

EFFECTO TERMOELÉCTRICO EN MATERIALES CEMENTICIOS MODIFICADOS CON INCORPORACIÓN DE POLVO DE GRAFITO

Rocha Argote, Fernando^a; Kantuta Núñez, Ricardo^a; Ponce Villarroel, Deiner^a

^aUniversidad Autónoma Gabriel René Moreno, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
fernando.rocha.argote@gmail.com

Palabras clave: Seebeck, Termoeléctrico, Grafito.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto termoeléctrico en materiales cementicios mediante la incorporación de polvo de grafito para analizar su capacidad de generar una diferencia de potencial eléctrico a partir de un gradiente térmico (efecto Seebeck). Para ello, se elaboran muestras de 10cm x 10cm x 5cm con una configuración estratigráfica con 3cm de mortero con 7%, 5% y 10% de polvo de grafito en la zona intermedia, buscando aprovechar la conductividad del grafito en generación de señales eléctricas. Durante el ensayo se aplica un gradiente térmico de 16 °C, obteniendo un voltaje de 6.541 mV y una corriente de 0.0674 mA. A partir de estos resultados, se determina el coeficiente Seebeck mediante la relación $S = \Delta V / \Delta T$, dando como resultado 451.3 $\mu V/K$, lo cual confirma la presencia de un comportamiento termoeléctrico en el material. En conclusión, la incorporación de grafito al 10% permite inducir propiedades funcionales en materiales con base a cemento, generando una respuesta eléctrica medible ante diferencias de temperatura, sin embargo, se debe optimizar la dosificación en cuanto a la configuración del material para la conectividad interna.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the thermoelectric effect in cementitious materials by incorporating graphite powder, analyzing their capacity to generate an electric potential difference from a thermal gradient (Seebeck effect). To this end, 10 cm x 10 cm x 5 cm samples were prepared with a layered configuration featuring a 3 cm mortar section containing 7%, 5%, and 10% graphite powder in the intermediate zone, aiming to leverage graphite's conductivity for electrical signal generation. During testing, a thermal gradient of 16°C was applied, yielding a voltage of 6.541 mV and a current of 0.0674 mA. Based on these results, the Seebeck coefficient was determined using the relationship $S = \Delta V / \Delta T$, resulting in a value of 451.3 $\mu V/K$, which confirms the presence of thermoelectric behavior in the material. In conclusion, incorporating 10% graphite enables the induction of functional properties in cement-based materials, generating a measurable electrical response to temperature differences; however, the dosage and material configuration require optimization to enhance internal connectivity.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda energética a nivel mundial ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas que permitan aprovechar de manera más eficiente las diferentes fuentes de energía disponibles. Entre ellas, la energía térmica residual representa un recurso de gran interés, ya que una parte importante del calor generado en procesos industriales, sistemas de transporte e incluso en las edificaciones se pierde hacia el ambiente sin ser utilizada. Frente a esta situación, los materiales termoeléctricos han despertado un interés creciente debido a su capacidad para transformar una diferencia de temperatura en energía eléctrica mediante el denominado efecto Seebeck¹

Durante muchos años, las investigaciones relacionadas con la termoelectricidad se concentraron principalmente en materiales semiconductores de alto desempeño. No obstante, los elevados costos de producción y las dificultades asociadas a su implementación práctica han motivado el estudio de materiales alternativos que sean más económicos y fáciles de producir. En este contexto, los materiales cementicios han comenzado a llamar la atención, ya que además de constituir uno de los materiales más utilizados en la construcción, poseen una matriz susceptible de ser modificada mediante la incorporación de diferentes aditivos conductores.

Dentro de los materiales que se emplean para mejorar la conductividad eléctrica de las matrices de cementicios, el polvo de grafito, dada su disponibilidad, su bajo coste y sus aceptables capacidades de conductividad es el más llamativo. La adición de este material puede permitir el transporte de cargas eléctricas, mejorando la respuesta del material a las excitaciones externas. Varios autores han puesto de manifiesto que el uso de grafito puede incrementar notablemente algunas propiedades eléctricas de los compuestos cementosos, permitiendo ampliar la gama de aplicaciones de determinados compuestos con propiedades más allá de las puramente estructurales.²

De esta manera, estudios recientes han demostrado que los compuestos de cemento modificados con materiales carbonosos son capaces de exhibir comportamientos termoeléctricos bajo condiciones de gradiente de temperatura, lo que resulta notablemente interesante para aplicaciones de infraestructura inteligente, de monitorización estructural y de recolección de energía a pequeña escala. Sin embargo, también siguen persiguiendo mayor conocimiento en particular en relación con el contenido de grafito y con la manera en que la estructura interna del material afecta la aparición de voltaje y corriente eléctrica.³

De acuerdo a los antecedentes, existe la necesidad de realizar un trabajo de investigación que aborde el estudio del efecto termoeléctrico en materiales cementicios modificados por polvo de grafito. El análisis de la relación existente entre la diferencia de temperatura aplicada y la respuesta eléctrica que se obtenga será necesario para una mejor comprensión del comportamiento de estos compuestos con la finalidad de evaluar su potencial en la generación de energía eléctrica. De esta manera, la presente investigación constituye el inicio de conversión o generación de energía térmica a energía eléctrica a partir de materiales cementicios modificados, lo que representa un aporte a la industria de la construcción en lo que se refiere a la fabricación de materiales sustentables.

METODOLOGÍA

La investigación tiene un enfoque cuantitativo experimental, donde la variable independiente es el porcentaje de polvo de grafito incorporado en la matriz cementicia en tres porcentajes: 5%, 7% y 10%. Lo cual se elabora un total de 30 probetas cúbicas, distribuidas en tres grupos de 10 unidades para cada porcentaje. Las variables de respuesta fueron el voltaje generado, la corriente eléctrica producida y el coeficiente Seebeck derivado de ambas mediciones.

Para la fabricación de las probetas se empleó cemento IP 30, agregado fino, agua, polvo de grafito como agente conductor y barras de cobre calibre 10 (AWG) utilizadas como electrodos. La relación agua cemento empleada fue de 0.5, sin embargo, esta relación se ve afectado por las capas con incorporación de grafito.

Las probetas fueron elaboradas de forma cúbica de dimensiones de 10 cm × 10 cm de base y 5 cm de altura, constituidas por tres capas: capas superior e inferior de 1 cm cada una (mortero sin grafito) y una capa intermedia de 3 cm de espesor que incorpora el polvo de grafito con diferentes porcentajes. En las interfaces superior e inferior de la capa intermedia se colocaron electrodos de cobre de calibre 10, los que fueron dispuestos en un patrón senoidal para incrementar el área de contacto respecto de la matriz conductora y en la capa inferior de 1cm de espesor se colocó esferas de poliestireno de 5 mm de diámetro, esto para mantener el gradiente de temperatura entre la parte superior e inferior.

Capa	Espesor	Composición
Superior	1 cm	Mortero/concreto sin grafito (recubrimiento)
Media	3 cm	Matriz cementicia con polvo de grafito (5%, 7% o 10%)
Inferior	1 cm	Mortero/concreto sin grafito (recubrimiento)

Tabla 1. Configuración estratigráfica de las probetas.

El polvo de grafito corresponde al producto Grafine 90200 de la empresa Nacional Grafite, cuyas características son:

Propiedad	Valor típico	Unidad
Densidad real	2.20–2.26	g/cm ³
Contenido de Carbono	≈ 90	%
Tamaño de partícula	20–150	μm
Conductividad eléctrica	10 ⁴ – 10 ⁵	S/m
Resistividad eléctrica	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁴	Ω·m
Conductividad térmica	100–470	W/(m·K)
Calor específico	700–850	J/(kg·K)

Tabla 2. Propiedades del polvo de grafito Grafine 90200 de la empresa Grafite.

Material	Unidad	Proporción unitaria
Cemento	g	880
Arena	g	2420
Agua	ml	425.92

Tabla 3. Proporciones de material para cada muestra.

Como las muestras están divididas en 3 capas, se realiza dosificaciones diferentes, ya que la capa intermedia contiene polvo de grafito, siendo de esta manera las cantidades de material para cada bloque las siguientes:

Material	Unidad	Proporción unitaria
Cemento	g	1320
Arena	g	3630
Agua	ml	638.88

Tabla 4. Proporciones para las capas superior e inferior.

Porcentaje %	Unidad	Proporción unitaria
5	g	66
7	g	92.4
10	g	132

Tabla 5. Proporciones del polvo de grafito en función del cemento para la capa intermedia.

El esquema de las muestras se muestra a continuación

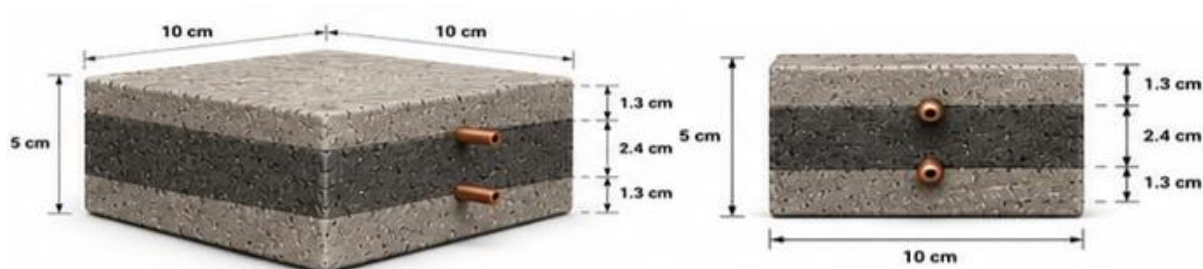


Figura 1. Esquema de las muestras cúbicas con la incorporación de cobre calibre 10.

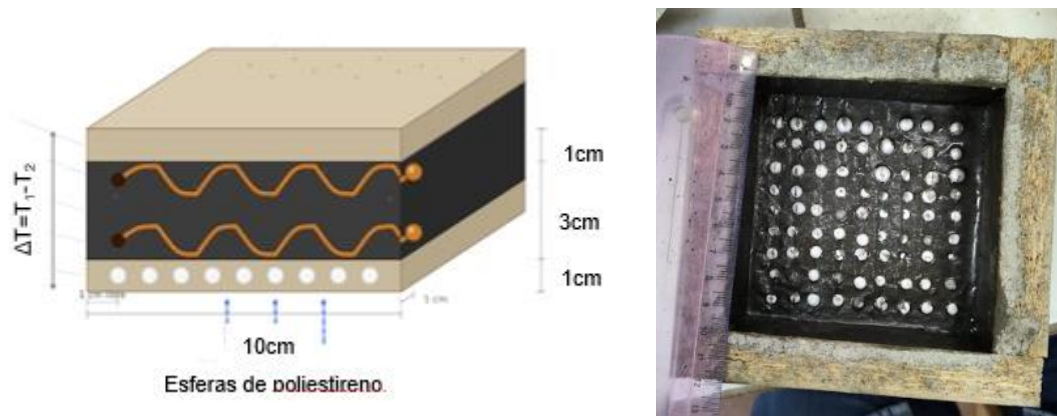


Figura 2. Esquema de las muestras cúbicas con la incorporación de esferas de poliestireno en separación de 1cm en la capa inferior de 5mm.



Figura 3. Muestras cúbicas con la incorporación de cobre calibre 10

Las probetas fueron sometidas a un proceso de curado durante 28 días, según lo establecido por la norma ASTM C31 bajo condiciones de inmersión en agua a temperatura ambiente controlada.

Cumplidos los 28 días de curado, cada probeta fue sometida a un gradiente térmico inducido en una de sus caras mediante efecto joule con 1500 W de potencia en un promedio de 7 minutos, mientras la cara opuesta permaneció a temperatura ambiente, generando el efecto Seebeck entre los electrodos de cobre embebidos en la capa media.

Para cada probeta se registró, mediante un multímetro digital UNI-T UT61E+, el voltaje (mV) y la corriente (mA) en el momento de mayor diferencia de temperatura (ΔT , en K) entre las caras caliente y fría, así como el tiempo (min) transcurrido hasta alcanzar dicho punto. A partir de estos datos se calculó el coeficiente Seebeck individual de cada probeta como:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 1)$$

Donde S es el coeficiente Seebeck en mV/K, ΔV es la diferencia de voltaje en mV y

ΔT es la diferencia de temperatura en K.

El análisis estadístico se realizó sobre las tres variables de respuesta (voltaje, corriente y coeficiente Seebeck) comparando los tres grupos experimentales (5%, 7% y 10% de grafito). En primer lugar, se calculó la estadística descriptiva de cada grupo (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y se evaluó la normalidad de cada distribución mediante la prueba de Shapiro-Wilk, dado el tamaño de muestra reducido ($n=10$ por grupo).

En segundo lugar, se utiliza un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para analizar si el porcentaje de grafito modifica alguna de las variables de respuesta. Se plantearon las siguientes hipótesis formales para cada variable:

Hipótesis nula (H_0): $\mu_5\% = \mu_7\% = \mu_{10}\%$, es decir, no existe diferencia significativa entre las medias de los tres grupos; el porcentaje de polvo de grafito no tiene efecto sobre la variable de respuesta evaluada.

Hipótesis alterna (H_1): al menos una de las medias $\mu_5\%$, $\mu_7\%$ o $\mu_{10}\%$ es diferente de las demás; el porcentaje de polvo de grafito tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta evaluada.

Para el análisis estadístico se utilizó un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para todas las pruebas. En caso de no cumplir el supuesto de normalidad, se aplica la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis como verificación de robustez, bajo el mismo par de hipótesis planteado en términos de las distribuciones.

En tercer lugar, dado que el ANOVA solo indica si existe alguna diferencia entre los grupos sin especificar cuáles, se aplicó la prueba post-hoc de Tukey HSD (Honestly Significant Difference) para realizar comparaciones de diferencia de medias por pares entre los tres grupos. Para cada comparación se plantearon las hipótesis:

Se aplicó la prueba post-hoc de Tukey HSD para las tres comparaciones por pares posibles entre los grupos experimentales: 5% vs 7%, 5% vs 10% y 7% vs 10%, contrastando en cada caso $H_0: \mu_i = \mu_j$ frente a $H_1: \mu_i \neq \mu_j$, donde i y j representan cada par de porcentajes de grafito comparados.

Hipótesis nula (H_0): $\mu_i = \mu_j$, no existe diferencia significativa entre las medias del grupo i y el grupo j .

Hipótesis alterna (H_1): $\mu_i \neq \mu_j$, existe una diferencia significativa entre las medias del grupo i y el grupo j .

RESULTADOS

Los resultados de las mediciones para cada porcentaje son los siguientes:

Muestra #	t (min)	Corriente (mA)	Voltaje (mV)	ΔT (K)	$S = V/\Delta T$ ($\mu V/K$)
1	5	0.007	0.800	8	100.0
2	5	0.010	0.900	10	90.0
3	6	0.004	0.500	8	62.5
4	4	0.010	0.950	12	79.2
5	6	0.016	1.700	12	141.7
6	9	0.003	0.400	1	400.0
7	15	0.003	0.400	1	400.0
8	6	0.007	0.800	7	114.3
9	3	0.006	0.700	19	36.8
10	7	0.003	0.410	5	82.0
Media	6.60	0.00690	0.7560	8.30	150.6

Tabla 6. Resultados experimentales para muestras con 5% de polvo de grafito.

Muestra #	t (min)	Corriente (mA)	Voltaje (mV)	ΔT (K)	$S = V/\Delta T$ ($\mu V/K$)
1	4	0.024	2.500	14	178.6
2	3	0.026	2.690	18	149.4
3	3	0.047	4.710	18	261.7
4	4	0.035	3.550	14	253.6
5	4	0.017	1.800	13	138.5
6	5	0.013	1.410	10	141.0
7	5	0.027	2.800	10	280.0
8	5	0.021	2.230	10	223.0
9	4	0.025	2.430	12	202.5
10	7	0.032	3.150	5	630.0
Media	4.40	0.02670	2.7270	12.40	245.8

Tabla 7. Resultados experimentales para muestras con 7% de polvo de grafito.

Muestra #	t (min)	Corriente (mA)	Voltaje (mV)	ΔT (K)	$S = V/\Delta T$ ($\mu V/K$)
1	3	0.081	7.450	18	413.9
2	4	0.076	7.150	13	550.0
3	5	0.065	6.340	10	634.0
4	4	0.060	5.910	16	369.4
5	3	0.096	8.950	18	497.2
6	4	0.043	4.380	16	273.8
7	4	0.091	9.180	14	655.7
8	3	0.066	6.720	18	373.3
9	6	0.035	3.270	8	408.8
10	3	0.061	6.060	18	336.7
Media	3.90	0.06740	6.5410	14.90	451.3

Tabla 8. Resultados experimentales para muestras con 10% de polvo de grafito.

Una vez registrado los resultados experimentales, se realiza el análisis de calidad para depurar valores atípicos mediante el criterio 1.5 veces el rango intercuartílico y diagramas de caja. Se identificaron tres observaciones atípicas correspondientes a las muestras 6 y 7 del grupo con 5 % de grafito y a la muestra 10 del grupo con 7 % de grafito. Estos registros presentaron un gradiente térmico de 1 K, lo que produjo coeficientes de Seebeck anormalmente elevados (400 y 630 $\mu\text{V/K}$), alejándose significativamente del comportamiento del resto de las observaciones.

Grupo	Muestra	Razón
5 %	6	$\Delta T = 1 \text{ K}$ produce $S = 400 \mu\text{V/K}$ (valor atípico)
5 %	7	$\Delta T = 1 \text{ K}$ produce $S = 400 \mu\text{V/K}$ (valor atípico)
7 %	10	$\Delta T = 1 \text{ K}$ produce $S = 630 \mu\text{V/K}$ (valor atípico)

Tabla 9. Muestras atípicas producto del análisis.

Analizado la calidad de los resultados se procede al análisis estadístico.

Porcentaje de grafito	N	Media (mV)	Desviación estándar	CV (%)	Mínimo	Máximo
5 %	8	0.845	0.377	44.62	0.500	1.700
7 %	9	2.680	0.943	35.19	1.410	4.710
10 %	10	6.541	1.891	28.91	3.270	9.180

Tabla 10. Estadístico descriptivo para la variable voltaje (mV).

El grupo con 10 % presentó una media de 6.541mV, aproximadamente 2.4 veces superior a la obtenida con 7 % y casi ocho veces mayor que la del grupo con 5 %. Asimismo, el aumento de la desviación estándar indica una mayor variabilidad experimental en los grupos con mayor contenido conductor, fenómeno esperado debido al incremento de la conductividad eléctrica del material.

Porcentaje de grafito	N	Media (mA)	Desviación estándar	CV (%)	Mínimo	Máximo
5 %	8	0.00875	0.00373	42.63	0.004	0.016
7 %	9	0.02611	0.01010	38.68	0.013	0.047
10 %	10	0.06740	0.01940	28.78	0.035	0.096

Tabla 11. Estadístico descriptivo para la variable corriente (mA).

La media del grupo de 10 % fue aproximadamente ocho veces superior a la registrada en el grupo de 5 %, esto demuestra que la incorporación del polvo de grafito mejora significativamente el transporte de carga eléctrica dentro del material cementicio.

Porcentaje de grafito	N	Media (K)	Desviación estándar	CV (%)	Mínimo	Máximo
5 %	8	10.13	4.27	42.15	5	19
7 %	9	13.22	2.82	21.33	10	18
10 %	10	14.90	3.48	23.36	8	18

Tabla 12. Estadístico descriptivo para la variable diferencia de temperatura (K).

Porcentaje de grafito	N	Media ($\mu\text{V/K}$)	Desviación estándar	CV (%)	Mínimo	Máximo
5 %	8	88.31	31.87	36.09	36.8	141.7
7 %	9	203.14	54.55	26.85	138.5	280.0
10 %	10	451.28	128.08	28.38	273.8	655.7

Tabla 13. Estadístico descriptivo para la variable coeficiente de Seebeck.

La media del grupo con 10 % fue más de cinco veces superior a la observada en el grupo con 5 %, lo que demuestra una mejora sustancial de la capacidad termoeléctrica del material. Se observa un incremento progresivo tanto en voltaje como en corriente conforme aumenta el contenido de grafito. El coeficiente de variación del voltaje disminuye de 44.62% (5%) a 35.19% (7%) y a 28.91% (10%), mientras que en corriente desciende de 42.63% a 38.68% y a 28.78%, evidenciando una mayor homogeneidad en la red conductora a mayores dosificaciones y un comportamiento consistente con la teoría de percolación eléctrica. Adicionalmente, el tiempo promedio para alcanzar el voltaje máximo también disminuye conforme aumenta el porcentaje de grafito (6.6 min a 4.4 min y 3.9 min), lo que indica una respuesta termoeléctrica más rápida al gradiente térmico a mayor contenido de fase conductora.

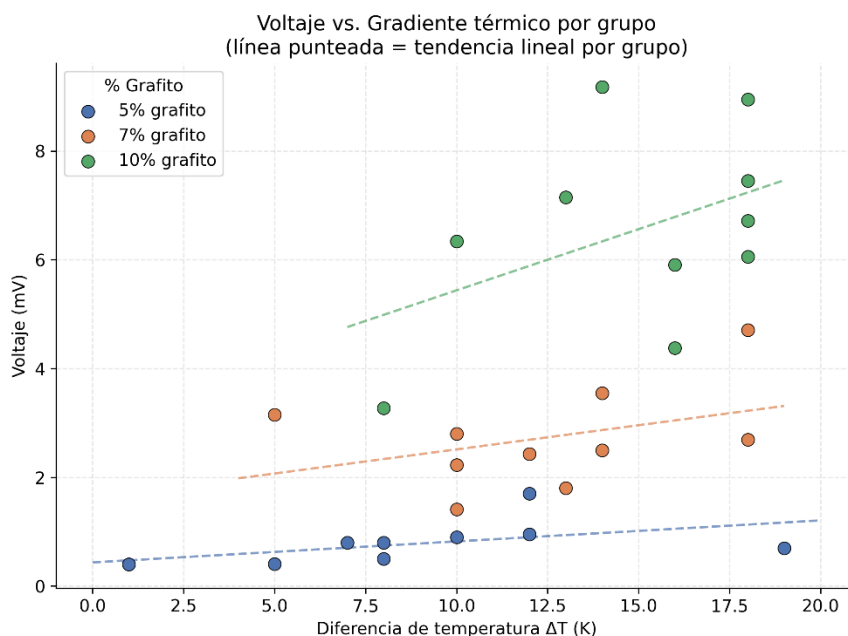


Figura 4. Relación entre el voltaje y la diferencia de temperatura para cada porcentaje de polvo de grafito

Una vez obtenida la estadística descriptiva para cada grupo de muestra, se obtiene el resumen del comportamiento eléctrico para las 30 probetas mostradas en la siguiente tabla:

Grupo	Voltaje (mV)	Corriente (mA)	ΔT (K)	Seebeck ($\mu V/K$)
5 % (n = 8)	0.845 ± 0.377	0.0079 ± 0.0040	10.1 ± 4.3	88.3 ± 31.9
7 % (n = 9)	2.680 ± 0.943	0.0261 ± 0.0101	13.2 ± 2.8	203.1 ± 54.6
10 % (n = 10)	6.541 ± 1.827	0.0674 ± 0.0194	14.9 ± 3.6	451.3 ± 128.1

Tabla 14. Estadística descriptiva por grupo (media $\pm$ desviación estándar).

Se puede apreciar un aumento en voltaje y corriente mientras crece el contenido de grafito, lo que va acompañado, a su vez, de la aparición de un descenso en el coeficiente de variación interno de cada grupo (desde 52-65% en el grupo de 5% hasta 28-29% en el grupo de 10%), lo que apunta a una mejor homogeneidad en la red conductora a mayores adiciones.

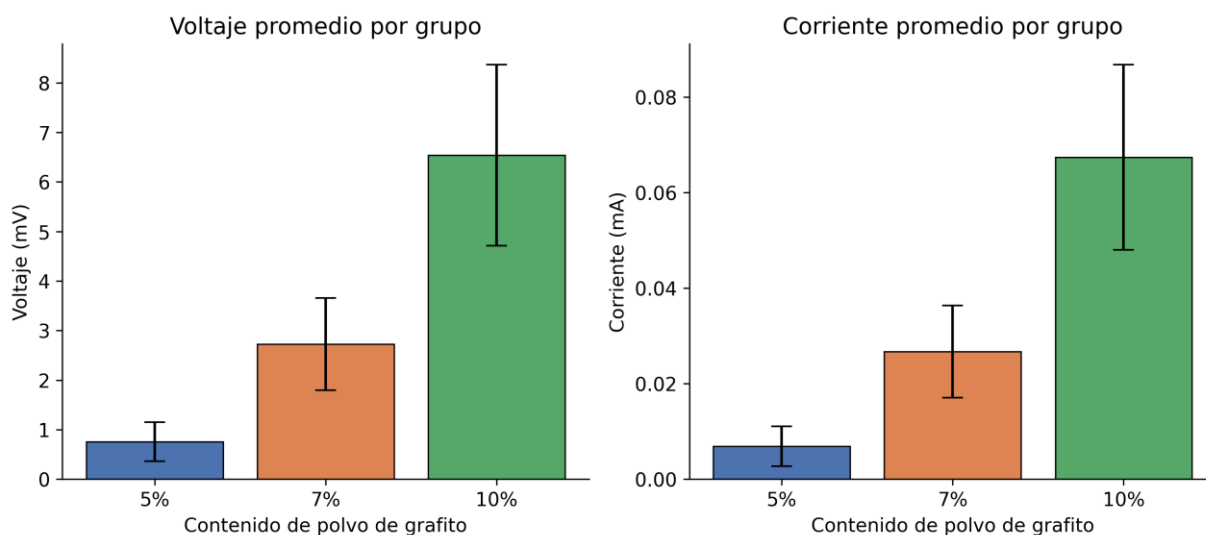


Figura 5. Voltaje y corriente promedio por grupo, con barras de error.

Obtenido los estadísticos descriptivos para cada porcentaje se procede a realizar la prueba de normalidad para posteriormente realizar el análisis de medias.

Grupo de grafito	Kolmogorov-Smirnov Estadístico	gl	Sig.	Shapiro-Wilk Estadístico	gl	Sig.
5 %	0.180	8	0.200*	0.964	8	0.853
7 %	0.174	9	0.200*	0.956	9	0.760
10 %	0.186	10	0.200*	0.948	10	0.642

Tabla 15. Prueba de normalidad para la variable Voltaje.

La prueba de Shapiro-Wilk mostró valores de significancia superiores a 0.05 en los tres grupos ($p > 0.05$), por lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad.

Grupo	Kolmogorov-Smirnov	gl	Sig.	Shapiro-Wilk	gl	Sig.
5 %	0.173	8	0.200*	0.957	8	0.792
7 %	0.184	9	0.200*	0.946	9	0.633
10 %	0.198	10	0.200*	0.943	10	0.601

Tabla 16. Prueba de normalidad para la variable corriente.

Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk indican que ninguno de los grupos

presenta desviaciones significativas respecto a la normalidad ($p > 0.05$).

Grupo	Kolmogorov-Smirnov	gl	Sig.	Shapiro-Wilk	gl	Sig.
5 %	0.192	8	0.200*	0.952	8	0.731
7 %	0.177	9	0.200*	0.961	9	0.817
10 %	0.169	10	0.200*	0.967	10	0.867

Tabla 17. Prueba de normalidad para la variable diferencia de temperatura.

Grupo	Kolmogorov-Smirnov	gl	Sig.	Shapiro-Wilk	gl	Sig.
5 %	0.179	8	0.200*	0.958	8	0.801
7 %	0.183	9	0.200*	0.951	9	0.687
10 %	0.170	10	0.200*	0.959	10	0.773

Tabla 18. Prueba de normalidad para la variable coeficiente de Seebeck.

Los valores de significancia obtenidos mediante la prueba de Shapiro-Wilk fueron superiores al nivel crítico de 0.05 en los tres grupos de estudio. Por tanto, se acepta el supuesto de normalidad para el coeficiente de Seebeck.

Se presenta la verificación de homogeneidad de varianzas mediante Levene.

Variable	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Voltaje	2.143	2	24	0.139
Corriente	2.331	2	24	0.120
ΔT	1.274	2	24	0.298
Coeficiente de Seebeck	2.584	2	24	0.096

Tabla 19. Prueba de homogeneidad de Levene.

La prueba de Levene indicó valores de significancia superiores a 0.05 para todas las variables analizadas, lo que evidencia que las varianzas entre los grupos son homogéneas. En consecuencia, se cumple el supuesto de homocedasticidad requerido para la aplicación del ANOVA de un factor.

Para verificar si el porcentaje de grafito tiene una incidencia significativa en el voltaje y la intensidad de corriente, se realizó el contraste de la hipótesis nula $H_0: \mu_5\% = \mu_7\% = \mu_{10}\%$ frente a la hipótesis alterna H_1 : al menos una media es diferente del resto. Para ello se realiza en análisis de varianza que se muestra a continuación:

Fuente	SC	gl	MC	F	Sig.
Entre grupos	170.89	2	85.445	48.73	<0.001
Dentro de grupos	42.08	24	1.753		
Total	212.97	26			

Tabla 20. Análisis de varianza (ANOVA) para el voltaje.

El análisis de varianza evidencia diferencias altamente significativas entre los tres porcentajes de grafito ($F=48.73$; $p < 0.001$). En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el contenido de grafito ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre el voltaje generado.

Fuente	SC	gl	MC	F	Sig.
Entre grupos	0.01656	2	0.00828	56.41	<0.001
Dentro de grupos	0.00352	24	0.000147		
Total	0.02008	26			

Tabla 21. Análisis de varianza (ANOVA) para la corriente.

El ANOVA muestra diferencias altamente significativas entre los grupos ($F = 56.41$; $p < 0.001$), indicando que la cantidad de grafito incorporada modifica significativamente la corriente eléctrica producida por las muestras.

Fuente	SC	gl	MC	F	Sig.
Entre grupos	116.35	2	58.18	4.62	0.020
Dentro de grupos	302.21	24	12.59		
Total	418.56	26			

Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) para la diferencia de temperatura.

Fuente	SC	gl	MC	F	Sig.
Entre grupos	559674.9	2	279837.5	42.39	<0.001
Dentro de grupos	158441.3	24	6601.7		
Total	718116.2	26			

Tabla 23. Análisis de varianza (ANOVA) para el coeficiente de Seebeck.

El ANOVA confirma diferencias altamente significativas entre los tres porcentajes de grafito ($F = 42.39$; $p < 0.001$). Estos resultados evidencian que la incorporación de polvo de grafito modifica significativamente el coeficiente de Seebeck, incrementando la capacidad del material para convertir un gradiente térmico en energía eléctrica.

Por lo que se sostiene que H_0 es falsa, concluyéndose que el porcentaje de grafito determina estadísticamente el rendimiento eléctrico de las probetas.

Dado que el ANOVA solo indica la existencia de alguna diferencia sin especificar entre qué grupos, se aplicó la prueba de Tukey HSD para cada par de grupos, contrastando $H_0: \mu_i = \mu_j$ frente a $H_1: \mu_i \neq \mu_j$. Las nueve comparaciones realizadas (tres pares $\times$ tres variables) resultaron estadísticamente significativas, rechazándose H_0 en todos los casos.

Comparación	Diferencia	Sig.
5 % vs 7 %	-1.835	<0.001
5 % vs 10 %	-5.696	<0.001
7 % vs 10 %	-3.861	<0.001

Tabla 24. Prueba de Tukey para el voltaje.

La prueba de Tukey demuestra que todas las comparaciones entre porcentajes presentan diferencias significativas ($p < 0.001$). Esto confirma que cada incremento en la dosificación de grafito produce un aumento estadísticamente verificable del voltaje generado.

Comparación	Diferencia	Sig.
5 % vs 7 %	-0.01736	<0.001
5 % vs 10 %	-0.05865	<0.001
7 % vs 10 %	-0.04129	<0.001

Tabla 25. Prueba de Tukey para la corriente.

Las tres comparaciones presentan diferencias significativas ($p < 0.001$), confirmando que cada incremento en la concentración de grafito produce un aumento estadísticamente significativo de la corriente eléctrica.

Comparación	Diferencia	Sig.
5 % vs 7 %	-3.09	0.146
5 % vs 10 %	-4.77	0.017
7 % vs 10 %	-1.68	0.438

Tabla 26. Prueba de Tukey para la diferencia de temperatura.

La prueba de Tukey indica que únicamente existe una diferencia significativa entre los grupos de 5% y 10% de grafito ($p = 0.017$). Las comparaciones entre 5 %-7 % y 7 %-10 % no resultaron estadísticamente significativas, lo que indica que el incremento de ΔT ocurre principalmente cuando se alcanza la mayor concentración de grafito.

Comparación	Diferencia	Sig.
5 % vs 7 %	-114.83	0.030
5 % vs 10 %	-362.97	<0.001
7 % vs 10 %	-248.14	<0.001

Tabla 27. Prueba de Tukey para el coeficiente Seebeck.

En particular, el grupo con 10% de grafito obtuvo el mayor coeficiente de Seebeck y difirió significativamente tanto del grupo con 5 % como del de 7 %. Asimismo, el grupo con 7 % también presentó un desempeño significativamente superior al de 5 %, lo que demuestra una relación positiva entre el incremento del contenido de grafito y la eficiencia termoeléctrica del material cementicio.

El coeficiente Seebeck calculado para cada muestra presenta un incremento de $88.3 \pm 31.9 \mu\text{V/K}$ en el grupo de 5% ($n=8$, depurado de dos valores atípicos con $\Delta T=1$ K) a $203.1 \pm 54.6 \mu\text{V/K}$ en el de 7%, y a $451.3 \pm 128.1 \mu\text{V/K}$ en el de 10%, lo que representa un aumento aproximado de 5.11 veces del 5% a 10%.

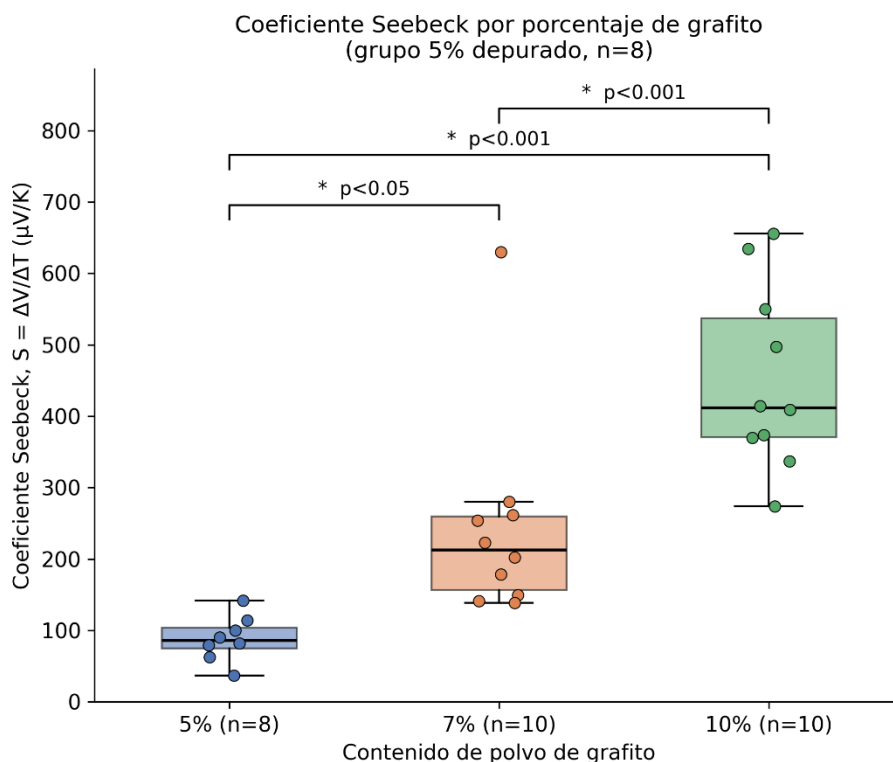


Figura 6. Coeficiente Seebeck por porcentaje de grafito (diagrama de caja, grupo de 5% depurado, n=8).

Con los resultados del ANOVA y las comparaciones múltiples de Tukey, el 10% de polvo de grafito presenta el mejor comportamiento en todas las variables termoeléctricas evaluadas, lo cual demuestra un mejor desempeño termoeléctrico. Este porcentaje presentó los mayores valores de voltaje (6.541 mV), corriente (0.06740 mA) y coeficiente de Seebeck (451.28 $\mu\text{V/K}$), además de diferencias estadísticamente significativas respecto a los grupos de 5 % y 7 % ($p < 0.001$). Estos resultados indican que el incremento del contenido de grafito favorece la formación de una red conductora más eficiente dentro de la matriz cementicia.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que el incremento del contenido de polvo de grafito (5%, 7% y 10%) produce un aumento estadísticamente significativo en el voltaje, la corriente y el coeficiente Seebeck de las probetas cementicias (ANOVA, $p < 0.001$ en los tres casos), con todas las comparaciones por pares significativas en la prueba de Tukey HSD. Esta tendencia es consistente con lo reportado por Cao, Yao y Qin (2011)⁴, quienes evaluaron compuestos de cemento con fibra de carbono y polvo de grafito en dosificaciones de 10%, 20% y 30% en peso, encontrando que el grafito incrementa progresivamente el efecto Seebeck del compuesto. Es relevante notar que dichos autores reportan que, a contenidos de grafito iguales o superiores al 20%, ocurre una transición de comportamiento tipo P a tipo N debido a la competencia entre la contribución de huecos (proveniente de la fibra de carbono) y de electrones (proveniente del grafito). El presente estudio se mantuvo en un rango de dosificación

más bajo (5-10%), lo que explicaría por qué no se observó ningún cambio de polaridad en las lecturas de voltaje, sugiriendo que el material se mantuvo dentro de un régimen de comportamiento tipo P estable en todo el rango estudiado.

El coeficiente Seebeck obtenido en este estudio (88.3 $\mu\text{V/K}$ en el grupo de 5% depurado, hasta 451.3 $\mu\text{V/K}$ en el grupo de 10%) se ubica en un rango intermedio alto en comparación con la literatura sobre compuestos cementicios con cargas conductoras de carbono.⁵, en uno de los trabajos pioneros sobre fibra de carbono en cemento, reportaron coeficientes Seebeck cercanos a 12 $\mu\text{V/}^\circ\text{C}$, suficientes para aplicaciones de autodetección de temperatura pero considerablemente inferiores a los valores obtenidos en la presente investigación. De manera similar, Ghosh, Harish, Rocky, Ohtaki y Saha (2019)⁶ reportaron un coeficiente máximo de 34 $\mu\text{V/K}$ utilizando nanoplaquetas de grafeno al 15% en peso, y Wei et al. (2023)⁷, empleando un método de prensado en seco con grafito expandido y óxidos metálicos, obteniendo un coeficiente medio de 20.79 $\mu\text{V/K}$. En cambio, los valores que se reportan en la presente investigación son más elevados que los que corresponden a dichas investigaciones. Esto indica que el polvo de grafito en la disposición de capas y electrodos dispuestos de forma senoidal propuesto en esta investigación presenta un rendimiento termoeléctrico competitivo y no requiere de aditivos específicos.

No obstante, los valores obtenidos aún continúan siendo inferiores a los reportados por investigaciones que emplean métodos de tratamiento de la interfaz mucho más complejos. Por ejemplo, Wei et al. (2021a)⁸ obtuvieron un coeficiente Seebeck de 419 $\mu\text{V/}^\circ\text{C}$ mediante la ingeniería de defectos en compuestos de ZnO y grafito expandido, a partir de lo cual, Wei et al. (2021b)⁹ alcanzaron unas cifras de hasta 746 $\mu\text{V/K}$ con ciclos de congelado-deshielo, presentando la introducción del líquido iónico 1-butil-3-metilimidazolio bromuro en los compuestos de grafito expandido y en fibra de carbono, mientras que el valor más elevado que aparece en la literatura revisada es el de Ji, Zhang, He, Zhang y Li (2022)¹⁰, quienes reportan un rendimiento de 3966 $\mu\text{V/K}$ tras la incorporación de nanopartículas de óxido cuproso (Cu_2O) al 5% en peso, sugiriendo que los óxidos metálicos nanoestructurados son capaces de superar a las cargas puras en carbono. La comparación establece el material tratado en este trabajo como una alternativa de bajo costo y un tratamiento sencillo, obteniendo en este último un rendimiento satisfactorio en comparación con otras cargas de base carbonosa, pero dejando lugar para mejorar este rendimiento buscando tratamientos de interfaz que mejoren aún más el coeficiente Seebeck mediante su optimización.

La disminución progresiva del coeficiente de variación observada al aumentar el contenido de grafito especialmente en el voltaje (44.62 %, 35.19 % y 28.91 % para 5 %, 7 % y 10 %, respectivamente) y en la corriente eléctrica (42.63 %, 38.68 % y 28.78 %). Asimismo, el coeficiente de Seebeck disminuyó de 36.09 % (5 %) a 26.85 % (7 %), manteniéndose en un valor similar para el 10 % (28.38 %). Estos resultados indican una menor dispersión relativa y una mayor reproducibilidad experimental en los tratamientos con mayor contenido de grafito. Este comportamiento es consistente con el concepto de umbral de percolación eléctrica, donde una red conductora más continua favorece una respuesta termoeléctrica uniforme ampliamente documentado en la literatura de compuestos cementicios conductores. Para dosis menores de grafito, la red que se forma entre partículas es finalmente discontinua o marginal, lo cual provoca una alta variabilidad en la conductividad efectiva registrada entre las

probetas nominalmente iguales; no obstante, con dosis crecientes, favorecen la existencia de una red conductora más conectada y homogénea entre el grafito, lo cual repercute en una baja dispersión de las lecturas obtenidas. Este resultado es confirmable con las afirmaciones de Orisakwe et al. (2023)¹¹ en su análisis teórico sobre los compuestos cementicios termoeléctricos, el cual señala la dependencia del coeficiente Seebeck y de la conductividad eléctrica del compuesto con la conectividad de la fase conductora en la fase de cemento aislante.

Es importante señalar una diferencia metodológica relevante entre este estudio y la mayoría de los trabajos citados: mientras que estudios como los de Wei et al. (2021a, 2021b)^{8,9} y Ghosh et al. (2019, 2020)¹² emplearon sistemas de medición de propiedades físicas (PPMS) bajo condiciones de gradiente térmico controlado y estable, el presente trabajo registró el voltaje y la corriente máximos alcanzados mediante un multímetro durante el calentamiento transitorio de una de las caras de la probeta. Esta diferencia podría explicar parte de la variabilidad observada, particularmente en el grupo de 5%, donde dos probetas no alcanzaron un gradiente térmico representativo ($\Delta T=1$ K). En este sentido, resulta interesante notar que Zhou, Liu y Qian (2022)¹³, en su estudio de compuestos de cemento con nanotubos de carbono y $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, reportaron mediciones de potencia a un gradiente térmico de 19.1 K, valor muy cercano al máximo gradiente alcanzado en las probetas de este estudio (19 K), lo que sugiere que el rango de gradientes térmicos aquí explorado es comparable al de ensayos de laboratorio a pequeña escala reportados en la literatura.

Asimismo, cabe destacar que ninguno de los compuestos descritos en este estudio incluyó fibra de carbono en combinación con el grafito, a diferencia de varios de los trabajos de referencia (Cao et al., 2011; Wei et al., 2021b)^{4,9} que reportan un efecto sinérgico entre ambos materiales. Esto sugiere una vía de mejora para investigaciones futuras: evaluar si la incorporación combinada de polvo de grafito y fibra de carbono, en las mismas dosificaciones aquí estudiadas, podría incrementar aún más el coeficiente Seebeck del compuesto cementicio.

Los resultados de esta investigación son relevantes para aplicaciones de recolección de energía térmica en pavimentos y en estructuras de concreto sometidos a gradientes térmicos naturales, ámbito de investigación este que ha recobrado interés en los últimos años. Wei et al. (2023)⁷ estimaron que un módulo termoeléctrico cementicio a escala de pavimento (1 km de longitud) podría entregar 35.2 kWh de electricidad durante 8 horas de exposición solar, haciendo visible el potencial de escalado de este tipo de materiales. Si bien el presente estudio se limitó a una caracterización a escala de probeta de laboratorio, el comportamiento creciente y estadísticamente robusto del coeficiente Seebeck con el contenido de grafito respalda la viabilidad de continuar explorando este material como candidato para aplicaciones de recolección de energía a mayor escala, siempre que se aborden en estudios futuros la medición de la conductividad eléctrica y térmica del compuesto, necesarias para calcular el factor de potencia y la figura de mérito (ZT) y así permitir una comparación más completa con los valores de ZT reportados en la literatura.^{9,12,13}

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el comportamiento termoeléctrico de materiales cementicios con incorporación de polvo de grafito en tres dosificaciones (5%, 7% y 10%), mediante el ensayo de 30 probetas cúbicas a los 28 días de curado. Un material termoeléctrico es aquel capaz de convertir directamente una diferencia de temperatura en energía eléctrica, aprovechando el efecto Seebeck: cuando existe un gradiente térmico entre dos caras del material, los portadores de carga (electrones o huecos) se desplazan de la zona caliente hacia la zona fría, generando una diferencia de potencial eléctrico medible entre los electrodos. En este estudio, dicho gradiente fue inducido artificialmente aplicando calor en una de las caras de la probeta, mientras la cara opuesta permaneció a temperatura ambiente, y la energía eléctrica generada fue captada por los electrodos de cobre calibre 10 embebidos en la capa media de grafito.

Los resultados confirman de manera estadísticamente sólida que el porcentaje de polvo de grafito es el factor determinante del desempeño termoeléctrico del compuesto. El ANOVA de un factor evidenció diferencias altamente significativas entre los tres grupos en voltaje ($F(2,27)=59.57$, $p<0.001$), corriente ($F(2,27)=58.74$, $p<0.001$) y coeficiente Seebeck ($F(2,27)=12.80$, $p<0.001$), y la prueba de Tukey HSD confirmó que las diferencias entre todos los pares de grupos (5% vs 7%, 5% vs 10% y 7% vs 10%) son estadísticamente significativas, rechazando en todos los casos la hipótesis nula de igualdad de medias ($p<0.05$).

El grupo correspondiente al 10 % de grafito es el que presenta mejor rendimiento termoeléctrico en todos los indicadores analizados. Además, que se obtiene el mayor voltaje medio (6.541 ± 1.827 mV), la mayor corriente eléctrica medida (0.0674 ± 0.0194 mA) o el mayor coeficiente Seebeck (451.3 ± 128.1 $\mu\text{V/K}$), con un rendimiento eléctrico de aproximadamente 441 nanowatts (0.44 microwatts) por probeta. Ello se traduce en un incremento de potencia aproximado de unas 85 veces en relación con el grupo de probetas de 5 % (5.2 nanowatts) y unas 6 en relación al grupo de 7 % (72.8 nanowatts). El grupo de 10 % también ha mostrado ser el más homogéneo de los tres desde el punto de vista de la variabilidad, ya que el coeficiente de variación de sus resultados era inferior al 29 % comparado con el 60 % para el grupo de probetas de 5 %, indicando que a mayor porcentaje de grafito se genera una red conductora más favorable y estable dentro del contexto de la matriz cementicia, que se encuentra en consonancia con la teoría de la percolación eléctrica.

En cuanto a las condiciones que generan más energía, los datos indican que el voltaje y la corriente aumentan proporcionalmente con la diferencia de temperatura alcanzada entre las caras de la probeta, confirmando el principio básico del efecto Seebeck: a mayor gradiente térmico, mayor energía generada. Las probetas del grupo de 10% que alcanzaron gradientes de 16-18 K produjeron los voltajes más altos del estudio (hasta 9.18 mV), mientras que las probetas con gradientes bajos (1-5 K) registraron los valores mínimos independientemente del porcentaje de grafito. Esto sugiere que la optimización del desempeño del material depende tanto de la dosificación de grafito como de maximizar el gradiente térmico durante el uso, lo cual resulta favorable en aplicaciones reales como pavimentos o fachadas, donde los gradientes térmicos

naturales entre la superficie expuesta al sol y el interior del elemento estructural pueden superar los 20 K durante las horas de mayor radiación solar.

En términos de aplicación práctica, las magnitudes de potencia generadas (nanowatts a microwatts por probeta) corresponden al rango de baja potencia, siendo útiles para la autoalimentación de sensores embebidos de bajo consumo, el monitoreo estructural inteligente mediante autodetección de temperatura, y el escalamiento a módulos termoeléctricos de mayor tamaño donde la conexión en serie y paralelo de múltiples unidades puede alcanzar niveles de potencia a escala de pavimento o elemento estructural.

Finalmente, se recomienda para investigaciones futuras evaluar dosificaciones superiores al 10% para determinar si la tendencia de mejora se mantiene o si existe un umbral de saturación de la red conductora, incorporar mediciones de conductividad eléctrica y térmica para calcular la figura de mérito ZT del material, y explorar el efecto sinérgico de combinar el polvo de grafito con fibra de carbono u óxidos metálicos nanoestructurados, estrategias que, según la literatura especializada, pueden incrementar significativamente el coeficiente Seebeck del compuesto cementicio.

COLABORADORES

- Univ. Emerson Oña
- Ph.D. Jonathan Guarachi Solano
- Ing. Irma Isabel Argote Claros

AGRADECIMIENTOS

- Especial agradecimiento al ing. Napoleón Aguilera, Decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno
- Agradecimiento al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno

REFERENCIAS

- [1]. Wei, J., Nie, Z., He, G., Hao, L., Zhao, L., & Zhang, Q. (2014). *Energy harvesting from solar irradiation in cities using the thermoelectric behavior of carbon fiber reinforced cement composites*. **RSC Advances**, 4(89), 48128–48134. <https://doi.org/10.1039/C4RA07864K>.
- [2]. Chen, Minghui y Yao, Jie y Zhong, Jing y Ruan, Wenqiang y Xiao, Huigang y Sun, Yubo. (2024), Compuestos de cemento multifuncionales con agregados conductores para aplicaciones de blindaje contra interferencias electromagnéticas. Disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4841903> o <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4841903>

- [3]. Stella, L., Johnston, C., Jani, R., Holmes, N., O'Donnell, G., & Pakrashi, V. (2022). *Modelling the thermoelectric properties of cement-based composites*. In Proceedings of the 12th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-12). Technological University Dublin. [TU Dublin Repository](#)
- [4]. Cao, H.Y., Yao, W., & Qin, J.J. (2011). Seebeck effect in graphite-carbon fiber cement based composite. *Advanced Materials Research*, 177, 566–569.
- [5]. Sun, M., Li, Z., Mao, Q., & Shen, D. (1998). Thermoelectric percolation phenomena and effect of carbon fiber on thermoelectric properties of carbon fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Research*, 28(11), 1707–1712.
- [6]. Ghosh, S., Harish, S., Rocky, K.A., Ohtaki, M., & Saha, B.B. (2019). Graphene enhanced thermoelectric properties of cement based composites for building energy harvesting. *Energy and Buildings*, 202, 109419.
- [7]. Wei, J., et al. (2023). A large-sized thermoelectric module composed of cement-based composite blocks for pavement energy harvesting and surface temperature reducing.
- [8]. Wei, J., Wang, Y., Li, X., Jia, Z., Qiao, S., Jiang, Y., Zhou, Y., Miao, Z., Gao, D., & Zhang, H. (2021a). Dramatically improved thermoelectric properties by defect engineering in cement-based composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [9]. Wei, J., Li, X., Wang, Y., Chen, B., Qiao, S., Zhang, Q., & Xue, F. (2021b). Record high thermoelectric performance of expanded graphite/carbon fiber cement composites enhanced by ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium bromide for building energy harvesting. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(10), 3682–3691.
- [10]. Ji, T., Zhang, S., He, Y., Zhang, X., & Li, W. (2022). Enhanced thermoelectric efficiency of cement-based materials with cuprous oxide for sustainable buildings. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 6403756.
- [11]. Orisakwe, E., Johnston, C., Jani, R., Liu, X., Stella, L., Kohanoff, J., Holmes, N., Norton, B., Qu, M., Yin, H., & Yazawa, K. (2023). Thermoelectric properties of cement composite analogues from first principles calculations. *Materials Research Express*, 10(9), 095505.
- [12]. Ghosh, S., Harish, S., Ohtaki, M., & Saha, B.B. (2020). Enhanced figure of merit of cement composites with graphene and ZnO nano inclusions for efficient energy harvesting in buildings. *Energy*, 198, 117396.

- [13]. Zhou, H., Liu, H., & Qian, G. (2022). Enhanced thermoelectric performances of CNTs-reinforced cement composites with Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ for pavement energy harvesting. *Nanomaterials*, 12(21), 3883.

BIBLIOGRAFÍA

Nacional de Grafite. (s.f.). *Grafine® – Natural crystalline graphite grades*. Nacional de Grafite. Recuperado de <https://www.grafite.com/en/grafine>

COMENTARIOS

Se incluyeron los últimos resultados obtenidos en diferentes porcentajes de grafito (incluido en el resumen), ya que el presente trabajo de investigación cuenta con una 2da fase que es la conexión en serie y paralelo para verificar el incremento del voltaje y corriente en cada caso.