



Elección del tipo de cemento capaz de proteger al concreto de la corrosión de las armaduras sobre la acción de iones cloruros a través del análisis jerárquico

S. H. Lopes da Silva¹, C., Londero², M. H. F., Medeiros³, V. C. O., Pereira⁴, E. C. B., Monteiro⁵

¹ Departamento de Construcción Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Email: sarahhlds@gmail.com

² Departamento de Construcción Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Email: carolina.londero7@gmail.com

³ Departamento de Construcción Civil, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Email: medeiros.ufpr@gmail.com

⁴ Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Brasil.

⁵ Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco e Universidade Católica de Pernambuco, Brasil. Email: eliana@poli.br

RESUMEN

Este trabajo discute las combinaciones de tipos de cemento buscando obtener el de mayor capacidad de proteger al concreto de la corrosión de las armaduras ante la acción del ion cloruro. Para ello se usó el método de análisis jerárquico (AHP), basado en la definición de elementos principales para la toma de decisión rápida, confiable y objetiva. Fueron analizados tres tipos de cemento (CPII-Z-32: con adición de puzolana, CPIII-40: con adición de escoria y CPIV-32: con adición de puzolana), dos relaciones agua/cemento (0,4 y 0,7) y dos tiempos de curado (7 y 28 días), a través de los resultados de cinco ensayos. La aplicación del AHP se mostró eficaz en La elección Del tipo de cemento, generando La constatación que el cemento CPIII-40 presento El mejor desempeño entre los cementos evaluados

Palabras clave: Análisis Jerárquico, concreto armado, corrosión de las armaduras

RESUMO

Este trabalho discute combinações de tipos de cimento, buscando obter o de maior capacidade de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de cloretos. Para isso, utilizou-se o método Análise Hierárquica (AHP), baseado na definição de elementos principais para uma tomada de decisão rápida, confiável e objetiva. Foram analisados três tipos de cimento (CPII-Z-32: com adição de pozolana, CPIII-40: com adição de escória e CPIV-32: com adição de pozolana), duas relações água/cimento (0,4 e 0,7) e dois tempos de cura (7 e 28 dias), através do resultado de cinco ensaios. A aplicação do AHP mostrou-se eficaz na escolha do tipo de cimento, gerando a constatação que o cimento CPIII-40 apresentou o melhor desempenho entre os cimentos avaliados.

Palavras-chave: Análise hierárquica. Concreto armado. Corrosão de armadura.

ABSTRACT

This paper discuss cement types combinations to obtain the best one to protect against the steel reinforcement corrosion caused by chloride ions. In this case, it was used the method of Analytic Hierarchy Process (AHP), which is based on the definition of the main elements for making fast, reliable and objective decision. Three types of cement (CPII-Z-32: pozzolanic admixture, CPIII-40: blast furnace slag admixture and CPIV-32: pozzolanic admixture), two water/cement ratio (0,4 and 0,7) and two curing times (7 and 28 days), were analyzed through results of five experiments. The application of AHP was effective to choose the type of cement, concluding that the CPIII-40 cement showed the best performance compared to the other cements.

Keywords: Analytical hierarchy process. Reinforced concrete. Steel corrosion.

Autor de correspondencia: Marcelo Medeiros

1. INTRODUCCION

El concreto constituye uno de los principales materiales de construcción utilizados en La sociedad moderna, siendo El cemento portland El material de construcción más adecuado para esas estructuras, superando alternativas también viables, como El acero y La madera. Eso se debe a La combinación de los materiales que trabajan para resistir esfuerzos distintos siendo que El concreto resiste bien La compresión y El acero La tracción, permitiendo así una variedad de aplicaciones.

Su uso intenso tuvo inicio a partir de la década de los 50, hasta mediados de los años 70 se creía que el concreto armado era un material que no se deterioraba. Sin embargo en esa época las estructuras elaboradas con ese material comenzaron a presentar manifestaciones patológicas, haciendo que surgiera una preocupación en cuanto a la durabilidad del mismo. (Medeiros 2008).

A partir de allí, muchas investigaciones fueron realizadas con El objetivo de suprimir La incidencia de las manifestaciones patológicas en estructuras de concreto armado. Así Andrade 1997 concluyó que El 64% de las manifestaciones patológicas encontradas en las edificaciones Del Estado de Pernambuco, consistían en corrosión de La armadura por ataque intenso de cloruros.

Por lo tanto el deterioro de las estructuras de concreto armado debido a La corrosión de armaduras representa uno de los grandes problemas de La construcción civil. Eso ES porque El costo de La reparación de estas fallas puede corresponder AL 3,5% de pérdida anual Del producto interno bruto de Brasil, debido a inversiones de prevención de La corrosión y en mantenimiento o sustitución de elementos estructurales deteriorados por La corrosión.

(DOTTO, 2006).

Este proceso citado, ocurre por un mecanismo electroquímico que dispone necesariamente por lo menos de una reacción de oxidación y una de reducción que se Dan simultáneamente. Por lo tanto hay tres condiciones básicas para que ocurra La corrosión: existencia de un electrolito; diferencia de potencial del electrodo en presencia de oxígeno (BARBOSA et al., 2012). Según Pereira et al. (2013), la corrosión de La armadura puede ser influenciada por factores tales como las propiedades del concreto, tiempo de exposición al agente agresivo, condiciones de la superficie de la barra de acero, características del ambiente donde la estructura está embutida, entre otros. Normalmente el concreto ofrece un grado de protección contra la corrosión AL acero, debido a la formación de una fina película de óxidos protectora en su superficie, en virtud de la alta alcalinidad del material. No obstante, la presencia de cloruros a partir de 0,4 % de la masa de cemento, la película que antes protegía la armadura y destruida y El acero se despasiva propiciándose la corrosión.

En ese sentido los investigadores como Page et al. (1986), Tessari (2001), Mather (2004), Sakr (2004) y Pereira (2011), hicieron estudios sobre la influencia de los tipos de cemento y sus adiciones en La protección contra el ataque de cloruros. Según esos investigadores, las adiciones de los diversos tipos de cemento pueden contribuir con beneficios como La reducción de la permeabilidad y porosidad capilar. Por lo tanto, con esos beneficios y sus influencias en lo referente a corrosión de las armaduras, surge La hipótesis de que los tipos de cemento influyen en la protección de la corrosión de armaduras causada por cloruros.

Según lo expuesto y usando los datos obtenidos de La investigación de maestría de Pereira (2011), este trabajo presenta una discusión, a partir Del análisis jerárquico sobre La elección de algunos tipos de cemento de La región noreste de Brasil, CPII-Z-32 (cemento Portland

compuesto con puzolana), CPIII-40 (cemento Portland de alto horno) y CPIV-32 (cemento Portland puzolánico), según la corrosión de las armaduras sobre la acción de cloruros.

2. FACTORES DE INFLUENCIA EN LA PENETRACION DE CLORUROS EN COMPUESTOS DE CEMENTO PORTLAND

La corrosión de las armaduras puede ocurrir por procesos nocivos de naturaleza química o electroquímica. Para el caso de elementos estructurales de concreto armado expuestos al ataque de cloruros, principalmente en ambientes marítimos, se percibe que son frecuentes las manifestaciones patológicas como: figuración, de laminación y pérdida Del espesor de recubrimiento. La causa de estas manifestaciones se encuentra en el proceso de perdida de sección de las barras de acero debido a La propia corrosión de las mismas, que a su vez trae La formación de productos expansivos en el interior del concreto.

Para que no ocurra el proceso de corrosión ES necesario, primeramente, que el concreto se encuentre en un medio alcalino provisto de hidróxidos. Siendo así, debido a la alta alcalinidad, se forma sobre la superficie de las barras de acero una película de óxidos que actúa como barrera de protección de las mismas. Por lo tanto de existir contaminación por cloruros, la corrosión de armaduras puede ocurrir mismo con o pH do concreto estando por volta de 13 como no concreto nuevo.

Como la corrosión que se explica ocurre en un medio acuoso, el proceso ES caracterizado como electroquímico, ES decir supone que existe una reacción de oxidación y una de reducción, y circulación de iones a través del electrolito, siendo este responsable por El deterioro Del concreto (HELENE, 1993).

Uno de los principales factores de influencia de la corrosión ES la estructura de poros del espesor de recubrimiento, que si ES de elevada absorción debe resultar en un proceso de corrosión más acelerado. De ese modo, El ingreso del agua, varía dependiendo de la porosidad, y es de gran importancia controlar El índice de humedad, oxígeno, CO₂ y principalmente de cloruros dentro del concreto (CERVO, 2001). Siendo así se vuelve más importante La evaluación Del tipo de cemento, de la relación agua/cemento y de las condiciones de curado como influyente para el proceso corrosivo de armaduras por ataque de cloruros.

La composición química del cemento también influye significativamente en el proceso de corrosión debido a la presencia de iones cloruros, pues el aluminato tricálcico (C₃A) y El ferro-aluminato tetra cálcico (C₄AF) se combinan con los cloruros formando los cloro aluminatos. El aluminato tricálcico tiene la capacidad de inmovilizar los iones cloruros, por medio de la formación de un compuesto insoluble llamado cloro aluminato de calcio hidratado (PAGE *et al.*, 1986). El trabajo de Hoppe Hijo *et al.* (2013), aplicando la técnica de difracción de rayos X, también indica la formación de cloro-aluminato en concreto sometido al contacto con La solución acuosa de iones cloruros.

Es importante destacar que, las adiciones minerales como las puzolanas en la composición del cemento, reducen la porosidad dejando el concreto menos susceptible a La percolación de líquidos, por tanto, disminuyendo la permeabilidad. Además de eso las puzolanas poseen buena capacidad de retención de cloruros, por presentar elevados contenidos de alúmina (CERVO, 2001).

Así como la composición química del cemento, a relación agua/cemento influye directamente en la forma, El tamaño y en La distribución de los poros. Por tanto, uno de los factores regentes de la penetración de cloruros es esa relación. Esto ocurre, pues La baja relación a/c disminuye la porosidad del concreto disminuyendo la penetrabilidad y la difusión. De esta forma, diversas

investigaciones proponen estudios de penetración de los iones cloruro en función de diferentes relaciones agua/cemento. Esos estudios comprobaron que cuanto más baja la relación a/c, menor la cantidad de penetración de cloruros (GASTALDINI *et al.*, 2010).

Otro factor de influencia sobre la difusión de los iones cloruros en compuestos de cemento Portland ES El curado que también influye en la formación de la estructura de los poros en la pasta de cemento Portland. Cuanto mayores el tiempo de curado del concreto, mayor la resistencia a la entrada de agentes agresivos, pues hay una mejora en las condiciones internas y superficiales del recubrimiento debido a hidratación del cemento.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabajo consiste en una aplicación la herramienta en La toma de decisión llamado análisis jerárquico, que toma como sustento una base de datos para la fundamentación de una escogencia en una aplicación específica. A continuación están presentadas las condiciones y premisas adoptadas en este trabajo, que tuvo como foco La elección del tipo de cemento más adecuado en una condición de ejecución de obras sometidas a un ambiente contaminado por iones cloruros.

3.1. Datos del estudio usado como base de datos para la AHP

El trabajo usado como base de datos de esta aplicación de AHP fue desarrollado por Pereira (2011). En ese trabajo, fueron usadas las variables de estudio a continuación mostradas:

- Relación agua/cemento (2 niveles – a/c = 0,4 y 0,7) – fueron escogidos dos niveles de relación a/c bien diferentes para intentar evidenciar el efecto de este parámetro de forma más significativa;
- Tipo de cemento (3 niveles - CPII-Z-32, CPIII-40 y CPIV-32) - Esta elección fue en base a las capacidades de protección en ambientes contaminados por cloruros. Los cementos CPII-Z-32 y CPIV-32 utilizados en La investigación son compuestos, respectivamente, 12% y 43% de puzolana natural proveniente de roca, y en la composición del CPIII-40 hay 67% de escoria de alto-horno;
- Proceso de curado (2 niveles – 7 y 28 días en cámara húmeda) – fueron escogidos dos períodos de curado en cámara húmeda con La intención de cuantificar la magnitud de la importancia de elevar el tiempo de curado de los componentes del cemento Portland.

Durante el programa experimental se preocupó en mantener las mismas condiciones de las probetas elaborándolos dentro del mismo rango de trabajabilidad, variando entre 260 mm y 300 mm. Para la realización de los ensayos complementarios fueron adoptados probetas cilíndricas de mortero de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Para El ensayo de corrosión acelerada fueron confeccionados probetas prismáticas en las dimensiones de 60 x 80 x 25 mm, con dos barras de 5 mm de diámetro, 100 mm de largo y con 10 mm de recubrimiento.

Luego Del curado y secados en ambiente de laboratorio por 15 días, las probetas prismáticas fueron sometidas al ensayo de corrosión que consistió en semiciclos de secado y humectación por inmersión parcial en una solución acuosa con 5% de NaCl, durante tres meses. Los semiciclos se caracterizaron en 5 días en que las probetas estaban dentro de la estufa, y después 2 días en que los mismos quedaban parcialmente sumergidos en la solución citada.

Para la ejecución del ensayo de corrosión acelerada fue necesario que hubiera como aparatos los siguientes ítems: un electrodo de referencia, un dispositivo eléctrico, cables eléctricos y un voltímetro de alta impedancia. Para La medición del potencial de corrosión se conectaron los polos positivo y negativo, respectivamente, a la barra de acero y al electrodo de referencia. De esa forma, el voltímetro indica la intensidad de la diferencia de potencial entre las semicélulas,

siendo un parámetro indicativo de la ocurrencia o no de corrosión de armaduras (PEREIRA, 2011).

Para cerrar el circuito es necesaria una interface conductiva entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo (barra de acero) y eso fue hecho usando una esponja saturada colocada en el contacto eléctrico entre el electrodo de referencia y la superficie del concreto. La Figura 1 ilustra la configuración del ensayo de determinación del potencial de corrosión (MEDEIROS et al., 2013).

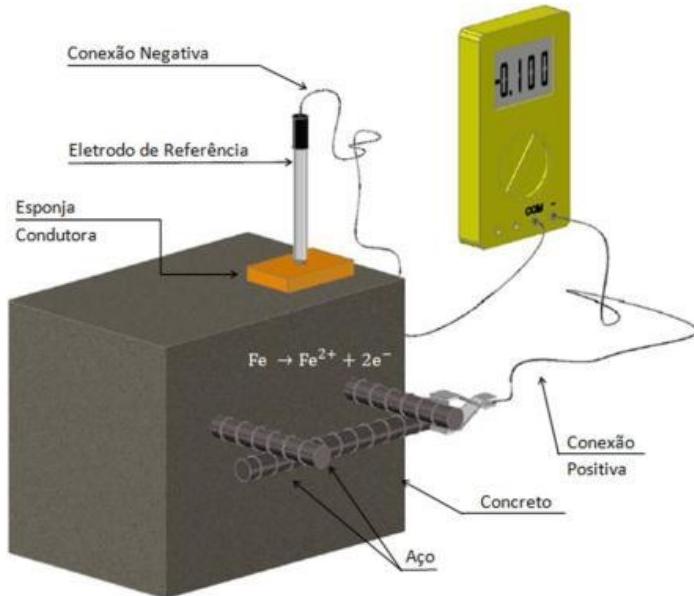


Figura 1. Configuración del circuito para La determinación del potencial de corrosión (ROCHA, 2012; MEDEIROS et al., 2013)

El objetivo del método no es cuantificar la corrosión de acero, una vez que El índice de corrosión no es determinado con el procedimiento. Según Medeiros, Balbinot y Helene (2010), el potencial de corrosión identifica los locales de La pieza en estudio donde las condiciones termodinámicas son favorables al inicio del proceso de corrosión, aun cuando la armadura no presente señales en la superficie de concreto que lo recubre

Para la evaluación de la probabilidad de corrosión, fue usado el procedimiento recomendado en la ASTM C 876 (2009), siendo que para el potencial de corrosión referente al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (E_{corr}) menor que -350 mV, la probabilidad de corrosión es mayor que 90%. Y para E_{corr} mayor que -200 mV, la probabilidad de corrosión es menor que 10%.

Además del ensayo de envejecimiento acelerado, se realizaron los ensayos complementarios de absorción por inmersión (ABNT NBR 9778:1987), absorción por capilaridad (ABNT NBR 9779:1995) y resistencia a la compresión (ABNT NBR 7215:1997). La intención del autor en realizar los ensayos complementarios fue de auxiliar en la compresión e interpretación del ensayo principal.

3.2. Método de Análisis Jerárquica

La toma de decisión para problemas complejos exige un tratamiento de datos simplificados, entretanto sistemático con El fin de obtener resultados rápidos, confiables y que no sean onerosos.

Tomando en cuenta factores de importancia para la realización de una determinada elección, Saaty desarrolló en 1971 la técnica de análisis Jerárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*). El AHP consiste en una herramienta de decisión multi-criterio abordando factores que son organizados en una estructura Jerárquica (SAATY, 1990).

En La ingeniería civil, el potencial del análisis Jerárquico ha sido poco explorado, pero se pueden citar algunos estudios que lo usaron como la herramienta e instrumento de decisión, tales como: 1 - Marchezetti et al. (2011), en el tratamiento de residuos domiciliarios; 2 - Silva y Souza (2011), en la selección de camiones colectores compactadores de residuos sólidos; 3 - Lisboa y Waisman (2006) y Zayed et al. (2008) en las decisiones relacionadas en el área de proyecto de vialidad; 4 - Pan (2008), en la selección de métodos de construcción de puentes; 5 - Lai et al. (2008), en el proyecto de obras públicas; 6 – Pereira, Medeiros y Levy (2012), para elegir los porcentajes de sustitución de residuos de construcción como agregados en La dosis de concretos; 7 – Mattana et al. (2012), en La elección de morteros de revestimiento; 8 – Pereira et al. (2014), elegir mortero de pega para aplicación en el sistema piso sobre piso.

El método del AHP desarrolla tres principales operaciones, que corresponden a la construcción de una jerarquía, análisis de prioridades y verificaciones de consistencias. La construcción de la jerarquía consiste en separar las partes componentes del problema y organizarlas en niveles. Ya para los análisis de prioridad se realiza una comparación de los elementos de cada nivel con base en el conocimiento y experiencia Del decisor. Por fin, se ejecutan verificaciones de consistencia para garantizar La coherencia entre las comparaciones (HO, 2008).

Así, antes de iniciar la aplicación de la técnica del AHP se hace necesario definir el objetivo, que en este trabajo consiste en escoger un tipo de cemento, una relación agua/cemento (a/c) y un tiempo de curado, como fueron especificados anteriormente, capaz de proteger mejor el concreto de la corrosión das armaduras sobre La acción de iones cloruro. Así las alternativas de escoger para ese trabajo se encuentran dispuestas en la Tabla 1. Se analizó cada situación procurando obtener y comparar el mejor tipo de cemento para cada relación a/c y tiempo de curado.

Tabla 1. Combinación de los tipos de cemento para dos niveles de relación a/c y de curado

Tipo de cemento	Relación a/c	Días de curado
CP II-Z-32	0,4	07 días
CP II-Z-32	0,4	28 días
CP II-Z-32	0,7	07 días
CP II-Z-32	0,7	28 días
CP III-40	0,4	07 días
CP III-40	0,4	28 días
CP III-40	0,7	07 días
CP III-40	0,7	28 días
CP IV-32	0,4	07 días
CP IV-32	0,4	28 días
CP IV-32	0,7	07 días
CP IV-32	0,7	28 días

Luego de la definición de las opciones de elección, representados en la Tabla 1, se fijaron los criterios a ser considerados en la evaluación del desempeño de las alternativas. Pereira (2011) analizo el resultado de tres ensayos principales siendo absorción de agua, resistencia a la compresión y corrosión acelerada, que estaban en el nivel primario da jerarquía. El ensayo de absorción de agua abarca otros tres ensayos dispuestos en el nivel secundario de jerarquía, y el ensayo de corrosión acelerada también envuelve datos de ensayo de evolución del potencial de corrosión, basados en datos obtenidos con la variación de La masa de las probetas.

En la Figura 2 se encuentra El árbol Jerárquico demostrando los niveles analizados y los criterios considerados.

En la Tabla 3 están presentados los valores de la matriz de decisión del primer nivel jerárquico indicando los pesos de cada parámetro. Como los ensayos de absorción de agua y resistencia a compresión fueron considerados levemente menos importantes que el ensayo de corrosión acelerada, esos AL ser comparados con el último reciben valores inversos para caracterizar La tendencia de los datos.

Tabla 3. Matriz de decisión del primer nivel do AHP

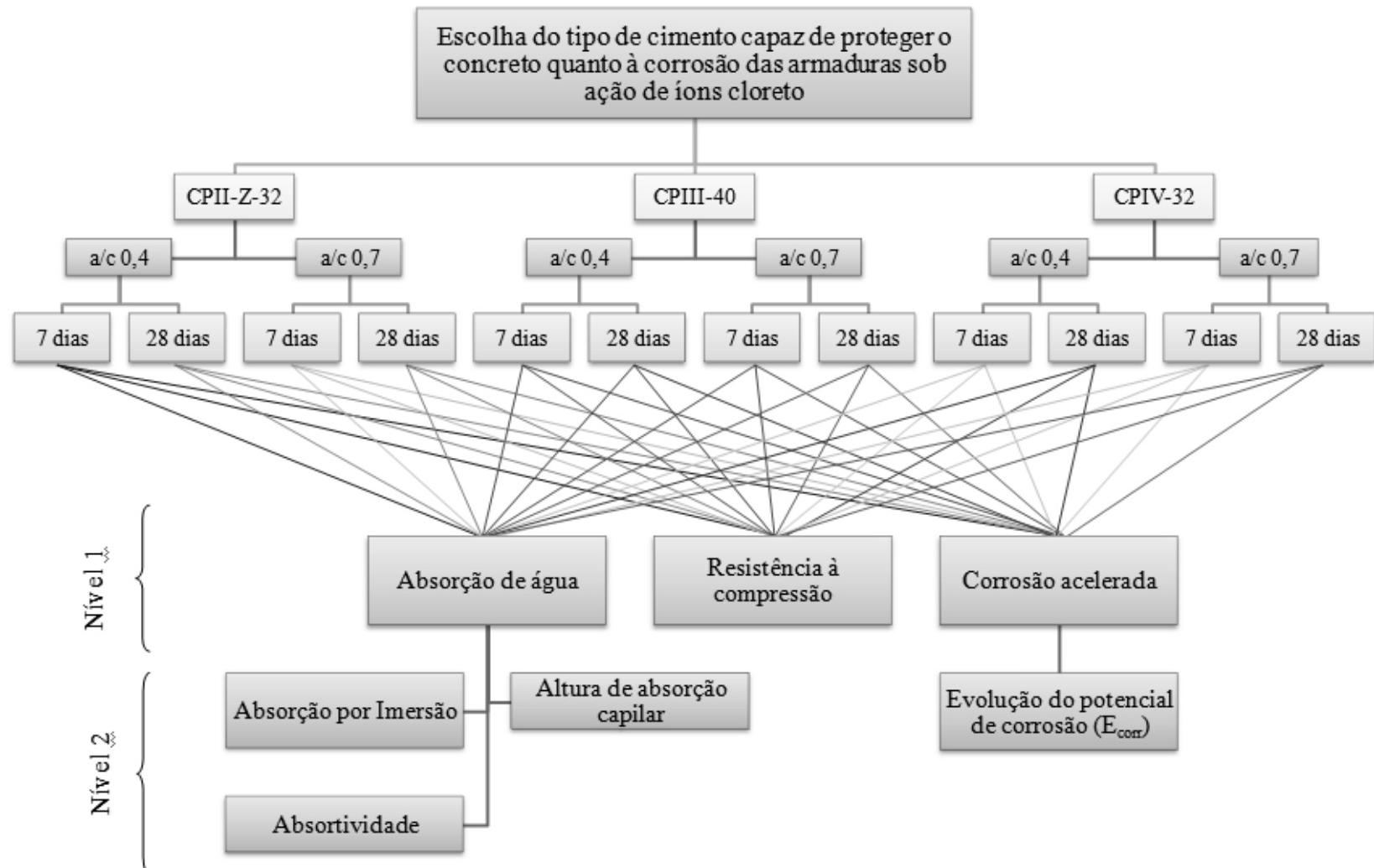
	Absorción de agua	Resistencia a compresión	Corrosión acelerada	Total de La línea (Tl)	Importancia relativa
Absorción de agua	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Resistencia a compresión	1,00	1,00	0,33	2,33	0,20
Corrosión acelerada	3,00	3,00	1,00	7,00	0,60
Total general (Tg)				11,67	1,00

En la elaboración de la matriz de decisión del segundo nivel jerárquico se opto por considerar todos los criterios analizados como Del mismo grado de importancia. Esta práctica fue realizada porque ES muy difícil y subjetivo atribuir diferentes niveles de importancia para cada uno de los tres resultados de absorción de agua. En la Tabla 4 están dispuestos los valores da matriz de decisión del segundo nivel jerárquico.

Tabla 4. Matriz de decisión del segundo nivel del AHP

	Absorción por inmersión	Altura absorción capilar (cm)	Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	Total de La línea (Tl)	Importancia relativa
Absorción por inmersión	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Altura absorción capilar (cm)	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	1,00	1,00	1,00	3,00	0,3333
Total General (Tg)				9,00	1,00

Figura 2. Árbol de jerarquía con los criterios y niveles de análisis



Luego de resolver las matrices de decisión con los pesos de cada criterio, se calcula la consistencia del AHP, a través Del test de consistencia fundamentado por Saaty (2000) e indicado por Costa (2002). De ese modo se determino la razón de consistencia, que debe ser un valor menor o igual a 0,1. En el caso de este estudio, el cálculo de La razón resulto ser 0 (cero) para las dos matrices desarrolladas, siendo menor que el límite establecido. Así la AHP montada es considerada perfectamente consistente.

En este trabajo, todos los datos usados en la comparación de los criterios de análisis son requisitos cuantitativos, ES decir se usaron los valores numéricos extraídos de los resultados de los ensayos realizados por Pereira (2011), como se ve en la Tabla 5.

El ensayo de evolución del potencial de corrosión fue ejecutado con 12 ciclos de secado y humectación (en solución de NaCl al 5%) y duración total de 84 días. Para La evaluación del desempeño de los cementos se considero las medias de todos los resultados solamente de las fases de humectación, que por la presencia da agua presenta los valores más representativos en relación a probabilidad de corrosión.

Tabla 5. Datos generales para La elaboración del AHP

Tipo de cemento	CPII				CPIII				CPIV			
	7 días		28 días		7 días		28 días		7 días		28 días	
Relación a/c	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7
Altura ascención capilar (cm)	4,7	6,1	4,4	6,7	3,5	5,3	3,3	4,2	4,3	4,8	3,5	5,5
Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	1,27	1,93	1,14	1,87	0,97	1,37	0,89	1,24	1,26	1,72	0,98	1,48
Absorción por inmersión (%)	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11
Resistencia a compresión (MPa)	34,5	16,8	46,2	20,4	47,5	18,7	50,0	28,6	37,1	14,5	43,6	18,3
Potencial de corrosión (mV)	-387	-474	-379	-492	-406	-514	-339	-462	-460	-481	-434	-503

4. RESULTADOS - APLICACIÓN DEL ANÁLISIS JERÁRQUICO

Con la presente investigación, utilizando los datos de ensayos realizados por Pereira (2011) y a través del método de Análisis Jerárquico, se busco obtener el mejor tipo de cemento (CPII-Z-32, CPIII-40 y CPIV-32) con respecto a la corrosión de armaduras por acción de iones cloruro, considerando también dos niveles de relación a/c (0,4 y 0,7) y dos tiempos de curado (7 y 28 días). Los resultados de los análisis fueron verificados separadamente por la combinación de los elementos de elección, generando dos matrices de análisis comparando los tipos de cemento con la relación a/c de 0,4 tanto para 7 días de curado como para 28 días, y dos matrices con los tipos de cemento para relación a/c de 0,7 y tiempos de curado de 7 días y 28 días.

Para optimizar los resultados del presente trabajo, se muestra con detalles los procedimientos de evaluación apenas de la matriz de decisión de los tipos de cemento para relación a/c de 0,4 a los 7 días, que se encuentra en El ítem que sigue. Para las otras matrices, se eligió demostrar apenas las Tablas finales con los índices de desempeño y evaluación final. Así queda claro para El lector la forma de llegar a los análisis finales por AHP.

4.1. Elección del cemento para La relación a/c 0,4 y curado de 7 días

Luego de obtener el conocimiento de los criterios considerados en el AHP y establecer los pesos para comparación de esas propiedades, El evaluador debe realizar La normalización de los datos para la debida verificación del desempeño. Para eso se divide el valor de cada aspecto por El mayor valor de La línea, a fin de que todos los criterios presenten la misma importancia de valores, comprendida entre 0 y 1.

Los valores de los ensayos relacionados a absorción de agua y el potencial de corrosión precisan ser invertidos, ya que cuando son menores los resultados son de mejor desempeño. Al convertir los datos es posible una estandarización del análisis por los mayores valores agregando coherencia a la evaluación. En la Tabla 6 siguen los datos estandarizados y normalizados de los ensayos referentes a absorción de agua (absorción por inmersión, altura de ascensión capilar y absorbitividad), resistencia a compresión y corrosión acelerada (potencial de corrosión).

Tabla 6. Valores modificados y normalizados usados en el AHP

Criterios	Datos de Análisis	Valores modificados			Valores normalizados		
		CP II	CP III	CP IV	CP II	CP III	CP IV
Criterios	Absorción por inmersión (%)	9,09	8,33	7,69	1,00	0,92	0,85
	Altura ascension capilar (cm)	0,21	0,29	0,23	0,74	1,00	0,81
	Absortividad (Kg/m ² h ^{1/2})	0,79	1,03	0,79	0,76	1,00	0,77
	Resistencia a compresión	34,50	47,52	37,09	0,73	1,00	0,78
	Potencial de corrosión (mV)	0,00259	0,00246	0,00217	1,00	0,95	0,83

Al multiplicar el valor normalizado de cada ítem (Tabla 6) por la importancia relativa de cada criterio (Tabla 4), por el número 100, para obtener valores en porcentaje, fue posible obtener los índices de desempeño de cada uno. Como ejemplo, en la Ecuación (1) sigue descrito el procedimiento de cálculo del índice de desempeño del criterio de absorción por inmersión para el CP II con a/c 0,4 a los 7 días.

$$I_c = Vn_i \times P_c \times 100 \quad (1)$$

$$I_c = 1,00 \times 0,3333 \times 100$$

$$I_c = 33,33$$

Donde,

I_c: índice de desempeño del criterio

Vn_i: valor normalizado del criterio

P_c: importancia relativa del criterio

Luego de eso se suman los índices de desempeño de los criterios de comparación correspondientes a absorción de agua. Los índices de desempeño de los criterios de resistencia a compresión y evolución del potencial de corrosión no son sumados, pues cada criterio se trata de un ensayo aislado. En la Tabla 7 siguen los índices de desempeño de los criterios.

Por fin la evaluación final ES La suma de los índices de desempeño multiplicados por la importancia relativa (Tabla 3) de cada propiedad analizada. El procedimiento de cálculo para la evaluación final del CP II sigue ejemplificado por la Ecuación (2).

$$Af = \sum(I_p \cdot P_p) \quad (2)$$

$$Af = (83,62 \cdot 0,20) + (72,60 \cdot 0,20) + (100,00 \cdot 0,60)$$

$$Af = 91,24$$

Donde,

Af: evaluación final

I_p: índice de desempeño de la propiedad

P_p: importancia relativa de la propiedad

Tabla 7. Índices de desempeño para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 7 días de curado

Datos de Análisis		Índices de desempeños			
		CP II	CP III	CP IV	
Res. compresión	Absorción de agua	Absorción por inmersión (%)	33,33	30,56	28,21
		Altura ascención capilar (cm)	24,82	33,33	27,13
		Absortividade (Kg/m ² h ^{1/2})	25,46	33,33	25,66
		Índice de Desempeño	83,62	97,22	81,00
Corrosión acelerada	Resistencia a compresión	Resistencia a compresión	72,60	100,00	78,05
		Índice de Desempeño	72,60	100,00	78,05
	Potencial de corrosión (mV)	Potencial de corrosión (mV)	100,00	95,26	83,99
		Índice de Desempeño	100,00	95,26	83,99

Los resultados de la evaluación de cada tipo de cemento se encuentran descritos en la Tabla 8. El mejor resultado entre las combinaciones de los tipos de cemento, relaciones a/c y tiempos de curado ES lo que presenta El mayor valor en la evaluación final.

Tabla 8. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 7 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Importancia relativa	0,20	0,20	0,60	
CP II	83,62	72,60	100,00	91,24
CP III	97,22	100,00	95,26	96,60
CP IV	81,00	78,05	83,99	82,21

Para el caso estudiado, buscando el mejor tipo de cemento capaz de proteger el concreto tanto de la corrosión de las armaduras sobre La acción de iones cloruro, considerando una relación a/c de 0,4 y tiempo de curado de 7 días, La opción que presento mejor desempeño según el Análisis Jerárquico fue el cemento tipo CPIII-40, seguido del cemento CPII-Z-32 y CPIV-32.

4.2. Elección del cemento para otras combinaciones de a/c y tiempo de curado

Los procedimientos de cálculo demostrados anteriormente, para la elección del tipo de cemento con relación a/c de 0,4 a los 7 días de curado, fueron los mismos adoptados para las otras combinaciones de relación a/c y tiempo de curado. Así, como forma de simplificar la presentación de los resultados, en las Tablas 9, 10 y 11 están colocados los datos de los índices de desempeño y la evaluación final de las otras matrices en análisis.

Tabla 9. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,4 a los 28 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	84,36	92,41	89,36	88,97
CP III	97,22	100,00	100,00	99,44
CP IV	89,91	87,21	78,09	82,28

Tabla 10. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,7 a los 7 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	80,45	90,04	100,00	94,10
CP III	96,86	100,00	92,17	94,68
CP IV	90,44	77,68	98,35	92,63

Tabla 11. Evaluación final para los tipos de cemento con a/c 0,7 a los 28 días de curado

	Absorción agua	Resistencia a Compresión	Corrosión Acelerada	Evaluación final
Peso	0,20	0,20	0,60	
CP II	76,33	71,38	94,01	85,95
CP III	100,00	100,00	100,00	100,00
CP IV	86,72	64,03	91,84	85,25

Al analizar cada criterio individualmente se constata que en relación a la absorción de agua los mejores desempeños entre los tipos de cemento se destaca el CPIII-40, como identificado con la relación a/c de 0,4 con tiempo de curado de 28 días. Ese resultado se debe a la mejoría de la microestructura de la composición del cemento Portland proporcionada por el prolongamiento del período de curado. En cuanto a La relación a/c, esta influye en la cantidad de vacíos del mortero, siendo ese un parámetro que controla la porosidad influenciando en las propiedades ligadas a los mecanismos de transporte en el concreto (MENDES et al., 2010).

Ya en relación a La resistencia a la compresión se confirmó, por el Análisis Jerárquico, lo esperado: la resistencia a compresión tiende a aumentar a medida que disminuye la relación agua/cemento (MEHTA y MONTEIRO, 2008).

Se observó que para las muestras, de cemento CPIII-40 se obtuvo mayores valores de resistencia, debido a la propia escoria de alto-horno que compone el material. Pereira (2011) al realizar la caracterización de los materiales también percibió que ese tipo de cemento fue o que demostró ser más fino en relación a los otros estudiados, lo que trae como consecuencia una mayor reactividad del cemento.

Evaluando los resultados finales de los ensayos de corrosión acelerada se noto nuevamente que en todas las matrices analizadas la elección del mejor tipo de cemento corresponde al CPIII-40, seguido del cemento CPII-Z-32 y CPIV-32. Eso viene concordando con las afirmaciones de Tumidajski y Chan (1996), de que concretos que incorporan escoria de alto-horno en sustitución parcial del cemento Portland, son más eficientes en prevenir la penetración de iones cloruro en comparación con concretos dosificados con cementos comunes.

Por fin, se constato que para las probetas fabricadas con el cemento CPIII-40, que fue escogido en todas las matrices analizadas, los valores de la relación agua/cemento resultaron en efectos relativamente semejantes, y a favor de la protección del concreto a la corrosión por ataque de cloruros. En relación al curado, El tiempo prolongado también favoreció el CPIII-40 en la protección del concreto.

Este trabajo fue realizado teniendo como base de datos el trabajo de maestría de Pereira (2011) y se debe destacar que la aplicación de la AHP sería más completa si el banco de datos comprendiera datos de velocidad de corrosión y hasta otro indicativo de corrosión de armaduras como aparición de manchas de corrosión en la superficie del concreto. Por tanto, este trabajo muestra que la AHP ES un sistema abierto a la inclusión de otros parámetros, lo que puede enriquecer el resultado de la elección.

5. CONCLUSIONES

La aplicación del Análisis Jerárquico como una herramienta para tomar de decisiones presento ventajas como facilidad de aplicación del método, y la posibilidad de manipular los factores determinantes en una elección, forneciendo resultados claros y objetivos. El AHP permite la construcción de jerarquías que consideran múltiples variable y admiten la comparación y evaluación de criterios priorizando los resultados.

En relación al presente trabajo, la aplicación del AHP facilitó la elección del tipo de cemento capaz de proteger al concreto de La corrosión de las armaduras sobre acción de iones cloruro, considerando también diferentes relaciones agua/cemento y tiempos de curado.

Evaluado los criterios de elección, a través de los ensayos de absorción de agua, resistencia a compresión y corrosión acelerada ejecutados por Pereira (2011), se constato que el cemento CPIII-40 fue El que presentó el mejor desempeño en todas las combinaciones estudiadas en este

trabajo. Ya de acuerdo con el tiempo de curado el mejor desempeño del cemento escogido fue a los 28 días, como era esperado debido AL mayor grado de hidratación.

Es relevante destacar que las importancias relativas de los criterios considerados fueron establecidas por los autores en base a la literatura y La Tesis de Pereira (2011). La intención de este trabajo es demostrar la utilidad y aplicación del AHP, cuando involucra una toma de decisión entre diversas posibilidades y combinaciones que involucran los estudios de corrosión de armaduras por acción de iones cloruro en el concreto.

Así, para la presente investigación, se confirma que el Análisis Jerárquico demostró ser eficiente para la sistematización de La escogencia de un nuevo análisis de los resultados obtenidos en la tesis de Pereira (2011). Las variables a ser consideradas en sus respectivos pesos pueden ser discutidas en trabajos futuros, visando aprimorar el método desarrollado en este trabajo. Un punto de mejora que ya puede ser sugerido en el método e implementar en el AHP algún parámetro que considere la velocidad de corrosión.

6. REFERENCIAS

- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 876: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete – (1999 reapproved 2009).* Annual Book of ASTM Standard, 2009.
- _____. *ASTM E 1765: standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to buildings and buildings systems.* 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cemento Portland - determinacao da resistencia a compresión.* Rio de Janeiro, 1997.
- _____. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinacao da absorcion de agua por inmersión, índice de vacíos e massa especifica.* Rio de Janeiro, 1987.
- _____. *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinacao da absorcion de agua por capilaridade.* Rio de Janeiro, 1995.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução.* Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- CERVO, T. C. *Influencia da finura e do teor de puzolana na penetracao de cloruros e na solucion aquosa dos poros do concreto.* Dissertacao de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.
- COSTA, H. G. *Introdução ao Método de Análisis Jerárquica: análisis multicriterio no auxilia a decisión.* 1 ed. Niterói, 2002.
- DOTTO, J. MR. *Corrosión do acero induzida por iones cloruro – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema acero-concreto como e sem puzolana.* Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; SACILOTO, A. P.; MISSAU, F.; HOPPE, T. F. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing Rice husk ash: A technical and economical feasibility study. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 783-793, 2010.
- HELENE, P. Contribuicao ao estudo da corrosión em armaduras de concreto armado. Sao Paulo, 1993. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo.
- HO, W. Integrated analytic hierarchy process and its applications – a literature review. *European Journal of Operational Research*, v. 186, p. 211-228. 2008.

- HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, p. 411-418, 2013.
- LAI, Y.; WANG, W.; WANG, H. AHP and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects. *Automation in Construction*, v. 17, n. 5, p. 623-632, 2008.
- LISBOA, M. V.; WAISMAN, J. Multicriteria analysis in the selection of urban highway alignment alternatives with application of the Analytic Process. An environmentally sustainable approach. In: *Urban transport, XII, Anais. 2006*, Praga.
- MARCHEZETTI, A. L; KAVISKI, E; BRAGA, M. C. B. Aplicación do método de AHP para a hierarquización das alternativas de tratamiento de residuos sólidos domiciliares. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 173-187, 2011.
- MATTANA, A. J; MEDEIROS, M. H. F; SILVA, N. G; COSTA, M. R. M. M. Análisis Jerárquica para elección entre agregado natural ou areia de britagem de rocha para confección de argamassas de revestimiento. *Ambiente Construído*, v. 12, p. 63-79, 2012.
- MATHER, B. Concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 3-4, 2004.
- MEDEIROS, M. H. F. *Contribución ao estudio da durabilidad de concretos com protección superficial frente a acao de iones cloruros*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Construcción Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MEDEIROS, M. H. F.; BALBINOT, G. B.; HELENE, P.. Inspecção em prédios no Rio de Janeiro: corrosión em pilares. *Concreto & Construcción*, v. Ano 38, p. 58-66, 2010.
- MEDEIROS, M. H. F.; KNUUTILA, M.; PEREIRA, E.; HELENE, P. Inspection of Buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosión at the base of reinforced concrete columns using potential corrosión technique. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, v. 2, p. 102-112, 2013.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propiedades e materiales*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MENDES, M. V. A. da Silva; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; FERREIRA, R. B. Evaluación das propiedades de transporte massa em concretos contendo adiciones minerais. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 52, 2010, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: IBRACON, 2010.
- MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. Corrosión de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de iones cloruro. *54º Congresso Brasileiro de Concreto. Anais...* Maceió, 2012.
- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosión of reinforcing steel. *Cement and Concrete Research*, v. 16, p. 79-86, 1986.
- PAN, N. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method. *Automation in Construction*, v. 17, n. 8, p. 958-965, 2008.
- PEREIRA, V. C. O. *Estudo da influencia do tipo de cemento em relación a corrosión de armaduras sob acao de iones cloruros*. Dissertación (Mestrado em Engenharia – Construcción Civil), Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica de Pernambuco. Recife, 2011.
- PEREIRA, E; MEDEIROS, M. H. F; LEVY, S. M. Durabilidad de concretos com agregados reciclados: uma aplicación de análisis Jerárquica. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 3, p. 125-134, 2012.
- PEREIRA, E.; RESENDE, A.; MEDEIROS, M. H. F.; MENEGUETTI, L. C. Ensayo acelerado por cloruros: efecto da sílica activa, relación agua/aglomerante e espesura de cobrimiento do concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 6, n. 4, p. 561-581, 2013.

- PEREIRA, E.; MARTINS, L. A.; MEDEIROS, M. H. F.; COSTA, M. R. M. M. Análisis Jerárquica para a elección de argamassa colante aplicada no assentamento de piso sobre piso. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, p. 203-214, 2014.
- ROCHA, F. C. *Leituras de potencial de corrosión em estruturas de concreto armado: influencia da relación a/c, da temperatura, da contaminacão por cloruros, da espessura de cobrimento e do teor de humedad do concreto*. Dissertacão (Mestrado em Engenharia de Construcción Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. Norte da Holanda, v. 48, p. 9-26. 1990.
- SAKR, K. Effect of cement type on the corrosión of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1820–1826, 2004.
- SILVA, F. J. A.; SOUZA, R. O. AHP na selección de caminhões coletores-compactadores de residuos sólidos. *Acta Scientiarum Technology*, v. 33, n. 3, p. 259-264, 2011.
- TESSARI, R. *Estudo da capacidade de protección de alguns tipos de cimentos nacionais, em relación a corrosión de armaduras sob acao de iones cloruro*. Dissertacão (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- TUMIDAJSKI, P. J.; CHAN, G. W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 4, p.551-556, may. 1996.
- ZAYED, T; AMER, M; PAN, J. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. *International Journal of Project Management*, v. 26, n. 4, p. 408-419, 2008.