

Casos con aditivos

Mortero de cemento con nano sílice. Adherencia con resina epoxi de placas de acero al concreto.

Mortero de cemento con nano sílice

Referencia

Byung-Wan Jo, Chang.Hyun Kim and Jae-Hoon Lim (Hanyang University, Seoul, Korea). *Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles*. ACI Materials Journal, Vol 104, N° 4, July-August 2007.

El sílice amorfo o vítreo, que es el componente principal de una puzolana, reacciona con el hidróxido de calcio (resultante de la hidratación del silicato de calcio). La tasa de la reacción puzolánica es proporcional al área disponible para la reacción. Esta área aumenta con nano partículas, de ahí que sea posible agregar nano-SiO₂, con el propósito de mejorar el desempeño del concreto. Fueron evaluadas las resistencias de mortero de cemento con diferentes proporciones agua-cemento (w/c, w/cm o a-c). Estas proporciones fueron 0.23, 0.25, 0.32, 0.35 y 0.48, y cuatro contenidos de nano sílice: 3, 6, 9 y 12% por peso de cemento. Los resultados fueron comparados con las resistencias a la compresión de mortero de cemento con la adición de micro sílice también evaluada a una relación w/c de 0.35 y tres contenidos de micro sílice: 5, 10 y 15% por peso de cemento. Los resultados experimentales muestran que las resistencias a la compresión de morteros con nano sílice fueron todos más altos que aquellos conteniendo micro sílice a los 7 y 28 días. Las nano-partículas mostraron ser mejores en incrementar la resistencia que el micro sílice. El artículo también analiza los progresos de la hidratación utilizando escaneado electrónico (SEM), cantidades residuales para Ca(OH₂), y la tasa de evolución de calor. Los resultados de los exámenes indican que el SiO₂ en nano escala, no sólo mejora la micro-estructura como relleno, sino también como un activador de las reacciones puzolánicas. *Aunque no se mencionan en este artículo, existe una importante preocupación ambiental en el uso de partículas tan finas, especialmente en su etapa de preparación y manipuleo, debiendo cumplirse exigentes prácticas de seguridad.*

Introducción

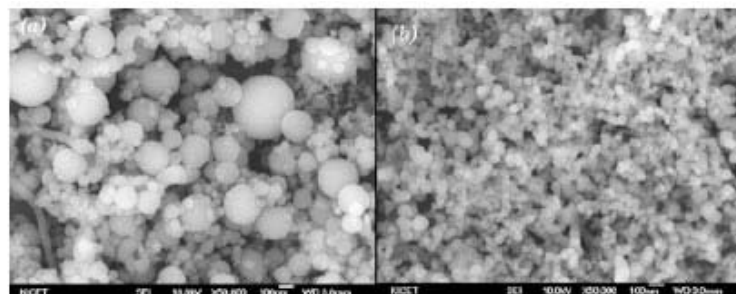
El uso de nano partículas (nanómetro = 10⁻⁹m) puede dar lugar a mejoras dramáticas en las propiedades de materiales de grano convencional, aún cuando se trate de la misma composición química. Existen experiencias con el uso de nano partículas en cemento para construcción con nano-SiO₂ y nano-Fe₂O₃ en relación con su potencial mecánico y térmico. Con el uso de partículas ultra finas, alto rango de agua y reducción de micro sílice, Se han obtenido resistencias de 200 a 800 MPa y mejoras en la energía de fractura, lo cual motiva el continuar con estas investigaciones. En este caso, agregando nano-SiO₂ de alta pureza (99%), y valores de alta fineza (50 m²/g). Se le compara con la influencia de micro sílice en el mortero de cemento.

Materiales para el experimento

El micro sílice está siendo usado como reemplazo parcial o como un aditivo en la tecnología de cemento. Para efectos de comparación, de una parte, el utilizado en este estudio fue en forma de polvo con 95% de SiO₂ y un tamaño de partícula de 0.1 μm. De otra, se empleó nano-SiO₂ en forma de partícula con 99.9% de Si O₂ y tamaño de partícula de 40 nm.

Composición química, %			
Compuesto	Cemento Portland ordinario	Micro sílice	Nano-SiO ₂
SiO ₂	22.0	95.0	99.9
Al ₂ O ₃	6.6	0.9	-
Fe ₂ O ₃	2.8	0.6	-
CaO	60.1	0.3	-
MgO	3.3	0.9	-
SO ₃	2.1	0.5	-
Pérdida en ignición (LOI)	2.6	2.1	0.1
Propiedades físicas			
Gravedad específica	3.15	2.33	-
Tamaño promedio de partícula	13 μm	0.1 μm	40 nm
SSA, m ² /g	0.38	20	50

La morfología de partículas de micro sílice y nano sílice se ilustran en la figura siguiente.



MORFOLOGÍA DE PARTÍCULAS DE MICRO SÍLICE Y NANO SÍLICE

Se adicionó un *reductor de agua de alto rango* (HRWRA, *High-Range Water-Reducing Admixture*), un super-plastificante (incrementa la trabajabilidad sin necesidad de agregar más agua) de densidad relativa 1.06 para evitar exudaciones o segregaciones. La arena, con un tamaño máximo 4.76 mm, gravedad específica de 2.6 y módulo de fineza de 2.7, fue usada en una

mezcla 1:2.45. También fue agregada agua a las mezclas para satisfacer las condiciones de saturación del agregado.

Proporciones de las mezclas

Se prepararon ocho especímenes (OPC: cemento portland ordinario; SF5, SF10 Y SF15: mortero de cemento conteniendo micro sílice en las proporciones indicadas; NS3, NS6, NS9 y NS12: mortero de cemento conteniendo nano-SiO₂ en las proporciones señaladas). En la tabla siguiente se indican los contenidos de los especímenes:

Proporciones de mezcla en los especímenes

Nombre del espécimen	w/cm,%	Agua, g	Cemento, g	Arena, g	Micro sílice, g	Nano-SiO ₂ , g	HRWA, %
OPC	35	89.25	255	625	-	-	1.2
SF5			242.3		12.8	-	1.9
SF10			229.5		25.5	-	2.1
SF15			216.8		38.3	-	2.2
NS3			247.3		-	7.7	1.8
NS6			239.7		-	15.3	2.4
NS9			232.0		-	23.0	2.9
NS12			224.4		-	30.6	3.3

Procedimiento de prueba

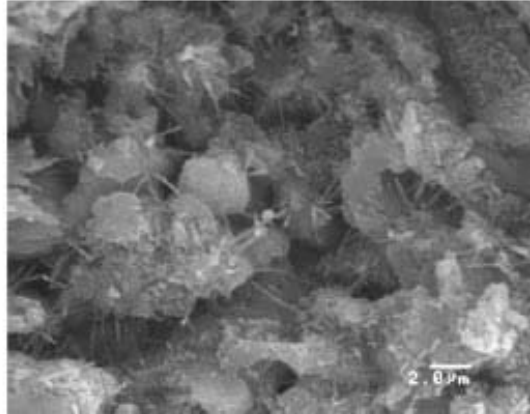
Se empleó un mezclador rotatorio y se siguieron las acciones que se indican:

- Al agregar el nano-sílice, según el caso, la mezcla fue agitada y la mezcla fue a alta velocidad (120 rpm) por 1 minuto.
- Al agregar el micro-sílice, según correspondió, la velocidad fue media (80 rpm) por 30 segundos adicionales.
- A velocidad media, la arena fue agregada gradualmente.
- El ingrediente reductor de agua de alto rango, HRWRA, fue agregado y agitado a alta velocidad por 30 segundos adicionales.
- La mezcla se tuvo en reposo por 90 segundos y entonces mezclada por 1 minuto a alta velocidad.

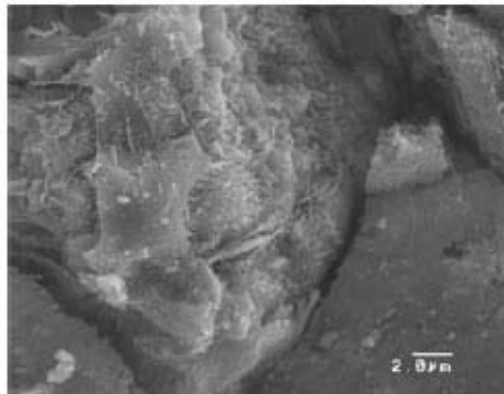
Para cada mezcla, se prepararon seis especímenes cúbicos de 50 mm de lado para las pruebas a la compresión. Se retiró cada molde al transcurrir un día. Se curaron con agua a 25±1.67°C por 7 y 28 días. Los cubos fueron probados a la compresión usando una máquina de prueba universal bajo control de carga de 0.24 MPa/s. Fueron analizadas observaciones con un microscopio de escaneo electrónico (SEM), conduciéndose la prueba residual de Ca(OH)₂, así como la tasa de evolución de calor con análisis calorimétrico diferencial a fin de monitorear el proceso de hidratación de las pastas de cemento.

Micro-estructura

Se muestran los micrográficos SEM de pastas de cemento con y sin nano-SiO₂ a los 7 días. La superficie de fractura de la pasta de cemento portland ordinario con 7 días de hidratación mostró cristales en forma de aguja en los espacios llenos con agua. Mientras que la microestructura de la mezcla conteniendo nano sílice se muestra densa, de formación compacta de productos hidratados.



MICROGRÁFICO SEM DE UNA PASTA DE CEMENTO PORTLAND ORDINARIO



MICROGRÁFICO SEM DE UNA PASTA DE CEMENTO CON NANO SILICE

Cantidad residual de hidróxido de calcio

La reacción puzolánica (reflejada en mayor resistencia y menor distribución de los tamaños de poro), puede ser seguida al monitorear la disminución de hidróxido de calcio. El silicio amorfo o vítreo reacciona con el hidróxido de calcio formando una hidratación de silicato de calcio. Se encontró del análisis cuantitativo a los 7 días, que el remanente de Ca(OH)₂ en las pastas, fue de 4.56% (NS10), 6.09% (SF10), y 6.89% (OPC).

Resistencia a la compresión

En este estudio se utiliza un error de 5%, o un nivel de confianza del 95%. En la siguiente tabla se comparan los resultados bajo la misma proporción de agua, *w/c*, de 0.35. Las diferencias pueden ser atribuidas a la reacción puzolánica, la cual es más efectiva con las nano-partículas. Estas llenan

mejor los poros aumentando la resistencia, en su comparación con el uso de micro-sílice.

Resistencia a la compresión, MPa, en especímenes con el mismo w/c

Nombre del espécimen	7 días	28 días
OPC	38.26	44.64
SF5	38.64	43.89
SF10	40.22	47.12
SF15	41.61	50.47
NS3	38.87	47.85
NS6	40.19	50.67
NS9	43.76	51.37
NS12	48.74	58.13

El estudio también estudia la influencia de la variación de la relación w/c , así como del ingrediente plastificante HRWRA. Al incrementarse el valor de w/c entre 0.23 y 0.48, y al aumentarse también el contenido del nano-sílice, se incrementa la resistencia. El estudio considera que el óptimo nivel de nano-SiO₂ para elevar la resistencia es de 6% con w/c de 0.23. Todavía al 12% no se encuentran efectos adversos sobre la resistencia.

Resistencia de especímenes conteniendo partículas de nano sílice

Material: mortero de cemento con nano sílice	w/c, %	NS, %	HRWRA, %	Resistencia a la compresión, MPa	
				7 días	28 días
	0.23	0	3.92	69.26	78.58
	0.25	0	3.84	56.23	72.81
	0.32	0	1.71	44.56	58.27
	0.35	0	1.19	38.26	44.64
	0.48	0	0	25.93	32.64
	0.23	3	4.26	74.34	87.84
	0.25	3	4.18	58.70	77.95
	0.32	3	2.30	45.06	59.65
	0.35	3	2.05	38.87	47.85

Resistencia de especímenes conteniendo partículas de nano sílice

0.48	3	0.68	29.74	38.27
0.23	6	5.12	88.16	102.28
0.25	6	4.95	64.66	91.09
0.32	6	3.24	47.02	60.71
0.35	6	2.90	40.19	50.67
0.48	6	0.94	31.52	41.57
0.23	9	5.80	80.87	97.48
0.25	9	5.63	74.72	97.27
0.32	9	3.75	50.23	65.63
0.35	9	3.50	43.76	51.37
0.48	9	1.36	32.51	44.24
0.23	12	6.48	78.53	92.85
0.25	12	6.39	67.15	91.62
0.32	12	4.01	53.25	69.16
0.35	12	3.92	48.74	58.13
0.48	12	1.71	37.09	46.54

También será notado que los cambios deben estar acompañados de variaciones del ingrediente HRWA a fin de evitar que los especímenes no sufran excesiva desecación y agrietamiento.

Conclusiones

Las pruebas de resistencia a la compresión muestran que las partículas de SiO₂ a nano escala, mejoran la microestructura del cemento y promueven la reacción puzolánica. Los resultados son consistentes con la mejora de la resistencia, según fue esperado.

Adherencia con resina epoxi de placas de acero al concreto

Referencia

Antonio J. B. Tadeu and Fernando J. F. G. Branco (University of Coimbra, Coimbra, Portugal). *Shear Tests of Steel Plates Epoxy-Bonded to Concrete under Temperature*. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 12, N° 1, February, 2000. ASCE, USA.

Agregando placas de acero se busca incrementar la flexión y la resistencia al corte de elementos de concreto estructural. Se usa resina epoxi (o poliepóxido, *un polímero que se endurece cuando se mezcla con un agente*

catalizador o endurecedor) para fijar ambos elementos. Bajo condiciones normales de carga, el pegamento se comporta bien. Sin embargo, debido a que el material usado es un compuesto orgánico, su resistencia es sensible al incremento de temperatura, y podría fallar en el caso de un incendio. En este artículo se reporta el comportamiento de varios tipos de concreto pegados a placas de acero con resina epoxi bajo condiciones de elevada temperatura y carga al corte.

Introducción

De 1967 y 1971 son los primeros estudios que consideran el uso de resinas epoxi con concreto y mortero para reforzar externamente elementos de concreto, como parte de un trabajo de rehabilitación. Continuaron en 1977, 1985, 1993 y 1994, incorporando pruebas de flexión y corte, el tratamiento de la superficie a pegar, la influencia del espesor y el área del pegamento, así como la calidad del concreto. Estos estudios no consideraron la variable temperatura.

En 1977, se desarrolló una prueba con dos losas de 1.0 x 0.5 x 0.14 m ligadas con un pegamento epoxi. Se reportó que éste se calentó más rápidamente que el concreto, confirmándose la existencia de fisuras en el concreto en su interface con el pegante. En el mismo año se estudiaron casos similares para probar diferentes clases de aislantes al fuego. En adelante, los estudios recomiendan protección de las zonas pegadas frente a incremento del calor, y mantener temperaturas por debajo de 65° C. En estudios posteriores se muestra la debilidad del pegamento frente a la temperatura.

Este estudio describe la influencia de la temperatura en el pegado de placas de acero con concreto a través de resina epoxi comercial, cuando son sometidos a cargas de corte. Se consideraron especímenes con tres diferentes resistencias de concreto, sometidos a calor y cargas de corte. La zona de pegado fue definida con ayuda de elementos finitos.

Características de los materiales

En relación con el concreto, se consideraron tres especímenes con diferentes resistencias a la compresión. Se midieron las siguientes variables: valor medio y desviación estándar de la resistencia a la compresión a los 28 días de cubos de concreto ($f_{cm\ cub}$)(Δf_{cm}), el valor medio y la desviación estándar del módulo de elasticidad del concreto (E_{cm})(ΔE_{cm}). Se presentan los valores.

Propiedades de los especímenes de concreto

Propiedades	Especímen A	Especímen B	Especímen C
$f_{cm\ cub}$ (MPa)	27.9	44.4	74.1
Δf_{cm} (MPa)	0.890	0.969	2.111
E_{cm} (GPa)	28.9	32.9	38.3
ΔE_{cm} (GPa)	3.09	0.245	0.395

En relación con el acero y el epoxi: el valor medio y la desviación estándar de la resistencia a la tensión (f_{ym})(Δf_{ym}), el valor medio y la desviación estándar del módulo de elasticidad (E_m)(ΔE_m). Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Propiedades del acero y el epoxy

Propiedades	Acero St-37	Epoxi
E_m (GPa)	200	3.8
ΔE_m (GPa)	-	0.54
f_{ym} (MPa)	360	24.0
Δf_{ym} (MPa)	-	1.86

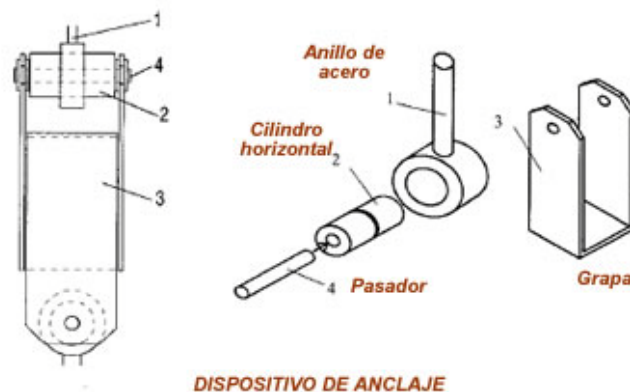
Se usaron relaciones de Poisson de 0.2, 0.3 y 0.37 para el concreto, acero y resina, respectivamente.

Recursos de laboratorio



La máquina de pruebas, como la de la figura, fue equipada con celdas de cargas de 120kN e instrumentadas para adquirir los desplazamientos y las cargas. Para las pruebas de calor se usó un horno que permite trabajar temperaturas hasta 425° C, y se empleó un captador de datos que también permite su registro.

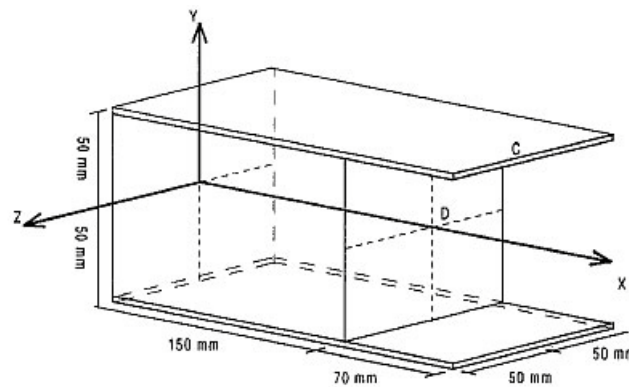
Especímenes e instrumentación



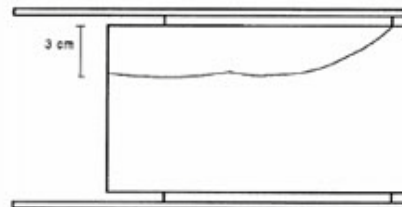
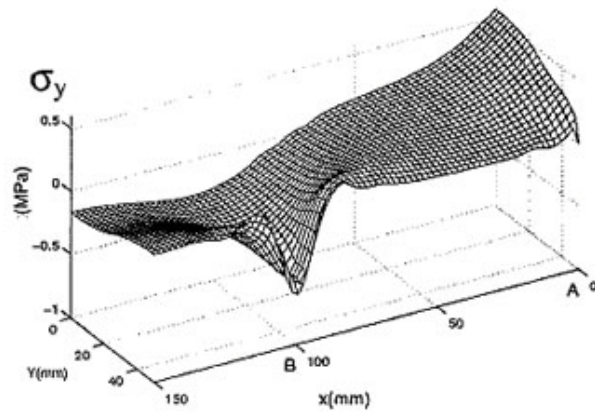
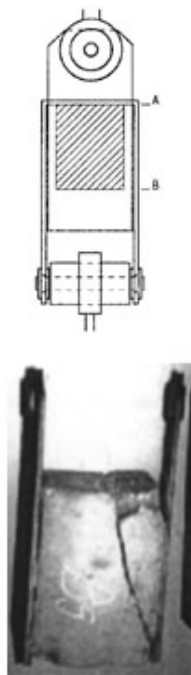
Fue construido un dispositivo de anclaje o sujeción que permita aplicar las cargas de tracción a las placas de acero mientras que simultáneamente los bloques de concreto fueron sometidos a cargas de compresión. Las partes se indican en la figura. El anillo se fija a la máquina a través de un rodillo. Se inserta el cilindro horizontal. El pin o pasador se inserta a este cilindro, y en el otro extremo se fija a las placas de acero que serán probadas. El bloque de concreto es sometido a fuerzas de compresión por medio de una pieza de acero o grapa. Los soportes fueron dimensionados para tomar la carga máxima de 120 kN.

Zona de pegado

Se desarrollaron varios modelos de elementos finitos (sin variaciones de temperatura) para conocer la distribución de esfuerzos y determinar la zona apropiada de pegado. En el modelo se aplicó una carga de 5 kN en cada placa en la dirección del eje x y en el extremo C de la placa. No se permiten desplazamientos en la dirección del eje x de la cara D.



MODELO PARA EL BLOQUE DE CONCRETO



**ANÁLISIS Y PRUEBA SEGÚN ZONA DE PEGADO
(SIN EFECTO DE TEMPERATURA)**

Los análisis mostraron que los valores de los esfuerzos σ_z , τ_{xz} , y τ_{yz} , fueron cercanos a cero. En los diferentes modelos analizados, el máximo valor de tracción registrado se obtuvo a lo largo del eje y ($\sigma_y = 0.55$ MPa), el mismo que ocurrió cuando el pegado fue hecho al extremo del bloque del concreto, en la cara A, según la figura. Este máximo disminuye al alejarse el pegado del extremo. Los picos de esfuerzo σ_x , también se presentan en los extremos del pegado.

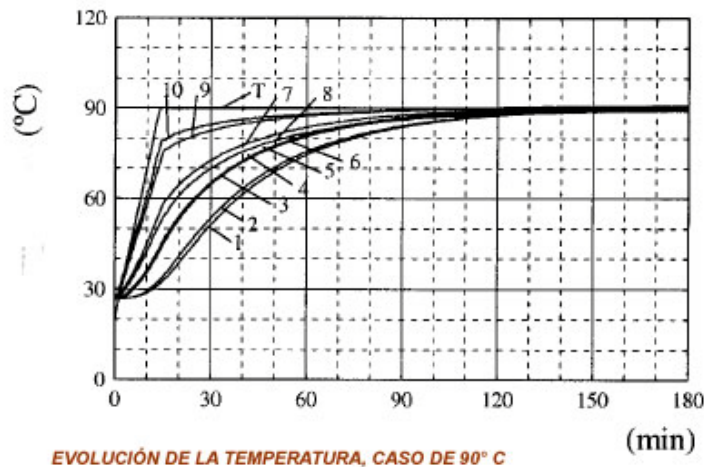
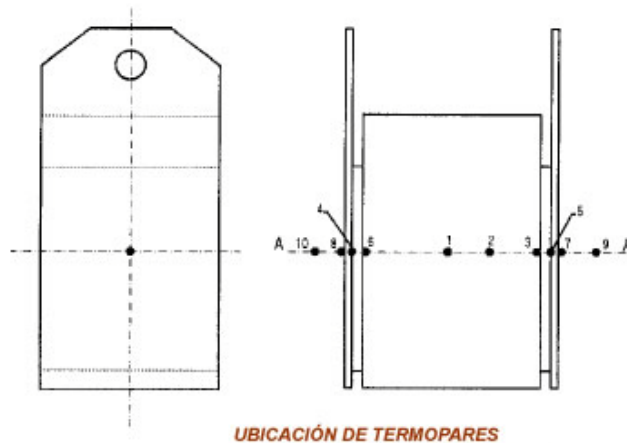
La distribución de los esfuerzos tangenciales no depende mayormente de la zona de pegado, variando el máximo entre 0.93 y 0.97 MPa.

Condiciones de pegado

Existe consenso sobre la adecuada preparación de las superficies a pegar. El concreto fue tratado con chorros de arena, y el acero golpeado. Se utilizaron guías para asegurar el alineamiento de las placas.

Pruebas con temperatura

El comportamiento del pegamento en relación con la temperatura fue estudiado bajo cinco niveles: temperatura ambiente, 30, 60, 90 y 120° C. Se incrementó gradualmente en 5° C/min hasta alcanzar la temperatura de prueba, la misma que se mantuvo hasta obtener un nivel uniforme en cada espécimen.



Los *termopares* fueron distribuidos en el eje de simetría del espécimen. Se registraron variaciones de temperatura cada 20 s.

Resultados

Se efectuaron pruebas de corte para cada uno de los cinco estados de temperatura señalados, registrándose los desplazamientos con el movimiento de la máquina de tracción. En todos los casos, después de la fase inicial de carga, la fuerza se incrementa a una tasa casi constante con el incremento del desplazamiento. La falla ocurrió súbitamente sin mostrar señales de fluencia.

En ausencia de calor, la falla ocurrió por ruptura del concreto.

La resina epoxi colocada entre el acero y el concreto exhibe un pobre comportamiento frente al incremento de temperatura. A los 60° C ya ha perdido casi la mitad de la resistencia en las condiciones previas de calentamiento. A los 90° C, esta resistencia se redujo a valores entre 24 y 29° C.

A los 120° C se observó además una lámina de agua en la superficie del concreto (seguramente por evaporación del agua libre en éste), en adición al deterioro de la resina.