

Un nuevo enfoque para optimizar dosificaciones de hormigón autocompactante

Benjamin Linden ⁽¹⁾ y Emilio García-Taengua ⁽¹⁾

⁽¹⁾ School of Civil Engineering, University of Leeds, Inglaterra, Reino Unido.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5958>

RESUMEN

Todo procedimiento para diseñar hormigones autocompactantes comprende dos etapas: la aplicación de un método de dosificación, y el ajuste de la mezcla mediante amasadas de prueba. Ambas se centran en el comportamiento del hormigón en estado fresco, buscándose maximizar tres propiedades fundamentales: fluidez, capacidad de llenado, y estabilidad. Este estudio propone formular matemáticamente el comportamiento en fresco del hormigón autocompactante como un fenómeno multivariado. Este nuevo enfoque posibilita una optimización más robusta de los hormigones autocompactantes. Con esta finalidad, se ha llevado a cabo un metanálisis de cerca de trescientas dosificaciones recogidas de distintas fuentes, abarcando: las propiedades de los materiales utilizados y sus cantidades relativas; los resultados de los ensayos de escurrimiento, embudo en V, anillo en J, caja en L, e índice visual de segregación; y la resistencia media a compresión simple. Se han estudiado las relaciones de codependencia entre los distintos parámetros medibles, y cómo estas relaciones se ven afectadas por cambios en la dosificación.

PALABRAS CLAVE: dosificación, optimización, resistencia, segregación.

1.- INTRODUCCIÓN

Las dosificaciones de hormigón autocompactante (HAC) buscan tres características fundamentales: capacidad de llenado, capacidad de paso, y estabilidad. La capacidad de llenado se puede modificar fácilmente con aditivos superplastificantes, pero asegurar al mismo tiempo un nivel adecuado de capacidad de llenado y estabilidad es más complejo. La capacidad de paso depende en gran medida del contenido en áridos y su tamaño máximo, además de su granulometría y la cohesión de la mezcla [1], [2]. La estabilidad puede medirse a través del índice visual de segregación o VSI [3], depende de la cohesión de la mezcla y de su viscosidad [4], que no debe verse reducida en exceso para evitar que la mezcla presente tendencia a segregar. El incremento del contenido en finos, mediante la incorporación de filler o adiciones activas, contribuye a una mayor cohesión. La adición de reguladores de la viscosidad es una estrategia complementaria a las anteriores al compensar

la reducción de viscosidad en condiciones de alta fluidez, reduciendo por tanto el riesgo de segregación [5].

Las consideraciones anteriores se han venido incorporando de forma más o menos directa a los métodos de dosificación propuestos para HAC. La mayoría de propuestas se pueden agrupar en cinco categorías [6]: métodos empíricos [7], [8]; basados en la resistencia a compresión [9], [10]; basados en el empaquetamiento de los áridos [11]–[13]; basados en la reología de la pasta [14], [15]; o bien derivados de análisis estadísticos [4], [16].

Los métodos de este último grupo proponen ecuaciones predictivas para las propiedades en fresco en función de la dosificación. Sin embargo, presentan problemas importantes: la hiper-especificación, cuando se intenta forzar ajustes casi perfectos, lo que conlleva graves pérdidas de generalidad; la representatividad de los datos experimentales, normalmente por el reducido número de amasadas; la poca atención que se da a la variabilidad; o el sesgo de confirmación, al intentar obtener ecuaciones que confirmen los comportamientos esperados. Nuestra propuesta es que los llamados métodos estadísticos de dosificación no se enfoquen a obtener dosificaciones, sino que se utilicen para optimizarlas, evaluando el impacto que los cambios en la dosificación tienen sobre el comportamiento en fresco.

2.- DEFINICIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO

2.1.- Motivación y objetivos

Hasta la fecha, no se había emprendido ningún estudio cuyo objetivo fuese modelizar el comportamiento de los HAC en un sentido amplio, incorporando la variabilidad de los datos de partida. Esta variabilidad debe reflejar la realidad de las dosificaciones de HAC. El objetivo de este estudio es incorporar esta variabilidad de los HAC en una base de datos y luego usarla para construir modelos sin pérdida de generalidad. Esto se ha hecho realizando un metanálisis de los resultados de diferentes estudios previamente realizados.

2.2.- Fases del estudio

Este estudio se organizó en cinco fases que se acometieron en el siguiente orden:

- Búsqueda bibliográfica, recolección de información y compilación de la misma en una base de datos, donde cada dato individual comprende la información relativa a la dosificación así como las propiedades en fresco. Para mayor generalidad, se hizo un esfuerzo importante para lograr una buena representación de casos con valor del índice visual de segregación y de hormigones autocompactantes con fibras.
- Análisis descriptivo preliminar de las distintas variables, para lograr una buena representatividad de la información recogida en la base de datos, detectando y excluyendo casos atípicos. Para evitar sesgos, se procedió a la definición razonada de reglas de filtrado, que se aplicaron sistemáticamente en la limpieza de la base de datos.
- Tratamiento de datos faltantes. Como no todos los estudios previos han caracterizado el comportamiento en fresco de los HAC mediante los mismos ensayos, no todos los casos recogidos en la base de datos incluirían valores para todas las variables. Se

decidió descartar los casos donde faltaba una parte importante de la información, y en casos puntuales se completó la información faltante mediante técnicas de imputación.

- Análisis factorial. Sobre la base de datos una vez tratada (tras las operaciones de limpieza e imputación de faltantes), se recurrió a la condensación de la información mediante la aplicación de técnicas habituales en minería de datos, en particular el análisis de componentes principales o PCA [17]. Como resultado, se obtuvieron los factores fundamentales más representativos del comportamiento en fresco de los HAC.
- Correlación de los parámetros de dosificación con los factores representativos del comportamiento en fresco, para obtener ecuaciones que reproduzcan el efecto que tienen los cambios en la dosificación. Estas ecuaciones son aplicables con generalidad, no para predecir valores exactos, sino para estimar cómo las variaciones en la dosificación afectan al comportamiento en fresco de los HAC, y por tanto constituyen la base de un nuevo enfoque de optimización de dosificaciones de HAC.

2.3.- Metodología

2.3.1.- Análisis de componentes principales (PCA)

Las técnicas de minería de datos se utilizan en el análisis de bases de datos y ayudan a extraer conocimiento de ellas. La aplicación del PCA permite resumir la información para que sea más manejable matemáticamente y pueda ser analizada e interpretada con mayor facilidad. En esta investigación, se recurrió al PCA para condensar los parámetros que se pueden obtener de los diversos ensayos de caracterización de los HAC. Dichos parámetros están fuertemente correlacionados (por ejemplo, los tiempos T_v del embudo en V y T_{500} del ensayo de escurrimiento), y por tanto se pueden condensar en un número menor de variables, o factores, sin pérdida sustancial de información. La Figura 1 ilustra la reducción de tres variables originales correlacionadas entre sí a una única variable, o factor.

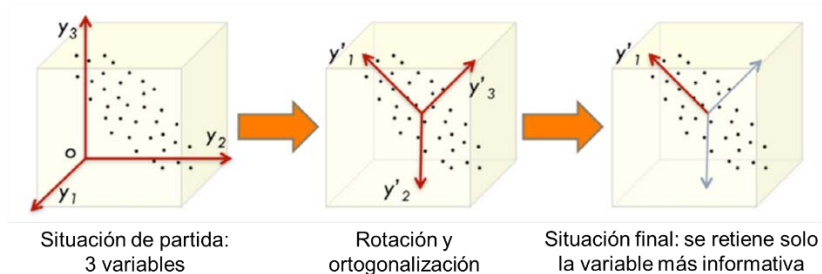


Figura 1. Ilustración del fundamento del PCA.

2.3.2.- Regresión lineal múltiple y superficies de respuesta

Los factores que describen las propiedades de HAC obtenidos mediante la aplicación del PCA a la base de datos pueden relacionarse con las cantidades relativas de los distintos constituyentes de los HAC, buscando modelizar las relaciones causa-efecto entre la dosificación y las propiedades en estado fresco. Para ello se recurrió a la regresión lineal múltiple, obteniéndose ecuaciones que explican el comportamiento en fresco (los factores

obtenidos mediante PCA) en función de las variables que describen la dosificación (tales como relación agua/cemento, o contenido total de áridos). La representación gráfica de estas funciones con respecto a las distintas variables da lugar a lo que se denominan superficies de respuesta, muy útiles para detectar e interpretar estas relaciones.

3.- BASE DE DATOS: CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO

Los datos recopilados se extrajeron de publicaciones indexadas en ScienceDirect®, a partir de los resultados de las búsquedas con los términos “self compacting concrete” y “self consolidating concrete”. Se seleccionaron únicamente aquellos casos donde se disponía de, al menos, la siguiente información: resultados del ensayo de escurrimiento, embudo en V, o caja en L, y toda la información relativa a las cantidades relativas de los distintos constituyentes. En total, se recopiló un total de 652 dosificaciones a partir de 131 artículos.

3.1.- Selección de dosificaciones: reglas de filtrado

Para que la base de datos fuera representativa del espectro de dosificaciones de HAC más habituales y minimizar el impacto de datos correspondientes a casos muy especiales, se descartaron los que no cumplieran los siguientes requisitos o reglas de filtrado:

- Contenido total de áridos entre 1200 y 2000 kg/m³.
- Contenido en árido grueso no inferior a 400 kg/m³.
- Tamaño máximo de árido no superior a 20 mm.
- Contenido total de cemento y adiciones entre 300 y 650 kg/m³.
- Contenido de cemento entre 150 y 500 kg/m³.
- Relación agua/cemento entre 0,25 y 0,65.

La Tabla 1 muestra los valores mínimo, máximo y promedio para cada una de las variables de dosificación antes y después del filtrado de la base de datos.

3.2.- Tratamiento de datos faltantes

Los parámetros relativos al comportamiento en fresco que se incluyeron en este estudio son: el escurrimiento SF , en mm, el tiempo T_{500} , en segundos, y el índice visual de segregación (VSI) a partir del ensayo de escurrimiento; el tiempo T_v , en segundos, del ensayo del embudo en V; y el cociente $H2/H1$ del ensayo de la caja en L. No todos los ensayos anteriores se llevan a cabo siempre, y por tanto se tenía una proporción de datos faltantes, como se muestra en la Tabla 2.

Las técnicas de imputación de datos faltantes, en las que los valores faltantes se estiman a partir de los casos completos, son aplicables siempre que su proporción no sea superior al 20%-30% [18]. En este estudio, se eliminaron parte de los casos incompletos seleccionados aleatoriamente, y se procedió a la imputación de los restantes. La comparación entre antes y después está en la Tabla 2. Tras las operaciones de filtrado y tratamiento de datos faltantes, el número de casos en la base de datos se redujo a 216, todos ellos completos y quedando dentro de los rangos definidos como más representativos de los HAC.

Tabla 1. Variables de dosificación: rango y promedio antes y después del filtrado (kg/m³).

Variable	Antes			Después		
	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
<i>Ligante</i>						
Cemento	110	707	391	180	500	367
Adiciones	112	800	78	120	378	58
Agua	123	347	193	126	265	190
<i>Áridos</i>						
Fino	0	1286	818	392	1135	904
Grueso	0	1579	697	420	1187	705
D.máx. (mm)	4	25	16	8	20	16
<i>Aditivos</i>						
SP	0,24	72	6	0,8	13	5
VMA	0	6	0,2	0	6	0,2
<i>Fibras</i>						
Contenido	0	136	8	0	80	3
Longitud (mm)	0	60	7	0	60	4
Esbeltez	0	500	11	0	200	9

Tabla 2. Propiedades: rango, promedio y porcentaje de datos faltantes antes y después de las operaciones de filtrado y descarte de casos incompletos.

		SF(mm)	T ₅₀₀ (s)	T _V (s)	H2/H1	VSI
<i>Antes</i>	Mínimo	60	0,5	1,2	0	0
	Máximo	890	31	50	1	3
	Promedio	680	3,5	9,1	0,84	0,5
	Faltantes	0,1%	34%	43%	49%	51%
<i>Después</i>	Mínimo	565	0,5	1,2	0,3	0
	Máximo	830	7	23	1	2
	Promedio	686	2,6	7,8	0,85	0,5
	Faltantes	0%	25%	28%	26%	25%

4.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

4.1.- Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA sobre las variables correspondientes al comportamiento en fresco reveló tres componentes principales o factores, que condensan el 78% de toda la información de la base de datos en términos de varianza. Los pesos relativos de cada una de las variables iniciales sobre estos factores se muestran en la Tabla 3, en tanto por uno. Estos pesos, en

valor absoluto, apuntan una interpretación muy clara de cada uno de los factores. $F1$ está fuertemente dominado por los tiempos T_{500} y T_v , y por tanto representa la fluidez del HAC. $F2$ viene determinado por el escurrimiento SF y el cociente $H2/H1$, representativos del alcance del HAC en su flujo. Por último, $F3$ depende casi exclusivamente del índice VSI , y por tanto representa la tendencia a la inestabilidad en tanto que riesgo de segregación.

Tabla 3. Factores obtenidos del PCA.

	$F1$	$F2$	$F3$
SF	0.075	-0.862	0.153
T_{500}	0.821	0.103	0.006
T_v	0.854	-0.008	0.038
$H2/H1$	0.197	0.784	0.214
VSI	0.022	0.022	0.981

Una de las ventajas del PCA es que los factores que se obtienen están totalmente incorrelacionados: $F1$, $F2$ y $F3$ son independientes entre sí y corresponden a tres propiedades fundamentales, en consonancia con la capacidad de llenado, capacidad de paso, y estabilidad. Esta independencia entre $F1$, $F2$ y $F3$ permite tratarlos por separado, simplificando enormemente una aplicación robusta de las técnicas de optimización al separar un problema multiobjetivo en tres problemas simples.

4.2.- Superficies de respuesta

Para cada uno de los factores $F1$ (fluidez), $F2$ (alcance), y $F3$ (inestabilidad), después de tipificar sus valores, se llevó a cabo un análisis de regresión lineal múltiple obteniéndose las superficies de respuesta que se muestran en las Figuras 2-6.

En la Figura 2 se muestran las superficies de respuesta correspondientes al modelo desarrollado para $F1$, representativo de la fluidez de los HAC, en función de la relación agua/cemento (A/C), la dosificación de superplastificante (SP, en kg/m^3) y la cantidad de cemento (kg/m^3). El modelo reproduce satisfactoriamente las tendencias generales y también las interacciones entre los distintos parámetros. Aumentando la dosis de superplastificante se consigue aumentar la fluidez, y dicha tendencia se ve moderada significativamente cuando se consideran valores bajos de la relación A/C. Cuando la dosis de superplastificante es elevada, la fluidez es poco sensible a los cambios en la relación A/C. En cuanto a la relación entre contenido de cemento y la fluidez, el modelo indica que existe un contenido óptimo de cemento, alrededor de los $400 \text{ kg}/\text{m}^3$.

La Figura 3 muestra las superficies de respuesta del mismo modelo para $F1$, ahora en relación al cociente arena/grava y el tamaño máximo de árido. Con respecto al cociente arena/grava, relacionado con el nivel de cohesión, el rango óptimo para maximizar la fluidez se sitúa entre 1,2 y 1,7, ya que el valor de $F1$ se ve reducido drásticamente fuera de este rango. En cuanto al tamaño máximo de árido, su efecto sobre la fluidez varía según la relación A/C. Cuando la relación A/C es alta, conviene reducir el tamaño máximo de árido

para mejorar la fluidez, pero esta tendencia cambia de signo si la relación A/C es baja. Sin embargo, la Figura 3 muestra que el factor fundamental es el cociente arena/grava.

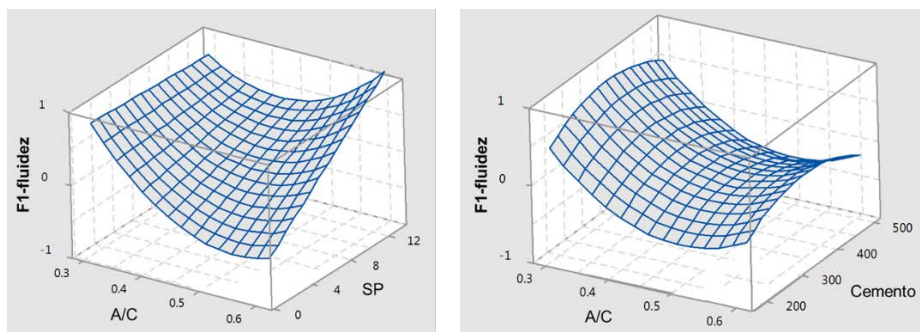


Figura 2. Efecto de la relación A/C, cantidad de cemento y aditivo sobre $F1$ (fluidez).

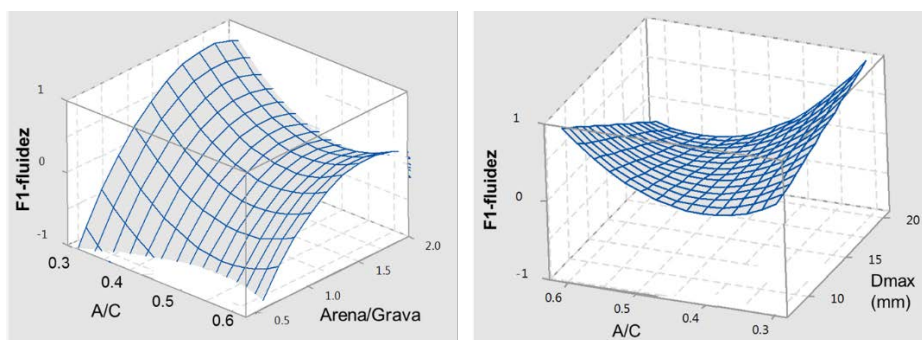


Figura 3. Sensibilidad del factor $F1$ (fluidez) a la granulometría de los áridos.

Dos de las superficies de respuesta correspondientes al modelo obtenido para el factor $F2$, representativo del escurrimiento o alcance, se muestran en la Figura 4. La tendencia con respecto al superplastificante es clara, y lineal. Sin embargo, en cuanto a la relación A/C, parece que valores fuera del intervalo entre 0,45 y 0,55 son más favorables en relación con el escurrimiento. Por otra parte, el modelo para $F2$ reproduce muy bien el efecto de la incorporación de modificadores de la viscosidad (VMA, en kg/m^3) y su interacción con los superplastificantes.

El modelo obtenido para el factor $F3$, que representa el riesgo de inestabilidad, se muestra en las Figuras 5 y 6. En la Figura 5, se observa que la reducción del contenido en cemento conlleva un incremento considerable del riesgo de segregación, especialmente por debajo de los 400 kg/m^3 . El modelo también reproduce el efecto negativo que tiene la reducción de la relación A/C si no se acompaña del correspondiente ajuste en la dosificación de superplastificante.

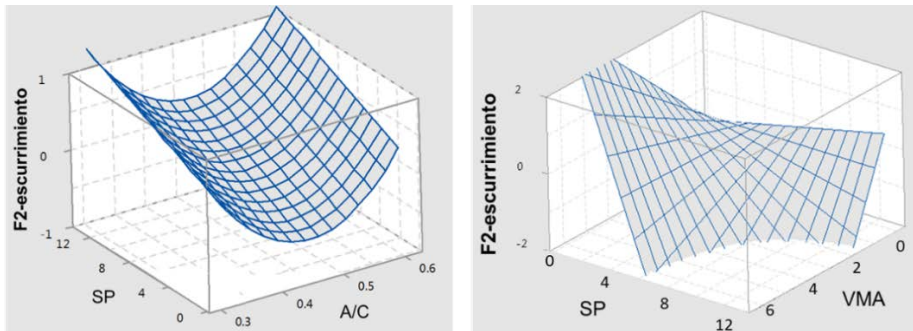


Figura 4. Variación de $F2$ (escorrimento) con la relación A/C y las dosis de aditivos.

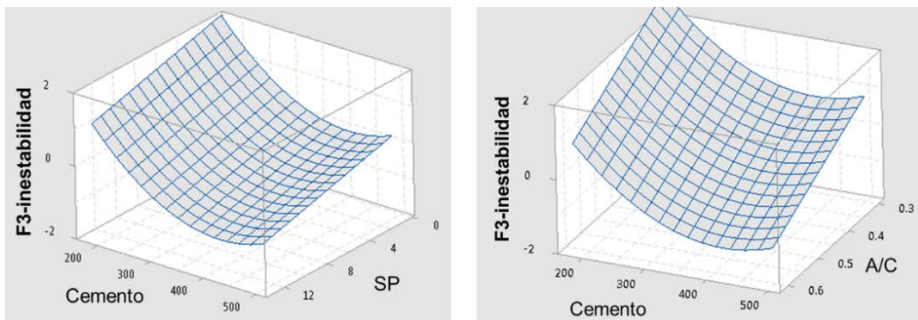


Figura 5. Efecto de la relación A/C, dosis de cemento y aditivo sobre $F3$ (inestabilidad).

Las superficies de respuesta en la Figura 6, por su parte, muestran cómo el modelo desarrollado para $F3$ también reproduce el efecto que la composición de los áridos y la adición de fibras tienen sobre el riesgo de segregación. Cuando se incorporan fibras al HAC, se precisan contenidos relativamente altos de cemento para mantener la estabilidad de las mezclas en fresco, que obviamente se ve afectada por el contenido en fibras. En cuanto a los áridos, siempre que el tamaño máximo sea no inferior a los 12 mm, la mejor estrategia para reducir el riesgo de segregación es incrementar el contenido de arena.

4.- CONCLUSIONES

- Se ha modelizado el comportamiento de los HAC a partir de una base de datos con dosificaciones y resultados de su comportamiento en fresco, compilada a partir de 131 publicaciones indexadas, con un total de 652 dosificaciones.
- El análisis de las variables correspondientes al comportamiento en fresco reveló tres componentes principales o factores: $F1$, que representa la fluidez; $F2$, que representa el alcance del HAC en su flujo; y $F3$, que representa la tendencia a la inestabilidad.
- $F1$, $F2$ y $F3$ son totalmente independientes entre sí. Esto permite tratarlos por separado, simplificando enormemente una aplicación robusta de las técnicas de optimización al separar un problema multiobjetivo en tres problemas simples.

- En términos de fluidez, se ha detectado un contenido óptimo de cemento alrededor de los 400 kg/m^3 , que coincide con el detectado en términos de estabilidad: contenidos de cemento por debajo de 400 kg/m^3 conllevan un mayor riesgo de segregación.
- El parámetro fundamental en términos de fluidez es la relación arena/grava, y su rango óptimo se sitúa entre los valores 1,2 y 1,7. En cuanto al tamaño máximo de árido, su efecto sobre la fluidez varía según la relación A/C.

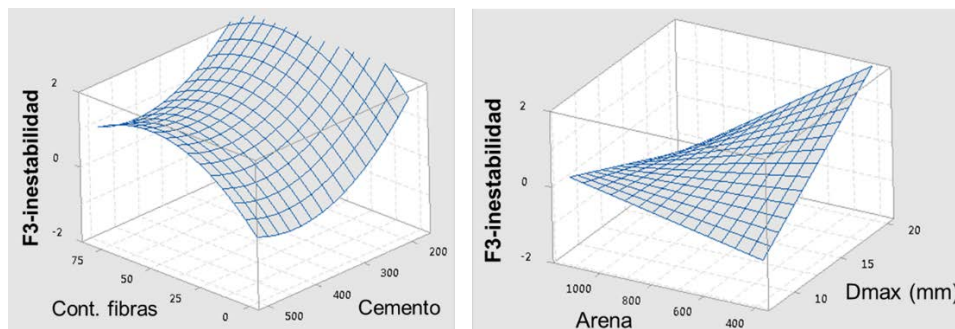


Figura 6. Sensibilidad de $F3$ (inestabilidad) a las fibras, y características de los áridos.

NOTA SOBRE LA BASE DE DATOS

Por razones de extensión, los 131 artículos de donde se extrajo la información incorporada a la base de datos objeto de este estudio no se citan en la lista de referencias. Sin embargo, dicha información, así como la base de datos íntegra, están disponibles bajo solicitud a los autores a través del correo e.garcia-taengua@leeds.ac.uk (Emilio García-Taengua).

REFERENCIAS

- [1] T. Noguchi, S. G. Oh, and F. Tomosawa, “Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete,” in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium*, 1999, pp. 59–70.
- [2] I. Y. T. Ng, H. H. C. Wong, and a. K. H. Kwan, “Passing ability and segregation stability of self-consolidating concrete with different aggregate proportions,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 447–457, 2006.
- [3] D. K. Panesar and B. Shindman, “The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 252–264, 2012.
- [4] K. H. Khayat, C. Hu, and H. Monty, “Stability of self compacting concrete, advantages, and potential applications,” in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium*, 1999, pp. 143–152.
- [5] K. H. Khayat, “Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An

- overview,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 171–188, 1998.
- [6] C. Shi, Z. Wu, K. Lv, and L. Wu, “A review on mixture design methods for self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 84, pp. 387–398, 2015.
- [7] H. Okamura and K. Ozawa, “Mix design for self-compacting concrete,” *Concr. Libr. JSCE*, no. 496, pp. 107–120, 1995.
- [8] O. R. Khaleel and H. Abdul Razak, “Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate,” *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 691–700, 2014.
- [9] G. F. Kheder and R. S. Al Jadiri, “New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements,” *ACI Mater. J.*, vol. 107, no. 5, pp. 490–497, 2010.
- [10] P. Dinakar, K. P. Sethy, and U. C. Sahoo, “Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag,” *Mater. Des.*, vol. 43, pp. 161–169, 2013.
- [11] T. Sedran and F. De Larrard, “Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model,” in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium*, 1999, pp. 321–332.
- [12] N. Su, K.-C. Hsu, and H.-W. Chai, “A simple mix design method for self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1799–1807, 2001.
- [13] J. Kanadasan and H. A. Razak, “Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing,” *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 9–19, 2014.
- [14] A. W. Saak, H. M. Jennings, and S. P. Shah, “New methodology for designing self-compacting concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 98, no. 6, pp. 429–439, 2001.
- [15] L. Ferrara, Y. D. Park, and S. P. Shah, “A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 957–971, 2007.
- [16] R. Patel, K. M. A. Hossain, M. Shehata, N. Bouzoubaâ, and M. Lachemi, “Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 101, no. 4, pp. 294–302, 2004.
- [17] H. Abdi and L. J. Williams, “Principal component analysis,” *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, Jul. 2010.
- [18] J. W. Graham, “Missing Data Analysis: Making It Work in the Real World,” *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 60, no. 1, pp. 549–576, Jan. 2009.