

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE PISOS y PAVIMENTOS INDUSTRIALES CON HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA

Roberto Pombo¹, Marcelo G. Altamirano², Graciela Giaccio³, Raúl Zerbino⁴

¹ Bautech S.A. Argentina, roberto.pombo@bautech.com.ar

² UTN Regional Pacheco - Bautech S.A. Argentina, marcelo.altamirano@bautech.com.ar

³ LEMIT-CIC, Investigador CIC, Facultad de Ingeniería UNLP, Argentina, ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

⁴ CONICET. LEMIT-CIC, Facultad de Ingeniería UNLP, Argentina, zerbino@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Actualmente se recurre a la incorporación de macrofibras sintéticas o de fibras de acero como reemplazo de las armaduras tradicionales en la construcción de pisos y pavimentos industriales, dado que mejora varias propiedades del hormigón fresco y endurecido. Las fibras controlan la propagación y ancho de las fisuras de contracción y permiten un mayor espaciamiento entre juntas; la resistencia residual que aportan las fibras aumenta la capacidad de carga de las losas. El empleo de Hormigón de Retracción Compensada Reforzado con Fibras (HRCRF) permite diseñar grandes losas minimizando la cantidad de fisuras y con menores aberturas de juntas. A fin de poner en evidencia las citadas ventajas, este trabajo presenta ejemplos de pisos y pavimentos industriales realizados en Argentina mediante estas tecnologías empleando macrofibras sintéticas o de acero, incluye resultados in situ y de laboratorio, información sobre trabajabilidad, contracción libre y restringida, resistencias a compresión y flexión y detalles constructivos.

Palabras claves: control de fisuras, hormigón reforzado con fibra, pisos industriales, pavimentos industriales, macrofibras sintéticas.

INTRODUCCIÓN

Los pisos y pavimentos industriales son elementos donde el hormigón no solo tiene la función de distribuir y sobrellevar las cargas, sino que requieren de la obtención de características particulares para las superficies; por ello además de la capacidad resistente, requieren una adecuada resistencia al desgaste y minimizar la contracción, causa de la aparición de fisuras y alabeos. Ejemplos de pisos industriales aparecen en depósitos, fábricas, talleres y cámaras frigoríficas, entre otros. En los depósitos, buscando economía de espacio, se suelen diseñar pasillos estrechos y altos por los que circulan vehículos de carga con ruedas muy duras. El almacenamiento a gran altura obliga a asegurar la planitud del piso. En cuanto a la durabilidad importan, además de la resistencia al desgaste, las juntas, puesto que son las partes más vulnerables del piso; resulta, por lo tanto, de mucha importancia minimizar su cantidad. Los requisitos y diseño de pisos interiores no son idénticos al caso de los pavimentos industriales destinados a circulación interna en fábricas, playas de maniobras y estacionamiento de vehículos pesados; en estos casos las condiciones de trabajo implican movimientos lentos y multidireccionales de cargas, en general en el interior de losas rodeadas por otras con transferencia de esfuerzos hacia los cuatro lados, condiciones muy distintas a las que ocurren en las calles urbanas, rutas y autopistas.

Las tendencias actuales de construcción de pisos y pavimentos industriales consideran el empleo de macrofibras sintéticas o de fibras de acero como reemplazo de las tradicionales armaduras de refuerzo, dado los beneficios que aporta esta tecnología. La interacción entre las cargas, las losas y la subrasante define la respuesta de las losas sobre suelo; además de mejorar las propiedades del hormigón fresco y endurecido, el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es ventajoso porque provee una significativa capacidad de rotación a las losas; las fibras aportan capacidad residual al hormigón (posterior a la fisuración) lo que aumenta la capacidad de carga de las losas. No menos importante es que las fibras tienden a reducir la segregación y exudación del hormigón fresco, mejorando la calidad superficial. Además, ante la aparición de micro o macro fisuras, las fibras pueden mantenerlas mucho más cerradas que en el caso del hormigón simple. De esta manera, el uso de HRF contribuye a minimizar los efectos de la contracción por secado y permite mayor espacio entre juntas. Por ejemplo, incorporando 30 a 40 kg/m³ de fibras de acero, se pueden lograr separaciones de juntas de 25 a 30 m; con las dosis habituales fibras de polipropileno (3 a 5 kg/m³) se puede alcanzar 10 a 15 m de distancia entre juntas. Otro beneficio singular es la reducción del alabeo; como la losa tiende a curvarse permanentemente, se suelen generar microfisuras en la superficie y las fibras permiten cierta relajación en el material sin que las fisuras sean visibles [1]. El hormigón de la losa es homogéneo en todo su espesor y también mejoran la resistencia al impacto y a la abrasión. El uso combinado de fibras y un agente expansivo da lugar al Hormigón de Retracción Compensada Reforzado con Fibras (HRCRF) y permite el diseño de losas de grandes dimensiones prácticamente sin fisuras y con menores espesores y menores aberturas de juntas.

Este artículo muestra ejemplos seleccionados de pisos y pavimentos industriales realizados en Argentina utilizando HRF y HRCRF, tanto con fibras poliméricas como de acero. Se discuten las motivaciones y ventajas que aporta el uso de estas tecnologías en el diseño estructural, en los aspectos y detalles constructivos y, fundamentalmente, en las condiciones de servicio de los pisos y pavimentos.

REQUISITOS DEL HORMIGÓN PARA PISOS INDUSTRIALES

Es importante señalar que el hormigón para pisos industriales demanda requisitos específicos [2-7] y, para asegurar la calidad de las obras, es importante que todos los actores involucrados tengan presente que no es suficiente meramente establecer un nivel de resistencia, sino que se debe evitar aumentar la contracción potencial y el alabeo utilizando materiales y proporciones inapropiados. Todo esto es válido tanto para el caso del hormigón simple como para el HRF. En cuanto a las operaciones de ejecución, que se pueden llevar a cabo de la misma manera con HRF que con el hormigón simple, también se deben seleccionar adecuadamente materiales y proporciones buscando trabajabilidad adecuada para la colocación y el enrasado, uniformidad del tiempo de fraguado, economía, resistencia a la abrasión y al impacto, resistencia a la flexión y mínima contracción.

Como ejemplos de la complejidad que implica la optimización de un hormigón para pisos industriales cabe notar que los cementos que promuevan contracción excesiva o retardos de fraguado no son aconsejables y en caso de incorporar adiciones, sus efectos deben ser cuidadosamente valorados. El uso de humo de sílice no es una buena opción, no solo por su costo, sino que puede aumentar la demanda de agua y la contracción plástica; las escorias pueden aumentar la contracción a largo plazo [8]. Las cenizas volantes mejoran la capacidad de bombeo, pero pueden prolongar el tiempo de fraguado (principalmente en clima frío) y afectar el color de las superficies. Se debe optimizar el contenido de ligante ya que contenidos excesivos de cemento o adiciones minerales pueden afectar el módulo elástico y la contracción por secado, favoreciendo el alabeo. Una reducción de los vacíos entre los agregados minimiza la demanda de agua, los costos y los riesgos de fisuración, y la relación a/c debe ser la menor posible; sin embargo, una reducción en el contenido de agua no necesariamente reduce la contracción en igual proporción. El contenido de mortero

debe ser el suficiente para bombear, colocar y terminar, pero el exceso de mortero puede aumentar la contracción. La forma, textura y gradación del agregado afectan el volumen de mortero requerido, pero dicho volumen depende del método de colocación y construcción adoptado. La contracción potencial depende de muchos factores como la temperatura del hormigón al momento de la descarga, el asentamiento y el tamaño máximo agregado, entre otros [9]. El tamaño máximo debe limitarse en el caso del HRF conforme la longitud de la fibra elegida. Un contenido excesivo de arena de trituración puede afectar el aspecto de la superficie. Finalmente, el contenido de aire debe ser el menor posible para mejorar el acabado de la superficie, evitar la delaminación y la flotación de las fibras sintéticas.

En cuanto a las propiedades del hormigón fresco resalta que, si bien es difícil evaluar la capacidad de colocación y terminación, adquieren una importancia similar o incluso mayor que otras propiedades como resistencia a la compresión o la durabilidad. El nivel de exudación debe ajustarse conforme el procedimiento constructivo para evitar la delaminación, al igual que el tiempo de fraguado en función de las condiciones ambientales esperadas en el proyecto, garantizando una baja variabilidad. Respecto a las propiedades del hormigón endurecido, en ocasiones más que la resistencia a compresión, la resistencia a la abrasión tiene gran importancia para la mayoría de las aplicaciones (por las exigencias de los rodamientos utilizados en las grandes apiladoras) y la resistencia a la flexión es requerida para el diseño estructural.

HORMIGÓN DE RETRACCIÓN COMPENSADA REFORZADO CON FIBRAS

Incorporando un aditivo expansor, ya sea formulado en base a etringita (sulfoaluminato de Ca) o en base a CaO, se puede obtener un hormigón que durante el curado húmedo genera una expansión inicial igual o ligeramente mayor que la contracción por secado esperada. Cuando dicho hormigón se moldea bajo condiciones de restricción al movimiento, el material experimenta compresión durante la etapa de curado húmedo que luego se aliviará una vez expuesto al aire. Esto da lugar a que, en la condición final, la contracción sea menor a la que tendría el mismo hormigón sin aditivo expansor, siendo lo ideal que, en el estado de equilibrio, el hormigón se encuentre libre de esfuerzos internos o con una ligera compresión residual, eliminando el riesgo de fisuración [10]. El uso habitual del Hormigón de Retracción Compensada (HRC) es restringido con barras de acero que se traccionan durante la expansión comprimiendo la estructura; dichas barras pueden ser reemplazadas por fibras de acero que generan cierta restricción a la expansión [11, 12] dando lugar al Hormigón de Retracción Compensada Reforzado con Fibras (HRCRF). La combinación de macrofibras sintéticas y aditivo expansor está pensada para aprovechar simultáneamente dos propiedades: la modificación de las características reológicas del hormigón que otorgan las fibras y la compensación de la contracción que realiza el aditivo expansor.

EJEMPLOS DE OBRAS

Se presentan a continuación ejemplos de pisos y pavimentos industriales utilizando HRF y HRCRF. Las dosificaciones empleadas responden a los lineamientos antes mencionados que incluyen adecuada selección de materiales componentes, baja relación agua/ligante, buena distribución granulométrica continua que minimice el contenido de pasta y arenas con módulo de finura mayor a 2,5 pero evitando un uso excesivo de arena de trituración ya que puede afectar la capacidad de terminación y el aspecto superficial. La colocación de las fibras, tanto de acero como sintéticas, se realizó esparciéndolas sobre la cinta de carga de áridos al mixer, dado que es la manera más eficiente de evitar la formación de erizos. La mezcla y el transporte fueron realizados en motohormigonera; en casi todos los casos la planta hormigonera estaba en la obra, salvo en el ejemplo de Dock Sud donde la planta estaba a 15 minutos de distancia. En estos ejemplos la colocación fue por vuelco desde la canaleta de la motohormigonera; la terminación en los pisos interiores fue un alisado con endurecedor cuarcítico superficial y en el pavimento de CTC la terminación fue al plato.

Como control en obra en todos los casos se moldearon probetas para evaluar la resistencia a compresión y en ocasiones vigas para verificar la capacidad residual. En el caso de uso de HRCRF también se realizaron ensayos de expansión restringida (ASTM C878).

HRFA en la construcción de un piso de un gran Centro de Distribución

El primer ejemplo corresponde a un piso de 60.000 m² construido en el año 1999 para una empresa logística que está operativo en Esteban Echeverría, Pcia. de Bs. As. (Figura 1). El equipamiento para el movimiento de las mercaderías en el interior de los galpones es del tipo de apiladoras que, para lograr buena estabilidad y durabilidad tienen ruedas muy duras. La parte más vulnerable de la superficie de los pisos de hormigón son las juntas. Sus labios se rompen como consecuencia del efecto combinado de fricción e impacto de las ruedas, aumentando su efecto destructivo cuando la junta se *abre* por el efecto de la contracción. En consecuencia, era relevante minimizar la cantidad de juntas, lograr que se *abran* lo menos posible y proteger los labios de las que se hicieran como juntas de trabajo.



Figura 1: Centro de Distribución (Partido de Esteban Echeverría, 1999).

La solución, en ese momento, fue la ejecución de un piso con Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA). Se trata de 6 galpones de aproximadamente 10.000 m² cada uno. Se ejecutaron losas de dimensiones típicas 37,5 m x 33,0 m y 0,15 m de espesor. Las juntas fueron acorazadas con planchuelas de acero según el esquema que muestra la Figura 2. En cuando al diseño de mezcla, se utilizaron fibras de acero de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro de forma sinusoidal incorporadas al hormigón a razón de 35 kg/m³. La resistencia a la compresión especificada fue de 25 MPa. Para lograr el asentamiento deseado se utilizó una combinación de un plastificante y un superplastificante. Con esta tecnología de HRFA se logró ejecutar losas de grandes dimensiones minimizando la cantidad de juntas. En algunas losas se observaron fisuras generadas a partir de la posición de las columnas que, de todas maneras, se mantuvieron cerradas ya que las fibras de acero fueron capaces de tomar las tensiones de tracción producidas por la retracción por secado. Las fibras no modifican la contracción por secado, en consecuencia, la gran distancia entre juntas, mayor a 30 m, produjo una abertura de juntas superior a 10 mm y cierto alabeo de las losas. No obstante, el resultado global fue que con la solución adoptada se disminuyeron drásticamente las necesidades de mantenimiento del piso aumentando su durabilidad. Hoy, después de más de 20 años de uso, sigue en servicio en buen estado.

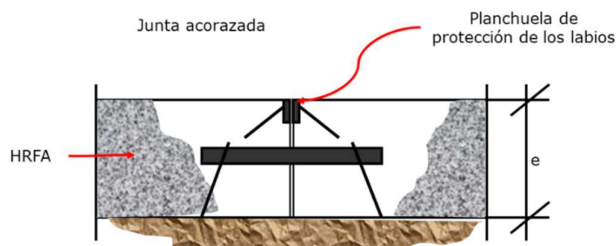


Figura 2: Juntas acorazadas con planchuelas de acero.

HRCRF como solución para la construcción de un piso sobre una sub-base de baja capacidad portante

El segundo ejemplo corresponde proyecto de un almacén para almacenamiento de grandes bobinas de acero (de unas 15 Tn cada una) sobre la costa del Riachuelo en Dock Sud. La capacidad de carga del suelo en ese lugar es extremadamente baja y ante las elevadas cargas concentradas que implica el proyecto (ver Figura 3) los asentamientos potenciales resultaban altos y variables. Es difícil y costoso diseñar un piso que no se deforme y/o fracture en estas circunstancias, manteniendo una relación costo/beneficio viable.



Figure 3: Depósito para almacenamiento de grandes bobinas de acero, construido sobre una sub-base de baja capacidad portante (Dock Sud, 2017).

Cabe mencionar que originalmente se construyó un piso convencional utilizando hormigón armado el cual, después de un corto tiempo, quedó rápidamente fuera de servicio a consecuencia de las fisuras en las losas que se originaron a causa de los asentamientos diferenciales de la sub-base.

La solución propuesta en el siguiente depósito, en base a incorporar fibras de acero, brindó al hormigón una ductilidad que permite a las losas deformarse sin grandes aperturas en las fisuras que se originan, con la ventaja adicional que al considerar en el cálculo estructural la resistencia residual del hormigón, se pudo reducir el espesor de las losas. Además, el uso combinado con un aditivo expansor (HRCRF) permitió aumentar el espacio entre las juntas (aproximadamente 35 m) y, especialmente, minimizar sus aperturas.

Las dimensiones del almacén eran de 100 m por 30 m, se proyectaron tres losas de 30 m por 33 m, de 0,15 m de espesor, lo que implica 450 m³ de HRCRF

Mediante estudios preliminares se realizaron ensayos de flexión de acuerdo con la Norma EN 14651 [13] para dosis variables entre 20 y 50 kg/m³ de fibras de acero conformadas en sus extremos, incorporadas en un hormigón base con una resistencia a la compresión del orden de 40 MPa.

La obra se realizó empleando una dosis de fibras igual a 40 kg/m³, 330 kg/m³ de cemento portland normal, siendo la resistencia a compresión especificada a 28 días igual a 30 MPa y el asentamiento 90 ± 10 mm, para lo que se agregó un superplastificante a base de naftaleno. También se procedió a la optimización del aditivo expansor midiendo en los ensayos previos valores de expansión iguales a 0,075 % para una dosis de 10 kg/m³. Se destaca que esta acción también es relevante y, por ejemplo, para contenidos de aditivo expansor mayores a 15 kg/m³ se verificaron expansiones excesivas y fisuras múltiples.

Entre los beneficios resultantes del uso de HRCRF para el piso se destaca que las fibras contribuyeron a facilitar la posibilidad de maniobrar las pesadas bobinas, sin tener específicos lugares de acopio, y al tener que soportar ciclos intensos de carga y descarga, una mejora en la repuesta a fatiga del hormigón (gracias al control de fisuras que proveen las fibras) es muy importante. En este caso también resalta que las fibras se distribuyen a lo largo de todo el espesor de la losa lo que es beneficioso respecto a la posición localizada de la solución convencional en hormigón armado donde la armadura suele tener desviaciones propias del proceso constructivo.

Otra cuestión singular es que, en esta aplicación, no era posible instalar una barrera de vapor para evitar la penetración de agentes agresivos porque la misma se rompería ante los asentamientos del suelo, sin embargo, como el uso de HRCRF minimiza la cantidad y el ancho de fisuras, el piso resulta menos susceptible a la penetración de agentes agresivos.

HRCRF en un piso para un sistema de almacenamiento robótico

En el Centro de Distribución ubicado en Moreno, Provincia de Buenos Aires, que cuenta con una superficie total de 80000 m², las operaciones de almacenamiento y distribución en un sector de 7000 m² se realizan mediante un sistema robótico.

Para poder materializarlo fue necesario colocar una gran cantidad de anclajes muy próximos entre sí para instalar las estanterías conforme ilustra el esquema de la Figura 4. Esto implicaba varias limitaciones como que la losa del piso no debía contener barras de acero de diámetros mayores de 8 mm, ya que un diámetro mayor implica un costo de perforación adicional, el espaciado entre juntas debía ser el mayor o posible para minimizar la posibilidad de que se ubique un anclaje sobre alguna de ellas (no se permitía perforar en áreas de juntas, la instalación de anclajes debía estar a más de 0,45 m de las mismas), para mejorar la precisión de ensamble el ancho de la junta debía ser el mínimo posible y se debía garantizar una planitud suficiente. Además, el proyecto incluía una concentración de columnas en un sector debida a la presencia de una plataforma elevada. Todas estas circunstancias condicionaban notablemente el refuerzo en base a hormigón convencional. La solución adoptada fue un piso de HRCRF, con un diseño de mezcla similar al caso anterior, que además aseguraba menor deformación en las losas, la planitud y nivelación requeridos.

Entre las motivaciones y ventajas que definieron el uso de este HRCRF cabe destacar las siguientes: las fibras de acero no interferían en los trabajos de perforación y permitirían en proyectar un espacio entre juntas del orden de 25 a 30 m, al incorporar aditivo expansor se minimizarían los espesores de las juntas y los efectos de alabeo, sería posible eliminar las uniones que tendrían que hacerse en la intercepción de cada una de las columnas de la plataforma, y al considerar en el cálculo la resistencia residual a flexión del HRCRF se podría reducir el espesor de losas respecto a la solución original.

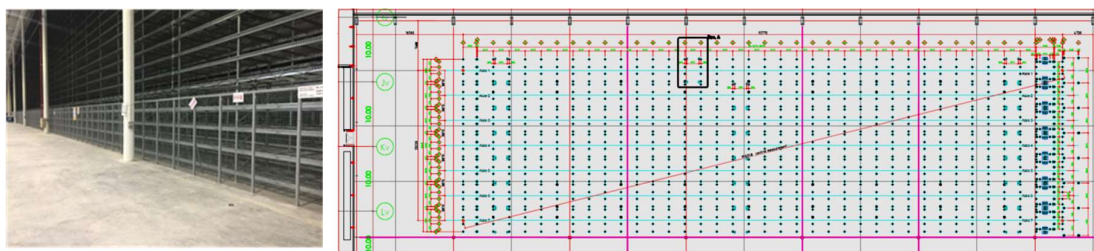


Figura 4: Centro de Distribución en Moreno (2019). Vista de las estanterías y plano de disposición de anclajes.

Centro de Transferencia de Cargas de la Ciudad de Buenos Aires (CTC) (2015)

Otro ejemplo interesante es el del Centro de Transferencia de Cargas de la Ciudad de Buenos Aires (CTC) que data de 2015, donde se recibe mercadería en grandes camiones para luego enviarla a la ciudad en vehículos más pequeños.

El proyecto original consistía en 112 galpones de 900 m² cada uno, lo que representaba 100.800 m² de pisos interiores y una playa de maniobras de 110.000 m². El diseño de esta última consistía en un pavimento exterior de 0,23 m de espesor con un hormigón clase H30 y una malla de acero de Ø 6 c/15 cm, aserrando los paños cuadrados de 5 m de lado. Sin embargo, para hacer económicamente viable el proyecto era importante, entre otras cosas, disminuir el espesor de las losas. Esto fue logrado proponiendo como alternativa el uso de HRF. La Figura 5 muestra imágenes del desarrollo de la obra.



Figura 5: Construcción del pavimento en el Centro de Transferencia de Cargas de Buenos Aires empleando hormigones con macrofibras sintéticas.

En ensayos previos en laboratorio se evaluaron HRF poliméricas estudiando como variables la dosis de fibras y el contenido unitario de cemento (entre 310 y 390 kg/m³, a fin de seleccionar la mezcla más adecuada. El hormigón fue elaborado con arena natural combinada con arena de trituración y piedra partida de 30 mm de tamaño máximo. En ensayos de flexión siguiendo la norma ASTM C1609 [14] se encontró que incorporando 4 kg/m³ de macrofibras sintéticas se alcanzaba una resistencia equivalente (R_{e3}) del 33 %.

Mediante el uso de este HRF fue posible reducir el espesor originalmente calculado de 0,23 m a 0,20 m de promedio, lo que se tradujo en una economía de 3300 m³ de hormigón. A la vez el espaciamiento entre juntas se pudo elevar de 5 m a 7 m, lo que generó una economía de 12.100 m de juntas, esto es un ahorro del 40 % de metros lineales.

Entre otras ventajas en comparación con la solución con hormigón armado convencional, se redujeron los anchos de juntas respecto al hormigón sin fibras (de 8 mm a 4 mm) y se minimizó el alabeo. También fue posible mejorar el proyecto hidráulico proyectando menores pendientes más bajas, el riesgo de filtración de agua a través de las juntas se redujo en un 40 % minimizando el riesgo de contaminación de la base.

En lo relativo a la performance, el uso de HRF provee mayor resistencia a la abrasión y al impacto mejorando el rendimiento de la superficie y además las losas están exentas de problemas de corrosión de los refuerzos de acero, todo esto permite disminuir los costos de mantenimiento del pavimento y del equipo que circula sobre el mismo.

Un relevamiento realizado a principios de 2018, más de dos años después de ejecutada la obra, sólo encontró fisuras en 39 losas sobre un total de aproximadamente 2500, esto es en 1,9 % del total de losas.

CONCLUSIONES

Se seleccionaron ejemplos de obras con el objetivo de mostrar las ventajas técnicas y económicas que se brinda el uso de las tecnologías del HRF y el HRCRF en el diseño y ejecución de pisos industriales. Entre otras observaciones se puso en evidencia que:

- Ante suelos de baja capacidad portante, el uso de HRCRF mejora la performance de las losas en comparación con el hormigón simple. La ductilidad que proveen las fibras al hormigón combinada además con la incorporación de un aditivo expansor permite que las losas se deformen sin que se formen fisuras con grandes aperturas.
- El HRCRF, al controlar la generación de fisuras, minimizar el alabeo y reducir los espesores y la cantidad de las juntas, permite mejorar las condiciones del piso y como resultado las losas sufren menores deformaciones.
- La opción del HRF, al aportar capacidad residual (posterior a la fisuración), aumenta la capacidad de carga de las losas, lo que permite reducir el espesor del pavimento industrial, lo que redundaría en una economía muy importante para el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Holland J, "Macro polymeric fibres for slabs on ground", Concrete Construction Magazine, June 1, (2008).
- [2] TR 34-2003, "Concrete industrial ground floors: a guide to design and construction", The Concrete Society, England, (2003).
- [3] Portland Cement Association, "Concrete floors on ground", Fourth edition, (2008).
- [4] Boyd R, "Designing Floors Slabs-on-Grade", Hanley Wood Inc, (1992)
- [5] Walker W, Holland J, "Reinforcement for slabs on ground", Concrete Construction, Floors (2007).
- [6] ACI Committee 302, "Guide for Concrete Floor and Slab Construction", ACI 302.1R-04 (2004)
- [7] Holland J, "Proper Use of Slab Reinforcement Systems: Avoiding Myths & Misconceptions", World of Concrete, (2013).
- [8] Fornasier G, Zitzer L, Pombo JR, "Some Considerations about the use of slag-cements in the formulation of Shrinkage Compensating Concretes", Proc. 6th International Colloquium-Industrial Floors "07, Vol 2, Technische Akademie Esslingen, Germany (2007).
- [9] ACI Committee 360, "Guide to Design of Slabs-on-Ground", ACI 360R-10 (2010)
- [10] Fernandez Luco L, Pombo JR, Torrent R, "Shrinkage Compensating Concrete in Argentina" Concr Inter 25 (5), (2003).
- [11] Paul BK, Polivka M, Mehta PK, "Properties of fiber reinforced shrinkage compensating concrete" ACI Mat J 78 (1981) 488-492.
- [12] Altoubat SA, Roesler JR, Lange DA, Rieder KA, "Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers"; Cons and Build Mat 22 (2008) 384-393.
- [13] CEN/TC 229, EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Méthode, 2005.
- [14] ASTM C1609 / C1609M-07. "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)", ASTM Standards, Vol.04.02 (2012).