



Julián David Fonseca López
PhD. Sandra Díaz Bello



ASPECTOS QUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

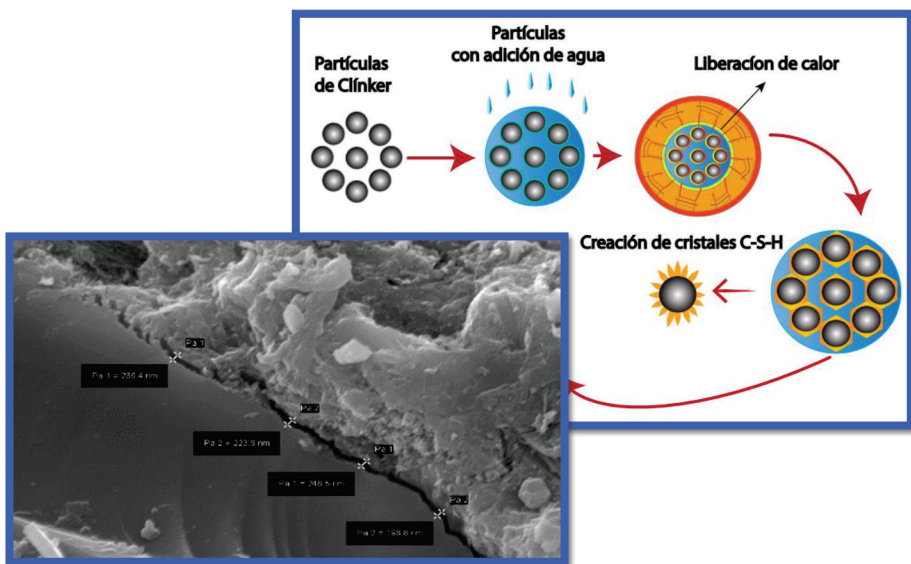
ISBN 978-958-5471-71-9



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A

ASPECTOS QUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

Esta cartilla va dirigida a los docentes y estudiantes de Ingeniería Civil, con el objetivo de darles a conocer conceptos básicos sobre la química del cemento al momento de realizar el fraguado, cómo esto afecta al concreto y qué es lo que pasa desde el punto de vista de la termodinámica en este proceso de hidratación.



Julián David Fonseca López
PhD. Sandra Díaz Bello

ASPECTOS QUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS
DEL CEMENTO Y EL CONCRETO

Julián David Fonseca López
PhD. Sandra Díaz Bello

Comité editorial

Fr. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.
Rector

Fr. Omar Orlando SÁNCHEZ SUÁREZ, O.P.
Vicerrector Académico

Fr. Héctor Mauricio VARGAS RODRÍGUEZ, O.P.
Vicerrector administrativo y Financiero

María Ximena ARIZA GARCÍA
Directora Ediciones Usta Tunja

Sandra Consuelo DÍAZ BELLO
Directora Unidad de Investigación e Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ
Director Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación

Primera edición, 2020

ISBN: 978-958-5471-71-9

Corrección de Estilo:
Fr. Ángel María BELTRÁN NARANJO, O.P.

Diagramación e impresión
Grafiboy - Cel. 310 3047541 - Tunja

Todos los derechos reservados conforme a la ley. Se permite la reproducción citando fuente.

El pensamiento que se expresa en esta obra, es exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete la ideología de la Universidad Santo Tomás.



Ediciones Usta
Universidad Santo Tomás
2020

Departamento Ediciones Usta Tunja
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro por cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente por fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo. Ley 23 de 1982.

TABLA DE CONTENIDO

BIOGRAFÍA.....	4
INTRODUCCIÓN	5
PRESENTACIÓN.....	5
¿Qué es el cemento?.....	6
¿QUÉ ES?	6
¿CUÁL ES SU FUNCIÓN EN EL CONCRETO?	7
¿CÓMO SE PRODUCE EL CEMENTO?	7
¿Cuáles son las reacciones químicas que se presentan?	9
Termodinámica del cemento	11
Reacciones Delta H, S, G.	11
CAPACIDAD CALORÍFICA	15
Zona de transición interfaz (ITZ)	16
DISCUSIÓN	18
AGRADECIMIENTOS	19
BIBLIOGRAFÍA	19

BIOGRAFÍA



Julián David Fonseca López fue estudiante de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, recibió su grado en el año 2018. Actualmente, realiza una maestría en ingeniería civil con énfasis en Geotecnia en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y trabaja como ingeniero civil en INGEOTES.



Sandra Consuelo Díaz Bello ingeniera metalúrgica de la Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia, Magister en metalurgia y ciencia de los materiales de la Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia y doctora en ingeniería ciencia y tecnología de los materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, fue docente de la Facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás en el periodo comprendido entre el 2017-2018 y actualmente directora de investigación e innovación de la misma Universidad.

INTRODUCCIÓN

La química y la termodinámica de los materiales son dos temas que permiten evaluar la generación de nuevos materiales.

Para el caso específico del cemento y el concreto se generan diferentes mezclas produciendo varias reacciones químicas, que de forma macroscópica son difíciles de percibir y sus efectos se van a observar a través del tiempo, por medio de sus propiedades mecánicas.

El objetivo de la cartilla es dar a conocer algunos parámetros que deben tenerse en cuenta cuando se elabora un concreto y se modifican las mezclas y componentes de estas. Es importante destacar que hoy en día se hacen muchas modificaciones a las mezclas de concreto variando los agregados gruesos, haciendo sustituciones parciales de los agregados finos y gruesos, y generando mezclas con diferentes tipos de cemento que también cambian químicamente su composición generando nuevos materiales de construcción que deben responder a la normativa colombiana.

PRESENTACIÓN

La cartilla es necesaria teniendo en cuenta que el conocimiento sobre el cemento desde el punto de vista de la química es bajo entre los estudiantes de ingeniería civil y los nuevos profesionales. Por esta razón, se intenta dar la información y reducir el tiempo tomado en la formación teórica de los conocimientos impartidos en las aulas de clase. También se espera que ésta, sea una herramienta base para generar nuevos proyectos de investigación, en donde se parta de la química para la generación de nuevos materiales y nuevas ideas que aún no se han concebido. Adicionalmente, se muestran los compuestos químicos que hacen parte del cemento, las etapas de formación del concreto, se da a conocer la zona de transición interfacial por sus siglas en inglés *ITZ* y su influencia en las propiedades mecánicas del concreto.

¿QUÉ ES EL CEMENTO?

El cemento es el material de construcción ligante más importante, que después de mezclarse con el agua crea una pasta procesable con la capacidad de endurecerse en el aire y debajo del agua. Los edificios, las construcciones técnicas e industriales, las instalaciones de infraestructura, las presas, las carreteras o los puentes que nos rodean no se habrían creado sin cemento. –(Igliński & Buczkowski, 2017).

Se cree que uno de los inventores del cemento Portland es Joseph Aspdin, quien en 1824 obtuvo una patente sobre el proceso de obtención de una carpeta creada a partir de una mezcla de caliza y arcilla asada, y que usó por primera vez el nombre "cemento Pórtland" ya que se parecía a una piedra que abunda en Pórtland, Inglaterra. –(Igliński & Buczkowski, 2017)

¿QUÉ ES?

El cemento hidráulico está constituido por una gran variedad de elementos y compuestos. Los compuestos que están en mayor porcentaje son óxidos de calcio, sílice, hierro, aluminio. Estos elementos son los más importantes en el cemento ya que forman las siguientes fases: (Silicato Tricálcico [C_3S]), (Silicato dicálcico [C_2S]), (Aluminato Tricálcico [C_3A]), (Ferroaluminato tetracálcico [C_4AF]). (Padilla, Jiménez, Brenes, Delgado, & Castro, 2017)

Tabla 1: Elementos químicos del cemento.

DESIGNACIÓN	FORMULA	ABREVIATURA
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato Tricálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
Cal libre	CaO	

¿CUÁLES SU FUNCIÓN EN EL CONCRETO?

Los cementos sufren una reacción química que en contacto con el agua hace que se endurezcan. Esta reacción, se denomina hidratación, el cemento se mezcla con el agua para formar una pasta. Cuando se mezcla la pasta con los agregados (arena y grava), esta actúa generándose el concreto, que es un material de construcción muy versátil y es el más usado en todo el mundo.(Kosmatka, Panarese, & Bringas, 1992)

¿CÓMO SE PRODUCE EL CEMENTO?

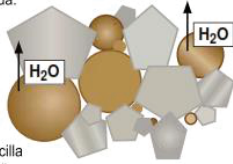
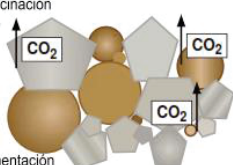
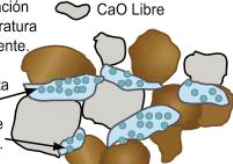
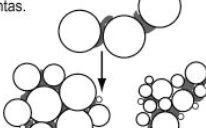
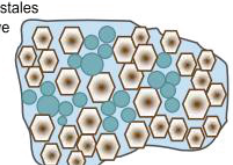
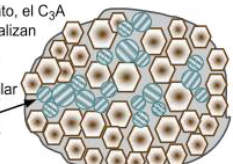


Ilustración 1. Compuestos utilizados para la producción del cemento

El cemento portland se produce de la pulverización del Clinker, el cual consiste en la combinación de materiales en cantidades apropiadas de calcio, sílice, alúmina y hierro. En el esquema anterior, se ve la fuente de obtención más común de los recursos necesarios para la fabricación de cemento. La fabricación del Clinker tiene varias etapas las que se caracterizan por la variación de temperatura y las reacciones que ocurren en éstas. A continuación se muestra el proceso de fabricación del Clinker desde la materia prima hasta el producto final. (Kosmatka, Panarese, & Bringas, 1992)

Ilustración 2

Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final.

A 700°C Las materias primas son un polvo de flujo libre 	Las partículas son sólidas. No hay reacción entre las partículas. 	Hay pérdida de agua. La arcilla deshidratada se recrystaliza.  ● Partícula de arcilla ● Partícula de caliza
700-900°C El polvo aun fluye libremente 	Las partículas aun son sólidas. 	A medida que la calcinación continua, la cal libre aumenta. La sílice reactiva combina con el CaO para empezar a formar C₂S. La calcinación mantiene la temperatura de alimentación en 850°C. 
1150-1200°C Las partículas empiezan a ser "pegajosas" 	Las reacciones empiezan entre las partículas sólidas. 	Cuando la calcinación termina, la temperatura se eleva rápidamente. Los cristales pequeños de belita se forman por la combinación de silicatos con CaO.  CaO Libre
1200-1350°C Las partículas comienzan a aglomerarse, ellas se mantienen juntas por el líquido. La rotación del horno empiezan la cocción de los aglomerantes 	Las fuerzas capilares del liquido mantienen las partículas juntas. 	La fase liquida se forma cuando la temperatura excede 1250°C. El liquido permite la reacción entre la belita y el CaO libre, formando alita.  Cristales de belita redondeados Cristales de belita angulares
1350-1450°C La aglomeración de las partículas continua a medida que el material cae encima uno del otro 	Si hay liquido suficiente, se forman nódulos La insuficiencia de liquido producirá un clinker polvoriento. 	La cantidad de cristales de belita disminuye y su tamaño aumenta. El tamaño y la cantidad de alita aumentan. 
Enfriamiento 	Los nódulos de clinker no cambian durante el enfriamiento 	Bajo el enfriamiento, el C₃A y el C₄AF se cristalizan en la fase liquida. La estructura laminar aparece en los cristales de belita. 

Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992).

Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concret

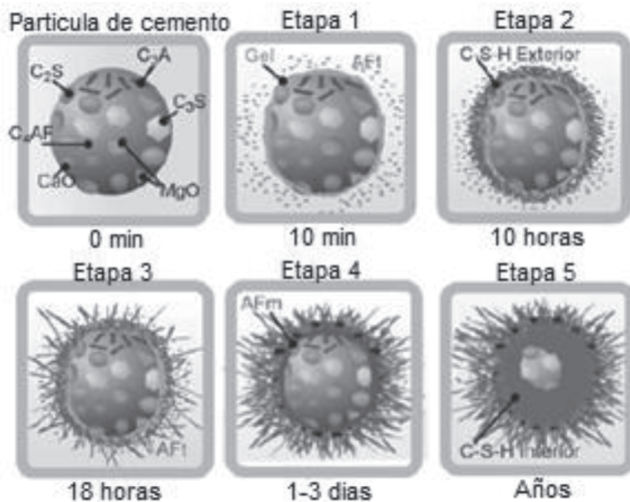
¿CUÁLES SON LAS REACCIONES QUÍMICAS QUE SE PRESENTAN?

En el cemento al ser mezclado con el agua se genera la reacción de hidratación. En el proceso de hidratación se presentan fases en la que estos compuestos reaccionan en mayor proporción que otras junto con algunas impurezas.– (Niño Hernandez, n.d.)

En el proceso de hidratación se generan varias fases, en primer lugar, la Alita que tiene un alto contenido de C_3S , de esta fase depende el desarrollo de la resistencia mecánica. Reacciona muy rápido con el agua, tiene altos porcentajes de hidratación afectando el tiempo de fraguado y la resistencia inicial–(Niño Hernández).

La segunda fase en grado de importancia es la Belita, su componente principal es C_2S , este reacciona lentamente con el agua, produce bajo calor de hidratación y contribuye en el desarrollo de la resistencia después de 7 días de fraguado.–(Niño Hernandez, n.d.) La dos fases mencionadas anteriormente, determinan el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estos dos compuestos suma el 75% del cemento aproximadamente.–(Niño Hernández, n.d.)

Ilustración 3: Mecanismo de formación de la pasta



Sociedade Portuguesa de Materiais., C., Carvalho, P. A. de, Bordado, J. C., & Nunes, A. (2009). Ciência e tecnologia dos materiais. Ciência & Tecnologia dos Materiais (Vol. 21). Sociedade Portuguesa de Materiais. Retrieved from

La fase aluminato está constituida por el compuesto C_3A , con algo de impurezas de SiO_3 y MgO que reaccionan muy rápido con el agua, contribuye con un alto calor de hidratación e incrementa la resistencia inicial. Además, da al concreto, propiedades inestables como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita al 5 y 15% del cemento.-(Niño Hernandez, n.d.)

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta encontrarse con la capa fibrosa de otra partícula de Clinker. El crecimiento de las fibras resulta en la rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de la resistencia, de esta manera el concreto, fragua y se endurece. La hidratación sigue desde que existan las condiciones favorables de temperatura, humedad y espacio para la formación de los productos de hidratación. Gran parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero se ha reportado aumento de resistencia hasta en un lapso de 30 años.-(Niño Hernandez, n.d.)

El cemento al ser mezclado con agua genera reacciones de hidrólisis e hidratación formando una pasta. Este endurecimiento se presenta por la formación de silicatos de calcio hidratados y de aluminatos hidratados como resultado de las reacciones ya expuestas, por su propiedad de conglomerante hidráulico es un material básico en la construcción. (Ho et al., 2018)

Los siguientes esquemas representan la reacción de hidratación de los silicatos de calcio. El hidrato de calcio hidratado o C-S-H, la resistencia máxima y la durabilidad de un cemento elevado en C_2S serán mayores que uno con una porción elevada de C_3S . (Abbas & Majdi, 2017)

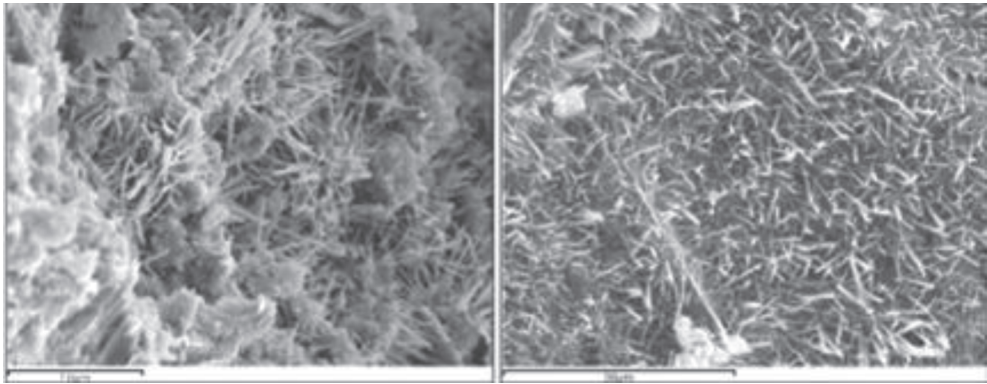
- $2C_3S + 11H = C_3S_2H_8$ (C-S-H) + $3CH$ (Hidróxido de calcio) (1)
- $2C_2S + 9H = C_3S_2H_8$ (C-S-H) + CH (Hidróxido de calcio) (2)

C_3A (Aluminato tricálcico) interactúa con el agua de forma rápida, esta reacción puede retardarse con la adición de yeso, por lo que los últimos productos de hidratación se alteran con la cantidad de yeso. Por lo general al hidratarse C_3A se forma Etringita que posteriormente se convierte en monosulfoaluminato, este proceso es reversible si se agrega un nuevo

exportador de sulfato. El aluminato cálcico participa poco en la resistencia de la pasta de cemento.(Abbas & Majdi, 2017)

- $C_3A + 3CSH_2 + 26H = C_6AS_3H_{32}$ (Etringita) (3)
- $C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H = 3C_4ASH_{12}$ (Monosulfoaluminato) (4)

Ilustración 4: Etringita en pasta de cemento a los 3 días de curado.



Tashima, M. M., Fioriti, C. F., Akasaki, J. L., Bernabeu, J. P., Sousa, L. C., & Melges, J. L. P. (2012). Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade de pozolânica. Ambiente Construído

TERMODINÁMICA DEL CEMENTO

La termodinámica clásica estudia el calor y todo tipo de forma de energía en estados de equilibrio. En termodinámica se busca encontrar las variables extensivas de los elementos como lo son la entropía, la entalpía y la energía libre de Gibbs.

Reacciones Delta H, S, G.

Delta H significa el valor de **Entalpía** en una reacción. El cambio de esta variable genera la cantidad de energía **atraída o cedida** por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema transfiere a su entorno(Gaskell & Laughlin, 2017).

Delta S representa la **Entropía**, que es la magnitud física que mide la parte de la energía que se pierde y que no puede utilizarse para realizar trabajo. La entropía **describe la irreversibilidad de los sistemas termodinámicos** (Gaskell & Laughlin, 2017). Por ejemplo, cuando se pone un cubo de hielo en un vaso de agua a temperatura ambiente, el cubo pasa de estado sólido a líquido, debido a que se alcanza un equilibrio térmico. Lo anterior porque el universo tiende a distribuir la energía uniformemente, es decir, a maximizar la entropía.

Delta G es la **Energía libre de Gibbs** se emplea en química para explicar si una reacción se da de manera espontánea o si se requiere cierta interacción con los alrededores para que ocurra y se denomina no espontáneo. (Gaskell & Laughlin, 2017).

A continuación, se muestran los valores de las variables termodinámicas para los compuestos usando el programa HSC 6.0:

Tabla 2: Silicato Tricálcico

*3CaO*SiO₂	Silicato Tricálcico			
T	Cp	ΔH	ΔS	ΔG
°C	J/(mol*K)	kJ/mol	J/(mol*K)	kJ/mol
0,000	161,507	-2933,370	154,003	-2975,436
10,000	165,817	-2931,733	159,889	-2977,005
20,000	169,729	-2930,055	165,712	-2978,634
24,850	171,500	-2929,227	168,512	-2979,444
30,000	173,297	-2928,340	171,466	-2980,320
40,000	176,561	-2926,590	177,144	-2982,063

Fuente: autor

Para el Silicato Tricálcico se tiene que la Entalpía, al ser combinado con otra sustancia genera una reacción exotérmica ya que libera calor, en cuanto a la Entropía al ser positiva muestra que esta especie puede volver a su estado original, ósea, que el proceso es reversible y en cuanto a la energía libre de Gibbs al ser negativa indica que el proceso se desarrolla de forma espontánea sin la necesidad de la intervención de agentes externos.

Tabla 3: Silicato Cálcico Hidratado

*3CaO*2SiO₂*3H₂O		Silicato cálcico Hidratado		
T	Cp	ΔH	ΔS	ΔG
°C	J/(mol*K)	kJ/mol	J/(mol*K)	kJ/mol
0,000	310,441	-4790,304	284,140	-4867,917
10,000	318,036	-4787,162	295,440	-4870,815
20,000	325,057	-4783,946	306,601	-4873,826
24,850	328,278	-4782,361	311,961	-4875,326
30,000	331,578	-4780,662	317,614	-4876,947
40,000	337,663	-4777,316	328,475	-4880,177
50,000	343,363	-4773,910	339,179	-4883,516

Fuente: autor

El silicato cálcico hidratado de igual manera muestra un calor de formación (H) negativo, lo que evidencia que el proceso es completamente exotérmico, y es un compuesto que se genera de forma espontánea tal como se evidencia en los valores de energía libre de Gibbs (G).

Tabla 4: **Silicato Dicálcico**

*2CaO*SiO₂	Silicato Dicálcico			
T	Cp	ΔH	ΔS	ΔG
°C	J/(mol*K)	kJ/mol	J/(mol*K)	kJ/mol
0,000	121,923	-2318,351	109,816	-2348,347
10,000	124,766	-2317,117	114,252	-2349,467
20,000	127,365	-2315,856	118,628	-2350,632
24,850	128,546	-2315,236	120,727	-2351,212
30,000	129,750	-2314,570	122,940	-2351,840
40,000	131,948	-2313,262	127,187	-2353,090
50,000	133,983	-2311,932	131,367	-2354,383

Fuente: autor

Tabla 5: **Hidróxido de Calcio**

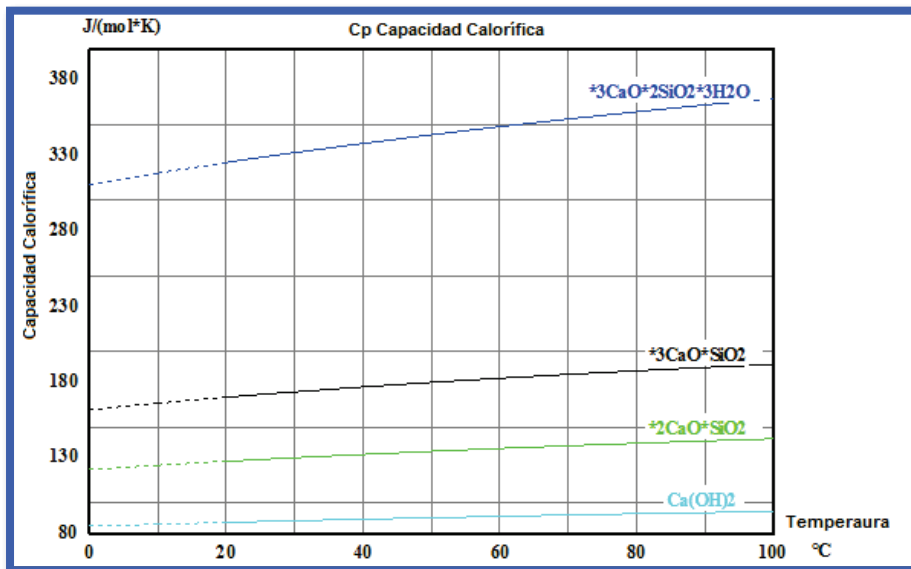
Ca(OH)₂	Hidróxido de Calcio			
T	Cp	ΔH	ΔS	ΔG
°C	J/(mol*K)	kJ/mol	J/(mol*K)	kJ/mol
0,000	84,432	-988,050	75,870	-1008,774
10,000	85,725	-987,199	78,929	-1009,548
20,000	86,922	-986,336	81,925	-1010,352
24,850	87,472	-985,913	83,356	-1010,753
30,000	88,035	-985,461	84,860	-1011,186
40,000	89,074	-984,576	87,734	-1012,049
50,000	90,048	-983,680	90,549	-1012,941

Fuente: autor

Los datos de las tablas de los compuestos que se tienen en el fraguado del cemento muestran diferentes valores para las capacidades caloríficas. El silicato cálcico hidratado es una especie que evidencia capacidades caloríficas (C_p) más altas, esto quiere decir, que a mayor C_p mayor entrega de calor. Por eso es importante tener en cuenta que así mismo los calores de formación (H) son más negativos, es decir, los procesos de liberación de calor son mayores para esta especie que se forma cuando se mezcla con el agua y los agregados que actúan en la formación del concreto.

CAPACIDAD CALORÍFICA

Grafica 1: Capacidad Calorífica de las especies que reaccionan y se forman en la obtención del concreto.



Fuente: autor

La capacidad calorífica es la variación de la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de una cantidad de sustancia determinada. Entre mayor sea la masa es necesario mayor energía (Gaskell & Laughlin, 2017). Es

importante saber cuál es la capacidad calorífica de las especies al estudiar reacciones químicas ya que esto puede afectar sus características mecánicas.

En la gráfica 1 se muestra la capacidad calorífica de las especies que se encuentran en el proceso de hidratación del cemento, en donde se evidencia que la reacción es exotérmica ya que el silicato cálcico hidratado tiene una mayor capacidad calorífica que el silicato dicálcico o el silicato tricálcico.

ZONA DE TRANSICIÓN INTERFAZ (ITZ)

La zona de transición de interfaz (ITZ) es el área más débil en el medio trifásico del concreto, que afecta directamente la resistencia, rigidez y durabilidad del concreto. (Zhang, Zhang, Liao, & Wang, 2018). Es una capa formada entre un agregado y la pasta de cemento, compuesta por una doble capa de "película dúplex" de cristales de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) orientada al lado del agregado y silicato de calcio hidratado, gel H-S-C, orientado al lado de la pasta, con un espesor de aproximadamente 1 μm . (Vargas, Restrepo-Baena, & Tobón, 2017)

El más alejado de los agregados es la zona de interfaz principal de aproximadamente 40-50 μm de espesor, que contiene cristales más grandes de hidróxido de calcio. En esta zona, las partículas de cemento no pueden unirse íntimamente con las partículas relativamente grandes del agregado, "el efecto de pared"; en consecuencia, el ITZ tiene una porosidad mucho más alta (2 a 3 veces) que la de la pasta de cemento endurecida más alejada de las partículas de agregado. (Vargas et al., 2017)

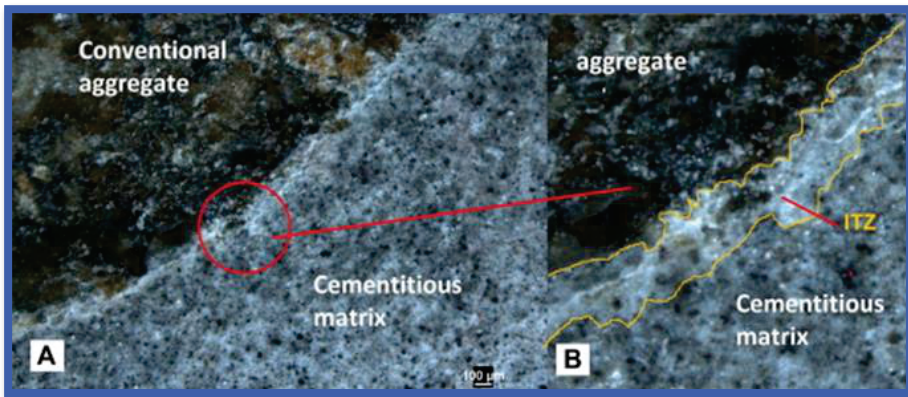
Las propiedades ITZ también se ven afectadas por las características del agregado y la matriz cementosa. Varios investigadores han descubierto que la distribución del tamaño de grano del cemento, la proporción de cemento en agua, el tamaño del agregado (específicamente su porosidad y absorción de agua) y el tipo de agregado tiene efectos importantes sobre las propiedades de ITZ. (Vargas et al., 2017)

Como la ITZ es quien conecta las partículas de cemento con los agregados, también es quien transmite las cargas entre estos, se ha afirmado que cuanto mayor es la diferencia de fuerzas entre la zona de transición de interfaz y la matriz circundante, mayor es la tendencia de microfisuración de la ITZ. (Wu, Shi, Xu, Ye, & De Schutter, 2016)

Se puede lograr la modificación de ITZ utilizando un material cementoso más fino, materiales puzolánicos, súper plastificante y un procedimiento de mezclado avanzado. Estos procesos se pueden clasificar principalmente en dos tipos principales (Wu et al., 2016):

- (i) Recubrir las superficies agregadas con algunos reactivos químicos o polímeros antes de mezcla. Sin embargo, el proceso de pre tratamiento antes de la producción de concreto conducirá a un costo mayor, y el potencial práctico puede ser limitado;
- (ii) El uso de aditivos minerales como el humo de sílice, cenizas volantes, metacaolín para el reemplazo parcial del cemento (Wu, Shi, Xu, Ye, & De Schutter, 2016).

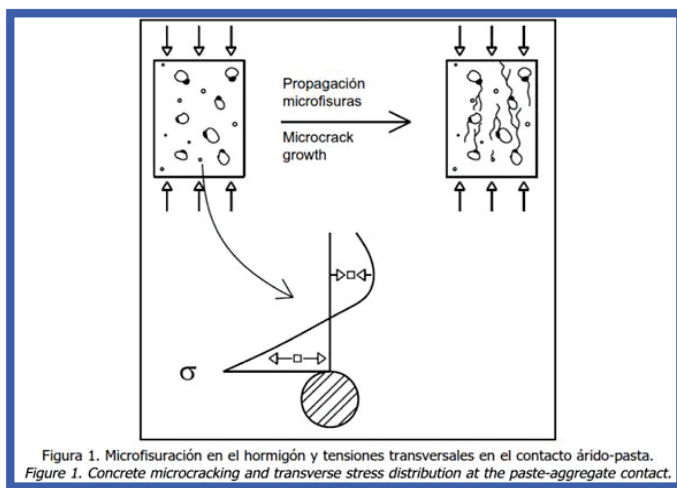
Ilustración 5: Formación de itz a los 28 días de curado del hormigón convencional con agregado convencional



Vargas, P., Restrepo-Baena, O., & Tobón, J. I. (2017). Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. Construction and Building Materials, 137, 381–389.

En cuanto a la microfisuración, sabemos que la rotura del concreto es causada por las tensiones de tracción originadas entre la pasta cementante y los agregados.

Ilustración 6: Microfisuración en el hormigón y tensiones transversales en el contacto árido-pasta.



Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. Materiales de construcción, (303), 385-399

La primera fase de la fisuración del concreto corresponde con la formación de microfisuras en la ITZ, ocupa aproximadamente el 10-15% de la vida de fatiga del concreto. La segunda fase se extiende hasta el 80-90% de la vida de la fatiga. En la última fase tiene lograr la unión de las microfisuras hasta la formación de una macrofisura que rompe el elemento. Por eso es de gran importancia el estudio y control de la ITZ ya que de esta manera se puede obtener un concreto con mayor rigidez y mejores características mecánicas. (Zanuy, Albajar, & De la Fuente, 2011).

DISCUSIÓN

1. Partiendo de que el cemento está compuesto principalmente de $[C_3S]$, $[C_2S]$, $[C_3A]$, $[C_4AF]$, se pueden buscar nuevos materiales que puedan reemplazar estas especies. De igual forma se puede mejorar el proceso de formación o desarrollar con nuevos materiales, una mezcla que se comporte similar al concreto.
2. El cemento al hidratarse forma una pasta, esta pasta puede ser re-utilizada ya que el proceso de hidratación es reversible, lo que lleva a pensar que el cemento es un material que se puede reutilizar.

3. Para el control de la ITZ se pueden desarrollar nuevas investigaciones usando material cementoso más fino, materiales puzolánicos, súper plastificantes y un procedimiento de mezclado avanzado.
4. El cemento se ha convertido en el material más usado en la construcción, por lo que es necesario un continuo desarrollo del mismo. La búsqueda de nuevos materiales y nuevos procesos de formación es fundamental para el desarrollo de la sociedad teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible.
5. El conocimiento sobre la capacidad calorífica es importante ya que esta variable afecta las capacidades mecánicas del concreto, esto porque el mecanismo de hidratación emite energía (calor) que evapora el contenido de agua y detiene el proceso.
6. El estudio del calor específico de un material y la capacidad calorífica de los concretos, permiten controlar las temperaturas de los mismos y depende primordialmente de estas variables, así como de su masa.
7. El control de estas variables incluyendo la temperatura pueden ayudar a mitigar la micro-fisuración del concreto, y la posible disminución en los valores de las propiedades mecánicas del concreto.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá por apoyarme durante mi carrera, a la facultad de ingeniería por darme la oportunidad de culminar mis estudios con el semillero de investigación como opción de grado y a mi directora Sandra Díaz por su paciencia, su amabilidad, y por sus conocimientos transmitidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, Z. H., & Majdi, H. S. (2017). Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 154162. <https://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S214509517300608>
- Gaskell, D. R., & Laughlin, D. E. (2017). *Introduction to the Thermodynamics of Materials*. CRC Press.

- Ho, L. S., Nakarai, K., Duc, M., Le Kouby, A., Maachi, A., & Sasaki, T. (2018). Analysis of strength development in cement-treated soils under different curing conditions through microstructural and chemical investigations. *Construction and Building Materials*, 166, 634646. <https://www.sciencedirect.com/bdatos.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0950061818301375>
- Igliński, B., & Buczkowski, R. (2017). Development of cement industry in Poland History, current state, ecological aspects. A review. *Journal of Cleaner Production*, 141, 702720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.139>
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/49513425/PCA_Disen%C3%B3_y_Control_de_Mezclas_de_Concreto.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1543171902&Signature=EbNfzSRAIKvb8RJCYW%2FSK9Fw3XE%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPCA_Disen%C3%B3_y_Control_de_Mezclas_de_Concr.pdf
- Niño Hernández, J. R. (n.d.). Tecnología del concreto Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tercera edición. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Asocreto, 2010. ISBN 978-958-8564-03-6.
- Padilla, J. V., Jiménez, B. C., Brenes, J. P. S., Delgado, J. S., & Castro, E. R. (2017). Contenido de metales pesados y composición química de los cementos hidráulicos de uso general comercializados en Costa Rica. *Revista Ingeniería*, 27(1), 7595.
- Vargas, P., Restrepo-Baena, O., & Tobón, J. I. (2017). Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, 137, 381389. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.101>
- Wu, K., Shi, H., Xu, L., Ye, G., & De Schutter, G. (2016). Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement and Concrete Research*, 79, 243256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.018>
- Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. *Materiales de Construcción*, (303), 385399. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3735630>
- Zhang, S., Zhang, C., Liao, L., & Wang, C. (2018). Numerical study of the effect of ITZ on the failure behaviour of concrete by using particle element modelling. *Construction and Building Materials*, 170, 776789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.040>