

**HAC**  
**BAC** **2018**

**V CONGRESO IBEROAMERICANO DE  
HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE Y  
HORMIGONES ESPECIALES**

*V CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE  
BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL E  
BETÕES ESPECIAIS*

**Valencia**

*5 y 6 de marzo de 2018*

**Libro de Comunicaciones** | *Livro das Comunicações*

EDITORES

**Aitor Llano-Torre**

**José Rocío Martí-Vargas**

**Pedro Serna Ros**





**V CONGRESO IBEROAMERICANO DE HORMIGÓN  
AUTOCOMPACTANTE Y HORMIGONES ESPECIALES**  
*V CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE  
BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL E BETÕES ESPECIAIS*

**Valencia**  
5 y 6 de Marzo de 2018

<http://hac2018.hac-bac.webs.upv.es>  
<http://ocs.editorial.upv.es/index.php/HAC-BAC/HAC2018>

**EDITORES**

Aitor Llano-Torre  
José Rocío Martí-Vargas  
Pedro Serna Ros



*Congresos UPV*

**V CONGRESO IBEROAMERICANO DE HORMIGÓN  
AUTOCOMPACTANTE Y HORMIGONES ESPECIALES**

*V CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE BETÃO  
AUTO-COMPACTÁVEL E BETÕES ESPECIAIS*

**Valencia**

5 y 6 de marzo de 2018

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/HAC-BAC/HAC2018/about/editorialPolicies>

© Editores científicos

Aitor Llano-Torre

José Rocío Martí-Vargas

Pedro Serna Ros

© de los textos: los autores

© 2018, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València.

[www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) Ref: 6377\_01\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-591-0

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.8274>



*V Congreso iberoamericano de hormigón autocompactante y hormigones especiales*

Se distribuye bajo licencia de Creative Commons 4.0 Internacional

Basada en una obra en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/HAC-BAC/HAC2018>

## PRESENTACIÓN APRESENTAÇÃO

Tras la cuarta edición de la serie de congresos HAC/BAC planteamos ampliar la temática de congreso más allá del enfoque a los Hormigones Autocompactantes. Fue una decisión basada en la tendencia de que muchos de los hormigones especiales se plantean como autocompactantes, y en la realidad de que muchos de nosotros trabajamos en otros tipos de hormigones especiales. Siendo uno de los objetivos del congreso facilitar el conocimiento mutuo y generar sinergias entre nuestros grupos parecía lógico que ampliar la temática era buena idea.

Es difícil conseguir una representación importante de todos los países de nuestro ámbito lingüístico. Estamos en todos los continentes y aunque cada vez las distancias son más cortas, no es fácil desplazarse o los costes son importantes. A pesar de ello en la actual edición contaremos con 66 artículos con autores procedentes de 17 países. Esperamos poder ampliar este número para próximas ediciones.

La temática se sigue enfocando prioritariamente a los Hormigones Autocompactantes pero con interesantes aportaciones en temas de hormigones de fibras, reciclados, autosanables, y centrándonos en aspectos tecnológicos. Para hacer que el Congreso resultara fácil de seguir hemos pretendido darle una estructura coherente en cuanto a contenido, más allá de la temática inicial propuesta ya que, además del enfoque que se puede dar al trabajo, influye el tipo de hormigón especial tratado.

También hemos intentado evitar sesiones en las que las ponencias correspondan a personas de la misma procedencia (país o institución). Nuestro objetivo es tanto mostrar el estado de los estudios que realizamos y los avances logrados, como fomentar la coordinación entre nuestros grupos y promover los debates.

Asumiendo que es imposible conseguir el momento ideal para todos los artículos a presentar, espero que la mayoría de los ponentes se encuentren cómodos en su sesión, que los asistentes encuentren lo que buscan y que podamos comentar y discutir sobre nuestros resultados y proyectos.

Sabemos que es difícil incorporar los nuevos avances en materiales y tecnologías en la industria de la construcción, así como seguir desarrollando nuestros trabajos con los medios disponibles. Por eso hemos planteado una mesa redonda, a la que intentaremos incorporar a diversos agentes sociales para analizar con ellos las causas de la poca capacidad de la industria de la construcción para asimilar estos avances.

Contamos con la participación de tres ponentes invitados de muy alto nivel, y desde estas líneas quiero agradecer a Barzin Mobasher, Nele de Belie y Emmanuel Denarié su disponibilidad para pasar este tiempo con nosotros y presentarnos sus ideas.

Este congreso no tendría sentido sin la contribución de todos los que habéis escrito las ponencias, pero tampoco sin los que han colaborado en la revisión de cada uno de esos artículos. Por ello quiero mostrar mi agradecimiento a los miembros de la Comité Científico, y a los que de alguna manera hacéis que este congreso llegue a su quinta edición. Mención especial para nuestros patrocinadores SIKA, PENETRON, FIBRAFLEX, MC BAUCHEMIE y BASF por su contribución a la viabilidad del congreso, y a la UPV por facilitar el uso de sus instalaciones. Un agradecimiento particular a Aitor y José R. por su gran labor en la organización del evento y en la preparación y edición del documento final, no sólo por el trabajo que representa, sino también por las ideas que han aportado y por haber controlado las mías.

A partir de este momento el HAC/BAC 2018 es vuestro.

Muchas gracias.

Pedro Serna

**Presidente Comité Organizador HAC2018**

## COMITÉS DEL CONGRESO COMISSÕES DE CONGRESSO

### COMITÉ ORGANIZADOR | COMISSÃO ORGANIZADORA

Pedro Serna Ros (España)  
Aitor Llano-Torre (España)  
José Rocío Martí-Vargas (España)

### COMITÉ DE HONOR | COMISSÃO DE HONRA

Pedro Serna Ros  
Antonia Pacios  
Sandra Nunes  
Joaquim A.O. Barros  
Romildo D. Toledo Filho

### COMITÉ CIENTÍFICO | COMISSÃO CIENTÍFICA

Antonio Aguado de Cea (España)  
Carlos M. Aire Untivero (México)  
M<sup>a</sup> Cruz Alonso Alonso (España)  
Mônica Barbosa (Brasil)  
Bryan E. Barragán (Francia)  
Joaquim A.O. Barros (Portugal)  
Jorge Brito (Portugal)  
Sergio Carmona Malatesta (Chile)  
Ángel Castillo Talavera (España)  
Sergio H. P. Cavalero (España)  
Hector Cifuentes (España)  
Antonio Conforti (Italia)  
Joana Sousa Coutinho (Portugal)  
Estefanía Cuenca Asensio (Italia)  
Vitor M. C. F. Cunha (Portugal)  
Silvio Delvasto Arjon (Colombia)  
Nelson E. Díaz Brito (Cuba)  
Alejandro Durán Herrera (México)  
Rui Faria (Portugal)

M<sup>a</sup> Esther Fernández (Uruguay)  
Luis Fernández Luco (Argentina)  
Liberato Ferrara (Italia)  
Antonio Figueiredo (Brasil)  
Fernando Almeida Filho (Brasil)  
Albert de la Fuente (España)  
Jaime C. Gálvez Ruiz (España)  
Pedro Garcés (España)  
Emilio García-Taengua (Reino Unido)  
Fernando L. Gayarre (España)  
Ravindra Gettu (India)  
Graciela Giaccio (Argentina)  
Lluís Gil (España)  
Ester Giménez Carbó (España)  
Paulo César Correia Gomes (Brasil)  
Arlindo Freitas Gonçalves (Portugal))  
Belen Gonzalez-Fonteboa (España)  
Holmer Savastano Junior (Brasil)  
Aitor Llano-Torre (España)

Juan Ángel López (España)  
Lino Maia (Portugal)  
José R. Martí-Vargas (España)  
Fernando Martínez Abella (España)  
Jesús Mínguez Algarra (España)  
Climent Molins (España)  
Amparo Moragues Terrades (España)  
Juan Navarro Gregori (España)  
Miguel C. Santos Nepomuceno (Portugal)  
Sandra Nunes (Portugal)  
Eva Oller (España)  
Antonia Pacios (España)  
Gustavo J. Parra-Montesinos (EEUU)  
Jorge J. Payá Bernabeu (España)  
M<sup>a</sup> José Pelufo Carbonell (España)  
Francisca Puertas Maroto (España)

Wellington Repette (Brasil)  
David Revuelta Crespo (España)  
António Bettencourt Ribeiro (Portugal)  
Gemma Rodríguez (Uruguay)  
Marta Roig-Flores (España)  
Gonzalo Ruíz López (España)  
Mercedes Sanchez Moreno (España)  
Sindy Seara-Paz (España)  
Pedro Serna (España)  
Flávio A. Silva (Brasil)  
Romildo D. Toledo Filho (Brasil)  
Berenice Martins Toralles (Brasil)  
Bernardo Tutikian (Brasil)  
Andrea Ulloa Mayorga (Colombia)  
Manuel Gomes Vieira (Portugal)  
Raúl Zerbino (Argentina)



**INSTITUCIONES**  
*INSTITUIÇÕES*

**INSTITUCIONES ORGANIZADORAS | INSTITUIÇÕES ORGANIZADORAS**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**INSTITUCIONES COLABORADORAS | INSTITUIÇÕES COLABORAÇÃO**





## EXPOSITORES

### EXPOSITOR PLATINUM



### EXPOSITOR GOLD



### EXPOSITORES BRONZE

**FIBRAFLEX**®





## ÍNDICE

### PONENTES INVITADOS | PALESTRANTES CONVIDADOS

Ultra High Performance Concrete - Materials Formulations and Serviceability based Design <i>Y. Yao, A. Arora, N. Neithalath and B. Mobasher</i> .....	1
Self-healing and repair of concrete structures: COST action CA15202 SARCOS and lessons learnt from FP7 project HEALCON <i>N. de Belie</i> .....	15
UHPFRC for the cast-in place reinforcement of offshore maritime signalization structures <i>E. Denarié</i> .....	17

### REOLOGÍA | REOLOGIA

Dosificación de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero basado en el estudio de la reología de pasta <i>A. de la Rosa Velasco, E. Poveda Bautista, H. Cifuentes Bulté y G. Ruiz López</i> .....	33
Efectividad de la dosificación de superplastificante sobre la dispersión de nanopartículas en el hormigón <i>H. Brace y E. García-Taengua</i> .....	45
Influencia de la naturaleza y granulometría de los áridos en el comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente <i>S. Gismera, M.M. Alonso y F. Puertas</i> .....	55
Influencia de las variaciones en los materiales sobre la reología de hormigones autocompactantes reciclados <i>I. González-Taboada, B. González-Fontebova, F. Martínez-Abella y G. Rojo-López</i> .....	65
Influencia de aditivos orgánicos en las propiedades reológicas de pastas de cemento de aluminato de calcio <i>M. Roig-Flores, M. Palacios, M. Martínez-Urbanos y M. C. Alonso</i> .....	75
Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto <i>M. Amario, M. Pepe e R. D. Toledo Filho</i> .....	85

## CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS | CRITÉRIOS DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO

Combinación de fibras de acero de última generación para el refuerzo de hormigón autocompactante <i>M. G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez y A. Cortez</i> .....	97
Estratégias de mitigação da retração em betões auto-compactáveis <i>M. José Oliveira, A. Bettencourt Ribeiro e F. Garrido Branco</i> .....	107
Betão autocompactable produzido com resíduo agroindustrial <i>J. Moretti, S. Nunes e A. Sales</i> .....	117
Crítérios para definição da composição de betões leves autocompactable com agregados de argila expandida <i>M. C. S. Nepomuceno, L. A. P. Oliveira e S. F. Pereira</i> .....	127
Betão auto-compactável com incorporação de resíduo de mármore <i>A. Destefani, S. Nunes e J. Sousa-Coutinho</i> .....	137
Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis dosados por empacotamento de partículas <i>I. S. G. Cavaliere, R. S. Campos, M. P. Barbosa e A. E. P. G. A. Jacintho</i> .....	147
Aditivos superplastificantes de última generación basados en polimeros PAE para el control de la viscosidad plástica del hormigón <i>P. Borralleras, J.J. Jurado, S. Parra y J. Caballero</i> .....	157
Un nuevo enfoque para optimizar dosificaciones de hormigón autocompactante <i>B. Linden y E. García-Taengua</i> .....	167
Diseño de mezclas de hormigones autocompactantes con alto contenido de adiciones minerales y áridos de diferentes naturaleza para desempeño en ambientes altamente agresivos <i>J. Puentes, J.L. García Calvo y M. C. Alonso</i> .....	177
Cajas de trabajabilidad como herramienta de diseño de hormigones autocompactantes con árido reciclado <i>I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella y F. Varela-Puga</i> .....	187
Nuevos hormigones celulares geopoliméricos aireados con agua oxigenada: síntesis y propiedades <i>A. Font, J.M. Monzó, L. Soriano, V. Borrachero y J. Payá</i> .....	197

## TECNOLOGÍA | TECNOLOGIA

Respuesta frente a cargas estáticas y frente a explosiones en hormigones de alta resistencia reforzados con fibras <i>R. Zerbino, G. Giaccio, M. C. Torrijos, B. Luccioni, F. Isla, R. Codina y D. Ambrosini</i> .....	209
---	-----

Nuevos hormigones para premoldeados en Uruguay <i>G. Rodríguez de Sensale, I. Rodríguez Viacava, R. Rolfi, L. Segura-Castillo</i> <i>y M. E. Fernández</i> .....	219
Comportamento mecânico de betão auto-compactável produzido com agregados reciclados provenientes da indústria de pré-fabricação <i>S. A. Santos, P. R. da Silva e J. de Brito</i> .....	229
Influência da adição de macrofibra polimérica no comportamento mecânico de concretos de alta resistência <i>A. Macêdo Leite y A. Lorenzetti de Castro</i> .....	239
Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados <i>J. R. Crespo y J. A. Hurtado</i> .....	249
Caracterización de ceniza de biomasa con metales pesados adsorbidos como adición en hormigones <i>M. C. Pacheco, J. M. Meneses, R. Maya y M. L. Carmona</i> .....	259
Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil <i>R. S. Campos, M. P. Barbosa e G. de F. Maciel</i> .....	269
Modelización del mecanismo de pérdida de consistencia provocado por arcillas en pastas de cemento con superplastificantes base policarboxilato <i>P. Borralleras, I. Segura y A. Aguado</i> .....	279
Protocolo de valorización de residuos en la fabricación de materiales de base cemento: sedimentos dragados como componente de hormigón autocompactante <i>F. Rozas, A. Castillo, I. Martínez y M Castellote</i> .....	291
Empleo de residuos de industria cementera y arrocera en micro-hormigón para paneles de viviendas de interés social en Uruguay <i>B.S. Sabalsagaray, A.G. Boiani y G. Rodríguez de Sensale</i> .....	301
Estudo da microcelulose em compósitos cimentícios <i>L. Fernanda Silva, S. Parveen, A. Gomes Filho, R. Fangueiro, P. Sardeiro e R. D.Vanderlei</i> ..	311
Desempeño de compuestos con fibras de alcohol polivinílico y nano-fibras/tubos de carbono <i>J. Hoheneder, I. Flores-Vivian, L. Vergara-Alvarez y K. Sobolev</i> .....	321
<b>METODOLOGÍAS DE ENSAYO   METODOLOGIAS DE ENSAIO</b>	
Determinação da resistência à tração de camadas de UHPFRC com base em ensaio não-destrutivo <i>S. Nunes, M. Pimentel e A. Abrishambaf</i> .....	331
Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona <i>S. Carmona y C. Molins</i> .....	341

Capacidad de autosanación de mortero con aditivos cristalinos mediante absorción capilar <i>M. Roig-Flores, C. Litina, A. Al-Tabbaa y P. Serna</i> .....	351
Comportamiento diferido en estado fisurado de elementos de UHPFRC a flexotracción <i>A. Llano-Torre, J.A. López, J.R. Martí-Vargas y P. Serna</i> .....	361
Avaliação da durabilidade do concreto autoadensável com diferentes teores de filler calcário em substituição ao cimento Portland <i>L. Rodrigues Meira de Miranda, F. Gonzales de Resende e V. Maria Silva Capuzzo</i> .....	373
Estudio de las reacciones de hidratación temprana en el hormigón proyectado <i>I. Galan, A. Stauffacher, F. Mittermayr, M. Thumann, W. Kusterle, P. Juilland, C. Stenger y B. Lindlar</i> .....	383

## VERIFICACIONES EXPERIMENTALES | VALIDAÇÕES EXPERIMENTAIS

Estudo de viabilidade técnica para substituição parcial de cimento por lignina no concreto auto-adensável (CAA) <i>C. Calado, A. Camões, F. Elias, G. Dalpane e B. Ferraz</i> .....	395
Repetitividad de la capacidad autorreparante de hormigones reforzados con fibras con aditivo cristalino <i>E. Cuenca, A. Tejedor y L. Ferrara</i> .....	405
Valorización de residuos sintéticos post-consumo para fibro-refuerzo de hormigón <i>M. E. Fernández Iglesias, G. Rodriguez de Sensale, I. Dávila Álvarez, V. Saravia Sosa y F. Petrone Núñez</i> .....	415
Concreto autoadensável: estudos de dosagem e validação de campo <i>S. Formagini, L. B. M. Barreto, P. S. Schanoski e G. S. Riva</i> .....	425
Influencia de las condiciones de curado en las propiedades a edades tempranas de hormigones autocompactantes con filler calizo, microsilíce y nanosilíce <i>G. Barluenga, C. Guardia y J. Puentes</i> .....	435
Influência da adição de fibras metálicas em concreto autoadensável no estado endurecido <i>T. Cristofoli, G. Catrine, B. F. Tutikian e R. Christ</i> .....	445
Betão de alta resistência reforçado com fibras exposto a elevadas temperaturas <i>V.M.C.F. Cunha, T. Al-Rikabi e J.A.O. Barros</i> .....	455
Comportamiento mecánico de compuestos de matriz cementicia y tejidos de fibras vegetales <i>L. Mercedes, L. Gil y E. Bernat</i> .....	465
Efecto de la fisuración a edades tempranas en la durabilidad de hormigones autocompactantes <i>G. Barluenga, J. Puentes, C. Guardia y N. Flores</i> .....	475



Determinación analítica y experimental de la resistencia a tracción de probetas de hormigón reforzadas con fibras de acero <i>S. Lorente, C. Molins y S. Ocete</i> .....	485
Estudo do volume de pasta em diferentes composições de agregados para concreto autoadensável <i>C. V. A. de Melo, R. dos S. Monteiro e P. C. C. Gomes</i> .....	495
Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia <i>Y. Silva y S. Delvasto</i> .....	505
Características mecánico-resistentes de hormigones fabricados con residuos siderúrgicos como conglomerantes y reducción de cemento <i>M.E. Parrón Rubio, F. Pérez García, F. Contreras de Villar, M.D. Rubio Cintas y M.J. Pelufo Carbonell</i> .....	525
Reforço ao corte de vigas em betão armado recorrendo a painéis em micro betão auto compactável reforçado com fibras metálicas de pneus reciclados <i>L. Lourenço, Z. Zamanzadeh, J. Barros, D. Gonçalves e I. Costa</i> .....	535
Uso de microfibras de vidrio para el control de la retracción autógena en compuesto cementicio <i>L. Onghero, W.L. Repette y L.A. Gómez</i> .....	545
Tiempos de fraguado, consistencia y propiedades mecánicas de hormigón de ultra alta resistencia con fibras (UHPFRC) <i>E. Giménez-Carbó, R. Torres Remón y P. Serna Ros</i> .....	557
Análisis experimental mediante fotogrametría del comportamiento de fisuras de cortante en vigas esbeltas de hormigón armado reforzado con fibras macro sintéticas <i>F. Ortiz Navas, J. Navarro-Gregori y P. Serna</i> .....	567
<b>APLICACIONES ESPECÍFICAS   APLICAÇÕES ESPECIAIS</b>	
Valorización como árido reciclado mixto de un residuo de construcción y demolición en la confección de hormigones autocompactantes durables en terrenos con yesos <i>I. M. Guerrero, G. R. Jerónimo y J. R. Montero</i> .....	579
Caracterización mecánica y reológica de un hormigón autocompactante elaborado con finos de recuperación procedentes de la fabricación de mezclas asfálticas <i>J.M. Castillo Mingorance, M.J. Martínez-Echevarría Romero, J. Rodríguez Montero y M. López Alonso</i> .....	589
Hormigón de alta conductividad térmica POWERCRETE® <i>D. Cruz Ramos, A. Navarro Valls y E. Vargas Serrano</i> .....	599
Estudio comparativo de la orientación del refuerzo en losas de hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas y de acero <i>A. Conforti, G. Plizzari y R. Zerbino</i> .....	609

Control de fisuración en vigas de hormigón armado reforzado con diferentes fibras <i>M. Fasciolo, A. Conforti, R. Zerbino y G. Plizzari</i> .....	619
Determinación de las curvas de Wöhler en fatiga a flexotracción de un hormigón de muy alta resistencia sometido a temperatura elevada <i>J. D. Ríos, H. Cifuentes y F. Medina</i> .....	629
Desarrollo de hormigones autocompactables de resistencia media (HAC-RM) en Colombia <i>C. J. de la Cruz M. y A. F. Tamayo G.</i> .....	639
Hormigón de alta densidad: una excelente solución para obras marítimas <i>D. Cruz Ramos y J. Antonio Lozano</i> .....	649
Hormigón ligero estructural con áridos reciclados <i>F. J. Benito, I. Miñano, C. J. Parra, J. Alcaraz y P. Hidalgo</i> .....	659
Influencia de los regímenes de expansión y curado en el comportamiento de hormigones expansivos autocompactantes y convencionales <i>J. L. García Calvo, P. Carballosa y D. Revuelta</i> .....	669
Estudo de ataque de cloreto em betões autocompactantes de alto desempenho com adjuvantes mitigadores de retração e diferentes relações água/aglomerante <i>R. D. Sakata, W. L. Repette, L. A. Gómez e L. Onghero</i> .....	681
Influencia de la fracción fina mixta y de hormigón en las prestaciones mecánicas de los hormigones reciclados <i>C. Medina, P. Plaza, P. Velardo, A. Matías, M.I. Sánchez de Rojas y I.F. Sáez del Bosque</i> .....	691
El uso de hormigones reciclados en el sector agroganadero <i>A. Juan-Valdés, J. García-González, D. Rodríguez-Robles, J. M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, M. I. Guerra-Romero y N. De Belie</i> .....	701
Resistencia de los hormigones elaborados con árido reciclado frente a ciclos de hielo-deshielo <i>A. Juan-Valdés, D. Rodríguez-Robles, J. García-González, J. M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, M. I. Guerra-Romero y N. De Belie</i> .....	711
Ensayos de control de calidad de hormigón reforzado con fibras en túneles: Experiencia mexicana <i>Carlos Aire</i> .....	721

**PONENTES INVITADOS**  
***PALESTRANTES CONVIDADOS***



# HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

## Ultra High Performance Concrete - Materials Formulations and Serviceability based Design

Yiming Yao <sup>(1)</sup>, Aashay Arora <sup>(2)</sup>, Narayanan Neithalath <sup>(3)</sup> and Barzin Mobasher <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Associate Professor, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, China.

<sup>(1)</sup> Graduate Research Assistant, School of Sustainable Engineering and the Built Environment,  
Arizona State University, Tempe, AZ, USA.

<sup>(2)</sup> Professor, School of Sustainable Engineering and the Built Environment,  
Arizona State University, Tempe, AZ, USA.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.8263>

### ABSTRACT

Materials and mechanical design procedures for ultra-high performance cement composites (UHPC) members based on analytical models are addressed. A procedure for the design of blended components of UHPC is proposed using quaternary cementitious materials. The blending procedures are used using a packing and rheology optimization approach to blend high performance mixtures using non-proprietary formulations. Closed-form solutions of moment-curvature responses of UHPC are derived based on elastic-plastic compressive model and trilinear strain hardening tension stress strain responses. Tension stiffening behavior of UHPC due to fiber toughening and distributed cracking is then incorporated in the cross-sectional analysis. Load-deflection responses for beam members are obtained using moment-area, and direct integration approach. The proposed models provide insights in the design of SHCC to utilize the hardening properties after cracking. Using proper parameters, generalized materials model developed are applicable to both SHCC and strain softening cement composites such as steel fiber reinforced concrete (SFRC), textile reinforced concrete (TRC) and ultra-high performance concrete (UHPC).

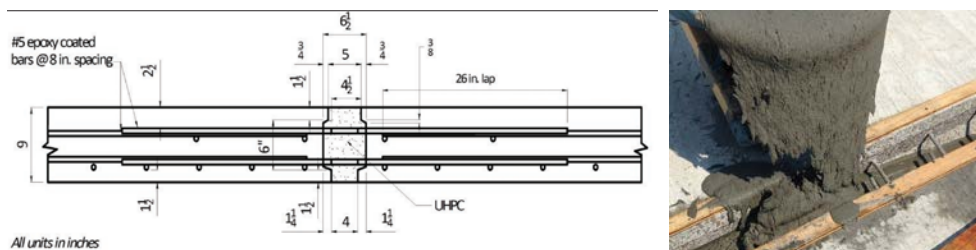
**KEYWORDS:** Strain hardening cement composites, distributed cracking, textile reinforced concrete, strain hardening, design.

### 1.- INTRODUCTION

Strain hardening cement composite (UHPC) is a class of materials using relatively high fiber volume fraction (more than 2%) and exhibiting high strength and ductility. In contrast to conventional concrete, increases in tensile stresses are observed after first crack in tension through crack bridging and interface transfer mechanisms provided by discrete fibers. The UHPC class requires a fundamental concentration on the matrix phase and its rheology in order to achieve high compressive strength and ductility. The durability of

concrete structures improves as a result of crack mitigation, where discrete cracks are replaced with a system of distributed micro cracks.

UHPC is an ideal construction material for applications that require rapid construction and connection of precast segments, applications that require a reduction of the weight and size of structure, or for seismic design where high ductility is desired. Figure 1 shows the application of UHPC connection between precast deck panels [Greybeal, 2014]. The improved performance of SHCCs subjected fatigue and impact loads make them attractive for industrial structures, highway pavements, bridges, and natural hazardous and extreme loads. In contrast to the design of conventional RC structures, implementation of UHPC requires use of strain-hardening response that is attributed to multiple cracking due to load transfer by the fibers across the cracks (Mobasher et al. 2006b). As multiple cracking takes place, the stiffness of the sample significantly drops while the crack spacing continuously decreases to a saturation level. The post crack stiffness and the ultimate strain capacity are functions of fiber type, stiffness, and bonding characteristics, however the stiffness in the post crack region can be effectively used in the analytical and design formulations (Mobasher et al. 2006a).



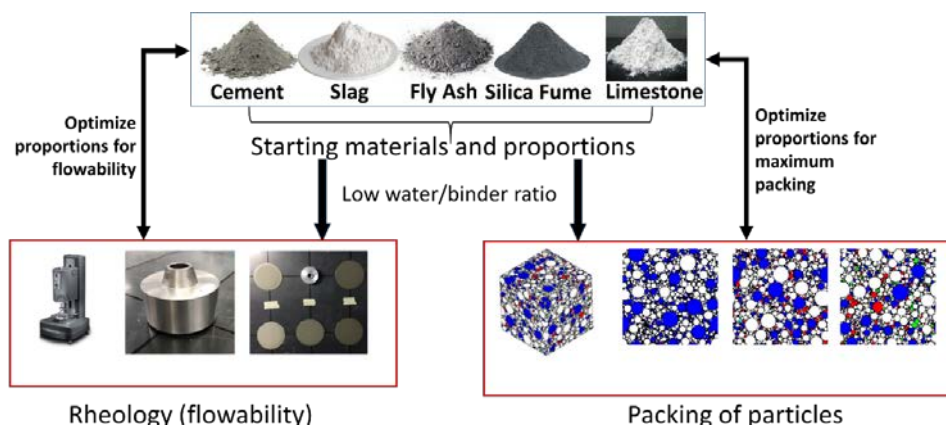
**Figure 1.** UHPC connection between precast deck panels as deployed by NYSDOT on I-81 in Syracuse, NY [Greybeal,2014]

## 2.- MATERIALS DEVELOPMENT

The main objective is by controlled blending of components with up to 3% volume fraction of steel fibers, a UHPC formulation can be obtained with non-proprietary materials that is strong, ductile, and durable. A systematic procedure was developed for a multiple (up to four component) non-proprietary paste components that can be blended for optimal performance. This paste system constitutes the main component of UHPC formulation, when used with specifically blended and sized aggregates of specified particle size distribution, it would yield the UHPC system.

Figure 2 shows the strategy to obtain the optimized design of UHPC. The research approach is built around three fundamental steps: binder (paste) design, aggregate packing and optimization, and testing the final properties. The binder design, shown in Figure 2 consists of selection of the source materials for the binder from a series of common cementing (or cement replacement) materials. Ordinary Portland cement (OPC), Flyash, (F), MicroSilica, (M), Slag, (S), Metakaolin, (K), Limestone, (La, Lb, 3.0 and 1.5 micron).

Different properties of the microstructure can be analyzed using the 3D particle packing models. 3D volumes are generated using a stochastic particle packing model assuming spherical particles.



**Figure 2.** Schematic showing the aggregate packing of UHPC

The goal is to use a blend of the cementitious materials that can be mixed with a very low w/b ratio and, with the aid of superplasticizers, can result in flowable and workable mixtures. The microstructural packing and rheological studies provide preliminary indicators as to the applicability of paste systems for UHPC. Packing influences rheology and mechanical/durability properties, while rheology influences placing and early-age structure development, which in turn influences the later age properties. In a composite binder that contains particles of different size distributions and surface characteristics, chemical admixtures are essential in controlling the rheological features. One would start with the materials (cement, fly ash, silica fume etc.) with particle sizes ranging from 0.1 microns to 50 microns. Therefore F20L10b would indicate a blended composite cement with 20% Flyash and 10% Limestone. The selected components and their mass fractions are combined to ensure maximum packing of the powder ingredients. The flowability of the binders at very low w/b, and in the presence of large amounts of chemical admixtures are evaluated using fundamental rheological experiments.

In the second step, the optimized packing of selected coarse and fine aggregates and fibers are tested to meet the performance criteria. Selection of aggregates is based on a compressible packing model (CPM) which determines the maximum packing density using different sizes of coarse and fine aggregates. The packing efficiency reduces the capillary pores and therefore improves the strength and the impermeability significantly. This is shown in Figure 3(a). The finalized UHPC mixture(s) are then subjected to property-and-performance testing that includes mechanical testing (compression, tension, flexural, fracture) and durability evaluation (resistance to freezing and thawing, chloride penetration). This approach shows that UHPC concrete mixtures can be developed using locally obtained materials. [Arora et. al, 2017]

### 2.1.- Strength and Fracture response

Figure 3(b) shows the compressive strengths of mortars made using the selected UHP pastes after 14 and 28 days of moist curing. Even with a clinker factor reduction of 30%, the UHP mortars, especially the quaternary blends demonstrate 28 day strengths that are comparable to, or higher than that of the control UHP mortar. The mixtures containing slag demonstrate higher strengths than those containing fly ash at 28 days, but it is conceivable that the pozzolanic reaction of fly ash and its later synergy with the other replacement materials could improve the strength with further curing. It is noted that the addition of fibers, reduction of water to binder ratio, optimization of the aggregate size fractions would lead to a final mixture with 28 day compressive strengths in excess of 22,000 psi (150 MPa).

The flexural response results are shown in Figure 4. Note that the increase in strength by means of microstructural modification is also complimentary to the role of fibers in increasing the load carrying resistance and the strength and ductility are both improved with the use of steel fibers. Figure 4.b shows the digital image correlation of the formation of multiple cracks in the flexural samples at various stages.

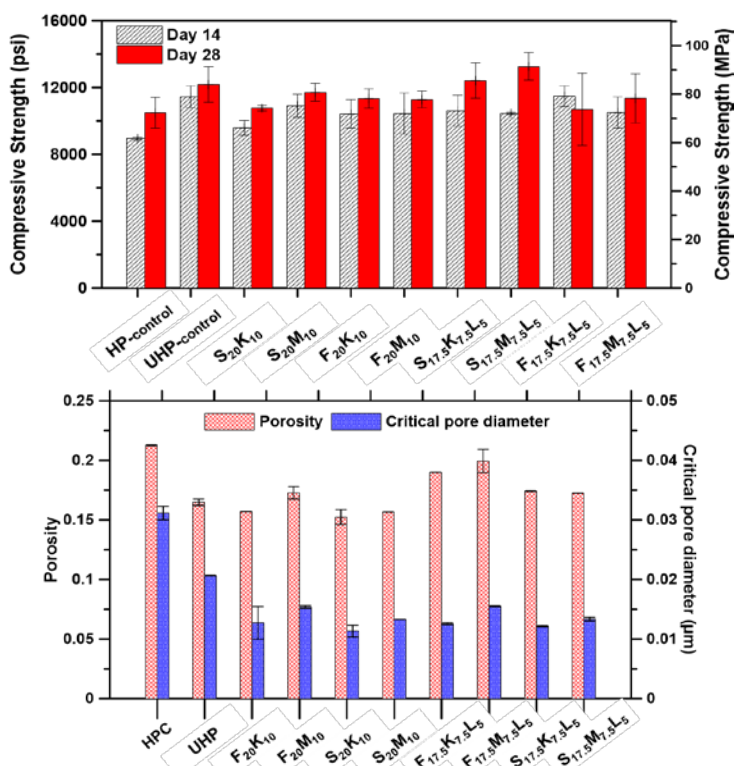


Figure 3. a) Mercury intrusion porosity and critical pore diameters for selected UHPC specimens b) compressive strengths at Day 14 and day 28 of selected UHP mortars.



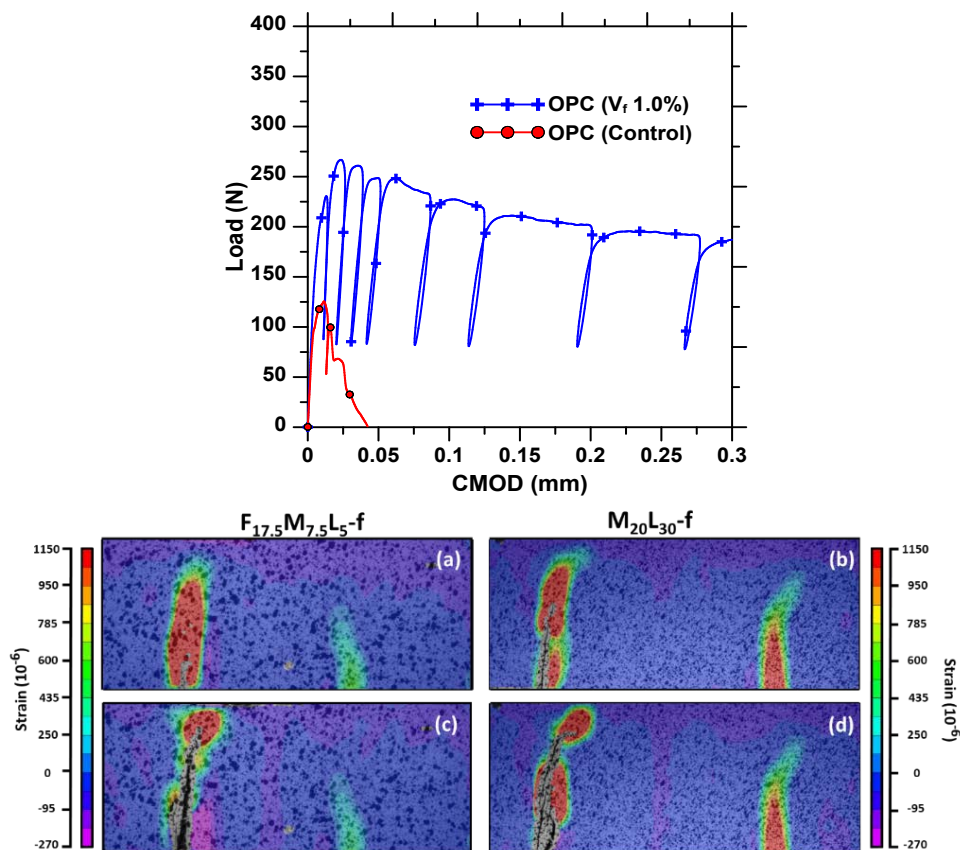


Figure 4. a) load vs. CMOD for control fiber reinforced beam specimens with 1% steel fiber at a post peak stress of (a,b) 90% and (c,d) 50% of the peak stress.

## 2.2.- Modeling and Structural Design of Strain-Hardening Composites

A broad range of cement composites exhibiting strain-hardening behavior can be modelled using the proposed approach. These materials include textile reinforced concrete (TRC), fiber reinforced concrete (FRC), and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC). The general behavior can be simulated by linearized compression and tension models that address nonlinear and hardening properties as shown in Figure 5 (Soranakom and Mobasher 2008). Tensile response is defined by Young's Modulus  $E$ , first crack tensile strain  $\varepsilon_{cr}$ , transition strain  $\varepsilon_{tm}$ , and post crack modulus  $E_{cr}$ . Note that by normalizing all parameters by minimum number of independent and dimensionless variables, tensile response uses only two intrinsic material parameters  $E$  and  $\varepsilon_{cr}$ , therefore the softening or residual range is defined by a constant stress level  $\mu E \varepsilon_{cr}$ , and the compressive strength  $\sigma_{cy} = \omega \gamma E \varepsilon_{cr}$ . Other material parameters are summarized as follows:  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ ,  $\omega$  and defined

respectively as normalized tensile strain at peak strength, residual tensile strength, post-crack modulus, and compressive yield strength (Soranakom and Mobasher 2008).

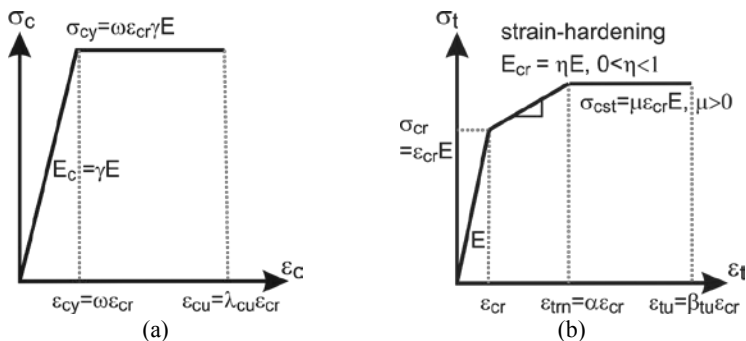


Figure 5. Material model for SHCC (a) compression, (b) tension model (Yao et al. 2017).

Even though the tensile strength is greatly improved in SHCC, the compressive strength in is still much higher, and the flexural capacity is defined by means of the tensile variable. The nonlinearity and failure in flexure are likely to be dominated by tensile properties. One can perform cross-sectional analysis by constructing strain and stress profiles. Followed by integration of normal stresses, the compressive and tensile force terms from each zone are obtained and bending moment on the cross section computed. Closed-form solutions of moment-curvature responses are explicitly derived based on interactions among different stages in tension and compression models. The detailed derivations for strain softening, strain hardening FRC as well as hybrid reinforced concrete (HRC) sections containing rebar and fibers can be found in (Mobasher et al. 2015; Soranakom and Mobasher 2008). These equations can be further simplified using polynomial or power curve fitting with detailed applications for individual cases presented in (Yao et al. 2017).

The solution for the plain fiber reinforced concrete section is presented first. For the given applied strain distribution, the location of neutral axis, defined as  $kd$  is obtained from the force equilibrium equations. For a specified serviceability limit based on maximum allowable compressive strain  $\varepsilon_c = \lambda_{cu} \varepsilon_{cr}$ , the neutral axis depth and the bending moment are obtained as:

$$k = \frac{2\mu\lambda_{cu}}{-\omega^2 + 2\lambda_{cu}(\omega + \mu) + 2\mu - 1} \quad (1)$$

$$M_n = \left( (3\omega\lambda_{cu}^2 - \omega^3 + 3\mu\lambda_{cu}^2 - 3\mu + 2) \frac{k^2}{\lambda_{cu}^2} - 3\mu(2k - 1) \right) M_{cr} \quad (2)$$

$$M_{cr} = \frac{\sigma_{cr}bh^2}{6} \quad (3)$$

On may conduct an asymptotic analysis to compute the moment capacity in the limit case, a simplified design equation for normalized moment capacity is obtained. This resembles a case when the cracked section in flexure opens significantly to go beyond serviceability limit, however due to the presence of fibers, the section can still transmit the flexural load applied. The moment capacity in this case is defined by the limit case of compressive cracking strain  $\lambda_{cu}$  reaching a relatively large number [1]. To further simplify Equation 2, The residual strength of FRC in flexure is approximately three times its residual strength in tension, that is,  $f_{eq,3} = 3\mu\sigma_{cr}$  [ACI-544-8R [6],  $M_n$ . Furthermore, the empirical relationship between tensile and compressive strength  $f_t' = 6.7\sqrt{f_c'}$  (in U.S. customary units) is used for normalized compressive strength  $\omega$  :

$$\omega = \frac{\gamma E \omega \varepsilon_{cr}}{E \varepsilon_{cr}} \approx \begin{cases} \frac{f_c'}{f_t'} = \frac{0.85 f_c'}{6.7 \sqrt{f_c'}} = 0.127 \sqrt{f_c'} & (f_c' \text{ in psi}) \\ \frac{f_c'}{f_t'} = \frac{0.85 f_c'}{0.56 \sqrt{f_c'}} = 1.518 \sqrt{f_c'} & (f_c' \text{ in MPa}) \end{cases} \quad (4)$$

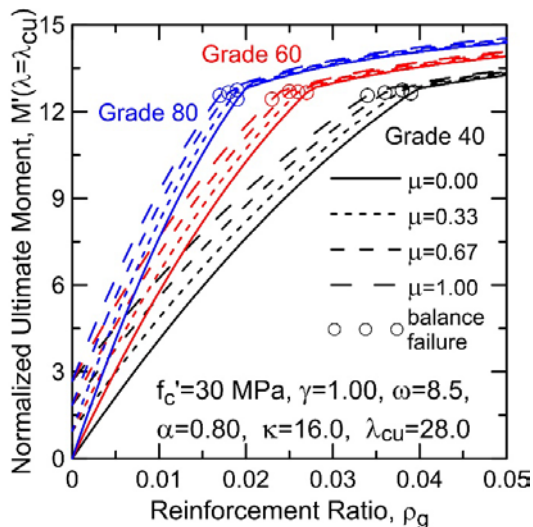
By substituting for  $\omega$ , as a function of ultimate compressive strength  $f_c'$  and the post crack tensile strength  $\mu$  the expression for nominal ultimate moment capacity is obtained.

$$M_n = \left[ \frac{6 f_{eq,3} \sqrt{f_c'}}{\xi (f_{eq,3} + 3 f_c')} \right] M_{cr}, \quad \xi = 15.8 \text{ for U.S. units; } \xi = 1.32 \text{ for SI} \quad (5)$$

The ultimate moment capacity as a function of residual tensile strength and reinforcement can be used as a convenient design tool for combinations of reinforcements, calculated as shown in Eq. (6). An analytical expression for minimum reinforcement ratio  $\rho_{g,min}$  for conventional reinforced concrete is obtained. For example, using parameters  $\mu = 0$ ,  $\gamma = 3/4$ , and  $\omega = 6$ , Eq. (7) represents the minimum reinforcement as a function of location and its stiffness (steel or FRP).

$$M_n \approx m_\infty M_{cr} = \frac{6 \rho_g n \kappa (\mu \alpha - \mu + \alpha \omega) + 3 \omega \mu - 3 (\rho_g n \kappa)^2}{\omega + \mu} M_{cr} \quad (6)$$

$$\rho_{min} = \frac{9\alpha - \sqrt{81\alpha^2 - 6}}{2\alpha n \kappa} \quad (7)$$

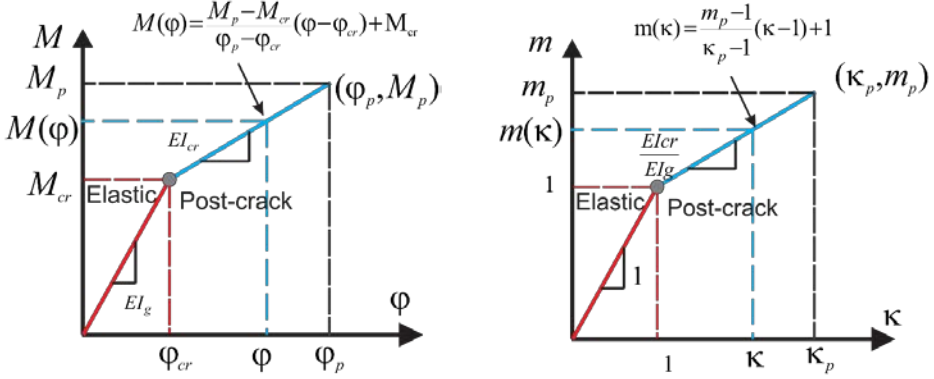


**Figure 6.** Design chart for normalized ultimate moment capacity (determined at  $\lambda=\lambda_{cu}$ ) for different levels of post crack tensile strength  $\mu$  and reinforcement ratio  $\rho_g$ .

Equations to determine the moment-curvature relationship, ultimate moment capacity, and minimum flexural reinforcement ratio were also explicitly derived by Yao et al (2018). Figure 6 shows a design chart for the parametric design model with various grades of steel. Flexural design using this chart, requires ultimate moment  $M_u$  due to factored loads normalized with respect to cross-sectional geometry. The demand moment capacity  $M_u'$  is obtained from this chart using a combination of normalized residual tensile strength  $\mu$ , grade of steel, and reinforcement ratio  $\rho_g$ . Results are scaled to numerical values using the section cracking moment  $M_{cr}$ .

### 3.- MOMENT-CURVATURE AND LOAD-DEFLECTION RELATIONSHIPS

Moment-curvature relationship as cross sectional properties connects the constitutive material parameters to the structural flexural behavior, equilibrium, and the curvature-displacement relationship. This design parameter can be represented in various forms of bilinear, tri-linear, or curve fit from various sections (Soranakom and Mobasher 2008; Wang 2015). To obtain load-deflection calculations with given moment-curvature response, two approaches can be applied to the slope deflection equation: direct integration and polynomial/piecewise integration of linearized segments as discussed in (Soranakom and Mobasher 2008). Alternatively, one can use a parameterized moment-curvature relationship for a generalized solution, which has been derived and proposed as a practical design tool Wang (2015), Yao et al, (2018).



**Figure 7.** Simplified parametric moment-curvature relationship: (a) bilinear representation, (b) dimensionless moment-curvature curve represented as variables  $(\kappa, m)$ .

Figure 7a and 7b presents the idealized parametric moment–curvature response of a deflection hardening case with a two stage linear elastic and a post-cracking range. The mid-span deflection is obtained directly using the double integration of curvature distribution and imposing boundary conditions to ensure the continuity of displacement fields (Wang 2015). Deflection distributions along the beams at full range of applied loads were derived for various beam types, loading conditions and supports such as simple beam, cantilever beam, point load/moment, distributed load and combination of them. Analytical expressions of the mid-span deflections for 3PB and 4PB are presented for elastic (Stage 1) and cracked (Stage 2) stages. where  $L_e = a / m$  refers to the length of elastic region, and  $a$  is the shear span of 4PB beam.

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= -\frac{\kappa}{12} \varphi_{cr} L^2 \\
 \text{3PB:} \quad \delta_2 &= \frac{\varphi_{cr} L^2}{L - 2L_e} \left[ \frac{(\kappa - 1)L}{24} + \frac{(2L_e - L)\kappa}{8} + \frac{L_e^2(L - 2\kappa L_e)}{6L^2} \right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= \kappa \varphi_{cr} \left( \frac{a^2}{6} - \frac{L^2}{8} \right) \\
 \text{4PB:} \quad \delta_2 &= \left\{ \frac{1}{54} \left[ \left( \frac{3L_e}{L} + 1 \right) \left( \frac{3\kappa L_e}{L} - 1 \right) + \kappa \right] - \frac{\kappa}{8} \right\} \varphi_{cr} L^2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

**Para seguir leyendo haga click aquí**