el hormigón donde los sulfatos, que están siempre presentes en el cemento, son principalmente los que generan inicialmente estos cristales en forma de agujas.

Este proceso inicialmente no dañino se llama “Ettringita Primaria” y se genera por la reacción natural del sulfato de calcio (Yeso) con los aluminatos contenidos en el cemento y con el agua aportada para el amasado de la mezcla. Potenciándose dicho contenido de cristales, por las altas temperaturas que se pudieran alcanzar en el hormigón en su reacción exotérmica inicial (fraguado). Siendo paralelamente también influenciadas esas tem-

peraturas, por los grandes volúmenes a verter, la geométrica, espesores de la estructura a hormigonar, tipología y cantidades de los materiales integrantes en el hormigón, condiciones de entorno en la fase del vertido y las condiciones de puesta en obra del hormigón.

La Ettringita primaria se concentra de forma aleatoria en el mapa composicional del hormigón, siendo de estudio y de gran potencial patológico la alta concentración perimetral de estos sulfatos cristalizados en los poros microscópicos del hormigón.

Los daños significativos en el hormigón por esta reacción química surgen cuando posteriormente y de forma diferida en el tiempo, sulfatos adicionales penetran por permeabilidad u otros medios en el hormigón, produciendo un aumento de cristalización en el perímetro de los poros e implícitamente un aumento de expansión y una micro fisuración en dichas zonas. Llamándose patológicamente en su conjunto como “Ettringita Diferida”.

Esta patología aparece de forma homogénea y muy posterior en el tiempo (meses o años). Las micro fisuras en los poros y las reacciones expansivas en el hormigón endurecido producen implícitamente, fenómenos patológicos graves como por ejemplo: múltiples y relevantes fisuraciones estructurales internas y externas, desprendimientos del hormigón, pérdidas de resistencias, etc., que combinadas todas ellas entre sí, desencadenarían fallos estructurales irreparables.

3. Tendencia actual en el sector de la Obra Civil en Parques Eólicos

En la actualidad, las normativas técnicas del hormigón (Por ejemplo: EN-13670, serie EN-1992, EN-206, ...), son conscientes de este potencial problema y se vuelcan entre otros conceptos para todas las estructuras, en limitar la temperatura máxima que puede alcanzar el hormigón en su etapa de endurecimiento inicial a 70 °C. No siendo realmente consciente la obra civil del sector eólico,

lo que implica esta limitación tan bien documentada últimamente por las Ingenierías en los Pliegos de Condiciones y/o Employer Requirements de los proyectos.

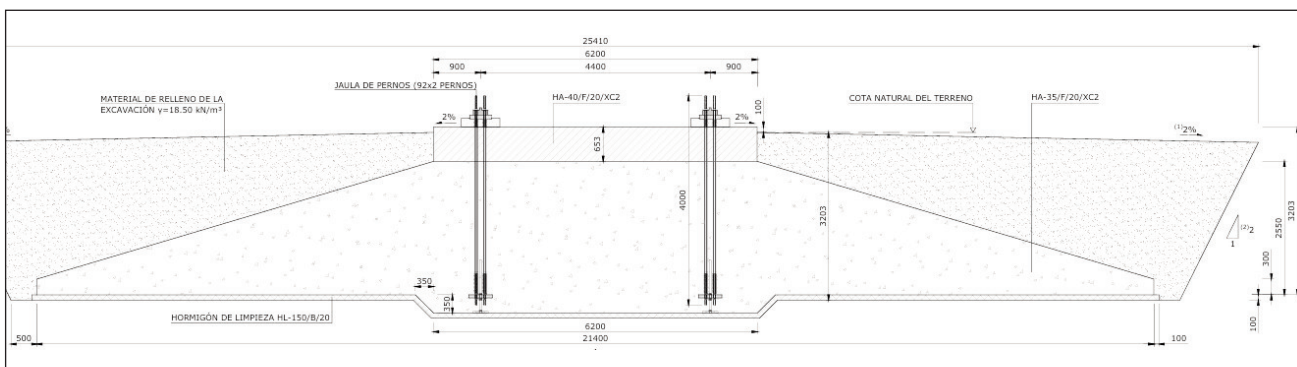
Ya no solo por tener un potencial inicio de Ettringita Diferida analizado anteriormente, sino además por todo lo que supone y se necesita saber en cuanto a la tecnología de los componentes del hormigón, los medios y equipos necesarios, los procesos de ejecución, la fabricación del hormigón, el transporte, el bombeo, el vertido, la monitorización y curado del hormigón. Y si a todos estos parámetros de la ecuación, le sumamos la promoción de parques eólicos en países con un nivel tecnológico obsoleto y con climatologías adversas por altas temperaturas ambientales. “Más”, una Asistencia Técnica europea in situ exigente, se convierte en la “Tormenta Perfecta”.

Tenemos que ser conscientes que la tendencia eólica terrestre se encuentra actualmente por un aumento progresivo en las prestaciones de la máquina. Y este eco de querer generar más MW, implica grandes volúmenes de hormigón a verter en una sola fase con 400, 500, 600, 900 m³, ... y más de 3,5 metros de altura. Es evidente que, con estas dimensiones exista un núcleo relevante en la cimentación con altas concentraciones de temperaturas, donde sin duda alguna deberemos tenerlas en cuenta en su fase inicial de endurecimiento o fraguado y así evitar en un futuro potenciales daños estructurales irreparables.

El hombre, es el único animal que tropieza dos veces en la misma piedra, pero para no tropezar una tercera o cuarta vez, quiero en este artículo aportar que conceptos mínimos son necesarios como medidas preventivas para no morir en el intento.

4. Estudios teóricos adiabáticos

Con la certeza de existir una zona en la estructura que potencialmente puede ser afectada por Ettringita Diferida, es necesario desarrollar un estudio teórico Adiabático y así ser sabedor de la acumulación de calor en el





hormigón en dicha zona por la no transferencia de este a su entorno. Para ello se debe tener conocimiento de métodos para calcular esta punta máxima de temperatura, como pudiera ser: la ACI 207.2R, las Recomendaciones para la Prevención de los Daños en el Hormigón emitidas por IFSTTAR, ...

El método según el **Instituto Americano del Hormigón (ACI)** es de fácil empleo con una fórmula directa y donde se opera:

La cantidad de cemento por m³ que emplearemos por el calor real de hidratación del cemento a utilizar a 28 días de edad dividido por el calor específico estándar del hormigón por la densidad del hormigón y por la relación que hay entre el espesor máximo y el perímetro de la cimentación.

(Este método requiere utilizar unidades de medidas americanas y coeficientes conversores)

El método según el **Instituto Frances de Ciencias y Tecnología (IFSTTAR)** tiene 6 pasos de puerta, donde se utilizarán conceptos como:

- La cantidad de cemento por m³ que emplearemos (kg/m³)
- Densidad del hormigón (kg/m³)
- Agua efectiva contenida en el hormigón (Kg/m³)
- Resistencia a compresión a 2 y 28 días (MPa)
- Calor real de hidratación del cemento a utilizar a 41 y/o 120 días de edad (KJ/kg)
- Espesor máximo de la cimentación. (m)

Ambos métodos teóricos, consideran con gran afectación en sus resultados de temperatura, la cantidad de Kg/m³ de cemento a utilizar y los valores reales a diferentes edades del calor de hidratación del tipo de cemento que se empleará en el hormigón. Por lo que será necesario disponer de una óptima y equilibrada formulación de la mezcla en consonancia a las altas resistencias a compresión que últimamente se imponen en estos diseños.

El resultado físico del “valor real del calor de hidratación del cemento a diferentes edades” no suele estar disponible en la ficha técnica comercial del cemento, siendo necesario que sea facilitado por el fabricante con sus últimos resultados realizados en sus controles de calidad de lotes de fabricación.

Certificar el fabricante que es un cemento de bajo

calor de hidratación y su valor cumple el requisito de la EN-197 (< 270 KJ/kg), no nos debe valer para meter ese input en las fórmulas de cálculo teórico de la Temperatura Adiabática. Tiene que ser el valor real numérico obtenido en sus últimos controles.

Trabajar con cementos europeos bajo el abrigo de las normas de la Unión Europea (Marcado CE) es una garantía certificada, donde están disponibles muchos resultados mecánicos, físicos y químicos de los lotes ensayados. Y que, por experiencia en otros continentes como en África, se emplean cementos de parámetros normativos locales (Etiopía, Djibouti, Egipto, ...) con límites para ciertos controles muy variables y diferentes, que se deben tener muy en cuenta antes de decidir su compra y consumo.

Por todo ello, aconsejo disponer siempre en estos países de algún técnico local competente y de confianza que, de soporte a todo equipo técnico, equipo de obra, ... y sea gran conocedor de los materiales críticos locales que influirán sin duda en los resultados de las monitorizaciones de temperaturas (Cementos, arenas, gravas, agua...).

Disponer de un estudio teórico adiabático nos proporcionará inicialmente una aproximación de la temperatura adiabática del hormigón a utilizar. Y también implícitamente la temperatura a la que deberemos verter el hormigón fresco en la cimentación, para cumplir la limitación máxima según normativa de 70º C. Y más aún cuando en la última década está siendo uno de los puntos contractuales exigidos en los pliegos y/o employer requirements de los proyectos civiles en el sector eólico. En paralelo también se está exigiendo en dicha documentación, la realización de un mock-up que valide el estudio adiabático y la monitorización de cimentaciones que ratifique todo el proceso.

Esta tendencia considero que se está imponiendo por:

- Las grandes exigencias de garantías en la durabilidad de las estructuras por parte de los fondos y/o bancos que financian estos proyectos.
- La ejecución de parques eólicos en emplazamientos con durísimas inclemencias climatológicas que dificultan la puesta del hormigón e implícitamente favorecen la potencial aparición de la Ettringita Diferida.
- Moda o tendencia técnica entre las propias ingenierías que desarrollan los proyectos y/o asistencias técnicas que controlaran la ejecución.
- Mayor control en procesos de ejecución y puesta en obra del hormigón.

- Inicio del conocimiento de los daños patológicos potenciales de la Ettringita Diferida en estructuras con grandes volúmenes de hormigón .

- Etc.,

5. Mock-up

Los estudios teóricos adiabáticos analizados en el punto anterior generan implícitamente tener que desplegar en las obras civiles de parques eólicos, un mayor control y despliegue de medios técnicos debido a:

- La imposición de realización de un mock-up previo a los hormigonados masivos en las cimentaciones, donde se simule y monitoricen realmente las temperaturas que en un futuro se tendrán. Y así dar el OK a la mezcla futura de hormigón, a sus sistemas de ejecución y a su puesta en obra.

- Que las cimentaciones de los aerogeneradores sean monitorizadas para garantizar que la temperatura máxima y gradiente térmico, cumple los requisitos normativos.

Iniciar los hormigonados masivos sin un estudio teórico adiabático y sin una simulación real en un mock-up para confirmar temperaturas, es un suicidio. Y como ingenieros, tenemos que evitar que esto suceda.

Mi recomendación sin duda es no iniciar los hormigonados masivos en las cimentaciones de los aerogeneradores, sin disponer primero de un estudio teórico adiabático y segundo sin haber contrastado las temperaturas en un mock-up.

La realización de un mock-up para simular las temperaturas en las que el núcleo de la cimentación desarrollará en las primeras edades de endurecimiento inicial, es primordial. Para ello se debe diseñar entre

otros temas la geometría, el volumen, confinamiento, disposición de los termopares, tiempos de monitorización, etc., Cuanto más parecida sea la simulación en el mock-up con respecto a su escala a tamaño real, más datos dispondremos para simular lo que realmente pasará en un futuro en las cimentaciones.

Sabemos que existen diferentes tipologías de cimentaciones de ejecución in situ para aerogeneradores, como pueden ser las de canto recto, canto variable, jabalcones, tendones postensados, prefabricadas, ...

Y en todas existe un factor común, “disposición de un núcleo central importante de masa de hormigón altamente solicitado, donde se encuentran elementos auxiliares críticos encargados de transmitir las cargas del aerogenerador al hormigón”. (Jaula de pernos, virola, ...). Es por ello por lo que debemos simular en el mock-up estas zonas tan relevantes estructuralmente.

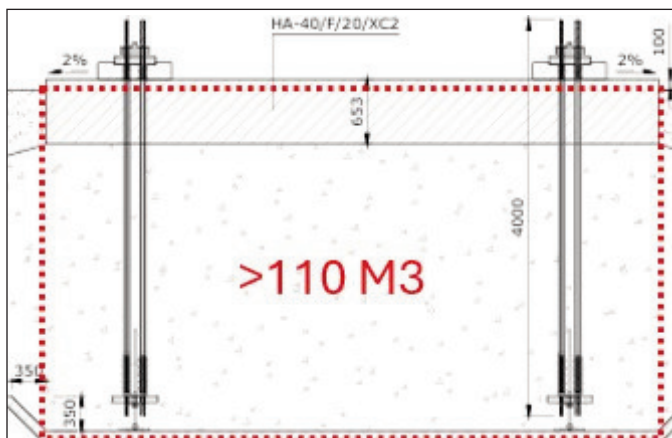
El diseño de los mock-up para estos casos, tienen secciones casi cuadrangulares. Siendo su principal objetivo geométrico la de disponer al menos, la dimensión real de la cimentación en vertical.

Para una mejor simulación se dispondrá también:

- Colocación del mock-up en una zona excavada. Por ser normalmente cimentaciones enterradas y evitar la incidencia del fujo del viento.

- Solo en las paredes laterales del encofrado se colocarán placas aislantes tipo EPS de Poliestireno expandido o similar, de al menos 3 cm de espesor con el objetivo de concentrar en el bloque las temperaturas y simular la continuidad del hormigón.

En estos mock-up de monitorización de temperaturas no es necesario colocar en su interior armadura principal y/o estructura auxiliar. Solo se

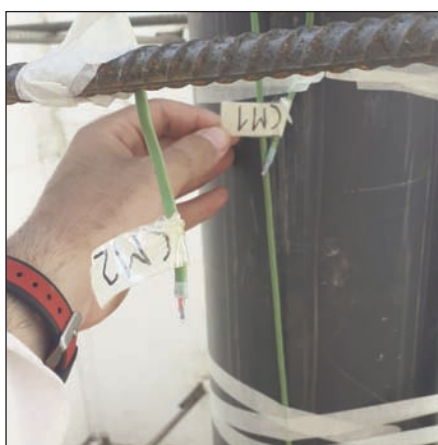


colocarán barras o elementos de sujeción para guiar y fijar los termopares o sensores en su posición.

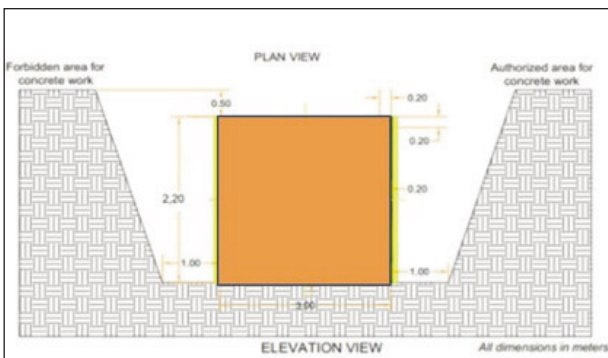
En ocasiones se introducen y ensayan en el mock-up los tubos para las conducciones eléctricas que servirán para el posterior tendido en el interior de la cimentación de los cables de comunicaciones (fibra óptica) y cables de tensión (Cable MT de diferentes secciones).

Normalmente los tubos empleados son de secciones nominales de 90 mm y 200 mm respectivamente, que

Recordar la existencia de normas para tubos de conducciones eléctricas con marcados de calidad según UNE-EN, IEC... que avalan las características mecánicas/geométricas y garantizan entre otros parámetros las temperaturas máximas de uso para tenerlo en cuenta. Mencionar también la importancia de no tener incidencias sobre estos elementos en los hormigonados, ya que cualquier deformación, mala conexión y/o perforación con entrada de hormigón en ellos, impediría posteriormente tender los cables y conllevaría a una serie de actua-



transcurren de forma recta verticalmente con un codo inferior a 90° para darles salida por la parte inferior de la cimentación para su futura conexión con la red de media tensión del parque eólico. La causa principal de ensayarlos es para someterlos a las futuras condiciones reales de temperatura que deberán resistir en la fase de curado del hormigón. Hay tubos rígidos y flexibles que se deforman y pierden sus propiedades a ciertas temperaturas, coincidiendo entre otras características con las limitaciones de temperaturas del hormigón.



ciones de gran relevancia.

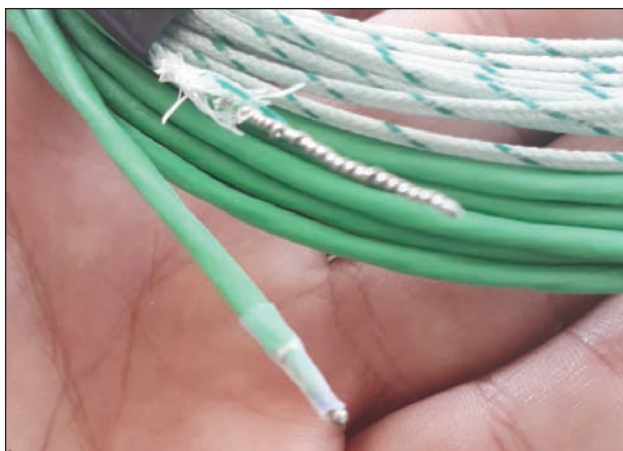
6. Equipos para la monitorización de temperaturas

Para la medición y grabación de las temperaturas en el hormigón, existen diferentes sistemas y equipos de medida. Siendo los termopares por cable y los dataloggers digitales los más empleados debido a su sencillez, coste, tecnología y viabilidad en disponerlos en puntos estratégicos del mock-up.

Un **termopar** se caracteriza por ser un sensor que está compuesto por dos hilos de metales de densidades de

Un **termopar** se caracteriza por ser un sensor que está compuesto por dos hilos de metales de densidades de

Tipos de sensor			
	Tipo T (Cu-CuNi)	Tipo K (NiCr-Ni)	Tipo J (Fe-CuNi)
Rango	-200 ... +400 °C	-195 ... +1000 °C	-100 ... +750 °C
Exactitud ±1 dígito	±1 % del v.m. (-200 ... -100,1 °C) ±0,3 °C (-100 ... +70 °C) ±0,5 % del v.m. (+70,1 ... +400 °C)	±1 % del v.m. (-200 ... -100,1 °C) ±0,3 °C (-100 ... +70 °C) ±0,5 % del v.m. (+70,1 ... +1000 °C)	±0,3 °C (-100 ... +70 °C) ±0,5 % del v.m. (+70,1 ... +750 °C)
Resolución	0,1 °C	0,1 °C	0,1 °C



electrodos diferentes que, unidos o anudados entre sí en uno de los extremos (junta caliente), produce tensiones eléctricas proporcionales a las temperaturas ensayadas. (Efecto Seebeck).

La naturaleza de los metales acota el rango de medida y su tipo. Siendo los más característicos en el mercado, los indicados anteriormente en el cuadro de tipos de sensor:

Quizás el más extendido para su utilización en estos casos, sea el tipo K con cable de 1,5 mm de espesor y longitud deseada, exactitud Clase 1 según norma EN 60584-2 y estar compuesto por Nicromo y Níquel. Es importante también conocer la temperatura máxima de uso de la cubierta del cable del fabricante de los termopares, para evitar fallos o errores en las mediciones y no estar por debajo de las temperaturas que tendremos en la monitorización del hormigón.

Quiero hacer hincapié en la necesidad de ratificar en la fabricación de los termopares, la correcta conexión de polos (+, -) en el switch de conexión del termopar (junta fría), ya que un error por este motivo dará lecturas incorrectas e incoherentes en los periodos de las monitorizaciones.

Un **datalogger** es un dispositivo electrónico utilizado para medir, registrar y almacenar datos de los termopares. Como mención a uno de los múltiples datalogger que hay en el mercado, sugiero por experiencia el Testo 176 T4 por su tamaño, características técnicas, número de entradas simultáneas de medición y sus prestaciones bajo configuración de un software gratuito. (Por ejemplo: alarmas, tiempos de monitorización, tipo de termopar a utilizar, periodicidad de impulso en la lectura y su registro, visibilidad/acceso en el display, ...)

Un tema relevante a tener en cuenta en la utilización de estos equipos de monitorización y que no hay que obviar, es todo lo relacionado con su metrología y estado de



calibración. Y sobre todo tenerlo siempre presente, cuando estemos con mediciones con rangos límites de cumplimiento. En este caso los famosos 70º C.

7. Colcación en el mock-up de los equipos para la monitorización

La colocación de los termopares en las posiciones que nos interesan monitorizar en el mock-up es relativamente fácil, ya que como hemos dicho anteriormente solo tenemos que ir manualmente fijando el cable a diferentes elementos (barras y/o tubos) hasta poder dejar el sensor en la posición deseada.

El objetivo de la monitorización es la de ser conocedor para la mezcla de hormigón diseñada, la temperatura máxima en el core y el gradiente térmico core-superficie. Para ello se disponen los termopares en diferentes ubicaciones estratégicas e incluso se duplican con back ups por cada posición para tener una máxima garantía de lecturas. Y así no tener que repetir toda la operativa por fallos inesperados.

La identificación unívoca de cada termopar y su conexión con el datalogger, es crucial para una buena monitorización y para no volvernos locos por lecturas de temperaturas ilógicas en las diferentes ubicaciones. Es por ello por lo que es necesario que se tomen las medidas necesarias de identificación para no tener posiciones intercambiadas y prevenir cualquier daño involuntario que haga imposible su posterior lectura, al ser equipos delicados y muy sensibles.

La ubicación tridimensional del termopar debe ser lo más exacta posible con respecto a lo diseñado, debiendo evitar cualquier tipo de cercanía o contacto directo con barras u otros elementos que desvirtúe la temperatura real a registrar.



Terminadas las operaciones de colocación de los termopares en el mock-up, es conveniente realizar una conexión y un encendido provisional de chequeo del datalogger para certificar el buen funcionamiento de lecturas en todos los termopares dispuestos. Estas lecturas provisionales deberían tender a las temperaturas ambientales del lugar.

8. Optimización y tecnología de la mezcla de hormigón

En este apartado quiero resaltar la importancia de la necesidad de disponer una mezcla de hormigón bien formulada que cumpla todos los requisitos físicos, mecánicos y químicos especificados. Para ello, con anterioridad al vertido de la mezcla en el mock-up y realizar la monitorización, se debe tener garantizado que cada componente del hormigón de forma individual y de la mezcla amasada en su conjunto, cumple los requisitos deseados de diseño. Últimamente los diseños en las estructuras civiles eólicas son más optimizados y exigentes a costa, entre otras cosas, de tener los hormigones unas prestaciones mecánicas mayores en resistencia, durabilidad, manejabilidad ... (C30/35, C40/50, C55/60).

Encontrar estas características idólicas en el hormigón en ciertos continentes y/o países subdesarrollados tecnológicamente, con obras en lugares donde da la vuelta el aire y encima con altas temperaturas ambientales, es realmente difícil y a veces frustrante. Si a este cóctel le añadimos los requisitos de temperatura inicial máxima de la mezcla fresca del hormigón para poder ser vertida según el cálculo del estudio adiabático, se convierte en un importante reto profesional.

Sin duda, para lograr no sobrepasar la temperatura en el hormigón fresco en el vertido en estas cimentaciones de grandes volúmenes y de una sola fase de vertido, se deberían utilizar principalmente cementos de bajo calor

de hidratación a dosificaciones de Kg/m^3 no elevadas. Si aun así no conseguimos in situ disponer de la temperatura en el hormigón fresco para verterlo en el rango calculado, se deberán implementar conjuntos de medidas alternativas, por ejemplo:

- Utilización de chillers para trabajar con el agua de amasado de la mezcla a bajas temperaturas ($T: 4^\circ\text{C}$).
- Amasar el hormigón con de hielo, ya sea triturado o en cubitos de hielo.
- Hormigonados nocturnos.
- Acopiar los áridos en carpas para protegerles de la exposición del sol
- Humectación con agua fría los áridos antes de amasado.
- Disponer de aire acondicionado en las carpas de acopio de áridos.
- Planificar y diseñar la obra con hormigonados en épocas con menos calor.



- Hormigonar la cimentación en varias fases en periodos diferentes (Juntas frías controladas). Reajustando, si fuera necesario, el diseño del armado.

Cada una de estas medidas alternativas conllevan implícitamente una serie de nuevas y múltiples necesidades, limitaciones, conocimientos, equipos, tecnologías, know how, etc. que, si no estaban contempladas en el inicio del proyecto y/o al alcance de la contrata principal, te podrán arruinar la obra.

9. Vertido de la mezcla y monitorización de temperaturas en el mock-up

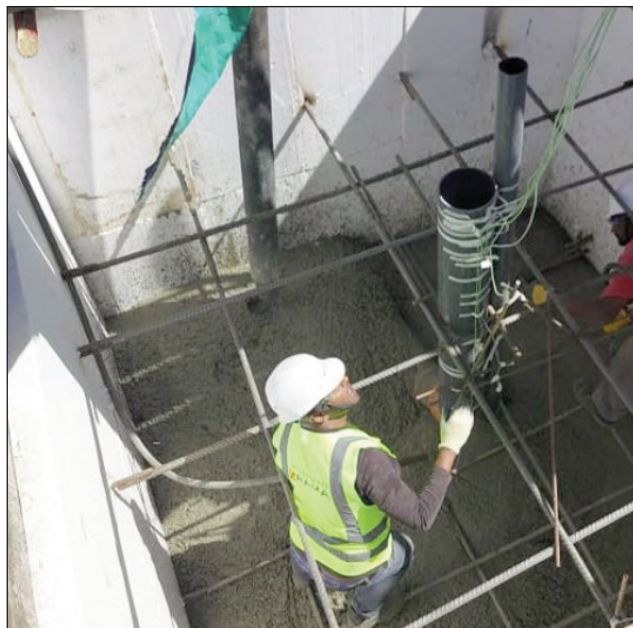
Analizados los hitos anteriores y previo al vertido, es momento de chequear que disponemos todo lo necesario para desplegar los controles de calidad que se llevaran a cabo en la ejecución del mock-up. Por ejemplo, el control de resistencias a diferentes edades, control de fluidez, control de temperatura inicial de la mezcla fresca, control de tiempos de vertidos, control de bombeabilidad,

Es recomendable la confección de probetas de hormigón para roturas a muy temprana edad (2 y/o 3 días) aparte del estándar en el sector eólico de 7,14,21 y 28 días. Y así poder justificar si fuese necesario, las fisuraciones por contracción térmica inicial en superficie por incumplimiento de gradiente térmico.

Iniciado el amasado en planta o en planta + camión hormigonera, transporte y bombeo de la mezcla al mock-up, se tendrá especial cuidado de no dañar y/o desconectar los termopares por parte de los operarios que trabajaran dentro del mock-up.

El hormigonado se hace en una sola fase y de manera continua, sin interrupciones y simulando toda operación real a escala de un vertido en una cimentación. Terminado el hormigonado, es el momento de conectar los switches de los termopares a los dataloggers y comenzar la monitorización.

Ya conectados estos, se aconseja chequear y visualizar en el display que se registran temperaturas. Y si hubiese alguno sin lecturas, revisar conexiones. Es imprescindible meter los equipos de medida durante los días establecidos para la monitorización, en algún cofre con candado para evitar manipulaciones, vandalismo o robos, al quedar estos equipos expuestos en el exterior. Además, los dataloggers a pesar de estar clasificados como IP 65, es recomendable una mayor protección y evitar daños irreparables por exposiciones mayores de agua y/o polvo (Lluvia y/o tormenta de arena).





Es por ello por lo que no hay que obviar la necesidad de proteger bajo condiciones óptimas la parte superior del mock-up con los sistemas de curado que posteriormente en la cimentación se llevaran a cabo para:

1. Evitar una pérdida rápida y súbita de temperatura/humedad que descompense el gradiente térmico en la monitorización y que normalmente está limitada esa diferencia en un máximo de 20°C.

Es importante que la custodia y acceso para visualizar puntualmente temperaturas en el display, lo realice un solo responsable que tenga conocimiento del funcionamiento y así no ser manipulados por personas ajenas no autorizadas.

El trabajo realizado y los futuros resultados en estos momentos son cruciales para el buen desarrollo de la obra, al ser considerado este proceso de monitorización en el mock-up como proceso crítico. Y es mejor hacer bien las cosas a la primera.

Recordemos que otro de los objetivos principales de la realización del mock-up es para la monitorización y análisis del gradiente térmico entre el core-superficie.

2. Evitar un descontrol en las retracciones superficiales que degenerarían en otros tipos de patologías adversas.

Resaltar que el mundo de los sistemas de curados en hormigones son diversos y en ocasiones muy ingeniosos. Bajo mi criterio y experiencia se suelen subestimar los sistemas de curados. Y ese mal uso, es causa directa de patologías muy visibles que ofrecen una muy mala calidad percibida por parte del Cliente.

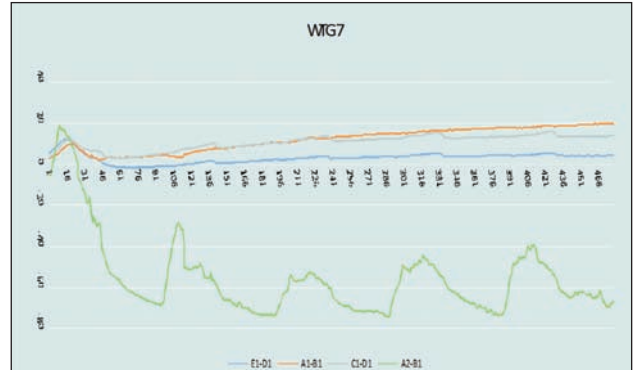
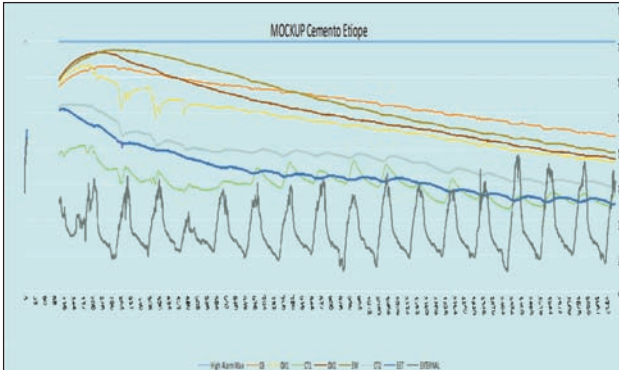
Transcurridos los días establecidos y programados para la monitorización (5 ,7,14 días, ...), se procederá al apagado de los dataloggers y a la desconexión de los termopares para poder recopilar y volcar los impulsos al-

ITEM	Time	High Alarm Max	High Alarm Grad	CB	CW1	C11	CW2	BB1	C12	BB2	CW3-C12	UNIT-C11	EXTERNAL
1752	01/12/2022 12:05:25	70	20	45,40	55,00	25,80	57,20	55,00	27,60	24,50	7,8	0,8	55,80
1753	01/12/2022 12:41:25	70	20	45,40	55,00	25,70	57,10	55,00	29,00	24,40	7,5	0,6	55,40
1754	01/12/2022 13:15:05	70	20	45,40	55,00	25,40	57,10	55,00	29,70	24,70	7,4	0,4	55,70
1755	01/12/2022 13:11:05	70	20	45,40	55,00	27,00	57,10	55,00	29,70	24,70	7,4	0,4	55,70
1756	01/12/2022 13:50:05	70	20	45,40	55,00	27,10	57,10	55,00	29,80	24,70	7,3	0,3	55,70
1757	01/12/2022 13:41:25	70	20	45,40	55,00	27,30	57,10	55,00	29,80	24,80	7,3	0,2	55,40
1758	01/12/2022 13:38:25	70	20	45,40	55,00	27,20	57,20	55,00	29,80	24,80	7,3	0,2	55,40
1759	01/12/2022 14:11:25	70	20	45,50	55,40	27,50	57,20	55,00	29,90	24,80	7,2	0,1	55,40
		70	20	63,1	63,1	44,1	67,0	67,8	70,4	70,7	71,8	25,1	57,9

PLAN VIEW

ELEVATION VIEW

ALL dimensions in meters



macenados. Es en este momento, cuando se podrá presentar la evolución de las temperaturas (máxima y gradiente térmico) en forma de datos numéricos y/o gráficas representativas.

Obtenidos, representados y analizados los datos de la monitorización del mock-up, es momento de compararlos con los datos teóricos calculados en el estudio adiabático y así tomar las decisiones oportunas del “OK o NOK a la mezcla/proceso” con todas las consecuencias que pudieran derivarse.

Quiero destacar por experiencia que estos estudios siempre marcan unos mismos patrones y así tenerlos en cuenta:

- La subida de temperatura entre las primeras horas desde el fin del vertido y el 2 y/o 3,5 día es relevante, destacada y muy pronunciada.
- La máxima temperatura en el core aparece entre el 2 y 3,5 día después del vertido. Influirá el tipo de cemento y su cantidad en Kg/m³ para estar cerca de cada uno de los intervalos.
- El descenso de la temperatura en todas las zonas monitorizadas una vez producida la máxima en cada termopar, es lenta y disminuye progresiva y gradualmente en el tiempo.
- Siempre y cuando el sistema de curado superficial empleado sea eficaz y evite una gran pérdida de temperatura y humedad superficial, el gradiente térmico no se descontrolará y estará garantizado ($T \leq 20^{\circ}\text{C}$) hasta el 5º-7º día de monitorización.
- Si el descontrol ($T > 20^{\circ}\text{C}$) se produce antes del 5º día, el sistema de curado es insuficiente y hay que pensar en mejorarlo. Además, se potenciará inevitablemente la fisuración superficial por contracción térmica inicial que, en ocasiones al ser muy llamativas por su gran anchura y profundidad conllevan sistemas de reparaciones fuera de lo estándar. (Inyección con resinas fluidas a presión).



WTG 1 – Repair process



WTG 1 – Repair process

- Por experiencia a partir del 5º-7º día, el gradiente térmico se descompensa sí o sí ($T > 20^{\circ}\text{C}$). Esto es debido a que la disminución de temperatura en el core es mucho más lenta que en la superficie por tender esta última a la temperatura ambiente. Pero si las resistencias a compresión del hormigón a muy temprana edad son buenas, las fisuras por contracción térmica inicial podrían evitarse y/o ser minimizadas, permitiendo una fácil reparación in situ (Colmatación por vertido por gravedad con resinas fluidas y/o reparación superficial con morteros especiales).



- La existencia de grandes picos de temperatura en los termopares superficiales producidos por la influencia y la variación de temperaturas ambientales del día y de la noche, pueden influir en el descontrol del gradiente térmico puntualmente a cualquier edad.

10. Monitorización en cimentaciones de aerogeneradores



Tomada la decisión del OK, para los inicios de los hormigonados masivos en las cimentaciones de los aerogeneradores en un parque eólico por el cumplimiento positivo de todos los requisitos establecidos y analizados anteriormente, se desplegará la misma sistemática de monitorización y ejecución a una escala superior en todos los sentidos. Siendo una de las principales diferencias la ubicación de los termopares en la cimentación y donde se

continuará monitorizando con las mismas medidas preventivas las temperaturas tanto del core como la superficie.

Analizados los resultados en la primera cimentación monitorizada, se ratificará las temperaturas máximas y el gradiente térmico con los resultados que ya fueron justificados y contrastados en el estudio teórico adiabático y monitorización en el mock-up.

Alineadas las tres etapas, estudio teórico adiabático, monitorización del mock-up y monitorización de la primera cimentación en el parque eólico, será el momento de considerar la ejecución de los hormigonados in situ como "cimentaciones maquina en serie en dicho parque eólico". Con plenas garantías de no desarrollar en el futuro patologías de Ettringita Diferida en el hormigón.

11. Recomendaciones complementarias a las normativas vigentes

En este apartado quiero dar a conocer la existencia de trabajos relevantes de ciertas instituciones gubernamentales que desarrollan recomendaciones complementarias a las normas vigentes, para disponer más información y más niveles de clasificación de temperaturas máximas que se podrían alcanzar. Y así no globalizar la misma limitación de 70 ° C de temperatura para todas las estructuras y para todas las clases de ambientes de exposición.

La más conocida por mí parte y de mayor relevancia en estudios y ensayos técnicos, son las Recomendaciones

Complementarias IFSTTAR para la Prevención de los Daños en el Hormigón debidos a la Formación de la Ettringita Diferida. (French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks).

Esta recomendación aparte de acercarnos aún más de lo que es la Ettringita Diferida y los potenciales daños que puede producir, hace **primero** una clasificación de **3 tipos de estructuras** definidas por un nivel de aceptabilidad del riesgo de formación de la Ettringita Diferida. (Categoría I, II, III).

- Categoría I (Con nivel de aceptabilidad menor o consecuencias aceptables): Estructuras ejecutadas con hormigones con dureza igual o menor al tipo C16/20, estructuras temporales, piezas prefabricadas no estructurales, construcciones sin cargas portantes.

- Categoría II (Con nivel de aceptabilidad de pocas consecuencias tolerables): Estructuras civiles y de edificación con cargas portantes incluidos puentes, productos prefabricados estructurales.

- Categoría III (Con nivel inaceptable o casi inaceptables): Estructuras en centrales nucleares, presas, túneles, puentes y viaductos excepcionales, edificios emblemáticos, traviesas.

Segundo, genera **3 nuevos tipos de clase de exposición** no definidas en la EN 206, relacionándolas estas con el nivel de presencia de agua y/o humedad. (Exposición XH1, XH2, XH3).

- Exposición XH1: Seco o humedad moderada

- Exposición XH2: Alternancia húmedo-seco, alto nivel de humedad

- Exposición XH3: Periodo largo en contacto con agua, periodo largo de estancamiento de agua, zona de mareas.

Y **tercero**, genera **4 niveles de prevención de temperaturas máximas** en base al tipo de estructura y clase nueva de exposición anteriormente citadas. (Niveles de prevención: As, Bs, Cs y Ds).

- Nivel de prevención As: Temperatura máxima en el interior del hormigón $\leq 85^{\circ}\text{C}$ o $[\leq 90^{\circ}\text{C}]$ *

- Nivel de prevención Bs: Temperatura máxima en el interior del hormigón $\leq 75^{\circ}\text{C}$ o $[\leq 85^{\circ}\text{C}]$ *

- Nivel de prevención Cs: Temperatura máxima en el interior del hormigón $\leq 70^{\circ}\text{C}$ o $[\leq 80^{\circ}\text{C}]$ *

- Nivel de prevención Ds: Temperatura máxima en el interior del hormigón $\leq 65^{\circ}\text{C}$ o $[\leq 75^{\circ}\text{C}]$ *



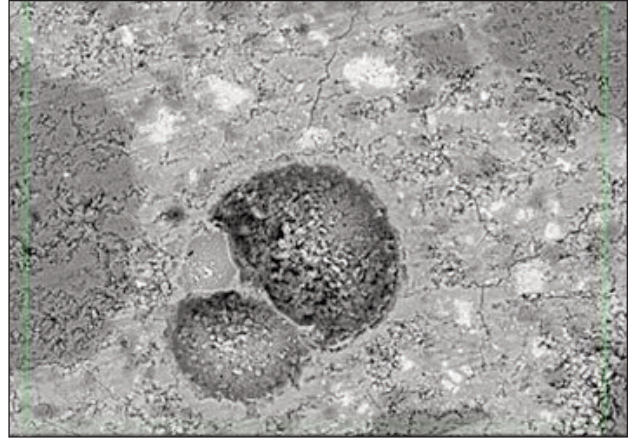
*: En caso de incumplir las temperaturas fijadas en cada nivel de prevención, podrán establecerse nuevos rangos de temperaturas acotados para cada nivel si cumple al menos UNO de los 7 límites establecidos en los parámetros asociados a la aparición, recogidos en la recomendación complementaria. Por ejemplo: tiempo continuo de incumplimiento < 4 h, tipo de cemento utilizado, contenido máximo de álcali en la mezcla ($< 3\text{kg/m}^3$),

Esta guía de recomendación complementaria IFSTTAR para la Prevención de los Daños en el Hormigón debidos a la Formación de la Ettringita Diferida, todavía no ha sido referenciada en las vigentes normas europeas EN, por lo que actualmente no dispone de una vigencia normativa legal, solo son recomendaciones complementarias. **Pero actualmente sí pueden ser argumentos técnicos muy sólidos y consistentes, para defender diferentes posturas donde se produzca incumplimientos en la temperatura máxima en el hormigón en grandes estructuras.**

12. Sistemas de detección de la ettringita diferida en estructuras

Si en cierta medida las acciones preventivas para evitar el desarrollo y potenciales daños de la Ettringita Diferida sobre estructuras de hormigón han sido expuestas y argumentadas anteriormente, es cierto que existen diferentes metodologías de detección mediante técnicas vanguardistas e innovadoras en laboratorio y que en este apartado detallaré.

La Ettringita Diferida se puede detectar mediante el estudio de los cambios químicos mineralógicos del hormigón que se producen durante el proceso de vida de muestras extraídas en la estructura a diferentes edades o mediante un modelo MBE (Muestra de mortero equivalente) que permiten reducir considerablemente el tiempo



de obtención de resultados fiables, así como la cantidad de material a emplear y muestras a fabricar.

Tipos de ensayos de detección:

Estereomicroscopía óptica de luz transmitida:

Estudio textural en el estereomicroscopio óptico de luz reflejada. Este análisis se realiza sobre muestras talladas y pulidas para determinar las zonas de interés para el estudio.

Difracción RX (RX= rayos X, ondas electromagnéticas):

La composición mineralógica de las probetas se realiza mediante la difracción RX sobre el agregado en polvo de la muestra de un tamaño de 15 micras. Finalmente, se muestran en un difractograma real, Los minerales que pueden ser detectados en el difractograma deben tener una proporción relativa en la muestra superior al 2%.

Florescencia RX (RX =rayos X, ondas electromagnéticas):

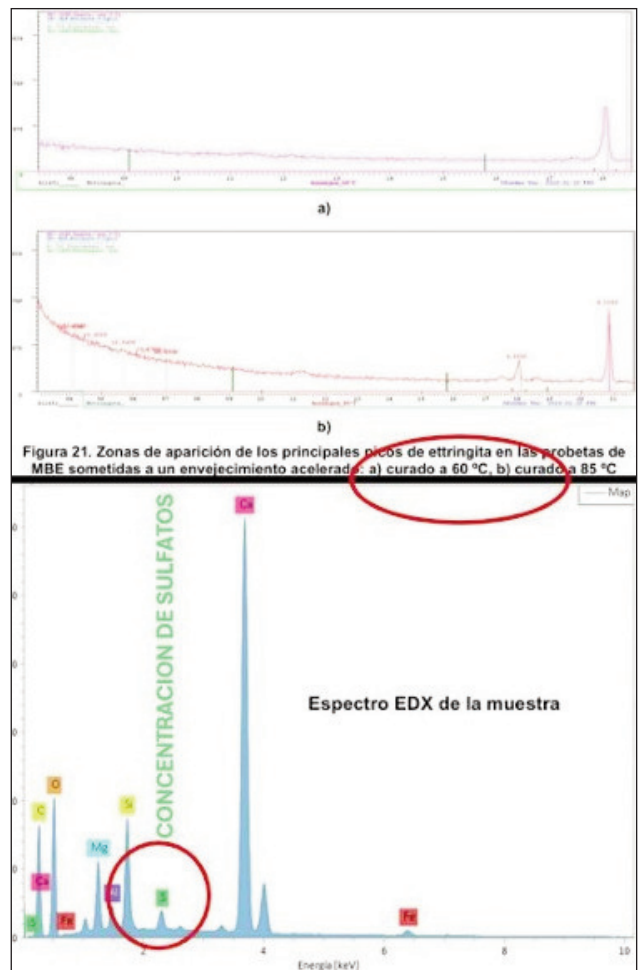
El análisis de la composición química de las probetas se realiza mediante la técnica de fluorescencia de RX (FRX). La FRX es una técnica analítica que se basa en la medida de las intensidades que, posteriormente y con la ayuda de curvas de calibración, son transformadas en concentraciones de los diferentes elementos químicos.

Microscopía electrónica de barrido de alta resolución con análisis químico y mapping EDX (EDX= por rayos X de energía dispersiva, es una técnica de rayos X que se utiliza para identificar la composición elemental de los materiales):

Mediante un “ESPECTRO EDX” (espectroscopía de rayos X) de la muestra de hormigón afectada o MBE y/o en paralelo ver su distribución en un “MAPA COMPOSI-

CIONAL” microscópico. Y así caracterizar químicamente sus componentes. Entre ellos la cantidad de S (Sulfatos cristalizados) y saber en qué zonas se concentran.

Hay otros métodos de estudio para complementar, medir y valorar el daño producido y así caracterizar su





nivel de deterioro del hormigón de la estructura de estudio.

Medición por el estudio de la expansividad del hormigón. Evolución de la expansividad muestra de hormigón o de MBE

Nivel de resistencias de testigos extraídos del elemento o de MBE.

Establecimiento del perfil calorimétrico de la hidratación del cemento mediante mortero equivalente. Estudio de las temperaturas alcanzadas durante el proceso de hidratación del cemento.

En España existen laboratorios que desarrollan toda esta tecnología para la determinación de la formación de la Ettringita Diferida con gran profesionalidad y conocimiento.

13. Referencias laborales de aplicación y bibliografías técnicas

- Parques Eólicos BOP Siemens Gamesa en África (Más de 1 GW):

- Lekela WF. (Egypt).
- Fiem WF. (Egypt).
- Goubet WF. (Djibouti).
- Jica WF. (Egypt).

- Assela WF. (Ethiopia).
- KFW WF. (Egypt).
- Extension KFW WF. (Egypt).
- Koudia WF (Morocco).

- UNE-EN 206 Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.

- UNE-EN 13670 Ejecución de estructuras de hormigón.

- Serie de normas UNE-EN 1992 Proyecto de estructuras de hormigón.

- ACI 207.2R Report on thermal and volume change.

- Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation by French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks

- <https://www.testo.com>

- <https://eqalaboratorios.com>

*José Luis Rivas Meco
Ingeniero Técnico de Obras Públicas.
Experto en Control de Ejecución de Procesos Críticos en
Obra Civil en Parques Eólicos.*

Quiero dedicar este artículo técnico a todo el equipo del departamento BOP Siemens Gamesa y a los más de “70 BOP Quality Engineers Inspector” que han estado a mí cargo en las obras civiles de parques eólicos en 4 continentes. Y agradecer su constancia, dedicación y profesionalidad en cada momento en los más de 12 años que hemos compartido laboralmente. ¡¡Gracias!!

Araceli Granado, Kepa Manrique, Carlos Matute, Diego Viana, Héctor Escudero, Álvaro Pérez, Pablo González, Eduardo González, Jesús Robles, Oscar García, Reina Orozco, Álvaro Fuentes, Álvaro González, Rebeca Monedero, Rui Lopes, Eneko Goikoetxea, Carlos Grau, Javier Santillana, Vicky Gkiouli, Javier Diéguez, Asier Zarandona, Antonio Muñoz, Joseba Mendialdua, Jon Zaldúa, Pedro Cobo, Azman Jalil, Ahmad El Nakib, Andrew Pascal, Refaat Pascal, Kassem Hassan, Mohamed Nabil, Mohamed Sayed, Patrick Pascual, Nelson Cabututan, Mike Carino, Medel de Guzmán, Tomas Santos, Rut López, Cesar de la Vega, Vladimir Santos, Candy Navarrete, Alejandro Castillo, Ramses Ortiz, Josué Vásquez, Ervin Ríos, Pavel Villaseñor, Octavio Zúñiga, Fernando Martínez, Francisco Quiroga, Carlos García Antelo, Carlos García Fernández, Francisco Jose Redondo, Raul Ruiz, Carlos Lortes, Jose Ángel Roca, Marcos Álvarez, Víctor Pico, Oussama Bourim, Ahmed Farouk, Said Jamkil, Tareq Waguih, Asier Sasian, Adrian Chipriana, Gustavo García, Abraham Mengiste, Taleb Khyar, Michael Assefa, Youssef Kamal, Chafik Mbirek y Mouhcine Abrilil.
