

Revista Ingeniería de Construcción

ISSN - 0716 - 2952 versión impresa / print version

ISSN - 0718 - 5073 versión en línea / electronic version



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN



Nº2

VOL
28

Agosto 2013

refine your research
SCOPUS™

RIC is encouraged by CIB



Scientific Electronic Library Online



www.ricuc.cl

Revista Ingeniería de Construcción

Director	Luis Fernando Alarcón , Ph. D., Académico Escuela de Ingeniería UC
Editor	Mauricio López , Ph. D., Académico Escuela de Ingeniería UC
Comité Ejecutivo	Alfredo Serpell , Ph. D., Académico, Escuela de Ingeniería UC Hernán de Solminihaç , Ph. D. Académico, Escuela de Ingeniería UC Fernando Echeverría , Ingeniero Civil, Director de Echeverría e Izquierdo Ingeniería y Construcción S. A. Claudio Mourgues , Ph. D. Académico, Escuela de Ingeniería UC Jaime Muñoz , Periodista, Jefe de Comunicaciones y Extensión, Escuela de Ingeniería, UC Montserrat Palmer , Arquitecta, Directora Ediciones ARQ, Escuela de Arquitectura UC Guillermo Thenoux , Ph. D. Académico, Escuela de Ingeniería UC Sergio Vera , Ph. D., Académico, Escuela de Ingeniería UC Carlos Videla , Ph. D., Académico, Escuela de Ingeniería UC Alondra Chamorro , Ph. D., Académico, Escuela de Ingeniería UC
Comité Editorial Internacional	Facundo Almeraya , Ph. D., Grupo de Corrosión del CIMAV, México Alfonso Bastías , Ph. D., Universidad del Desarrollo, Chile Marcelo Bustos , Ph. D., Universidad Nacional de San Juan, Argentina Domingo Carreira , Ph. D., Illinois Institute of Technology, Estados Unidos Miquel Casals , Ph. D., Universitat Politècnica de Catalunya, España Javier Castro , Ph. D., Universidad del Desarrollo, Chile Pedro Castro Borges , Ph. D., Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, México Mario Chiorino , Ph. D., Politecnico di Torino, Torino, Italia Juan F. Correal , Ph.D., P.E., Universidad de los Andes, Colombia Juan Pablo Covarrubias , Ph. D., Litoral Ingeniería, Chile Jorge de Brito , Ph. D., Technical University of Lisboa, Portugal Hans-Dieter Beushausen , Ph. D., University of Cape Town, Sudáfrica Leonardo Dueñas-Osorio , Ph. D., Universidad de Rice, Estados Unidos Martin Fischer , Ph. D., Stanford University, Estados Unidos Nuria Forcada , Ph. D., Universitat Politècnica de Catalunya, España Jesús de la Garza , Ph. D., Virginia Technological Institute, Estados Unidos Álvaro González , Ph. D., Universidad del Desarrollo, Chile Vicente González , Ph. D., The University of Auckland, Nueva Zelanda Paulo Helene , Ph. D., Universidad de Sao Paulo, Brasil Patricia Martínez , Ph. D., Universidad de Valparaíso, Chile Keith Molenaar , Ph. D., University of Colorado at Boulder, Estados Unidos Paulo Monteiro , Ph. D., University of California at Berkeley, Estados Unidos Edgar Muñoz , M. Sc., Pontificia Universidad Javeriana, Colombia Ángel Palomo , Ph. D., Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, España Feniosky Pena - Mora , Ph. D., University of Illinois at Urbana-Champaign, Estados Unidos Leonardo Rischmoller , Ph. D., Universidad de Talca, Chile Eddy Rojas , Ph. D., University of Washington, Estados Unidos Kenji Sakata , Ph. D., Okayama University, Japón Stéphanie Staquet , Ph. D., Université Libre de Bruxelles, Bélgica Jorge Vanegas , Ph. D., Texas A&M University, Estados Unidos Sergio Velásquez , Ph. D., Universidad Panamericana, Guadalajara, México
Asistente Editor	Ximena Araya
Diseñado	Sandra Burgos
Marcaje	María Troncoso
Secretaria	Edith Garrido
Revista Electrónica	www.ricuc.cl
Cómo citar esta revista	Revista Ingeniería de Construcción, Vol 28 N°2, 2013
Index	Esta Revista recibe el apoyo del CONICYT-Chile a través del "Fondo de Publicaciones de Revistas Científicas, año 2012" y el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile y es Indexada en Scopus, PERIODICA, Chemical Abstracts, Directory of Open Access Journals, Actualidad Iberoamericana, Redalyc, Rapra Polymer Library bibliographic y es respaldada por el CIB; además se encuentra en la Biblioteca Científica SciELO Chile on - line.

Fundada el año 1986, la Revista Ingeniería de Construcción (RIC) es una revista cuatrimestral del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Su propósito fundamental es promover el progreso y desarrollo de la ingeniería y gestión de la construcción, proporcionando un foro internacional de discusión y difusión de nuevos conocimientos y resultados de investigación, con particular énfasis en el medio Ibero-Latinoamericano. RIC es una revista orientada tanto a académicos como a profesionales. La revista publica artículos originales e inéditos, tanto en idioma español como inglés, en todos los tópicos relevantes de la ingeniería y gestión de la construcción, tales como: materiales de construcción; tecnologías, métodos y procesos de la construcción; gestión de la construcción y sus recursos; gestión empresarial en la construcción; construcción sustentable y rehabilitación de materiales y estructuras y otros tópicos de interés. La revista incluye artículos que informen resultados de investigación así como de aplicaciones y casos de la práctica. Las opiniones expresadas en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción o del Editor. Invitamos a investigadores, académicos y profesionales interesados, a contribuir con artículos para ser publicados en la revista o a enviar discusiones sobre los artículos ya publicados. La guía con las instrucciones para la preparación de artículos por los autores se entrega en la cara interior de la contratapa.

Revisión por pares: todos los artículos presentados para publicación son evaluados en forma independiente por un comité de revisores.

Procedimiento:

1. El Editor envía carta acusando recibo cada vez que un nuevo artículo es enviado para publicación.
2. El coordinador revisa que el artículo cumpla con las normas de envío requeridas. Si el artículo es aprobado pasa a ser revisado por el Editor. En caso contrario, se informa al autor de las observaciones.
3. Editor revisa si el tema del artículo es acorde a las áreas de interés y objetivos de la revista. Si el artículo es de interés para la Revista se envía junto con un instructivo y formularios de revisión a cinco revisores externos (revisión por pares), los cuales no conocen el nombre ni la institución del autor. En caso contrario, se informa al autor los motivos de la decisión.
4. El Editor revisa evaluaciones y recomendaciones de los revisores, (se requieren de al menos tres respuestas formales de revisores para proceder), y decide si el artículo es "Aceptado sin observaciones", "Aceptado sujeto a observaciones", o "Rechazado". En cualquier caso el autor es informado de la decisión y los comentarios de los revisores, cuyos nombres no son dados a conocer, son entregados al autor.
5. Si el artículo es "Aceptado sujeto a observaciones", se le pide al autor de preparar una segunda versión en base a los comentarios y sugerencias. Una vez recibido el artículo en su nueva versión, se evalúa junto con las observaciones iniciales de los revisores por el Editor y miembros del Comité Editorial Internacional quienes en conjunto dan la aprobación final para publicación.
6. El autor es informado de la aceptación final del artículo y se le pide la firma del formulario de transferencia de los derechos de autor.
7. Una prueba de imprenta es preparada y enviada a los autores una vez recibida la transferencia de derechos de autor.
8. El artículo va a impresión una vez recibida la aprobación de la prueba de imprenta.

Correspondencia: incluyendo el envío de artículos para publicación, debe ser dirigida a: Editor Revista Ingeniería de Construcción, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Casilla 306, Santiago, Chile. E-mail: ric@ing.puc.cl, Fono: (562) 354-4244; Fax: (562) 354-4806, www.ing.puc.cl/ric

Información de Suscripción Anual

El costo de la suscripción anual es de 20.000 pesos chilenos dentro de Chile, o US\$ 90 al extranjero. Suscripción especial para estudiantes de 15.000 pesos chilenos dentro de Chile o US\$ 70 al extranjero.

Puntos de Venta de la Revista

Ediciones UC. Librería Centro de Extensión UC, Avda. B. O'Higgins 390, Librería Campus San Joaquín, Vicuña Mackenna 4860, Santiago Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Vicuña Mackenna 4860, Edificio San Agustín 3er. Piso, Santiago.

Revista Ingeniería de Construcción

Director	Luis Fernando Alarcón , Ph. D., Professor Escuela de Ingeniería UC
Editor	Mauricio López , Ph. D., Associate Professor Escuela de Ingeniería UC
Advisory Board	Alfredo Serpell , Ph. D., Professor Escuela de Ingeniería UC Hernán de Solminihac , Ph. D., Professor Escuela de Ingeniería UC Fernando Echeverría , Civil Engineer, Director Echeverría e Izquierdo Ingeniería y Construcción S. A. Claudio Mourgues , Ph. D., Assistant Professor Escuela de Ingeniería UC Jaime Muñoz , Journalist, Head Communication of Extension, Escuela de Ingeniería, UC Montserrat Palmer , Architect, Director ARQ, Escuela de Arquitectura UC Guillermo Thenoux , Ph. D., Professor, Escuela de Ingeniería UC Sergio Vera , Ph. D., Assistant Professor, Escuela de Ingeniería UC Carlos Videla , Ph. D., Professor, Escuela de Ingeniería UC Alondra Chamorro , Ph. D., Assistant Professor, Escuela de Ingeniería UC
International Editorial Board	Facundo Almeraya , Ph. D., Grupo de Corrosión del CIMAV, Mexico Alfonso Bastías , Ph. D., Universidad del Desarrollo, Chile Marcelo Bustos , Ph. D., Universidad Nacional de San Juan, Argentine Domingo Carreira , Ph. D., Illinois Institute of Technology, USA Miquel Casals , Ph. D., Universitat Politècnica de Catalunya, Spain Javier Castro , Universidad del Desarrollo, Chile Pedro Castro Borges , Ph. D., Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Mexico Mario Chiorino , Ph. D., Politécnico di Torino, Torino, Italy Juan F. Correal , Ph.D., P.E., Universidad de los Andes, Colombia Juan Pablo Covarrubias , Ph. D., Litoral Ingeniería, Chile Jorge de Brito , Ph. D., Technical University of Lisboa, Portugal Hans-Dieter Beushausen , Ph. D., University of Cape Town, South Africa Leonardo Dueñas-Osorio , Ph. D., Rice University, USA Martin Fischer , Ph. D., Stanford University, USA Nuria Forcada , Ph. D., Universitat Politècnica de Catalunya, Spain Jesús de la Garza , Ph. D., Virginia Technological Institute, USA Álvaro González , Ph. D., Universidad del Desarrollo, Chile Vicente González , Ph. D., The University of Auckland, New Zealand Paulo Helene , Ph. D., Universidad de Sao Paulo, Brazil Patricia Martínez , Ph. D., Universidad de Valparaíso, Chile Keith Molenaar , Ph. D., University of Colorado at Boulder, USA Paulo Monteiro , Ph. D., University of California at Berkeley, USA Edgar Muñoz , M. Sc., Pontificia Universidad Javeriana, Colombia Ángel Palomo , Ph. D., Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Spain Feniosky Pena - Mora , Ph. D., University of Illinois at Urbana-Champaign, USA Leonardo Rischmoller , Ph. D., Universidad de Talca, Chile Eddy Rojas , Ph. D., University of Washington, USA Kenji Sakata , Ph. D., Okayama University, Japan Stéphanie Staquet , Ph. D., Université Libre de Bruxelles, Belgium Jorge Vanegas , Ph. D., Texas A&M University, USA Sergio Velásquez , Ph. D., Universidad Panamericana, Guadalajara, Mexico
Publishing	Ximena Araya
Design	Sandra Burgos
Markup	María Troncoso
Secretary	Edith Garrido
Electronic Journal	www.ricuc.cl
Citing this Journal	Revista Ingeniería de Construcción, Vol 28 N°1, 2013
Indexing	This journal receives the support of CONICYT-Chile through the "Fondo de Publicaciones de Revistas Científicas, año 2012" and Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile, and it is currently cited in Scopus, PERIODICA, Chemical Abstracts, Directory of Open Access Journals, Actualidad Iberoamericana, Redalyc, Rapra Polymer Library bibliographic, and the journal is encouraged by CIB; in addition, it has been included in the Scientific Electronic Library On Line (SciELO).

Founded in the year 1986, the Revista Ingeniería de Construcción (RIC) is a journal published three times a year that belongs to the Department of Construction Engineering and Management of the Pontificia Universidad Católica de Chile. Its main purpose is to promote the progress and development of construction engineering and management, providing at the same time, an international forum for discussion and dissemination of new knowledge and research results. The journal appeals mainly to the Ibero-American community. RIC is a journal oriented to both, academic and professional groups. It publishes original and unpublished articles both, in Spanish and English in all the relevant topics related to construction engineering and management, like: construction materials, construction methods, technologies and processes, construction management, resources management, construction entrepreneurship, sustainable construction rehabilitation of materials and structures and other interesting topics. The journal includes articles that report research reports as well as practice applications and case studies. The opinions expressed in the articles are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect the points of view of the Department of Construction Engineering and Management or the Editor. We invite researchers, academic personnel and professionals interested in sharing their knowledge to contribute with papers to be published in the journal or to send discussions about previously published articles. The instructions for preparation and submission of articles can be found on the inside back cover of each issue.

Peer review: Every article submitted for publication will be reviewed by an international comité de referees.

Procedure:

1. The Editor sends an acknowledgement letter to the author every time a new article is submitted for publication.
2. The coordinator checks that the article meets the standards for being evaluated. If the article meets the standards, it is reviewed by the Editor. Otherwise, the observations are informed to the author.
3. The Editor checks that the article is within the interests and objectives of the Journal. If the article is within the Journal interests, it is sent along with reviewing directions and forms to five reviewers (peer review), who know neither the author's name nor his (her) institution. Otherwise, the author is informed of the decision.
4. The Editor reviews the evaluation and recommendations of the reviewers (at least, three reviews are required to proceed), and decides, whether the article is "Accepted with no observations", "Accepted with observations", or "Rejected". Either case, the author is informed of the decision and the reviewers' comments, whose names remain undisclosed, are sent to the author.
5. If the article was "Accepted with observations", the author is required to address the reviewers' comments and suggestions in a second version of the article. Once the new version is received, it is evaluated along with the original reviewers' comments by the Editor and the international Editorial Board which decide on the final approval of the article.
6. The author is informed of the final approval and it is required to sign the copyright transfer form.
7. A galley proof is prepared and sent to the author for approval once the copyright transfer form is received.
8. The article goes to printing once the galley proof is approved.

Editorial Correspondence: Editor Revista Ingeniería de Construcción, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Casilla 306, Santiago, Chile. E-mail: ric@ing.puc.cl Fono: (562) 354-4244; Fax: (562) 354-4806, www.ricuc.cl

Subscription Information

annual subscription is 20.000 Chilean pesos out of Chile, or US\$ 90 to the foreigner. Special subscription for students of 15.000 Chilean pesos within Chile or US\$ 70 out of Chile.

Sales Location

Ediciones UC. Librería Centro de Extensión UC, Avda. B. O'Higgins 390, Librería Campus San Joaquín, Vicuña Mackenna 4860, Santiago Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Vicuña Mackenna 4860, Edificio San Agustín 3er. Piso, Santiago.



Esta ampliación, tal como se muestra en la figura, se realizó con la elevación de un cuarto anillo de gradas. Para ello, se levantaron doce torres que circundan el pabellón hasta una altura de 48 metros, sobre las cuales se apoyó la nueva cubierta de 120 metros de diámetro.

Figure was carried out by assembling a fourth seating platform. To do so, twelve towers were constructed, which encircle the multi-purpose arena. Towers length is 48 meters, wich support a new cover astructure of 120 m diameter.

El estándar ISO14006: Una herramienta que ayuda a mejorar la competitividad de los estudios de arquitectura

The standard ISO14006: a helpful tool to improve the competitiveness of the architecture firms

Beñat Landeta, Germán Arana, Patxi Ruíz de Arbulo, Pablo Díaz de Basurto

Pág.155-171

Índice

Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción

Influence of the addition of 2% calcium carbonate during the manufacturing process of red ceramic brick: drying and firing stage

Dania Betancourt, Yosvany Díaz, Fernando Martirena

113-124

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes extradados durante su construcción por voladizos sucesivos

Seismic vulnerability assessment of extradosed bridges during cantilever construction

José Benjumea, Gustavo Chio Cho

125-139

Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura

Blended cement containing fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): hydration and paste microstructure

Silvia Izquierdo, Jherson Diaz, Ruby Mejía, Janneth Torres

141-154

El estándar ISO14006: Una herramienta que ayuda a mejorar la competitividad de los estudios de arquitectura

The standard ISO14006: a helpful tool to improve the competitiveness of the architecture firms

Beñat Landeta, Germán Arana, Patxi Ruíz de Arbulo, Pablo Díaz de Basurto

155-171

Trends in productivity improvement in construction projects in Palestine

Tendencias para optimizar la productividad en los proyectos de construcción en Palestina

Adnan Enshassi, Bernd Kochendoerfer, Karem Abed

173-206

Hojas de cálculo para el análisis de losas combinadas con pilotes

Spreadsheets for the analysis of piled raft foundations

Luis Ibañez, Renato Cunha

207-216



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
y Gestión de la Construcción

Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul.
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile
Fonos (56 -2) 354 4244 / 354 4245
Fax (56 -2) 354 4806

Áreas de Especialización e Investigación

Ser líderes y permanecer a la vanguardia es un desafío permanente de nuestro Departamento, para ello se realiza una intensa actividad de investigación en las siguientes cuatro líneas temáticas principales:



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN *(estudia la constitución, comportamiento, mejoramiento, tecnología y aplicaciones de materiales utilizados en la Ingeniería Civil, tales como el hormigón y la mezcla asfáltica, la madera y el acero).*



TECNOLOGÍA Y VIVIENDA *(incorpora los requerimientos tecnológicos orientados al mejoramiento del comportamiento y calidad de diferentes tipos de obras de construcción y al mejoramiento de la habitabilidad de las viviendas. Incluye también los temas relacionados con la aplicación de tecnologías de información a la construcción sustentable).*



INGENIERÍA DE CAMINOS *(se centra en el diseño, construcción y administración de pavimentos, tanto rígidos como flexibles, así como también en su comportamiento y rehabilitación).*



GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN *(incluye temas tales como productividad, calidad y gestión de la calidad, gestión de la producción, administración de proyectos y de empresas constructoras, tecnologías de información para la gestión, manejo del riesgo y otros).*

Para mayor información visítenos en:

www.ing.puc.cl/icc

Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción

Influence of the addition of 2% calcium carbonate during the manufacturing process of red ceramic brick: drying and firing stage

Dania Betancourt^{1*}, Yosvany Díaz**, Fernando Martirena**

* Universidad Central de Las Villas. CUBA

** Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM) de la Universidad Central de Las Villas. CUBA

Fecha de Recepción: 02/05/2013

Fecha de Aceptación: 15/07/2013

PAG 113 - 124

Resumen

El trabajo hace un estudio de la influencia de la adición del 2% de carbonato de calcio en la duración de la etapa de secado y la eficiencia de la etapa de cocción durante el proceso de fabricación de ladrillos de cerámica roja. Dicho estudio se realizó en una fábrica que produce ladrillos huecos con una capacidad instalada de 65000 ladrillos por cada quema. Los resultados del estudio realizado demostraron que la adición de un 2% de CaCO_3 a la pasta arcillosa disminuye el tiempo de secado en un 35% con respecto a los ladrillos elaborados sin adición y provoca una disminución del consumo de combustible del 27% con respecto a quemas anteriores realizadas sin la adición de este fundente debido a la reducción del tiempo de cocción en los hornos.

Palabras Clave: Cocción, secado, eficiencia energética, fundentes, ladrillos de cerámica roja

Abstract

The work studies the influence of the addition of 2% calcium carbonate during the drying stage and the efficiency of the firing stage during the manufacturing process of red ceramic bricks. The study was conducted in a factory producing hollow bricks with an installed capacity of 65,000 bricks per burning. Results from the study showed that the addition of 2% CaCO_3 to the clay paste reduces the drying time by 35% compared with bricks made without addition, and causes a 27% reduction of the fuel consumption in relation to previous burnings without the addition of this flux, due to the reduction of the firing time in the ovens.

Keywords: Firing, drying, energy efficiency, fluxes, red ceramic bricks

1. Introducción

El proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja de manera general consta de 5 etapas: Extracción de las materias primas, preparación de las pastas cerámicas, moldeado, secado y cocción. En todas se hace necesario el debido control de la calidad de los procesos.

Es indudable que el cumplimiento de las normas establecidas para cada una de las etapas de fabricación es importante para lograr tanto la eficiencia de estas como la calidad del producto final pero existen dos etapas claves que se enmarcan en los denominados "Procesos térmicos" que influyen significativamente en la eficiencia energética de la fabricación de los productos cerámicos en general, que son las de secado y cocción.

Si bien la cocción está considerada como la parte más importante del proceso de fabricación de los productos cerámicos el proceso de secado es de fundamental importancia. Durante esta etapa se producen diversas transformaciones de las dimensiones y características físicas de las piezas, las que de no transcurrir dentro de ciertas condiciones, producen defectos irreversibles tales como fisuras y deformaciones.

1. Introduction

Usually, the manufacturing process of red ceramic bricks is composed of 5 stages: extraction of raw materials, preparation of ceramic pastes, molding, drying and firing. All of them require an effective quality control of the processes.

There is no doubt that compliance with the standards set for each manufacturing stage is important to achieve both their efficiency and the quality of the end product, but there are two key stages which fall within the so-called "thermal processing", which have a significant impact on the energy efficiency in the manufacturing of ceramic products in general: that is, drying and firing.

Although firing is considered the most important part of the manufacturing process of ceramic products, the drying process is of major importance. During this stage, there are several alterations in the dimensions and physical characteristics of the pieces, which can entail irreversible defects, such as cracking and deformation, if certain conditions are not met.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: daniab@uclv.edu.cu

Razón por la cual es necesario optimizar en lo posible la calidad de esta etapa (Sisti, 2002; Sisti, 2004a; Xavier, 2001; Berteli, 2005).

El agua contenida en el cuerpo cerámico puede encontrarse de las siguientes maneras:

- Agua intersticial.
- Agua higroscópica.
- Agua de cristalización y/o composición

El agua intersticial es la que se encuentra entre las partículas de arcilla, débilmente adheridas a las mismas y con posibilidades de migración desde el interior del cuerpo hacia su superficie, por efecto de un gradiente de humedad en el cuerpo. Esta agua es eliminada del cuerpo desde su superficie, por efecto de su disolución en el aire circulante a su alrededor; es decir, que la velocidad de secado está controlada en primera instancia, por las condiciones de humedad del aire de secado (Sisti, 2002; Sisti, 2004a; Xavier, 2001; Berteli, 2005).

Por ello, el agua residual en las piezas cerámicas dependerá de factores como:

- Naturaleza de las arcillas.
- Temperatura del sistema.
- Tiempo de secado.

Tal y como se menciona anteriormente la naturaleza de las arcillas influye en el tiempo de secado; los suelos para hacer ladrillos deben ser suelos arcillo-arenosos con un contenido de arena con respecto al material arcilloso del 25 – 30%, si el suelo no contiene ese porcentaje de arena se le puede añadir directamente esta para mejorar sus propiedades. A este tamaño de partícula presente en el suelo o no, se le suele llamar desgrasantes; son los encargados de disminuir la plasticidad de las arcillas y su retracción al secado, ya que no retienen el agua al disminuir las retracciones bruscas de la masa, que conducen al agrietamiento de los elementos. Otras de sus funciones es la de incrementar la resistencia de las piezas y los mismos deben ser añadidos finamente molidos para no quitar homogeneidad a las pastas (Xavier, 2001).

En la literatura se refiere el uso del carbonato de calcio finamente molido como desgrasante, (Xavier, 2004; Sisti, 2004a; Juárez Badillo, 1972) se dice que actúa dadas sus características físicas y granulométricas como un desgrasante natural que interviene parcialmente en la reacciones que ocurren dentro de los ladrillos, regula en una primera fase el tiempo de secado y posteriormente acelera las reacciones que ocurren durante la cocción (Xavier, 2004).

También se ha reportado el uso del carbonato de calcio finamente molido en muy pequeñas adiciones (en un rango entre el 2-5%) (Betancourt, 2008) con el objetivo de mejorar la eficiencia energética del proceso de cocción sin afectar las propiedades del ladrillo de arcilla roja cocido. Se demuestra que la adición de cantidades de carbonato de calcio que oscilen entre el 2-5% de la masa de arcilla mejora la resistencia a compresión de los ladrillos a temperaturas cercanas a los 900°C, y tiempos de sinterización de 1-3 horas.

Therefore, it is necessary to optimize the quality of this stage as much as possible (Sisti, 2002; Sisti, 2004a; Xavier, 2001; Berteli, 2005).

The water contained in the ceramic body can be found in the following ways:

- *Interstitial water.*
- *Hygroscopic water.*
- *Crystallization and/or composition water.*

Interstitial water is found among clay particles, weakly adhered to them and with migration possibilities from the body's interior towards the surface, due to a moisture gradient in the body. This water is eliminated from the body's surface, as a consequence of its dissolution in the air circulating around it; in other words, the drying speed is primarily controlled by the humidity conditions of the drying air (Sisti, 2002; Sisti, 2004a; Xavier, 2001; Berteli, 2005).

Therefore, residual water in ceramic pieces will depend on factors such as:

- *Nature of the clays.*
- *Temperature of the system.*
- *Drying time.*

As mentioned above, the nature of clays affects the drying time; bricks have to be made with sandy clay soils with a sand content of 25-30% in relation to the clay material content; if the soil does not have this sand percentage, it can be added directly in order to improve its properties. This particle size, either present or not, is usually called tempers, which are responsible for reducing clays' plasticity and their drying shrinkage, since they do not retain the water while reducing brusque mass shrinkage that lead to checking of the elements. Another function is to increase the strength of the pieces; these materials should be added in a finely ground manner so as not to reduce the homogeneity of the pastes (Xavier, 2001).

In the literature, the use of finely ground calcium carbonate is referred to as temper (Xavier, 2004; Sisti, 2004a; Juárez Badillo, 1972), stating that due to its physical and granulometric characteristics it acts as a natural temper that partially interferes in the reactions occurring inside the bricks; in a first phase, it regulates the drying time and then accelerates the reactions during firing (Xavier, 2004).

The use of finely ground calcium carbonate in very small doses (2-5% range) has also been reported (Betancourt, 2008), with the purpose of improving the energy efficiency of the firing process without affecting the properties of the baked red clay brick. It has been demonstrated that the addition of calcium carbonate quantities oscillating between 2% and 5% of the clay mass improves the bricks' compressive strength at temperatures close to 900°C, and sintering times of 1-3 hours.

Este efecto se atribuye a las modificaciones de las reacciones que se producen en las arcillas durante el tratamiento térmico por la presencia del mineral calcita, que permite que la sinterización ocurra a temperaturas más bajas en las arcillas estudiadas, en cuya composición mineralógica se confirma la presencia de caolinita y montmorillonita (Betancourt, 2008).

El presente trabajo parte del principio de utilizar pequeñas dosis de carbonato de calcio (2% respecto al volumen de la arcilla) como aditivo fundente en la fabricación de ladrillos cocidos con el objetivo principal de estudiar el efecto de dicha adición en la duración de la etapa de secado y en la eficiencia energética de la etapa de cocción de los ladrillos de cerámica roja.

2. Discusión y desarrollo

El trabajo experimental se dividió en dos partes. En una primera etapa se estudiaron los posibles efectos que provoca en la etapa de secado la adición de un 2% de CaCO_3 molido hasta un tamaño de partícula de $150 \mu\text{m}$. Primeramente se verificaron los cambios provocados en el tiempo de secado, asociados a cambios de la humedad del material y a la contracción volumétrica que experimentan los ladrillos cocidos durante esta etapa del proceso de fabricación.

La segunda fase de la experimentación consistió en medir el consumo de combustible, el tiempo y la temperatura de cocción en un horno de tipo discontinuo con capacidad para 6800 ladrillos en cada quema, con el objetivo de estudiar la influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la etapa de cocción. Ambas fases del trabajo experimental se desarrollaron en el Combinado de Cerámica Roja: "Sergio Soto" ubicado en el municipio de Manicaragua, en la provincia de Villa Clara, Cuba.

2.1 Organización de la experimentación

En esta investigación se empleó un material arcilloso proveniente del yacimiento Carranchola, La Moza. El mismo es un depósito de gran tamaño ubicado al noroeste de la localidad de Manicaragua, provincia de Villa Clara. Es un yacimiento con arcillas caoliníticas y montmorilloníticas como se muestra en los ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) (Ver Figura 1).

This effect is attributed to the alterations of the clays' reactions during the thermal treatment by the presence of calcite mineral, which allows sintering at lower temperatures in the studied clays, in whose mineralogical composition the presence of kaolinite and montmorillonite is confirmed (Betancourt, 2008).

This paper is based on the principle of using small doses of calcium carbonate (2% in relation to the clay volume) as flux additive in the production of baked bricks, and its main purpose is studying the effect of this addition on the drying stage duration and the energy efficiency of the firing stage of red ceramic bricks.

2. Discussion and development

The experimental work was divided in two. In the first part, the possible effects on the drying stage of the 2% CaCO_3 addition, ground to a particle size of $150 \mu\text{m}$, were studied. First, the changes during drying time were verified, associated to the material's moisture changes and the volumetric contraction of baked bricks in this stage of the manufacturing process.

The second stage of the experiment consisted in measuring fuel consumption, firing time and temperature in a discontinuous type of oven with capacity for 6,800 bricks per burning, with the aim of studying the influence of the 2% calcium carbonate addition on the energy efficiency of the firing stage. Both stages of the experimental work were performed in the Combinado de Cerámica Roja: "Sergio Soto" located in the township of Manicaragua, in the province of Villa Clara, Cuba.

2.1 Organization of the Experiment

In this research, clay material extracted from the Carranchola mineral deposit in La Moza was used, which is a large deposit located northwest of Manicaragua in the province of Villa Clara, containing kaolinite and montmorillonite clays, as shown in the X Ray Diffraction trials (XRD). (See Figure 1).

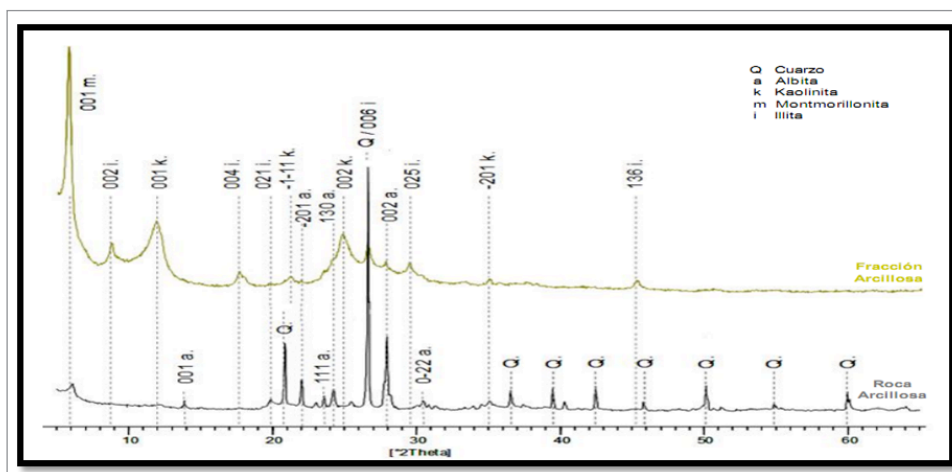


Figura 1. Resultados DRX de la comparación de fases en la roca arcillosa y la fracción arcillosa

Figure 1. XRD results for the phase comparison in the clay rock and the clay fraction

El carbonato de calcio utilizado como fundente procede de la cantera de Palenque en el municipio de Remedios en la provincia de Villa Clara. Los análisis realizados por DRX al CaCO_3 (Figura 2.), mostraron que las principales fases minerales identificadas son la calcita, además de la presencia de dolomita $[(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)]$, lo cual es muy común, ya que ambos minerales pueden encontrarse juntos dentro de la naturaleza.

The calcium carbonate used as flux was extracted from the quarry of Palenque in the township of Remedios in the province of Villa Clara. The XRD analysis of the CaCO_3 (Figure 2) identified the main mineral phases as kaolinite, as well as the presence of dolomite $[(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)]$, which is very common, since both minerals can be found together in the nature.

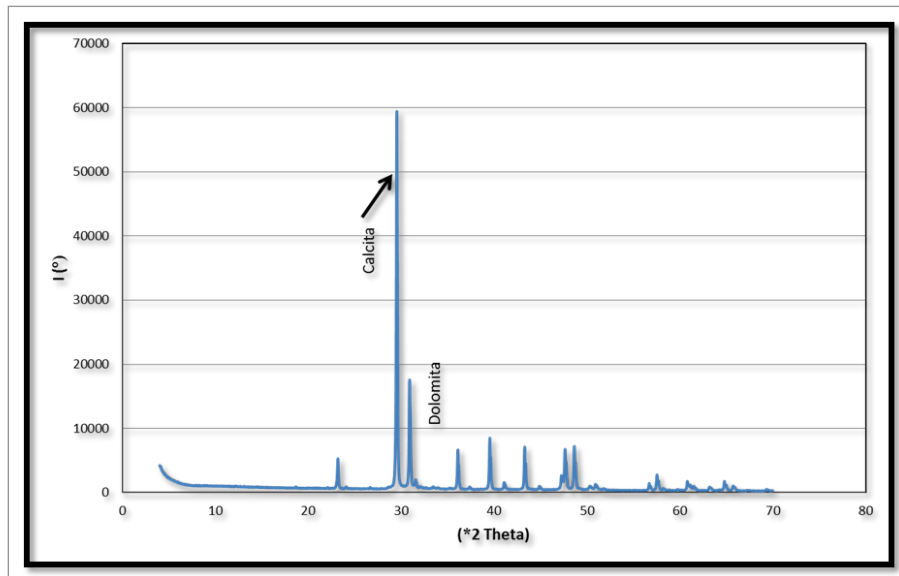


Figura 2. Resultados DRX del carbonato de calcio procedente de la cantera de Palenque

Figura 2. XRD results for calcium carbonate extracted from the Palenque quarry

2.2 Elaboración de los ladrillos

Se elaboraron ladrillos con y sin adición de carbonato de calcio tanto para el estudio de la etapa de secado como para la etapa de cocción.

Tanto para los ladrillos con o sin adición de carbonato el mezclado de las materias primas se realizó en un molino de paletas, para los fabricados con el 2% de CaCO_3 con el objetivo de lograr la dosificación y homogenización adecuada de la pasta del material arcilloso más el aditivo fundente, la medición de la cantidad a adicionar se hizo en volumen, tomando como volumen de referencia el del mezclador. Para añadir el carbonato de calcio se utilizó un recipiente de 0.01m^3 de capacidad con el objetivo de medir la cantidad de CaCO_3 que se debía suministrar al material arcilloso acumulado en el mezclador (0.7m^3), suministrando 0.014m^3 de carbonato de calcio por cada amasada (Ver Figura 3).

2.2 Brick Manufacturing

Bricks were manufactured with and without calcium carbonate addition in the study of both the drying and firing stages.

For the bricks with and without calcium carbonate addition, the mixing of raw materials was made in a pallet mill. With the purpose of obtaining the right dosing and homogenization of the clay material paste plus the flux additive for bricks manufactured with 2% CaCO_3 , the volume measurement of the added quantity considered the mixer's volume as reference volume. In order to add the calcium carbonate, a 0.01m^3 capacity container was used, with the aim of measuring the quantity of CaCO_3 to be added to the clay material accumulated in the mixer (0.7m^3), pouring 0.014m^3 of calcium carbonate per batch (see Figure 3).

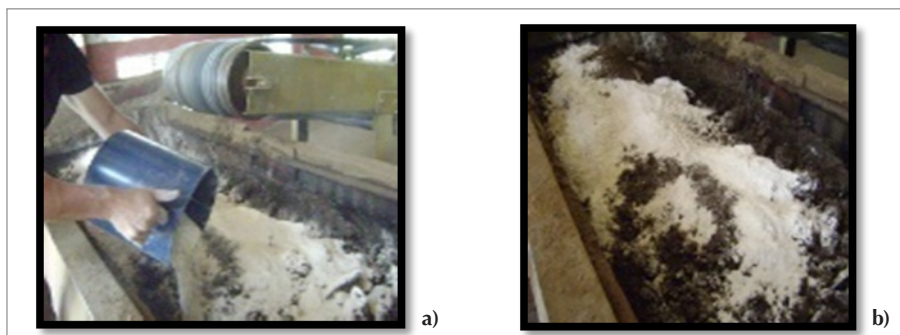


Figura 3. Adición del CaCO_3 al material arcilloso, a) Adición del CaCO_3 b) Mezclado del material arcilloso con el CaCO_3

Figure 3. Addition of CaCO_3 to the clay material, a) Addition of CaCO_3 b) Mixing of the clay material with CaCO_3

Los ladrillos fueron conformados y prensados en una extrusora al vacío con una presión de 7 MPa, después de conformados presentaron una humedad inicial entre 15 y 17%, con dimensiones establecidas de 28 cm de largo, 11 cm de ancho, 7.5 cm de espesor.

El proceso de secado de las piezas con y sin adición de CaCO_3 se desarrolló en las naves techadas que posee la fábrica, a la sombra y de manera natural con una humedad relativa del 90 % y una temperatura ambiente de 30°C.

Durante la cocción se utilizó el horno pequeño perteneciente a la fábrica, de funcionamiento intermitente, con quemador colocado en la parte inferior, y capacidad para procesar hasta 6800 unidades en cada quema. Se realizaron dos quemas: una primera denominada patrón o de control a ladrillos sin adición de carbonato de calcio y una segunda a la misma cantidad de piezas a las que se les adicionó un 2% de CaCO_3 . Para ambos procesos de cocción, se efectuaron mediciones de la temperatura en puntos ubicados en las puertas del horno. El control de la temperatura se realizó mediante la introducción de un sensor de temperatura tipo K marca METRA – 202, colocado en tres orificios (T_1 , T_2 , T_3), situados en las puertas del horno (Ver Figura 4), en la cual se realizaron mediciones con una frecuencia de una hora.

The bricks were shaped and pressed in a vacuum extruder with a pressure of 7 MPa; after being shaped, they presented initial moisture between 15% and 17%, with established dimensions of 28cm long, 11cm wide and 7.5cm thick.

The drying process of the pieces with and without CaCO_3 addition was performed in the factory's covered bay, in the shade and in a natural way, with relative humidity of 90% and room temperature of 30°C.

During firing, the factory's small oven with intermittent operation and burner in the lower part was used, with capacity to process up to 6,800 units per burning. Two burnings were carried out: the first one denominated standard or control burning for bricks without CaCO_3 addition, and the second one for the same number of pieces with 2% added CaCO_3 . In both firing processes, temperature measurements were made at points located in the oven's doors. The temperature control was made by introducing a K-type temperature sensor of the brand METRA–202, placed in three holes (T_1 , T_2 , T_3), located in the oven doors (see Figure 4); measurements were made every hour.

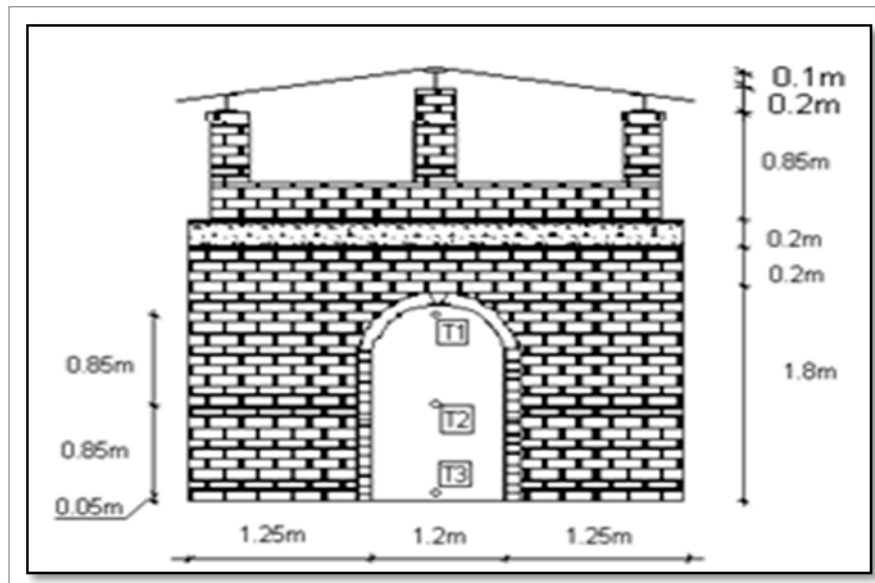


Figura 4. Esquema del horno con capacidad para 6800 ladrillos

Figure 4. Oven model with capacity for 6,800 bricks

3. Discusión de resultados

3.1 Influencia del CaCO_3 en el proceso de secado de ladrillos de cerámica roja

En la Figura 5, se muestra la evolución de la variación porcentual de la humedad con respecto al tiempo, tanto para las muestras elaboradas con la adición de CaCO_3 , como las elaboradas sin el aditivo.

3. Discussion of Results

3.1 Influence of CaCO_3 in the drying process of red ceramic bricks

Figure 5 shows the evolution of the moisture percentage variation in relation to time, for the samples produced with and without CaCO_3 addition.

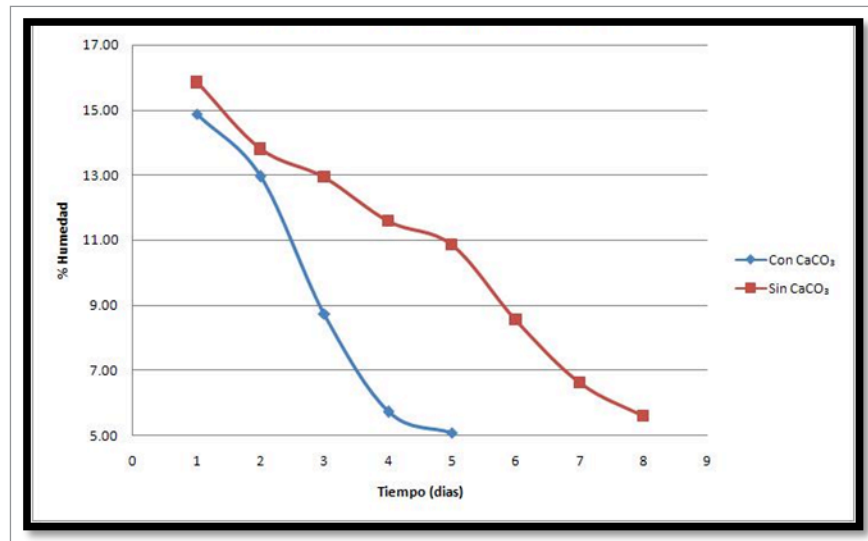


Figura 5. Gráfico de tendencia de Reducción del contenido de Humedad vs. Tiempo de secado de los ladrillos en la fábrica
Figura 5. Trend chart for moisture content reduction vs. drying time of the bricks at the factory

Claramente se puede observar en las gráficas que el porcentaje de humedad eliminado por unidad de tiempo está fuertemente ligado al contenido de CaCO_3 . Se evidencia que el % de humedad disminuye desde aproximadamente un 16% (humedad de salida de la extrusora) hasta un 5% (humedad adecuada para entrar al horno) en un tiempo de 5 días para el caso del secado de ladrillos con adición de CaCO_3 y en 8 días para el caso de los ladrillos sin adición.

A partir de este resultado se demuestra que el rendimiento alcanzado durante el secado de los ladrillos con la adición de CaCO_3 es superior en más de un 35% del tiempo con respecto al secado de los ladrillos sin adición. Este resultado según los autores consultados (Xavier, 2004; Berteli, 2005; Juárez Badillo, 1972) podría indicar una influencia de las materias primas no plásticas como el CaCO_3 en las pastas cerámicas mejorando el conformado y cambiando la estructura de los capilares hacia la formación de poros de mayor longitud y conectividad facilitando el secado y la eliminación del agua de composición durante el precalentamiento en la etapa de cocción de los ladrillos, lo cual propicia una posible disminución del consumo energético.

Para verificar de una manera sencilla la anterior aseveración relacionada principalmente con el fenómeno de capilaridad y tamaño de poros, se hace uso del ensayo "Edométrico" o también conocido como ensayo de consolidación de suelos, el cual se aplica en muestras de suelo con y sin adición de CaCO_3 . En este se verifica la relación de vacíos (e) contra una presión (P) (ver Figura 6), lo que permite aplicando las ecuaciones físicas relacionadas con los efectos capilares provocados por la tensión superficial (Juárez Badillo, 1972) de ahí que se pueda determinar un diámetro de poros equivalente (D_p) para cada una de las muestras con y sin la adición de CaCO_3 . Los principales resultados se muestran a continuación en la Tabla 1.

In the charts we can clearly observe that the moisture percentage eliminated by time unit is strongly related to the CaCO_3 content. The moisture % decreases from approximately 16% (extruder's outgoing moisture) to 5% (suitable moisture to enter the oven) in a 5-day timespan for the drying of bricks with CaCO_3 addition and 8 days for bricks without additive.

Based on this result, it is demonstrated that the performance reached during the drying process of the bricks with CaCO_3 addition is higher in more than 35% of the time in relation to the drying process of bricks without additive. According to the consulted authors (Xavier, 2004; Berteli, 2005; Juárez Badillo, 1972), this result could indicate an influence of non-plastic raw materials such as CaCO_3 on ceramic pastes, improving shaping and changing the structure of the capillary spaces towards the formation of pores with greater length and connectivity, facilitating the drying process and the elimination of the composition water during preheating in the bricks' firing stage, which favors a possible reduction of the energy consumption.

In order to verify the above statement in a simple way, mostly in relation to the capillary space phenomenon and the pore size, an "oedometer" test is carried out, also known as soil consolidation test, which is applied in soil samples with and without CaCO_3 addition. The test verifies the void ratio (e) under pressure (P) (see Figure 6), which makes it possible, when applying the physical equations related to the capillary space effects provoked by the surface tension (Juárez Badillo, 1972), to determine an equivalent pore diameter (D_p) for each sample with and without the CaCO_3 addition. The main results are shown below in Table 1.

Tabla 1. Relación de vacíos equivalente (e_0) en ladrillos
Tabla 1. Equivalent void ratio (e_0) in bricks

Relación de vacíos (e_0) ladrillos/ Brick Vaid Ratio (e_0)		
	0% de CaCO_3 /0% de CaCO_3	2% de CaCO_3 /2% de CaCO_3
Peso promedio húmedo W_s (g)/ Mean moist weight W_s (g)	3270	3180
Volumen promedio seco V (cm^3)/ Mean dry volume V (cm^3)	1940.08	1957.18
Peso específico del suelo $\delta_d=W_s/V$ (g/cm^3)/ Soil density $\delta_d=W_s/V$ (g/cm^3)	1.69	1.62
GS (g/cm^3)/ Specific Gravity SG (g/cm^3)	2.63	2.63
Relación de vacíos (e_0) $e_0=(GS/\delta_d)-1$ / Void ratio (e_0) $e_0=(GS/\delta_d)-1$	0.56	0.62

La Tabla 1 muestra la relación de vacíos obtenida (e_0) para cada una de las muestras de ladrillos ensayadas. Al comparar ambos resultados se observó que los ladrillos con una adición del 2% de CaCO_3 , muestran un ligero incremento de la relación de vacíos (0.62), en comparación con las muestras sin la adición (0.56). Esto manifiesta un aumento de la porosidad en las piezas elaboradas con adición de CaCO_3 .

A partir de las relaciones de vacíos obtenidas de los ladrillos con y sin adición de CaCO_3 y utilizando las curvas del ensayo Edométrico (ver Figura 6), se determinó la presión que debe aplicarse para llegar a cada una de las relaciones de vacíos determinadas anteriormente; la cual permite determinar un diámetro equivalente de poros, aplicando las ecuaciones de Terzaghi, como se muestra en la Tabla 2.

Table 1 shows the void ratio (e_0) obtained for each tested brick sample. When comparing both results, we observe that bricks with addition of 2% CaCO_3 show a slight increase in the void ratio (0.62), compared with the samples without additive (0.56). This evidences a porosity increase in the pieces produced with CaCO_3 addition.

The void ratios obtained from the bricks with and without CaCO_3 addition, together with the curves of the oedometer test (see Figure 6), allow determining the pressure to be applied to reach each one of the previously determined void ratios, which allows defining an equivalent pore diameter through the Terzaghi equations, as shown in Table 2.

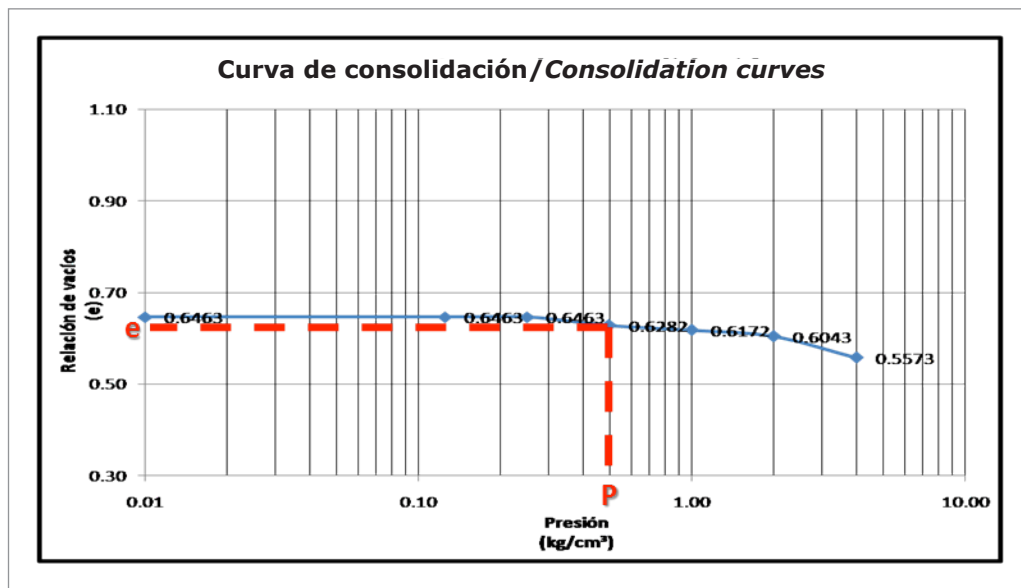


Figura 6. Gráfico de relación de vacíos Vs Presión de compactación
Figure 6. Chart of void ratio vs. compaction pressure

Tabla 2. Diámetro equivalente (D_0) en ladrillos
Tabla 2. Equivalent diameter (D_0) in bricks

Diámetro equivalente de poros (D_0) / Equivalent pore diameter (D_0)		
	0% de CaCO_3 / 0% of CaCO_3	2% de CaCO_3 / 2% of CaCO_3
Tensión superficial (T_0) (g/cm) / Surface tension (T_0) (g/cm)	0.074	0.074
Presión (P) (g/cm ³) / Pressure (P) (g/cm ³)	4000.00	500.00
D_0 (cm) $D_0 = 4 \cdot T_0 / P$	0.000074	0.000592
D_0 (μm)	0.74	5.92

Al comparar los resultados, podría indicarse que la adición CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado para la fabricación de ladrillos provoca que los capilares faciliten el flujo de la humedad desde el interior hacia el exterior al encontrarse más abiertos en muestras que contienen un 2% de CaCO_3 ; de forma tal, que proporciona una mejor eliminación del agua de poros siendo ésta una de las posibles razones por las que disminuye el tiempo de secado. Estos resultados han sido obtenidos por un ensayo que induce el diámetro de poros a partir de la presión de compactación (Juarez Badillo, 1972).

In the results' comparison, we observe that when adding CaCO_3 to the clay soil used for brick manufacturing, the capillary spaces facilitate the moisture flow from the inside to the outside, since they are more open in the samples containing 2% CaCO_3 ; thus, it provides a better elimination of the pore water, and this could be one of the reasons explaining the lesser drying time. These results have been obtained by a test which induces the pore diameter through compaction pressure (Juarez Badillo, 1972).

3.1.1 Influencia del CaCO_3 en la contracción durante el secado de los ladrillos

3.1.1 Influence of CaCO_3 on the contraction during the bricks' drying process

Los resultados anteriores se verifican a partir de la relación entre las variables % de humedad, contracción volumétrica y de la confección de las curvas de Bigot (Tari, 1997) como se muestra en la Figura 7. En primer lugar a pesar de que las curvas de Bigot guardan estrecha relación con la granulometría del material arcilloso (Fernández, 1990), en estos resultados se observó una profunda dependencia debido al uso del CaCO_3 como aditivo sobre el mecanismo de secado, pues a pesar de que se trabajó con el mismo tipo de secado la relación de la contracción versus la variación porcentual de la pérdida de humedad siguen trayectorias diferentes.

The above results are verified based on the relation between the variables of moisture %, volumetric contraction and the drawing of the Bigot curves (Tari, 1997), as shown in Figure 7. In the first place, even if the Bigot curves have a close relation with the clay material's granulometry (Fernández, 1990), these results showed a strong dependence due to the use of CaCO_3 as additive on the drying mechanism; in spite of working with the same type of drying, the relation of contraction versus moisture loss percentage variation follows different paths.

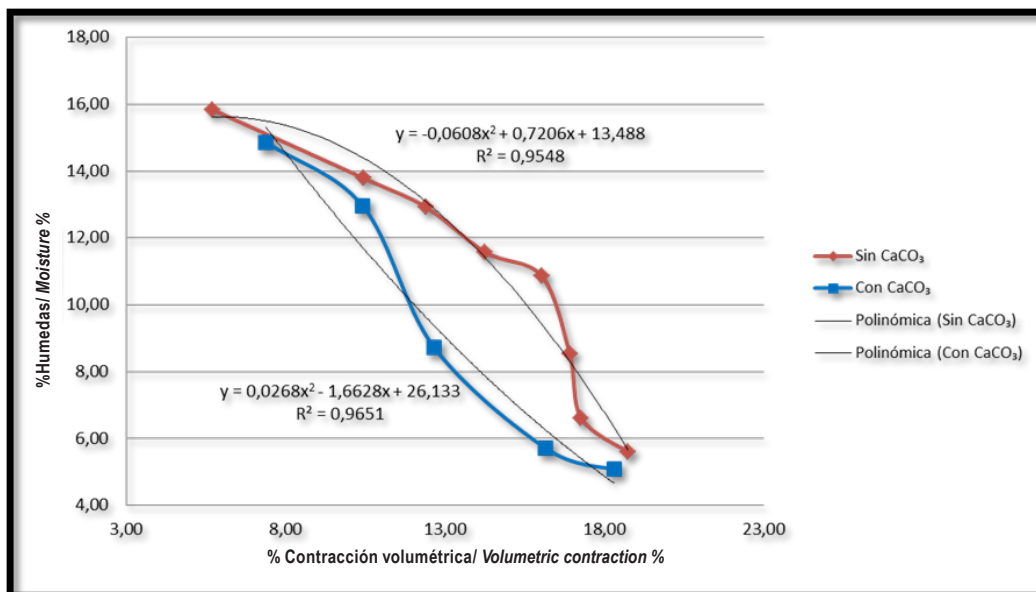


Figura 7. Gráfico de Perdida de Humedad vs. % Contracción volumétrica (curva de Bigot)
Figure 7. Chart of moisture loss vs. volumetric contraction % (Bigot curve)



A partir de estas curvas se puede observar que para eliminar un mismo porcentaje de humedad hay una menor contracción en los ladrillos elaborados con adición de carbonato de calcio en comparación con los ladrillos sin la adición principalmente en el rango comprendido entre el 6 y el 13% de humedad, aunque ambos tienen una contracción final similar.

Estos resultados podrían indicar según la literatura consultada (Xavier, 2004; Fernández, 1990; Juárez Badillo, 1972; Cárdenas, 2009) una reformulación de la pasta cerámica a partir de la adición del mineral CaCO_3 , que actúa como desgrasante o material no plástico, que baja la plasticidad de la pasta y disminuye la contracción debido fundamentalmente a que los desgrasantes pierden agua sin contraer (Xavier, 2004, Juárez Badillo, 1972). Por lo tanto un suelo arcilloso con un aumento del contenido de desgrasante presentará una menor contracción.

Para entender la influencia del CaCO_3 en la plasticidad y poder aclarar y/o confirmar la hipótesis hecha anteriormente se decidió entonces realizar un ensayo de plasticidad (Límites de Atterberg) a muestras de suelo arcilloso con y sin la adición de CaCO_3 . Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de plasticidad de muestras de suelo arcilloso con y sin CaCO_3
Table 3. Plastic limits of clay soil samples with and without CaCO_3

LIMITES/LIMITS	0% de CaCO_3 /0% of CaCO_3	2% de CaCO_3 /2% of CaCO_3
Límite líquido (%) / Liquid limit (%)	34,1	32.2
Límite plástico (%) / Plastic limit (%)	16.9	19.1
Índice de plasticidad (%) / Plasticity index	17.2	13.2

Al comparar los resultados se observó que las muestras de material arcilloso mezcladas con un 2% de CaCO_3 experimentan una disminución en sus índices de plasticidad en un 23,3 %, en comparación con las muestras de suelo arcilloso sin aditivo por lo tanto con el aumento del contenido de CaCO_3 , la plasticidad es menor y la contracción disminuye, este resultado es consecuente con lo planteado en la bibliografía consultada sobre el tema. (Juárez Badillo, 1972; Xavier, 2004; Sisti, 2004b).

3.2 Evaluación de la influencia del CaCO_3 sobre la temperatura, tiempo de cocción y consumo de combustible en la producción de ladrillos

A continuación en la Figura 8 se muestra la evolución de la temperatura con respecto al tiempo tanto de la cocción de ladrillos elaborados con un 2% de CaCO_3 como los elaborados sin adición. En estos tipos de hornos no existe un sistema confiable de control de la temperatura y tiempo de cocción, el cual que se subsanó con esfuerzo personal de los autores, los cuales controlaron estos fundamentales parámetros dentro del horno con el empleo de un termopar o sensor de temperatura tipo K marca METRA-202 y la constante vigilancia de las operaciones, en las cuales la pericia del hornero es definitiva.

Based on these curves, we can infer that to eliminate the same moisture percentage there is less contraction in the bricks made with calcium carbonate addition, compared with the bricks without addition, mostly in the moisture range between 6% and 13%, although both have a similar final contraction.

According to the consulted literature (Xavier, 2004; Fernández, 1990; Juárez Badillo, 1972; Cárdenas, 2009), these results could indicate a reformulation of the ceramic paste with the addition of CaCO_3 mineral that acts as a temper or non-plastic material, which reduces the plasticity of the paste and the contraction, mainly because tempers lose water without contracting (Xavier, 2004, Juárez Badillo, 1972). Therefore, a clay soil with higher temper content will present less contraction.

With the purpose of understanding the influence of CaCO_3 on plasticity and being able to clarify and/or confirm the above hypothesis, a plasticity test was carried out (Atterberg Limits) on clay soil samples with and without CaCO_3 addition. Results are shown in Table 3.

When comparing results, it was found that clay material samples mixed with 2% CaCO_3 showed a 23.3% drop of the plastic indexes, compared with the clay material samples without additive; therefore, when increasing the CaCO_3 content, there is less plasticity and contraction. This result is consistent with the consulted references on the matter (Juárez Badillo, 1972; Xavier, 2004; Sisti, 2004b).

3.2 Evaluation of the CaCO_3 influence on temperature, firing time and fuel consumption in the production of bricks

Figure 8 shows the evolution of the temperature-time ratio for the firing of bricks made with and without 2% CaCO_3 . This type of oven does not have reliable control systems for temperature and time; this difficulty was overcome with the personal effort of the authors, who controlled these basic parameters inside the oven by means of a thermocouple or K-type temperature sensor of the brand METRA-202, and the permanent monitoring of the operations, in which the know-how of the baker was a deciding factor.



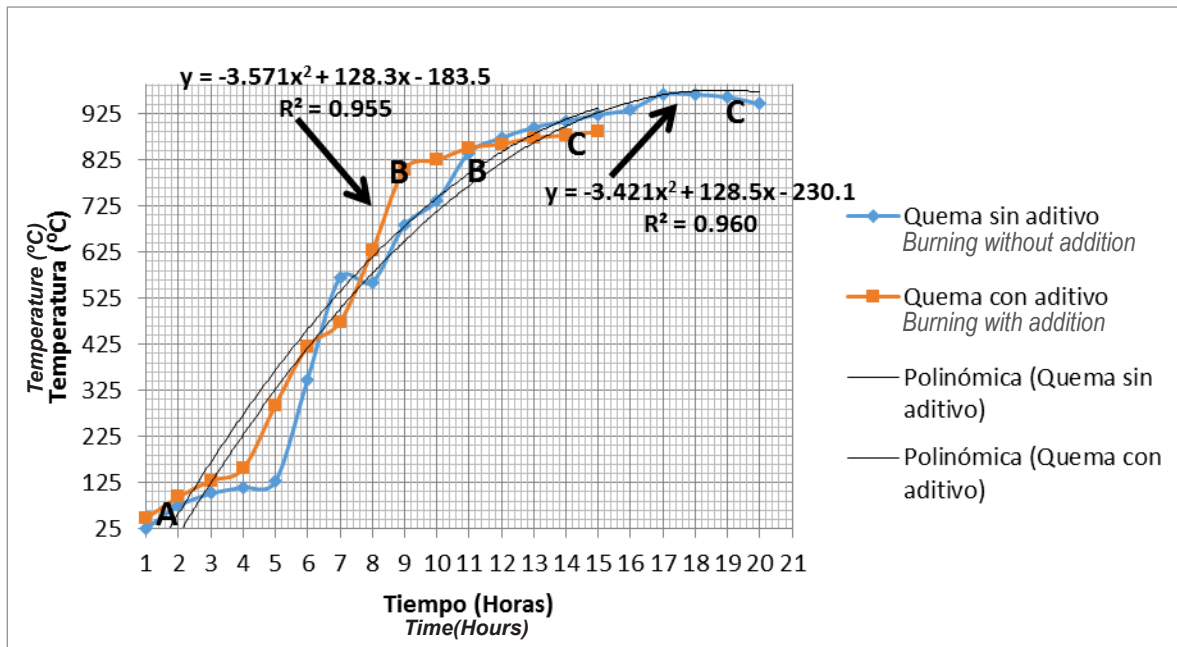


Figura 8. Curvas de Temperatura de Cocción Vs. Tiempo de las quemas con y sin adición de CaCO_3

Figure 8. Curves of firing temperature vs. burning time with and without CaCO_3 addition

En las gráficas se observa para ambos procesos de cocción la existencia de dos zonas bien definidas y con diferentes interpretaciones. La primera correspondiente a la etapa de precalentamiento, caracterizada fundamentalmente por un incremento gradual de la temperatura (Tramo A – B) y la segunda etapa, correspondiente a la cocción definida por una temperatura constante que oscila entre los 800 y 950°C (Tramo B – C). Cada una de estas etapas describe el proceso de cocción las cuales están asociadas con la eliminación del agua cristalográfica (Tramo A – B) y la formación de las fases cristalinas dándole dureza a los ladrillos (Tramo B – C) (Xavier, 2001; Betancourt, 2008; Cultrone, 2004; Vidal, 2001).

Como se puede apreciar en las curvas existen diferencias en cuanto a la duración del proceso de cocción el cual se dio por terminado, tomando como principal criterio la experiencia de los horneros. Durante la cocción de los ladrillos con adición de carbonato de calcio se produjo una reducción del tiempo en 5 horas, en comparación con la quema de ladrillos sin adición, lo que confirma la acción fundente del CaCO_3 en las pastas cerámicas cuando se utilizan pequeñas dosis del mismo.

La Figura 9 muestra del consumo de combustible para cada una de las quemas. Se observó una significativa disminución de un 27 % del consumo de combustible para la cocción de ladrillos con adición de un 2% de CaCO_3 , lo que significa un ahorro de combustible con respecto a la quema control o sin aditivo de 951 litros de combustible por quema. Este resultado es consecuente con la disminución del tiempo de cocción, pero también es influido por el efecto fundente del CaCO_3 en pequeñas dosis, descrito en la literatura (Betancourt, 2008).

The charts show the existence of two well-defined zones with different interpretations for both firing processes. The first one corresponds to the preheating stage, mainly characterized by a gradual temperature increase (Segment A – B), and the second stage corresponds to the burning process defined by a constant temperature fluctuating between 800°C and 950°C (Segment B – C). Each one of the stages describes the firing process and they are associated to the elimination of crystallographic water (Segment A – B) and the formation of crystalline phases, which give hardness to the bricks (Segment B – C) (Xavier, 2001; Betancourt, 2008; Cultrone, 2004; Vidal, 2001).

As can be appreciated in the curves, there are differences in the duration of the firing process, which was considered finished using the main criterion of the bakers' experience. During firing of the bricks with calcium carbonate addition, time was reduced by 5 hours, compared with the burning of bricks without addition, which confirms the flux action of the CaCO_3 in the ceramic pastes when small doses are used.

Figure 9 shows the fuel consumption for each burning. A significant 27% reduction was observed in the fuel consumption for the firing of bricks with 2% addition of CaCO_3 , which means fuel savings in relation to the control burning or without additive of 951 fuel liters per burning. This result is consistent with the firing time reduction, but it is also influenced by the flux effect of the CaCO_3 in small doses, described in the literature (Betancourt, 2008).

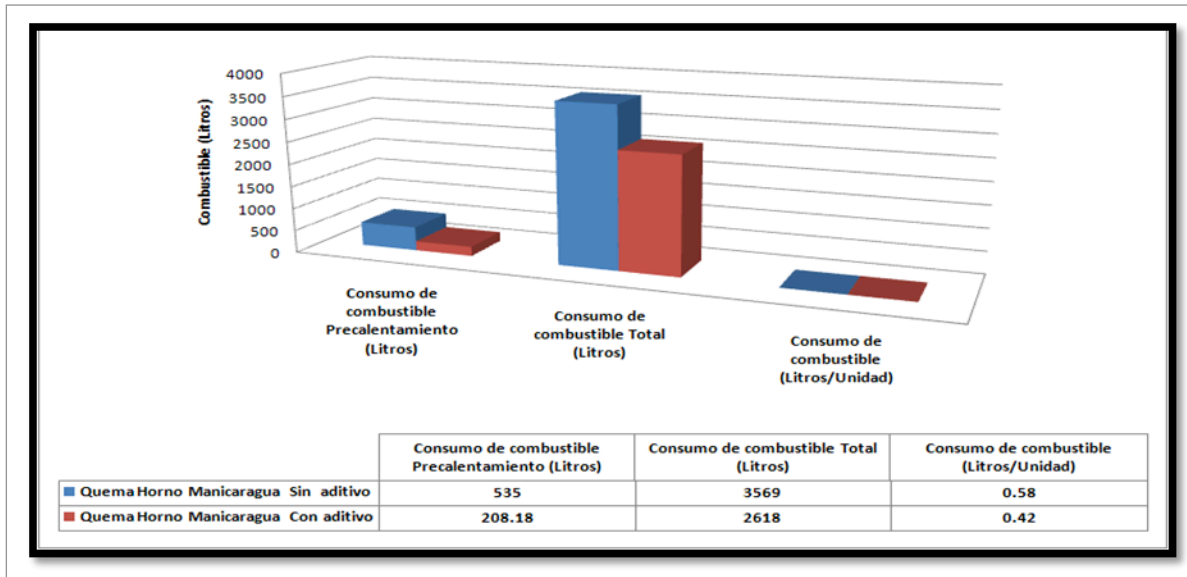


Figura 9. Consumo de combustible
 Figure 9. Fuel consumption

4. Conclusiones

1. Se demuestra que la adición de un 2% de CaCO_3 a la pasta arcillosa utilizada para la fabricación de ladrillos, disminuye el tiempo de secado significativamente en un 35% con respecto a los ladrillos elaborados sin adición.
2. Los resultados de los ensayos de contracción y plasticidad indicaron que el CaCO_3 actúa en las pastas cerámicas como un desgrasante, regulando las contracciones y facilitando la pérdida de humedad.
3. Los resultados logrados indican que la adición CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado para la fabricación de ladrillos provoca que los capilares faciliten el flujo de la humedad desde el interior hacia el exterior, al encontrarse más abiertos en muestras que contienen un 2% de CaCO_3 ; de forma tal, que proporciona una mejor eliminación del agua de poros, siendo esta una de las posibles razones por las que disminuye el tiempo de secado.
4. La adición de CaCO_3 al suelo arcilloso utilizado en la fabricación de ladrillos cocidos, provocó una disminución del tiempo de cocción, lo cual influye en la consiguiente disminución del consumo de combustible en un 27% en comparación con los ladrillos cocidos sin adición.

4. Conclusions

1. It is demonstrated that the addition of 2% CaCO_3 to the clay paste used in the manufacturing of bricks, significantly reduces the drying time by 35% in relation to the bricks made without addition.
2. The results of the contraction and plasticity tests indicated that the CaCO_3 acts as a temper in the ceramic pastes, regulating the contractions and contributing to the moisture loss.
3. The obtained results indicate that CaCO_3 addition to the clay soil used for brick manufacturing helps capillary spaces to facilitate the moisture flow from the inside to the outside, since they are more open in the samples containing 2% CaCO_3 ; thus, it provides a better elimination of the pore water, and this could be one of the reasons explaining the lesser drying time.
4. The CaCO_3 addition to the clay soil used in the manufacturing of baked bricks entailed a reduction of the firing time, which affects the resulting reduction of fuel consumption by 27%, compared with bricks baked without additive.

5. Referencias/References

- Berteli M. N. (2005)**, Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68, 75-183.
- Betancourt D. (2008)**, Utilización del carbonato de calcio como adición mineral en la producción de ladrillos de cerámica roja. Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Cárdenas C. (2009)**, Las microondas como una alternativa para el secado de materiales cerámicos tradicionales. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Colombia.
- Cultrone G. (2004)**, Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 547-564.
- Fernández M. (1990)**, Fabricación y control de calidad de los materiales de arcilla cocida. En seminario Internacional Fabricación y Control de calidad de los materiales de arcilla cocida.
- Juarez Badillo E. (1972)**, *Mecánica de Suelos*, La Habana, Editorial: Pueblo y Educación.
- Sisti M. (2002)**, Optimización del proceso de secado [Online]. Argentina. Available: [http:// www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas](http://www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas). [Accessed 2005].
- Sisti M. (2004a)**, El secado en la Industria Cerámica [Online]. Available: [http:// www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas](http://www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas). [Accessed 2005].
- Sisti M. (2004b)**, Parte II. El secado – Comportamiento de las arcillas [Online]. Available: [http:// www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas](http://www.negosiosolarria.com.ar/mariosisti/notastecnicas) [Accessed 2005].
- Tari G. (1997)**, Curve di Bigot: Un metodo pratico ed efficaci di caratterizzazione di composti crudi attenuati per colaggio. *Ceramagia*, 27, 363-368.
- Vidal J. (2001)**, Aptitudes cerámicas de una arcilla tipo modificada por la adición de un residuo rico en carbonato cálcico. *Materiales de construcción* 51, 5-19.
- Xavier E. (2001)**, Optimización de procesos cerámicos industriales. 3ra Parte. la fabricacion de los materiales ceramicos [Online]. Available: [http:// www.cnplm.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf](http://www.cnplm.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf) [Accessed 2007].
- Xavier E. (2004)**, Optimización de procesos cerámicos industriales. 1ra Parte. Introducción al comportamiento de las pastas cerámicas [Online]. Available: www.cnplm.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID57.pdf. [Accessed 2007].

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes extradados durante su construcción por voladizos sucesivos

Seismic vulnerability assessment of extradosed bridges during cantilever construction

José Benjumea R.^{1*}, Gustavo Chio Cho*

* Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 22/09/2012
Fecha de Aceptación: 04/04/2013
PAG 125 - 139

Resumen

El trabajo presenta el estudio de la vulnerabilidad sísmica de los puentes extradados durante construcción por voladizos sucesivos. Para esto fueron desarrollados modelos de elementos finitos de un puente extradado de tres luces (60 + 100 + 60 m), a partir de los cuales se determinó la respuesta sísmica durante seis etapas constructivas, y dos en estado de servicio, antes y después de que ocurran los efectos de fluencia y contracción del concreto. Siguiendo el enfoque propuesto en Wilson y Holmes (2007), se comparó la respuesta sísmica durante construcción y en servicio para determinar los elementos estructurales con mayor vulnerabilidad sísmica, además de detectar las etapas constructivas críticas. Los resultados encontrados permiten concluir que la vulnerabilidad sísmica del puente extradado durante construcción es mayor que la del estado de servicio, ya que durante construcción se tienen probabilidades de excedencias anuales mucho mayores al 0.21% que se adopta para el diseño sísmico del puente. Además, se encontró que los cables extradados y las torres son los elementos con mayor vulnerabilidad, y que las etapas previas al cierre del puente son las más críticas.

Palabras Clave: Puentes extradados, vulnerabilidad sísmica, construcción, voladizos sucesivos, probabilidad de excedencia anual

Abstract

This paper presents the study of seismic vulnerability of extradosed bridges during cantilever construction. The seismic response during six construction phases and two in service, before and after creep and shrinkage of concrete takes place, of a 3-span extradosed bridge (60 + 100 + 60 m) were determined by means of finite elements models. Using the approach proposed by Wilson and Holmes (2007), seismic response during construction and in service were compared to determine structural elements with higher vulnerability and to detect critical stages during construction. The results show that the seismic vulnerability of the bridge during construction is higher than in service, this is supported on the fact that during construction annual exceedance probabilities are higher than 0.21%, a commonly adopted value for the seismic design of bridges. Furthermore, it was found that extradosed cables and the towers are the most vulnerable elements and that the stages before the closure of the bridge during construction are the most critical.

Keywords: Extradosed bridges, seismic vulnerability, construction, cantilever, annual exceedance probability

1. Introducción

Generalmente, la construcción de los puentes extradados se hace empleando el método de los voladizos sucesivos. Este método deja a los puentes en un alto grado de vulnerabilidad frente a diversas acciones como el viento, la caída de segmentos y/o del carro de avance, o el volcamiento de uno de los voladizos, acciones que son consideradas y revisadas durante la fase de diseño del puente. En cambio, a los eventos sísmicos que puedan ocurrir durante la construcción no se les da mucha importancia y el diseño sísmico del puente se hace, generalmente, para la estructura completa. Este hecho se argumenta en la baja probabilidad de excedencia del sismo de diseño durante el periodo de construcción. Por ejemplo, usando la filosofía de diseño del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (AIS, 1995), en donde se propone un sismo de diseño con probabilidad de excedencia (P) del 10%, en un lapso (t) de 50 años, lo que equivale a un evento con probabilidad de excedencia anual (p) del 0.21%, se tendría, para ese mismo evento pero en un periodo de construcción supuesto en 1.5 años, una probabilidad de excedencia de 0.32%, determinado a partir de la Ecuación 1.

1. Introduction

The construction of extradosed bridges is commonly executed by employing the balanced cantilever method. This method provides a high degree of vulnerability on bridges facing adverse conditions, like wind, form traveler or segments collapse, or cantilever rollover. Such actions are considered and reviewed during the bridge design phase. However, seismic events that might take place during construction are not taken into consideration and, the bridge seismic design is generally planned for the whole structure. This fact is supported by the low design seismic exceedance probability during the construction phase. For example by using the design philosophy in the Colombian Code of Bridges Seismic Design (AIS, 1995), which proposes a seismic design with probability of exceedance (P) of 10%, for a period (t) of 50 years, equivalent to an event with annual exceedance probability (p) of 0.21%, there would be an exceedance probability of 0.32% resulting from Equation 1, for the same event but in a construction period assumed in 1.5 years.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: josemiguelbenjumea@gmail.com

Si en lugar de usar el tiempo total de construcción se empleara la duración máxima de cada una de las etapas constructivas, como es sugerido en Calvi, Sullivan y Villani (2010), la probabilidad sería aún mucho menor.

If instead of using the total construction period, the maximum execution period of each construction stage is used, as suggested by Calvi, Sullivan and Villani (2010), the probability will be lower.

$$P(t)=1-(1-p)^t \quad (1)$$

Sin embargo, podría darse el caso de que ocurran eventos sísmicos durante construcción que tengan menor magnitud que el sismo de diseño pero que, debido a la baja redundancia del sistema estructural y al gran porcentaje de masa, puedan generar fuerzas considerables en los elementos estructurales. Este hecho fue estudiado por Wilson y Holmes (2007), quienes a partir de la respuesta sísmica en la base de los pilares de un puente atirantado, pudieron determinar que las fuerzas obtenidas en el puente completo, para el sismo de diseño con $p=0.21\%$, son igualadas durante construcción por sismos de menor magnitud pero con probabilidades de excedencia anual mucho mayores que llegan hasta el 20%, exponiendo el alto grado de vulnerabilidad sísmica de esa tipología.

However, seismic events of lower magnitude than the design earthquake taking place during construction are likely to provoke considerable forces on structural elements due to the low redundancy of structural system and because of the great mass percentage of the bridge. This fact was studied by Wilson and Holmes (2007), who determined from the seismic response at the columns base of a cable-stayed bridge, that the forces obtained by the whole bridge for the seismic design with $p=0.21\%$ are matched during construction by lower magnitude seismic events that have higher annual exceedance probabilities almost reaching 20%, thus exposing a high seismic vulnerability degree for such typology.

Usando el mismo enfoque presentado por Wilson y Holmes, en el presente estudio se evalúa la vulnerabilidad sísmica de los puentes extradados durante construcción, tipología que comparte similitudes morfológicas con los puentes atirantados, pero cuyo diseño y comportamiento difiere en cuanto a la mayor rigidez que tiene el tablero. Para este propósito se analiza la respuesta sísmica de un puente extradado de luz central 100 metros, modelado numéricamente mediante elementos finitos, en el cual se ha incluido a la altura de los pilares como una de las variables. El trabajo describe las características del estudio y presenta los resultados no solo para los pilares, si no que se analizan otros elementos principales como el tablero, las torres y los cables, de modo tal que se obtenga una idea mucho más global de la vulnerabilidad del puente. Por último, se presentan las principales conclusiones del estudio.

By using the same approach presented by Wilson and Holmes, the current study assesses seismic vulnerability of extradosed bridges during construction stage, typology that shares morphological similarities with cable-stayed bridges. However, such typology design and behavior are different in regards to the higher stiffness of the deck. To this effect, the seismic response of an extradosed bridge with 100 meters mid-span, numerically modeled by means of finite elements, is analyzed. The columns height has been included as a variable. The study describes the research characteristics and shows the results not only from columns, but also from other main elements such as deck, towers and cables, so that a wider idea can be obtained about the bridge vulnerability. At the end, the main conclusions drawn from this study will be presented.

2. Características del estudio

2. Characteristics of the study

2.1 Descripción del puente

Las características geométricas principales se definieron a partir de los criterios de diseño presentados en Benjumea, et al. (2010) y las tendencias actuales en puentes extradados presentadas en Benjumea, et al. (Benjumea, et al. 2012). El puente tiene una luz central de 100 m y dos vanos laterales de 60 m. Las torres son elementos macizos de dimensión 2.5 x 1.5 m, con altura igual a 10 m, ver Figura 1. El tablero tiene una altura constante de 2.5 m (esbeltez igual a $L/40$) y consiste en una sección tipo cajón unicelular con voladizos, con espesor de losa inferior variable, ver Figura 2 y Tabla 1. El primer cable extradado se ancla sobre el tablero a una distancia de 21.5 m respecto del eje de la torre y los cinco cables restantes se ubican cada 5.5 m, haciendo coincidir los extremos de las dovelas con los nodos de anclaje de los cables. Estos elementos están conformados por 12 tendones de $\varnothing 0.6''$ presolicitados a una tensión promedio de $0.42f_{pu}$. Los pilares consisten en una sección rectangular hueca, cuya sección se presenta en la Figura 3.

2.1 Bridge Description

The main geometrical characteristics of the bridge were defined from the design criterion presented by Benjumea, et al., (2010) and also considering the current trends for extradosed bridges presented by Benjumea et. al. (Benjumea, et al. (2012). The bridge has a mid-span of 100 m and two side spans of 60 m. The towers are solids elements of 2.5 x 1.5 m, of 10m height, see Figure 1. The deck has a constant depth of 2.5 m (slenderness equal to $L/40$) and corresponds to a single-cell-girder box type with cantilevers, with variant lower slab thickness; see Figure 2 and Table 1. The first extradosed cable is anchored to the deck at a distance of 21.5 m in regards to the tower axis; the remaining six cables are placed every 5.5 m, matching the dowels ends with the cables anchorage nodes. Such elements are made up of 12 tendons of $\varnothing 0.6''$, which are pre-tensioned at an average of $0.42f_{pu}$. The columns correspond to a hollow rectangular section, which is presented by Figure 3.

Su altura (H_p) fue modificada, siendo estudiadas longitudes de 25, 37.5 y 50 m. Se ha supuesto que el puente se apoya sobre rodillos en sus extremos, aunque se restringieron los movimientos en la dirección transversal. Los pilares se suponen empotrados en la cimentación y unidos rígidamente al tablero en la corona.

Las propiedades del acero de los cables extradosados son: f_{pu} de 1860 MPa, E_{ps} de 1.999×10^5 MPa, y γ_{ps} igual a 77.14 kN/m^3 . La verificación por fatiga en estado límite de servicio y del esfuerzo admisible en estado límite último se ha hecho de acuerdo a lo establecido en SETRA (2001). Para el análisis estructural no fue considerada la relajación de estos elementos. En cuanto al concreto del tablero, la torre, y los pilares, se ha empleado un hormigón de f'_c igual a 39.2 MPa, E_c igual a 2.55×10^4 MPa, y γ_c igual a 23.5 kN/m^3 . En el análisis durante construcción se tuvieron en cuenta los efectos por fluencia y contracción del concreto, siguiendo las provisiones del CEB-FIB Model Code 1990 (CEB-FIP, 1993). Los efectos del envejecimiento en la resistencia y el módulo de elasticidad del concreto no fueron incluidos en el análisis.

Their height was modified and lengths of 25, 37.5 and 50m are under study. It is assumed that the bridge is supported by end rollers, although transverse direction movements have been restricted. It is assumed that the columns are embedded in a foundation and are rigidly connected to the deck.

The steel properties of extradosed cables are: f_{pu} of 1860 MPa, E_{ps} of 1.999×10^5 MPa, and γ_{ps} equal to 77.14 kN/m^3 . Fatigue control, under servicing limit condition and allowable stress under ultimate limit condition, was done in accordance with regulations established by SETRA (2001). For the structural analysis the stress relaxation of such elements was not considered. The deck, tower and columns concrete's properties are: f'_c equal to 39.2 MPa, E_c equal to 2.55×10^4 MPa, and γ_c equal to 23.5 kN/m^3 . For the analysis performed during construction stage, concrete creep and shrinkage effects were taken into consideration, following the specifications by CEB-FIB Model Code 1990 (CEB-FIP, 1993). Ageing effects on the concrete resistance and elasticity module were not included by the analysis.

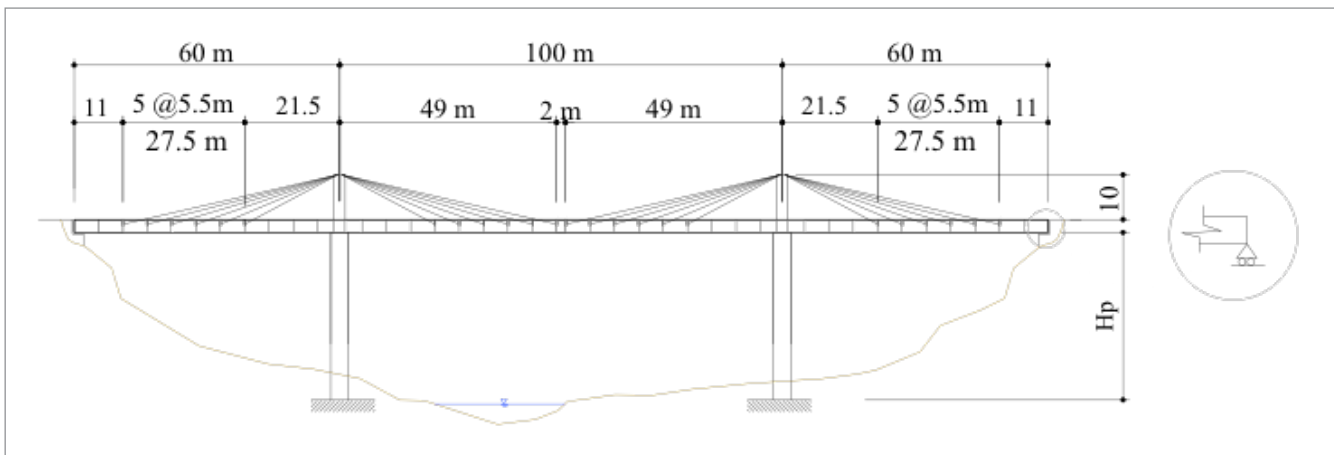


Figura 1. Vista longitudinal del puente estudiado
 Figure 1. longitudinal view of the bridge under study

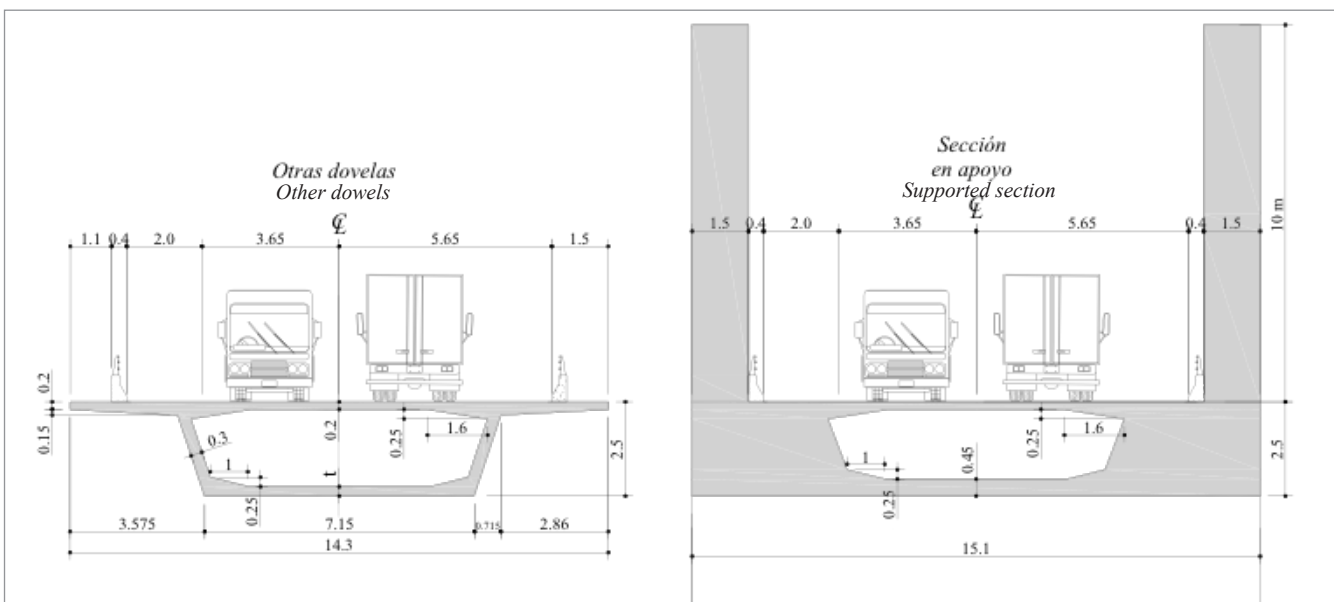
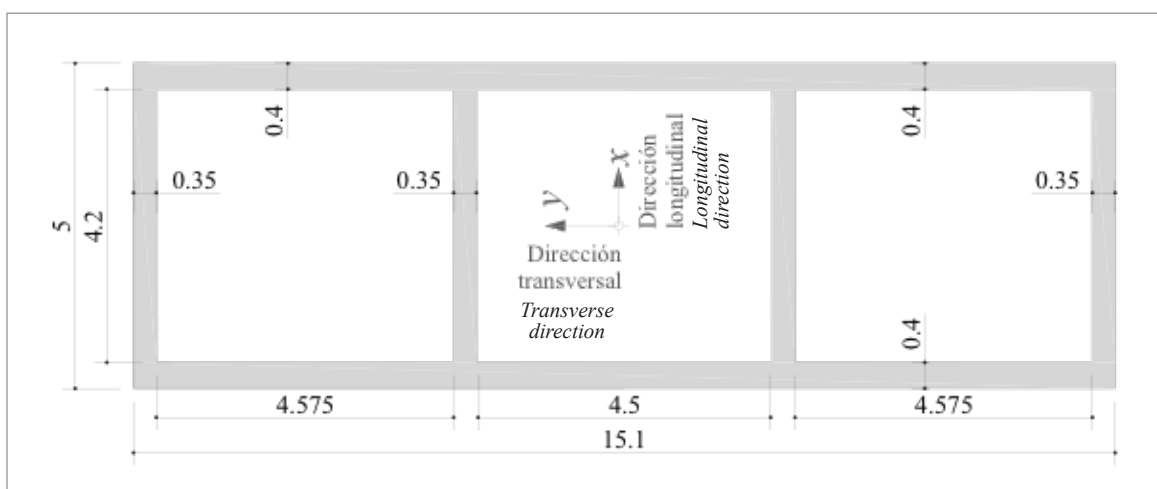


Figura 2. Sección típica del tablero (izquierda) y sección en apoyo sobre pilares (derecha)
 Figure 2. typical deck section (left) and section supported by columns (right)

Tabla 1. Propiedades geométricas de las dovelas del puente**Table 1.** Geometrical properties of deck's dowels

Dovela/Dowel	t* (m)	A (m ²)	J (m ³)	Ixx (m ³)	Iyy (m ³)
D _{Ap} (en apoyo sobre pilares/ <i>Dap supported by columns</i>)	0.45	8.33	17.72	8.49	99.31
D1	0.44	8.26	17.69	8.44	99.04
D2	0.41	8.05	17.56	8.28	98.22
D3	0.39	7.92	17.45	8.15	97.69
D4	0.36	7.71	17.26	7.95	96.88
D5	0.34	7.56	17.1	7.81	96.36
D6	0.31	7.37	16.84	7.57	96.57
D7	0.29	7.24	16.62	7.4	95.05
D8	0.26	7.04	16.24	7.11	94.27
D9	0.24	6.9	15.93	6.9	93.76
D10	0.23	6.84	15.76	6.8	93.5
D _{Cl} (cierre en centro de luz/ <i>closure of mid-span</i>)	0.22	6.77	15.58	6.68	93.24

**Figura 3.** Sección de los pilares**Figure 3.** Columns section

2.2 Análisis numérico

El análisis se desarrolló empleando el software SAP2000. Para esto se usaron elementos tipo viga-columna en el tablero, las torres y los pilares, y elementos tipo cable que tienen en cuenta el efecto catenaria para los cables extradados. La transmisión de la fuerza de los cables al tablero, y de la conexión entre el tablero y los pilares, se logró por medio del uso de elementos tipo link, que son rígidos y de masa nula (CSI, 2010), ver Figura 4.

El primer paso para el estudio de la vulnerabilidad sísmica durante construcción consistió en realizar el análisis constructivo y post-constructivo (entre $t=0$ y $t=50$ años después del cierre), incluyendo la no linealidad geométrica y los efectos diferidos en el tiempo. Las acciones tenidas en cuenta, los tiempos de construcción, así como los resultados de ese análisis, pueden ser revisados en Benjumea (2012).

2.2 Numerical Analysis

The analysis was performed by using the SAP2000 software. For this purpose, the employed elements were beam-column on the deck, towers and columns and; cable elements which consider the catenary effect of extradosed cables. Force transmission from cables to the deck and connection between deck and columns, was achieved by means of the use of link-type elements, which are rigid elements and their mass is almost void (CSI, 2010), see Figure 4.

The first step for the study of seismic vulnerability during construction stage consisted of developing a constructive and post-constructive analysis (between $t=0$ and $t=50$ years after closure), including geometrical non-linearity and differed effects throughout time. Considered actions and construction periods, as well as the results obtained from such analysis, can be reviewed on Benjumea (2012).

Para el puente recién construido ($t=0$) y luego de que hayan ocurrido las pérdidas ($t=50$ años), se realiza el análisis modal espectral y se determinan las fuerzas sísmicas. Esto mismo se hace para las etapas constructivas analizadas, presentadas en la Figura 5, en las cuales la solución del problema de los eigenvalues se hace usando la matriz de rigidez del puente en el estado deformado de cada etapa constructiva. Para calcular la vulnerabilidad sísmica del puente se estudió la respuesta interna en algunos puntos de interés en el tablero (en la zona de anclaje del primer cable extradosado en el vano lateral y en el vano central, y en la zona de conexión con los pilares), en la base de los pilares y de las torres, y en tres cables del vano central, ver Figura 6. Es importante anotar que en este trabajo no se ha estudiado el problema de la capacidad de los miembros estructurales del puente, puesto que los cálculos se basan en comparaciones relativas, y no absolutas, de la respuesta estructural del puente.

For the brand new bridge ($t=0$), and then when losses have taken place ($t=50$), a spectral modal analysis is conducted to determinate seismic forces. The same procedure is executed on the analyzed constructive stages, presented by Figure 5, which solution for the eigenvalues problems is performed by using the bridge stiffness matrix under deformed condition for each constructive stage. So as to calculate the bridge seismic vulnerability, the internal response was studied for some deck data points (the anchorage area of the first extradosed cable on the side span and mid-span and the zone connecting with columns), as well as the columns and towers bases and three cables on the mid-span, see Figure 6. It is important to emphasize that this research study has not analyzed the problems of bridge structural elements capacities, because calculations are based on relative comparisons of the bridge structural response and not on absolute ones.

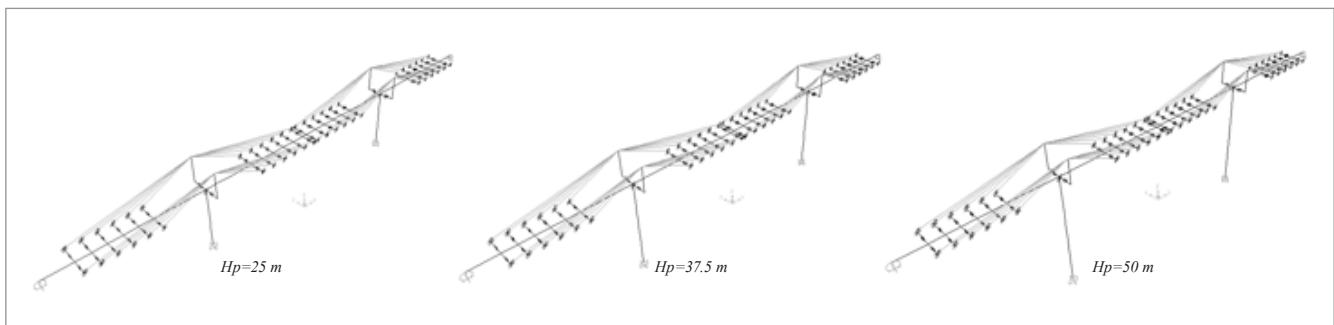


Figura 4. Modelos de elementos finitos desarrollados
Figure 4. Developed Finite Elements Modelling

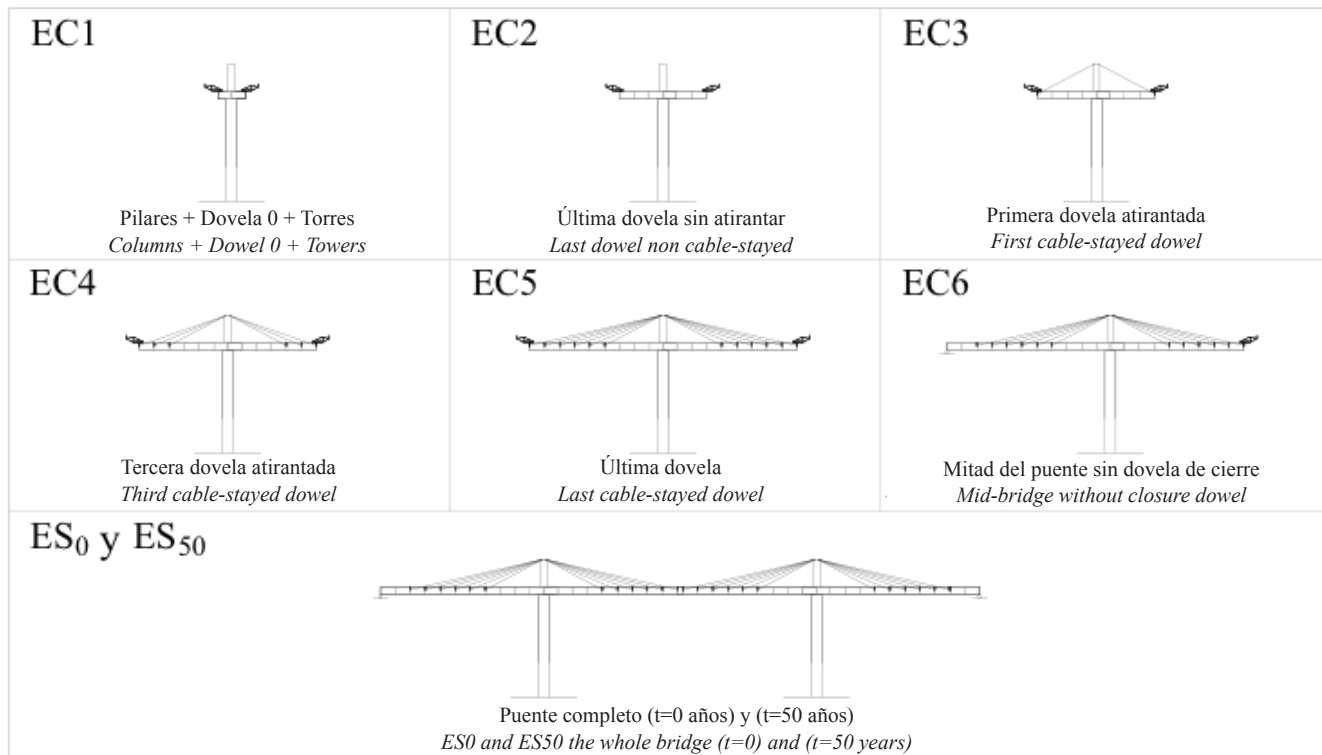


Figura 5. Estados del puente considerados
Figure 5. Bridge conditions taken in to consideration

2.3 Acción sísmica

Para determinar la acción sísmica durante construcción y en estado de servicio del puente, se empleó la curva de recurrencia de aceleraciones para la ciudad de Bucaramanga, ubicada en el nororiente de Colombia, ver Figura 7. De esta curva se observa que para un periodo de retorno de 475 años, la aceleración horizontal correspondiente es aproximadamente 0.22g. Este valor fue empleado para construir el espectro de aceleración de acuerdo al Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, que es presentado en la Figura 8.

2.3 Seismic activity

In order to determine seismic activity during construction stage and during service, the acceleration recurrence curve from the city of Bucaramanga, located at the northeast area of Colombia, was employed, located at the northeast area of Colombia, see Figure 7. From this curve it is observed that, for a return period of 475 years, the corresponding horizontal acceleration is 0.22g approximately. This value was used to create the acceleration spectrum, in accordance with the Bridge Seismic Design of the Colombian Code, which is presented by Figure 8.

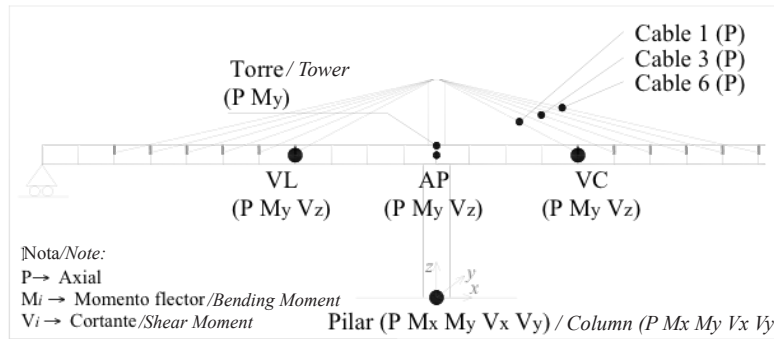


Figura 6. Zonas de interés y fuerzas internas estudiadas
 Figure 6. Interest zones and internal forces under study

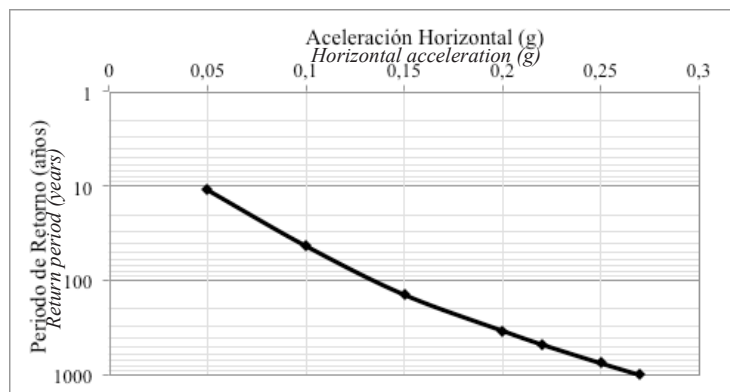


Figura 7. Curva de recurrencia de aceleraciones para la ciudad de Bucaramanga (AIS et al., 1996)
 Figure 7. Accelerations recurrence curve for the city of Bucaramanga (AIS et al., 1996)

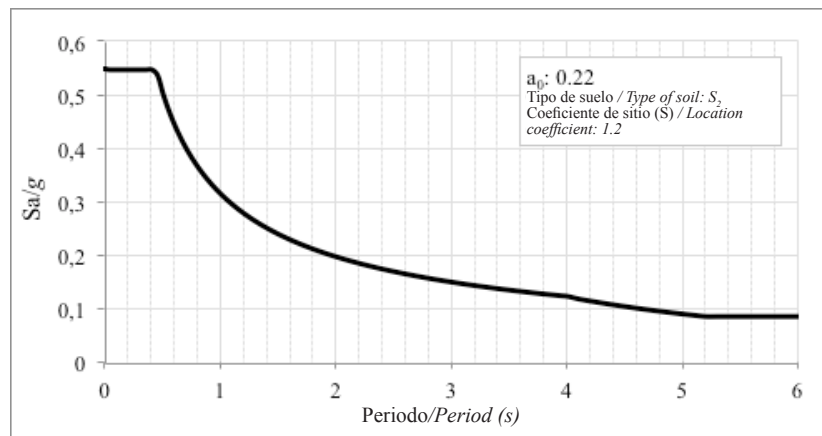


Figura 8. Espectro de aceleración para la ciudad de Bucaramanga
 Figure 8. Acceleration spectrum for the city of Bucaramanga

Para calcular las fuerzas sísmicas se ha supuesto un amortiguamiento del 1.5% en todos los modos del puente en el estado de servicio y durante construcción, valor encontrado por Niihara, et al. (2001) mediante estudios de vibración ambiental para tres puentes extradados construidos en Japón. El número de modos incluidos en el análisis modal fue seleccionado de modo tal que se garantizaran las premisas: (a) que el porcentaje de masa modal en la dirección vertical sea mayor o igual a la relación de la masa del tablero con respecto a la estructura, persiguiendo una alta participación del tablero en la respuesta en la dirección vertical, (b) que el porcentaje de masa modal sea mayor o igual al 80% en la respuesta en las direcciones horizontales, y (c) que el porcentaje de masa modal para las tres direcciones principales permanezca relativamente constante para todos los estados del puente analizados, incluyendo aquellos con el puente en servicio. En todos los casos se han tenido en cuenta los modos correspondientes a movimientos verticales de los pilares y la masa adicional del carro de avance durante las etapas constructivas.

3. Respuesta sísmica durante construcción

Luego de determinar la respuesta sísmica del puente para el sismo de diseño, durante construcción y en servicio, estas se comparan siguiendo las Ecuaciones 2 y 3 derivadas de Wilson y Holmes (2007). En éstas, el término E_c indica la máxima respuesta sísmica en la etapa constructiva analizada, mientras $E_{s,0}$ y $E_{s,50}$ indican el valor de la respuesta sísmica analizada para el puente completo en $t=0$ y $t=50$ años respectivamente. Debido a que el sismo considerado para las etapas constructivas y de servicio es el mismo, los términos $\psi_{E,0}$ y ψ_{E50} brindan una buena idea de los elementos y etapas constructivas críticas, siendo identificados por tener valores mayores a la unidad, lo que indica que la respuesta estructural sísmica durante construcción excede la respuesta del puente en servicio. La evaluación de las Ecuaciones 2 y 3 se presenta en las Tablas 2 a 4.

In order to calculate the seismic forces, a 1.5% damping ratio has been assumed for all modes of the bridge in service and during construction. This value was provided by Niihara et al., (2001), which is the result from environmental vibration studies in three extradosed bridges, built in Japan. The number of modes included in the modal analysis was selected in such a way that the following premises are guaranteed: (a) that the percentage of modal mass, in vertical direction, shall be higher or equal to the ratio of deck mass in regards to the structure, looking for a high participation of the deck in the vertical direction response; (b) that modal mass percentage shall be higher or equal to the 80% of horizontal direction responses and, (c) that the percentage of modal mass, for three main directions, shall remain relatively constant for all conditions of the analyzed bridge, including those with the bridge under service. In all such cases, the modes corresponding to vertical movements of columns and the additional mass of the bridge form traveler have been taken into account, during the constructive stages.

3. Seismic response during construction stage

After determining the bridge seismic response under the design earthquake, during the construction and in-service stages, they are compared by using Equations 2 and 3 derived by Wilson and Holmes (2007). In such equations the term E_c indicates the maximum seismic response for the analyzed constructive stage. While the terms $E_{s,0}$ and $E_{s,50}$ indicate the value of seismic response analyzed for the whole bridge in $t=0$ and $t=50$ years, respectively. Since the seismic activity considered for constructive and in-service stages is the same, the terms $\psi_{E,0}$ and ψ_{E50} provide a good idea of the elements and the critical constructive stages, thus being identified as having higher values than one, which indicates that the structural seismic response during construction stage exceeds the response of the bridge in-service. The assessment of Equations 2 and 3 is presented by Tables from 2 to 4.

$$\psi_{E,0} = \frac{E_c}{E_{s,0}} \quad (2)$$

$$\psi_{E50} = \frac{E_c}{E_{s,50}} \quad (3)$$



Tabla 2. Valores de $\psi_{E,0}$ y $\psi_{E,50}$ para el puente con Hp=25 m
Table 2. Values of $\psi_{E,0}$ and $\psi_{E,50}$ for the bridge with Hp=25 m

$\Psi_{E,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.48	0.46	0.5	0.5	0.51	1.39	Pilares Columns	P	0.48	0.46	0.5	0.51	0.51	1.39		
	ML	0.58	0.69	0.71	0.78	1.05	0.96		ML	0.57	0.69	0.71	0.77	1.05	0.95		
	VL	0.56	0.6	0.64	0.9	1.23	1.04		VL	0.55	0.6	0.64	0.89	1.22	1.04		
	MT	0.49	0.87	1.11	1.43	1.2	1.18		MT	0.49	0.87	1.11	1.43	1.2	1.18		
	VT	0.57	0.88	1.11	1.41	1.17	1.21		VT	0.57	0.88	1.11	1.41	1.17	1.21		
Torres Towers	ML	1.29	0.86	0.92	1.81	2.8	1.94	Torres Towers	ML	1.29	0.86	0.92	1.82	2.8	1.94		
	VL	1.28	0.85	0.91	1.78	2.76	1.92		VL	1.28	0.85	0.91	1.79	2.77	1.92		
Cables 6 3 1	P	-	-	1.27	1.84	1.36	2.32	Cables 6 3 1	P	-	-	1.51	2.19	1.62	2.76		
	P	-	-	-	1.66	1.62	2.45		P	-	-	-	1.66	1.62	2.46		
	P	-	-	-	-	1.33	1.9		P	-	-	-	-	1.33	1.91		
Tablero Deck	VL	P	-	-	0.09	0.55	1.25	1	Tablero Deck	VL	P	-	-	0.09	0.55	1.25	1
		ML	-	-	0.01	0.35	0.99	0.99			ML	-	-	0.01	0.36	0.99	0.99
		VL	-	-	0.28	0.92	0.74	1.2			VL	-	-	0.28	0.92	0.74	1.2
	VC	P	-	-	0.09	0.56	1.28	1.38		VC	P	-	-	0.09	0.56	1.28	1.38
		ML	-	-	0.01	0.36	1.01	1.2			ML	-	-	0.01	0.36	1.02	1.21
		VL	-	-	0.58	1.84	1.49	1.78			VL	-	-	0.58	1.85	1.5	1.79
AP	P	0.2	0.41	0.48	0.84	1.35	1.28	AP	P	0.2	0.41	0.48	0.84	1.35	1.28		
	ML	0.1	0.97	1.54	2.21	1.84	2.35		ML	0.1	0.97	1.54	2.22	1.84	2.35		
	VL	0.29	1.05	1.37	1.31	0.79	0.93		VL	0.3	1.06	1.38	1.32	0.79	0.94		

Tabla 3. Valores de $\psi_{E,0}$ y $\psi_{E,50}$ para el puente con Hp=37.5 m
Table 3. Values of $\psi_{E,0}$ and $\psi_{E,50}$ for the bridge with Hp=37.5 m

$\Psi_{E,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.82	0.79	0.74	0.79	0.77	1.58	Pilares Columns	P	0.82	0.79	0.74	0.79	0.77	1.58		
	ML	0.59	0.71	0.76	0.81	0.86	0.83		ML	0.59	0.71	0.76	0.81	0.86	0.83		
	VL	0.56	0.61	0.64	0.7	0.9	0.81		VL	0.56	0.61	0.64	0.7	0.9	0.81		
	MT	0.71	0.96	1.05	1.18	1.19	0.91		MT	0.71	0.96	1.05	1.18	1.19	0.91		
	VT	0.79	1	1.07	1.18	1.16	0.89		VT	0.79	1	1.07	1.18	1.16	0.89		
Torres Towers	ML	0.61	0.45	0.52	0.96	2.07	1.34	Torres Towers	ML	0.61	0.46	0.52	0.97	2.08	1.34		
	VL	0.6	0.45	0.51	0.94	2.04	1.32		VL	0.6	0.45	0.51	0.95	2.04	1.32		
Cables 6 3 1	P	-	-	1.18	1.79	1.78	3.74	Cables 6 3 1	P	-	-	1.18	1.79	1.79	3.74		
	P	-	-	-	1.11	1.45	2.64		P	-	-	-	1.11	1.45	2.65		
	P	-	-	-	-	1.17	2.02		P	-	-	-	-	1.18	2.02		
Tablero Deck	VL	P	-	-	0.07	0.37	1.07	1.02	Tablero Deck	VL	P	-	-	0.07	0.37	1.07	1.02
		ML	-	-	0.01	0.28	1.01	0.99			ML	-	-	0.01	0.28	1.01	0.99
		VL	-	-	0.37	1.22	1.53	1.05			VL	-	-	0.37	1.22	1.53	1.05
	VC	P	-	-	0.07	0.38	1.03	1.41		VC	P	-	-	0.07	0.39	1.03	1.41
		ML	-	-	0.01	0.27	0.92	1.26			ML	-	-	0.01	0.27	0.93	1.27
		VL	-	-	0.48	1.58	1.83	2.41			VL	-	-	0.48	1.57	1.83	2.4
AP	P	0.16	0.36	0.4	0.53	0.98	1.1	AP	P	0.16	0.36	0.4	0.53	0.98	1.1		
	ML	0.06	0.6	0.91	1.46	1.82	2.5		ML	0.06	0.6	0.91	1.45	1.81	2.49		
	VL	0.4	1.32	1.65	1.87	1.46	1.98		VL	0.4	1.32	1.65	1.88	1.46	1.98		



Tabla 4. Valores de $\psi_{E,0}$ y ψ_{E50} para el puente con Hp=50 m
Table 4. Values of $\psi_{E,0}$ and ψ_{E50} for the bridge with Hp=50 m

$\Psi_{E,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.92	0.87	0.86	0.83	0.78	1.32	Pilares Columns	P	0.92	0.87	0.86	0.83	0.78	1.31		
	ML	0.64	0.75	0.81	0.9	0.93	0.98		ML	0.64	0.75	0.81	0.9	0.93	0.98		
	VL	0.63	0.66	0.69	0.73	0.78	0.85		VL	0.63	0.66	0.69	0.73	0.78	0.85		
	MT	0.74	0.9	0.96	1.08	1.18	0.94		MT	0.74	0.9	0.96	1.08	1.18	0.94		
	VT	0.84	0.95	0.98	1.09	1.14	0.92		VT	0.84	0.95	0.98	1.09	1.14	0.92		
Torres Towers	ML	0.39	0.29	0.29	0.59	1.47	0.69	Torres Towers	ML	0.39	0.29	0.29	0.59	1.47	0.69		
	VL	0.38	0.29	0.29	0.58	1.44	0.69		VL	0.38	0.29	0.29	0.58	1.44	0.69		
Cables 6 3 1	P	-	-	0.98	1.31	1.69	2.79	Cables 6 3 1	P	-	-	0.99	1.32	1.69	2.79		
	P	-	-	-	0.77	1.25	1.78		P	-	-	-	0.77	1.25	1.79		
	P	-	-	-	-	0.99	1.32		P	-	-	-	-	0.99	1.32		
Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.06	0.29	0.81	1.36	Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.06	0.29	0.81	1.36
		ML	-	-	0.01	0.21	0.72	1.28			ML	-	-	0.01	0.21	0.72	1.28
		VL	-	-	0.39	1.03	1.31	0.97			VL	-	-	0.39	1.03	1.31	0.97
	AP	P	-	-	0.06	0.28	0.88	0.96		AP	P	-	-	0.06	0.28	0.88	0.96
		ML	-	-	0.01	0.19	0.74	0.78			ML	-	-	0.01	0.19	0.74	0.78
		VL	-	-	0.41	1.09	1.49	1.49			VL	-	-	0.41	1.08	1.49	1.49
AP	P	0.15	0.31	0.36	0.44	0.78	0.73	AP	P	0.15	0.31	0.36	0.44	0.78	0.73		
	ML	0.04	0.48	0.63	0.88	1.37	1.41		ML	0.04	0.48	0.62	0.87	1.36	1.4		
	VL	0.39	1.49	1.65	1.63	1.64	1.75		VL	0.4	1.5	1.67	1.65	1.67	1.77		

A partir de las Tablas 2 a 4 se observa que en los cables y las torres, la respuesta sísmica del puente completo siempre será excedida por lo menos en una etapa durante construcción. Estos elementos presentan los mayores valores de $\psi_{E,0}$ y ψ_{E50} (2.80 para el momento longitudinal de la torre y 3.74 para el axial del primer cable extradosado). En los pilares, las fuerzas sísmicas internas en la dirección transversal para el puente en estado completo serán excedidas por lo menos durante las etapas constructivas EC4 y EC5. En la dirección longitudinal también se logran respuestas sísmicas mayores durante construcción, aunque con menor proporción que en la dirección transversal. Para ambas direcciones, los valores mayores de $\psi_{E,0}$ y ψ_{E50} se obtuvieron en el caso del puente con pilares cortos. En cuanto a la fuerza axial, únicamente en la etapa constructiva EC6 se excede el axial sísmico para el puente completo. En el tablero, las respuestas sísmicas máximas durante construcción ocurren en la zona de conexión con los pilares ($\psi_{E,0}$ entre 1.41 y 2.35 para momento; $\psi_{E,0}$ entre 1.31 y 1.98 para cortante), y en el vano central ($\psi_{E,0}$ entre 1.21 y 1.27 para momento longitudinal; $\psi_{E,0}$ entre 1.49 y 2.41 para cortante). En el vano lateral se encontró una máxima respuesta sísmica en el cortante longitudinal ($\psi_{E,0}$ =1.53), aunque las demás respuestas analizadas son cercanas a la respuesta del puente en estado de servicio.

Los resultados de la Tablas 2 a 4 también permiten observar que los valores de $\psi_{E,0}$ y ψ_{E50} son muy similares. Esto se debe a que la respuesta modal de la estructura para esas dos etapas del puente no cambia significativamente, ver Figura 9, en donde se presenta, para los primeros 100 modos, la relación entre los periodos de vibración del estado E_{S_0} y $E_{S_{50}}$.

From Tables 2 up to 4, it is observed that in cables and towers, the deck seismic response will always be exceeded at least during one stage of construction phase. Such elements have the highest $\psi_{E,0}$ and ψ_{E50} values (2.80 for the tower longitudinal bending moment and, 3.74 for the axial of the first extradosed cable). In columns, the whole bridge internal seismic forces, in transverse direction, will be exceeded at least during constructive stages EC4 and EC5. In longitudinal direction, higher seismic responses are also achieved during construction phase, although with a lower rate than in transverse direction. For both directions the highest $\psi_{E,0}$ and ψ_{E50} values were obtained for the bridge supported by short columns. As far as axial force is concerned, only during construction stage EC6, it exceeds the axial seismic force for the whole bridge. Deck maximum seismic responses during construction phase take place in the columns connection area ($\psi_{E,0}$ between 1.41 and 2.35 for bending moment; $\psi_{E,0}$ between 1.31 and 1.98 shear). In mid-span, maximum seismic responses occurs for longitudinal bending moment ($\psi_{E,0}$ between 1.21 and 1.27) and for longitudinal shear ($\psi_{E,0}$ between 1.49 and 2.41). In the side span, a maximum seismic response was achieved for the longitudinal shear ($\psi_{E,0}$ =1.53), although the other analyzed responses are close to the response of the deck in-service condition.

The results from Tables 2 to 4 also show that $\psi_{E,0}$ and ψ_{E50} values are quite similar. This is so, because the structure modal response for these two bridge stages does not significantly changes, see Figure 9, which shows the relation between vibration periods under E_{S_0} and $E_{S_{50}}$ condition, for the first 100 modes.

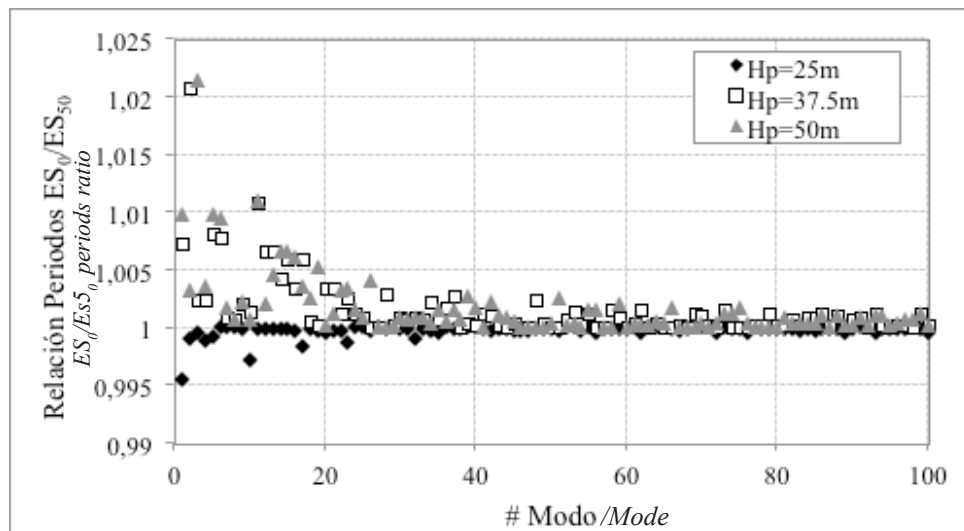


Figura 9. Relación entre los periodos de vibración para los estados ES_0 y ES_{50}
Figure 9. Relation between vibration periods for ES_0 and ES_{50} conditions

Si se modifican las Ecuaciones 2 y 3, introduciendo las acciones de peso propio y carga muerta durante construcción (D_c) y en servicio (D_s), ver Ecuaciones 4 y 5, se puede tener una idea más clara de la vulnerabilidad del puente y confirmar las tendencias previamente determinadas, ya que esta combinación de cargas es mucho más realista que la acción sísmica actuando sola.

If Equations 2 and 3 are modified by introducing the effect of selfweight and dead load during construction stage (D_c) and in-service stage (D_s), see Equations 4 and 5, it is possible to obtain a clearer idea about the bridge vulnerability and to confirm the trend previously determined, since that load combination is far more real than the seismic activity working by itself.

$$\psi_{E+D,0} = \frac{E_c + D_c}{E_{s,0} + D_{s,0}} \quad (4)$$

$$\psi_{E+D,50} = \frac{E_c + D_c}{E_{s,50} + D_{s,50}} \quad (5)$$

La evaluación de las Ecuaciones 4 y 5 se presenta en las Tablas 5 a 7. De estas se puede anotar lo siguiente: (a) las torres y los cables extradosados son los elementos estructurales que presentan mayor vulnerabilidad durante construcción frente a las acciones sísmicas. Debido a que estos dos elementos son importantes dentro del comportamiento del puente extradosado, se debe prestar especial atención durante la fase de diseño, (b) en los pilares, las fuerzas sísmicas en la dirección transversal presentan la mayor vulnerabilidad durante construcción. El axial y las fuerzas en la dirección longitudinal durante construcción alcanzan valores menores o iguales a aquellos obtenidos para el puente en el estado completo, (c) la zona que presenta mayor vulnerabilidad en el tablero es la de conexión con los pilares. En esta, el momento longitudinal alcanza los valores más críticos, los cuales aumentan a medida que disminuye la rigidez de los pilares, lo que se debe a que el tablero toma una mayor carga sísmica. En el vano central y en los vanos laterales se puede llegar a tener valores que exceden los obtenidos del puente en estado completo, sin embargo la vulnerabilidad es menor a la que exhibe la zona de conexión con los pilares, (d) en general, las etapas constructivas EC4, EC5 y EC6 son las condiciones más vulnerables del puente. En estas, la estructura tiene una menor redundancia que la del puente completo y un porcentaje considerable de la masa total.

The assessment of Equation 4 and 5 is presented by Tables 5 to 7. The following records are mentioned: (a) Towers and extradosed cables are structural elements showing higher vulnerability against seismic activity during construction stage. Since, these two elements are relevant for the extradosed bridge behavior special attention shall be paid during design phase; (b) in columns seismic forces in transverse direction show the highest vulnerability during construction phase. Axial and forces in longitudinal direction achieved lower or equal values to those obtained for the bridge under full condition; (c) the area showing the highest vulnerability in the deck is the connection with columns. In this area the longitudinal moment reaches the most critical values, which tend to increase as long as the columns stiffness decreases, because the deck absorbs more seismic load. In mid-span and side spans, values may exceed the ones obtained for the bridge in full condition, however vulnerability is lower than the one shown by the area connecting with columns; (d) in general, the constructive stages EC4, EC5 and EC6 are the most vulnerable of the whole bridge. In these stages, the structure has a lower redundancy than that of the complete bridge and a considerable percentage of total mass.

Tabla 5. Valores de $\psi_{E+D,0}$ y $\psi_{E+D,50}$ para el puente con $H_p=25$ m.
Table 5. Values of $\psi_{E+D,0}$ and $\psi_{E+D,50}$ for the bridge with $H_p=25$ m.

$\Psi_{E+D,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E+D,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.48	0.58	0.64	0.74	0.88	1.02	Pilares Columns	P	0.48	0.58	0.64	0.74	0.88	1.02		
	ML	0.5	0.6	0.62	0.68	0.93	0.85		ML	0.49	0.59	0.6	0.66	0.91	0.83		
	VL	0.5	0.54	0.58	0.8	1.1	0.94		VL	0.47	0.51	0.54	0.75	1.03	0.88		
	MT	0.49	0.87	1.11	1.43	1.2	1.18		MT	0.49	0.87	1.11	1.43	1.2	1.18		
	VT	0.57	0.88	1.11	1.41	1.17	1.21		VT	0.57	0.88	1.11	1.41	1.17	1.21		
Torres Towers	ML	1.12	0.75	0.81	1.59	2.44	1.74	Torres Towers	ML	0.92	0.62	0.67	1.31	2.01	1.44		
	VL	1.11	0.74	0.8	1.57	2.42	1.73		VL	0.92	0.61	0.66	1.3	1.99	1.43		
Cable 6 3 1	P	-	-	1.55	1.61	1.65	1.74	Cable 6 3 1	P	-	-	1.18	1.23	1.26	1.33		
	P	-	-	-	1.15	1.22	1.27		P	-	-	-	1.24	1.33	1.37		
	P	-	-	-	-	1.18	1.21		P	-	-	-	-	1.33	1.36		
Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.23	0.62	1.06	0.98	Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.25	0.67	1.15	1.06
		ML	-	-	0.11	0.41	0.73	0.83			ML	-	-	0.12	0.48	0.84	0.96
		VL	-	-	0.37	0.82	0.54	1.04			VL	-	-	0.34	0.75	0.5	0.95
	AP	P	-	-	0.14	0.38	0.65	0.64		AP	P	-	-	0.18	0.49	0.84	0.83
		ML	-	-	0.12	0.46	0.78	0.98			ML	-	-	0.11	0.42	0.71	0.89
		VL	-	-	0.47	0.99	0.87	0.98			VL	-	-	0.42	0.89	0.78	0.88
AP	P	0.16	0.39	0.53	0.78	1.06	1.03	AP	P	0.2	0.51	0.69	1.02	1.38	1.34		
	ML	0.08	0.99	1.29	1.79	1.82	2.08		ML	0.07	0.88	1.14	1.58	1.61	1.84		
	VL	0.3	0.77	0.88	0.89	0.77	0.81		VL	0.29	0.75	0.85	0.87	0.75	0.78		

Tabla 6. Valores de $\psi_{E+D,0}$ y $\psi_{E+D,50}$ para el puente con $H_p=37.5$ m.
Table 6. Values of $\psi_{E+D,0}$ and $\psi_{E+D,50}$ for the bridge with $H_p=37.5$ m.

$\Psi_{E+D,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E+D,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.59	0.68	0.72	0.81	0.94	1.03	Pilares Columns	P	0.59	0.68	0.72	0.81	0.94	1.03		
	ML	0.62	0.75	0.8	0.87	0.92	0.9		ML	0.55	0.66	0.71	0.77	0.81	0.79		
	VL	0.53	0.58	0.61	0.67	0.86	0.78		VL	0.52	0.57	0.6	0.65	0.84	0.76		
	MT	0.71	0.96	1.05	1.18	1.19	0.91		MT	0.71	0.96	1.05	1.18	1.19	0.91		
	VT	0.79	1	1.07	1.18	1.16	0.89		VT	0.79	1	1.07	1.18	1.16	0.89		
Torres Towers	ML	0.58	0.43	0.5	0.94	1.99	1.28	Torres Towers	ML	0.54	0.41	0.47	0.88	1.87	1.21		
	VL	0.57	0.43	0.49	0.92	1.95	1.26		VL	0.54	0.4	0.46	0.87	1.84	1.19		
Cable 6 3 1	P	-	-	1.07	1.12	1.23	1.43	Cable 6 3 1	P	-	-	1.1	1.16	1.27	1.48		
	P	-	-	-	1.05	1.19	1.33		P	-	-	-	1.11	1.26	1.41		
	P	-	-	-	-	1.14	1.25		P	-	-	-	-	1.24	1.36		
Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.22	0.58	1.02	0.98	Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.24	0.63	1.11	1.06
		ML	-	-	0.1	0.37	0.76	0.85			ML	-	-	0.11	0.4	0.82	0.92
		VL	-	-	0.46	0.94	1.18	0.87			VL	-	-	0.42	0.85	1.07	0.79
	AP	P	-	-	0.16	0.41	0.71	0.74		AP	P	-	-	0.19	0.48	0.84	0.87
		ML	-	-	0.11	0.39	0.74	1.05			ML	-	-	0.1	0.35	0.67	0.95
		VL	-	-	0.41	0.84	1.08	1.33			VL	-	-	0.37	0.76	0.98	1.21
AP	P	0.15	0.4	0.54	0.74	1.02	1.02	AP	P	0.18	0.46	0.62	0.87	1.19	1.19		
	ML	0.05	0.62	0.77	1.18	1.67	2.06		ML	0.05	0.59	0.72	1.11	1.56	1.93		
	VL	0.33	0.81	0.9	1	0.95	1.08		VL	0.32	0.79	0.87	0.97	0.92	1.04		

Tabla 7. Valores de $\Psi_{E+D,0}$ y $\Psi_{E+D,50}$ para el puente con $H_p=50$ m
Table 7. Values of $\Psi_{E+D,0}$ and $\Psi_{E+D,50}$ for the bridge with $H_p=50$ m

$\Psi_{E+D,0}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	$\Psi_{E+D,50}$		EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6		
Pilares Columns	P	0.64	0.72	0.76	0.84	0.95	1	Pilares Columns	P	0.65	0.72	0.76	0.84	0.95	1		
	ML	0.63	0.73	0.79	0.89	0.92	0.97		ML	0.61	0.72	0.78	0.87	0.9	0.95		
	VL	0.62	0.64	0.68	0.72	0.77	0.83		VL	0.61	0.64	0.67	0.71	0.76	0.82		
	MT	0.74	0.9	0.96	1.08	1.18	0.94		MT	0.74	0.9	0.96	1.08	1.18	0.94		
	VT	0.84	0.95	0.98	1.09	1.14	0.92		VT	0.84	0.95	0.98	1.09	1.14	0.92		
Torres Towers	ML	0.37	0.28	0.29	0.6	1.44	0.68	Torres Towers	ML	0.36	0.27	0.29	0.59	1.43	0.67		
	VL	0.36	0.27	0.28	0.58	1.41	0.67		VL	0.36	0.27	0.28	0.58	1.4	0.67		
Cable 6 3 1	P	-	-	1.02	1.06	1.23	1.33	Cable 6 3 1	P	-	-	1.06	1.09	1.27	1.38		
	P	-	-	-	0.98	1.16	1.21		P	-	-	-	1.03	1.23	1.28		
	P	-	-	-	-	1.1	1.13		P	-	-	-	-	1.2	1.22		
Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.2	0.51	0.88	0.94	Tablero Deck VC	VL	P	-	-	0.22	0.56	0.95	1.02
		ML	-	-	0.08	0.32	0.62	1.09			ML	-	-	0.09	0.34	0.65	1.15
		VL	-	-	0.48	0.82	2.43	0.81			VL	-	-	0.43	0.74	2.2	0.74
	AP	P	-	-	0.16	0.4	0.7	0.69		AP	P	-	-	0.18	0.46	0.8	0.79
		ML	-	-	0.09	0.31	0.62	0.71			ML	-	-	0.08	0.29	0.57	0.65
		VL	-	-	0.38	0.62	0.95	0.92			VL	-	-	0.34	0.56	0.87	0.84
AP	P	0.15	0.39	0.54	0.74	0.99	0.96	AP	P	0.17	0.45	0.61	0.84	1.13	1.09		
	ML	0.08	1.04	1.15	1.55	2.68	2.6		ML	0.09	1.15	1.27	1.72	2.96	2.88		
	VL	0.33	0.84	0.89	0.93	0.99	1		VL	0.32	0.82	0.86	0.9	0.96	0.98		

4. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Como se había expuesto anteriormente, la probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño para el puente completo durante el periodo constructivo es baja. Sin embargo, debido a que en algunas etapas constructivas el puente tiene una cantidad de masa considerable y una menor redundancia que la del puente completo, pueden ocurrir sismos de menor magnitud pero con mayor probabilidad de excedencia anual, que generen fuerzas sísmicas iguales a las que ocurren en el puente completo. En este numeral, el interés está en calcular la magnitud de esos sismos, o en otras palabras, el valor del coeficiente de aceleración sísmico, de modo tal que las fuerzas sísmicas durante construcción sean iguales a las del puente completo obtenidas para el sismo con periodo de retorno igual a 475 años. Para calcular esas aceleraciones se introducen las Ecuaciones 6 y 7, a partir de las cuales se puede obtener el valor del coeficiente de aceleración sísmico reducido (a_r). En estas ecuaciones, el subíndice i indica los estados $t=0$ y $t=50$ años, mientras que a_0 indica el valor del coeficiente de aceleración empleado para el diseño del puente en estado completo ($a_0=0.22$).

Para cargas sísmicas/ For seismic loads
$$a_{r,i} = \frac{E_{s,i}}{E_c} a_0 \tag{6}$$

Para cargas sísmicas y permanentes/ For constant seismic loads
$$a_{r,i} = \frac{E_{s,i} + D_{s,i} - D_c}{E_c} a_0 \tag{7}$$

4. Assesment of seismic vulnerability

As previously exposed, the probability of occurrence of the design earthquake during construction is quite low. However, since in some construction stages the bridge has a considerable amount of mass and a lower redundancy compared to the complete bridge, low magnitude earthquakes with higher annual exceedance probability can take place thus generating seismic forces equal to those taking place in the completed bridge. In this section, the main purpose is to calculate the magnitude of such earthquakes, in other words, the value of seismic acceleration coefficient, so that seismic forces during construction phase shall be equal to the ones obtained for the completed bridge in regards to seismic activity, with a return period equal to 475 years. So as to calculate such accelerations, the Equations 6 and 7 are introduced, which use allows obtaining the reduced seismic acceleration coefficient value (a_r). In such equations, the subscript indicate the conditions $t=0$ and $t=50$ years, while a_0 indicates the acceleration coefficient value employed for the bridge design under completed condition ($a_0=0.22$).



Luego de evaluar estas Ecuaciones, se presenta en la Tabla 8 los valores críticos (mínimos) de aceleración reducida para todos los puentes estudiados. Además, usando la curva de recurrencia de aceleraciones presentada en la Figura 7, se incluyen las probabilidades de excedencia asociadas. En la Tabla 8 no se presenta el valor de (a_r) en los cables para la condición "carga sísmica+carga permanente", ya que el creep y shrinkage del concreto reducen considerablemente la fluencia y contracción de los cables y por lo tanto se tendrían valores de (a_r) negativos. Tampoco se presentan los valores de probabilidad para aceleraciones menores a 0.05g pues la curva de recurrencia no contaba con dicha información.

De la Tabla 8 se observa que en todos los elementos estructurales existe una mayor vulnerabilidad sísmica durante construcción, ya que pueden ocurrir sismos de baja magnitud pero con mayor probabilidad de excedencia anual al 0.21% que se emplea en el diseño del puente completo, lo cual podría dejar a la estructura en un alto nivel de exposición a la pérdida de un elemento estructural si la capacidad para resistir las fuerzas sísmicas no es suficiente. Por ejemplo, en los pilares se pueden tener probabilidades de que las fuerzas sísmicas durante construcción sean excedidas un 0.41% anualmente, en las torres un 4.21%, en los cables se pueden llegar a tener probabilidades de excedencia del 7.81%, y del 3.07% en el tablero. En algunos casos, al tener en cuenta el efecto de las cargas muertas en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica ocurre un efecto positivo para el puente, lo que demuestra la dependencia de la distribución de cargas muertas en la estructura. Sin embargo, como los efectos diferidos en el tiempo pueden llegar a modificar significativamente la respuesta estructural del puente bajo cargas permanentes, también puede haber un efecto negativo, como en el caso de los cables.

After assessing these Equations, Table 8 presents the (minimal) critical reduced acceleration values for all the bridges under study. Besides, by using the acceleration recurrence curve, shown by Figure 7, the associated exceedance probabilities are included. Table 8 does not show (a_r) value of cables for the condition "seismic load + permanent load" because concrete creep and shrinkage considerably reduce cables stress, therefore (a_r) values would be negative. Probability values are not shown for accelerations lower than 0.05g, since that information was not available for the recurrence curve.

Table 8 shows that all structural elements have a higher seismic vulnerability during construction phase, because low magnitude earthquakes are likely to take place but having a higher annual exceedance probability of 0.21%, which is used for the design of complete bridge; thus exposing the structure to a high risk of losing a structural element, if the capacity to withstand seismic forces is not enough. For example, it is probable that seismic forces during construction phase can be annually exceeded by 0.41% in columns; in towers by 4.21%, in cables they may be exceeded by 7.81% and, 3.07% in the deck. In some cases, considering the effect of dead loads on seismic vulnerability, there is a positive effect on the deck, demonstrating the dependence on the structure dead load distribution. However, as the effects differed throughout time can significantly modify the bridge structural response under permanent loads, a negative effect is likely to take place, for example in the cables.

Tabla 8. Valores de a_r y probabilidad de excedencia anual para los puentes estudiados
Table 8. Values of a_r and annual exceedance probability for the bridges under study

		Hp=25 m				Hp=37.5 m				Hp=50 m				
		Ec. 6		Ec. 7		Ec. 6		Ec. 7		Ec. 6		Ec. 7		
		a_r	%exc.	a_r	%exc.	a_r	%exc.	a_r	%exc.	a_r	%exc.	a_r	%exc.	
Pilares Columns	P	0.16	0.59	0.2	0.29	0.14	0.88	0.19	0.35	0.17	0.49	0.22	0.21	
	Mx	0.21	0.25	0.24		0.26		0.24		0.23		0.23		
	Vx	0.18	0.41	0.2	0.29	0.24		0.26		0.26		0.27		
	My	0.15	0.71	0.15	0.71	0.18	0.41	0.18	0.41	0.19	0.35	0.19	0.35	
	Vy	0.16	0.59	0.16	0.59	0.19	0.35	0.19	0.35	0.19	0.35	0.19	0.35	
Torres Towers	My	0.08	4.21	0.09	3.07	0.11	1.75	0.11	1.75	0.15	0.71	0.15	0.71	
	Vy	0.08	4.21	0.05	9.2	0.11	1.75	0.11	1.75	0.15	0.71	0.15	0.71	
Cables	1	P	0.09	3.07	-	-	0.06	7.81	-	-	0.08	4.21	-	-
	3	P	0.09	3.07	-	-	0.08	4.21	-	-	0.12	1.37	-	-
	6	P	0.12	1.37	-	-	0.11	1.75	-	-	0.17	0.49	-	-
Tablero Deck VC	VL	P	0.18	0.41	0.09	3.07	0.21	0.25	0.11	1.75	0.16	0.59	0.2	0.29
		My	0.22	0.21	0.23		0.22	0.21	0.25		0.17	0.49	0.18	0.41
		Vy	0.18	0.41	0.21	0.25	0.14	0.88	0.18	0.41	0.17	0.49	0.21	0.25
	VC	P	0.16	0.59	0.71		0.16	0.59	0.34		0.23		0.53	
		My	0.18	0.41	0.23		0.17	0.49	0.21	0.25	0.28		0.33	
		Vy	0.12	1.37	0.22	0.21	0.09	3.07	0.16	0.59	0.15	0.71	0.23	
	AP	P	0.16	0.59	0.03	-	0.2	0.29	0.03	-	0.28		0.05	9.2
		My	0.09	3.07	0.08	4.21	0.09	3.07	0.09	3.07	0.16	0.59	0.03	-
Vy		0.16	0.59	0.27		0.11	1.75	0.19	0.35	0.13	1.09	0.22	0.21	

5. Conclusiones

A partir de la comparación de la respuesta sísmica durante seis etapas de construcción, y dos en estado de servicio (antes y después de que tengan lugar los efectos de la fluencia y contracción del concreto), se evaluó la vulnerabilidad sísmica de un puente extradosado de tres luces (60+100+60 m) construido por el método de voladizos sucesivos. En el estudio se ha incluido la altura de los pilares como una variable de investigación.

Los resultados encontrados permiten concluir que los puentes extradosados presentan un mayor grado de vulnerabilidad durante construcción que para el puente en servicio, ya que en el primer estado se pueden tener fuerzas sísmicas con probabilidades de excedencia anuales mayores a la probabilidad de excedencia del 0.21% que se adopta para el diseño sísmico del puente completo. En esta estructura, las torres y los cables extradosados son los elementos estructurales que presentan mayor vulnerabilidad sísmica durante construcción, y por lo tanto, se debe prestar atención a estos elementos en el análisis sísmico durante construcción. En los pilares, las fuerzas internas en la dirección transversal del puente presentaron la mayor vulnerabilidad, mientras que el axial y las fuerzas en la dirección longitudinal no resultaron ser críticas. En el tablero, la mayor vulnerabilidad sísmica se encontró para la zona de conexión con los pilares, la cual se incrementa a medida que se disminuye la rigidez de los pilares. El estudio realizado permite concluir también que las etapas constructivas posteriores a la construcción de la dovela atirantada intermedia representan las condiciones más vulnerables, ya que en estas el puente tiene una menor redundancia estructural que la del puente completo y un alto porcentaje de la masa total.

Debe tenerse presente el hecho de que durante construcción el puente exhiba una mayor vulnerabilidad sísmica que para su estado completo, no indica que los elementos estructurales alcancen el estado límite último y se produzca la falla de los mismos, a menos que la capacidad estructural de los mismos no sea la necesaria para resistir la demanda sísmica. En este trabajo no se determinó la capacidad estructural del puente para resistir las fuerzas sísmicas durante construcción, sin embargo, resultaría importante tener en cuenta este aspecto en trabajos futuros para poder determinar el grado de seguridad con que se estarían diseñando estos puentes.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, UIS, y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Investigación, COLCIENCIAS, por el apoyo recibido a través del proyecto RC No 65-2008 titulado "Aplicación de puentes de hormigón con pretensado extradosado en Colombia".

5. Conclusions

By comparing the seismic response during six constructive stages and two in-service condition (before and after concrete creep and shrinkage took place), the seismic vulnerability of a 3-span extradosed bridge (60+100+60 m) - built with the balanced cantilever method - was evaluated. The study includes the columns height as a research variable.

The achieved results allows us to conclude that extradosed bridges have a higher degree of vulnerability during construction phase than in-service bridges, because in the first stage it is possible that seismic forces with annual exceedance probabilities may surpass the 0.21% exceedance probability adopted for the seismic design of the whole bridge. In this structure, the towers and extradosed cables are the structural elements that show greatest seismic vulnerability during construction and, therefore, special attention shall be paid in the seismic analysis during construction phase. In columns, the internal forces in the bridge transverse direction showed the highest vulnerability, while the axial moment and forces in longitudinal direction demonstrated not being critical. In deck, the highest seismic vulnerability was found for the area connecting with columns, which increases as long as the columns stiffness decreases. This research also allows us to conclude that constructive stages executed after the construction of the intermediate stayed-dowel represent the most vulnerable conditions; since the bridge has a lower structural redundancy than that of the complete bridge and a high percentage of total mass in these stages.

It shall be taken into account the fact that during construction the bridge shows a higher seismic vulnerability than after construction is completed, as it does not indicate that structural elements may reach their ultimate limit condition and they might fail as well, unless their structural capacity is not well able to withstand seismic activity. This research did not determine the structural capacity of the bridge to endure seismic forces during the construction phase. However, it is important to consider this aspect in further researches, so as to determine the safety degree for bridges design.

6. Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Industrial University of Santander, UIS and; to the Administration Department of Science, Technology and Research, COLCIENCIAS for the support they provided by means of the RC No 65-2008 project, entitled "Application of prestressed extradosed concrete bridges in Colombia".

7. Referencias/References

- AIS (1995)**, Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (Norma AIS-200-95). Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1996)**, Universidad de Los Andes, Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química-Ingeominas. Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Santafé de Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Benjumea J. (2012)**, Evaluación del Comportamiento Estructural de Puentes Extradados con Pilares Esbeltos en Zonas de Alta Sismicidad. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, disponible en http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=160440|%20|1|18
- Benjumea J., Chio G. y Maldonado E. (2010)**, Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes extradados: visión general y estado del arte, Revista Ingeniería de Construcción [online], 25(3), 383-398, disponible en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732010000300004&lng=es&nrm=iso
- Benjumea J., Chio G. y Maldonado E. (2012)**, Puentes Extradados: Evolución y Tendencias Actuales. Revista Tecnura [online]. 16 (33), 173-188, disponible en <http://tecnura.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/434/438>.
- Calvi M., Sullivan T. J. y Villani A. (2010)**, Conceptual seismic design of cable-stayed bridges, Journal of Earthquake Engineering, [online], 14(8), 1139-1171, disponible en <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2010.505275>
- CEB-FIP. (1993)**, CEB-FIP Model Code 1990. London: Thomas Telford Publishing Ltd. London for the Comité.
- CSI Computers & Structures Inc. (2010)**, CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, and SAFE®. Berkeley, California, USA: Computers and Structures, Inc.
- Niihara Y., Tetsuya K., Yamanobe S. y Hishiki. (2001)**, PCエクストラドゾド橋の減衰特性に関する考察 (Study on Damping Characteristics of Extradosed Bridges). Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering [online], 47^a(2), 489-500, available at <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2001/47-A2-0489.pdf>
- SETRA (2001)**, Haubans - Recommendations de la commission interministérielle de la précontrainte. Bagneaux Cedex: Service d'études techniques des routes et autoroutes, SETRA.
- Wilson J. y Holmes K. (2007)**, Seismic Vulnerability and Mitigation during Construction of Cable-Stayed Bridges. Journal of Bridge Engineering [online], 12 (3), 364-372, available at [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:3\(364\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:3(364))



**INGENIERÍA
DICTUC**

Ingeniería para desarrollar Chile

RESMAT

Área Resistencia de Materiales

**Ensayos y Certificación
de Calidad de Materiales**

- Diseño, Análisis y Control de Calidad de Hormigones, Morteros y Mezclas Asfálticas
- Certificación de Producción Industrial de Materiales
- Ensayo y Certificación de Materiales de Construcción: áridos, cementos, asfalto, madera, agua, aditivos y membrana de curado
- Ensayo y Certificación de Prefabricados: soleras, tapas, tubos, baldosas, ladrillos, adoquines y bloques de hormigón
- Análisis Químico de Materiales

Laboratorio en Terreno

- Instalación y Operación de Laboratorios en Terreno
- Inspección Técnica en Terreno

Asesorías y Proyecto

- Evaluación de Daños en Obras y Diseño de Reparaciones
- Aplicación de Tecnología de Materiales
- Estudios de Técnicas y Sistemas Constructivos

**Ensayos Especiales
en Laboratorio y Terreno**

- Ensayos Destructivos: extracción de testigos de hormigón y asfalto, y módulo de elasticidad en probetas normalizadas y testigos
- Ensayos No Destructivos: índice esclerométrico, ultrasonido, pull off, pull out, lock test
- Ensayos Instrumentados: tenacidad en shotcrete y hormigón con fibra, adherencia acero-hormigón, determinación de curvas carga-deformación en materiales



- Contrastación de prensas y cilindros hidráulicos
- Ensayos de tracción en soportes, pernos y barras ancladas
- Evaluación de planeidad y nivel con F-Meter, e irregularidad superficial mediante IRI y H-ILO
- Otros ensayos: medición de temperaturas en hormigón masivo, hormigones de prueba, determinación del tiempo de fraguado

Durabilidad de Materiales

- Medición de retracción y creep en hormigón
- Ensayo ASTM de penetración del ion cloruro
- Permeabilidad al agua del hormigón y mortero
- Desgaste del hormigón según normas DIN y ASTM

- Ensayos de simulación de condiciones climáticas
- Evaluación de patologías de construcción
- Ensayo ASTM de permeabilidad en muros de albañilería

Investigación y Desarrollo

- Tecnología de materiales de construcción
- Estudio de nuevos materiales, diseño de hormigones, morteros especiales y mezclas asfálticas
- Diseño de ensayos
- Diseño y ejecución de programas experimentales
- Instrumentación de estructuras.

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago; Vicuña Mackenna 4860 • Fonos: (56-2) 552 2372 – 3544575 – 3544574 • Fax (56-2) 5531000
Viña del Mar; Álvarez 2132 • Fono (56-32) 670757 • Fax (56-32) 633923 • resmat@ing.puc.cl • www.dictuc.cl

Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura

Blended cement containing fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): hydration and paste microstructure

Silvia Izquierdo*, Jherson Diaz*, Ruby Mejía¹*, Janneth Torres**

* Universidad del Valle, Cali. COLOMBIA

** Universidad Nacional de Colombia, Palmira. COLOMBIA

Fecha de Recepción:09/03/2013

Fecha de Aceptación:18/07/2013

PAG 141 - 154

Resumen

El presente trabajo estudia el efecto de la incorporación de un residuo procedente de la industria petroquímica denominado catalizador gastado del craqueo catalítico (FCC) en la hidratación y microestructura de pastas cementicias. Se utilizan como materiales de referencia, además del cemento portland (OPC), dos tipos de adición de alto desempeño, metacaolín (MK) y humo de sílice (HS). La caracterización de los productos de hidratación se realizó por medio de difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG), microscopía electrónica de barrido (SEM) y resonancia magnética nuclear (NMR). Se complementa este estudio con la evaluación de la resistencia mecánica a compresión de morteros a edad hasta de 90 días. Los resultados indican que los principales productos de hidratación en las pastas adicionadas con FCC son silicato cálcico hidratado (CSH), aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y silicoaluminatos cálcicos hidratados (CASH). Pastas con 10% de FCC reportan un consumo de cal del 61% a edad de 360 días de curado, valor muy superior al reportado por las adiciones de MK y HS en la misma proporción, esto indica una mayor reactividad del FCC, que incluso se manifiesta a edades tempranas. Cabe anotar que, considerando el factor de dilución, la incorporación de un 10% de FCC como reemplazo del cemento contribuye a la resistencia del material adicionado en órdenes de hasta un 30%. Esto es un indicativo del uso potencial de este residuo como material suplementario en mezclas cementicias.

Palabras Clave: Catalizador gastado de Craqueo Catalítico, Cementos Adicionados, Productos de Hidratación, Resistencia mecánica a compresión

Abstract

The effect of the incorporation of a petrochemical industry waste, named spent fluid catalytic cracking (FCC) in the hydration process and microstructure of cement paste, was studied. Portland cement (OPC) pastes, with and without addition of meta-kaolin (MK) and silica fume (SF), were used as reference materials. The characterization of the type of hydration products was performed by using X-ray diffraction (XRD), thermo-gravimetric analysis (TG), scanning electron microscopy (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR). This study is complemented with the evaluation of compressive strength of blended cement mortars up to 90 days of curing. The main products of hydration in cement pastes, added with FCC, were calcium silicate hydrate (CSH); calcium aluminate hydrates (CAH) and hydrated calcium aluminosilicates (CASH). The addition of 10% of FCC reports lime consumption from 61% to 360 days of curing; this value is higher than the ones reported by the additions of MK and HS in the same percentage of addition. This indicates a higher reactivity of the FCC, which is manifested even at early ages. It should be noted that, considering the dilution factor, the addition of 10% FCC as cement replacement contributes to the strength of the blended material in the order up to an additional 30%. This is indicative of the potential use of this waste as supplementary material in cementitious mixtures.

Keywords: Fluid Catalytic Cracking Catalyst, Blended Cement, Hydration Products, Compressive Strength

1. Introducción

A nivel mundial, en el sector de la construcción, el principal material cementante es el cemento portland; sin embargo, su producción requiere altas temperaturas reflejándose en un elevado requerimiento energético, así como en la necesidad del uso de combustibles fósiles y elevado consumo de recursos naturales, lo que afecta la sostenibilidad ambiental, por lo que este proceso es considerado altamente contaminante. Esta situación ha llevado a la comunidad científica y las empresas productoras a considerar el uso de otras fuentes energéticas menos contaminantes y a incorporar materiales de adición para la sustitución parcial del cemento. En este último sentido, se han investigado distintos tipos de adiciones considerando que su incorporación al cemento se constituye en una solución económica, ecológica y técnica (Carrasco et al.,

1. Introduction

In the construction sector worldwide, Portland cement is the main cementitious material. However, its production requires the use of high temperatures, high energetic consumption, as well as the employment of fossil fuels and high consumption of natural resources, which affect environmental sustainability. Therefore, such process is considered as highly pollutant. This situation has led the scientific community and producer companies to consider the use of other less-pollutant energetic sources and, to incorporate blended material as a partial replacement of cement. In that sense, different kinds of blended material have been analyzed, considering that their addition to cement represents an economic, ecologic and technical solution (Carrasco et al., 2005).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: ruby.mejia@correounivalle.edu.co



2005). Estas adiciones pueden provenir de diversas fuentes ya sean naturales (puzolanas, piedra caliza), naturales activadas por temperatura (arcilla, metacaolín) o subproductos industriales (ceniza volante, escoria de alto horno, cascarilla de arroz) (Kumar y Monteiro, 2006). Cabe anotar, que algunos de estos materiales son considerados residuos industriales y su uso como adición al cemento trae beneficios adicionales ambientales y económicos, al no tener que disponerlos en vertederos ambientales e incrementar su valor agregado. En general, las adiciones pueden contribuir a modificar el comportamiento de morteros y concretos en estado fresco así como su desempeño a largo plazo (ACI 201). Algunos de estos materiales alternativos actúan como microfillers o microrellenos, aumentando la densidad de la pasta de cemento y formando una microestructura densa y homogénea en la zona de transición pasta-agregado, contribuyen a la reducción de la permeabilidad, incrementan propiedades mecánicas y en general permiten obtener morteros y concretos adicionados con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad. Las especificaciones y normativas de algunos países han incorporado las adiciones al reconocerlas como parte de los denominados cementos adicionados o compuestos (*blended cements*).

En los últimos años se ha reportado la utilización de un material denominado catalizador usado del craqueo catalítico (FCC, por las siglas en inglés de *Fluid Catalytic Cracking*). Este residuo procede de la industria petroquímica donde el catalizador virgen es utilizado para el refinamiento del crudo en la producción de gasolina y otros combustibles. A nivel mundial, se estima una generación de aproximadamente 400.000 toneladas/año (Zornosa et al., 2008), el cual es utilizado por algunas de las refinerías principalmente como elemento inerte para pavimentación y rellenos de caminos, y como relleno o áridos en bloques de cemento. En Colombia se estima que la generación del residuo de catalizador (FCC) es de aproximadamente 15.000 toneladas al año. Este residuo a pesar de estar en contacto con productos de la industria petroquímica, y que se han encontrado metales pesados encapsulados en su estructura, no representa peligrosidad con el ambiente, por lo que se le da una calificación de residuo sólido inerte (Torres et al., 2012).

El FCC es un material de carácter semicristalino; se caracteriza por estar formado de partículas con formas esféricas o esferoidales, altamente porosas, lo que le otorga una elevada superficie específica, que a su vez es característico de una alta reactividad (Chen et al., 2004; Paya et al., 2009; Tseng et al., 2005). La composición química de este catalizador gastado es muy similar independiente de su procedencia, está formado principalmente por Al_2O_3 en un rango de 37 – 46% y SiO_2 en un rango de 47 – 58%, y posee un tamaño de partícula promedio que oscila entre 60-70 μm (Chen et al., 2004; Tseng et al., 2005; Torres et al., 2009; Paya et al., 2003; Paya et al., 2003a; Pinto et al., 2007).

Diferentes estudios reportan que el porcentaje óptimo de FCC como adición al cemento se encuentra entre el 10% y 15%, valores que incrementan la resistencia a la compresión del cemento en ordenes del 10% y 26% respectivamente (Chen et al., 2004; Paya et al., 2009; Tseng et al., 2005); cabe anotar que estos incrementos pueden ser observados a edades tempranas, debido a sus efectos sobre la aceleración de las reacciones durante el proceso de endurecimiento.

Such blended material may come from different sources, either natural (pozzolans, limestone), natural and activated by temperature (clay, meta-kaolin) or from industrial by-products (fly ashes, high furnace slag or rice husk) (Kumar and Monteiro, 2006). It is important to highlight that some of such products are considered as industrial waste materials. Their use as blended products has some environmental and economical benefits, since waste material is not dumped into a garbage deposit, thus increasing their aggregate value. Generally, blended products may contribute by modifying green mortars and concrete behavior, as well as their performance in the long term (ACI 201). Some alternative materials work as microfillers by increasing cement paste density and by delivering a dense and homogeneous microstructure in the paste-aggregate transition zone. They contribute to the permeability reduction, to increase mechanical properties and, in general, they facilitate the production of blended mortars and concretes of proper mechanical and durability properties. In some countries, specifications and standards have incorporated blended products by admitting them as part of the so-called blended cements.

Over the past few years, the use of a fluid catalytic cracking material has been reported (FCC, English initials). This residual material comes from petrochemical industry, where the virgin catalyst is used to refine crude for gasoline and other fuels production. The worldwide production is estimated in 400,000 tons/year approximately (Zornosa et al., 2008), which is mainly used by some refineries as inert element for roads paving and filling, as well as refill or aggregate for cement blocks. In Colombia the generation of FCC catalyst residue is estimated in 15,000 tons per year. In spite of being in contact with products of the petrochemical industry and, although some heavy metals have been found in its structure, this material is not environmentally dangerous; therefore, it is classified as an inert solid residue (Torres et al., 2012).

The FCC is a semi-crystal material formed by particles of spherical or spheroid shape, of highly porous nature, thus providing an increased specific surface which is quite typical of high reactivity (Chen et al., 2004; Paya et al., 2009; Tseng et al., 2005). The chemical composition of this spent catalyst is quite similar, no matter what its origin is. It is mainly formed by Al_2O_3 within a range of 37 – 46% and SiO_2 within a range of 47 – 58%. It has an average particle size ranging from 60-70 μm (Chen et al., 2004; Tseng et al., 2005; Torres et al., 2009; Paya et al., 2003; Paya et al., 2003a; Pinto et al., 2007).

Different studies suggest that the optimum FCC percentage, as cement blended material, is between 10 and 15%, values that increase cement compressive strength from 10% to 26%, respectively (Chen et al., 2004; Paya et al., 2009; Tseng et al., 2005). It is important to indicate that such increases may be observed at early ages, due to the effects of blended material on the acceleration reactions during the hardening process.

Aunque el FCC está demostrado es un material altamente reactivo, existe la posibilidad de incrementar su reactividad mediante procesos de activación térmica o mecánica (Paya et al., 2000). Adicionalmente, algunos investigadores han demostrado que morteros y concretos adicionados con 20% FCC presentan un buen comportamiento frente a cloruros y sulfatos Pacewska et al., 2000; Zornosa, 2007).

El presente artículo tiene como objetivo analizar el desarrollo microestructural y el proceso de hidratación de pastas de cemento adicionadas con 10% y 20% de FCC como reemplazo de cemento en la misma proporción, para lo cual se han utilizado como materiales de referencia dos puzolanas ampliamente estudiadas, una de carácter aluminico (metacaolín, MK) y otra silíceo (humo de sílice, HS) adicionadas en un 10%.

2. Materiales y procedimiento experimental

2.1 Materiales

Para la realización del estudio, se utilizó un residuo de catalizador del proceso de craqueo catalítico (FCC) el cual fue suministrado por una industria petrolera colombiana; las características físicas y químicas son presentadas en la Tabla 1.

Although it is demonstrated that this is a highly reactive element, it is possible to increase its reactivity by means of thermal or mechanical activation processes (Paya et al., 2000). Furthermore, some researchers have demonstrated that blended mortars and cements with 20% FCC have a proper behavior, when facing chlorides and sulfates attacks (Pacewska et al., 2000; Zornosa, 2007).

The purpose of the present paper is to analyze the micro-structural development and the hydration process of blended cement pastes at 10% and 20% FCC, as replacement for cement in the same proportions; consequently two widely studied pozzolans have been employed as reference materials: one of aluminum nature (meta-kaolin, MK) and the other of siliceous nature (silica fume, SF) containing 10% of blended material.

2. Materials and experimental procedure

2.1 Materials

For the execution of this study, a fluid catalytic cracking residue (FCC) was employed, which was supplied by a Colombian petro-chemical industry. Its physical and chemical characteristics are shown by Table 1.

Tabla 1. Características químicas y físicas de los materiales utilizados
Table 1. Chemical and Physical Characteristics of employed material

Características/ Characteristics	FCC	MK	HS/ SF	Cemento/ Cement (OPC)
Composición química, %/ Chemical composition, %				
Oxido de Sílice, SiO ₂ / Silicon Dioxide, SiO ₂	44,13	53,00	>90,00	19,43
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃ / Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃	46,06	43,80	-	4,00
Oxido de Hierro, Fe ₂ O ₃ / Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	0,81	0,43	-	3,61
Oxido de Calcio, CaO/ Calcium Oxide, CaO	0,52	0,02	-	64,46
Oxido de Magnesio, MgO/ Magnesium Oxide, MgO	-	0,03	-	1,52
Oxido de Potasio, K ₂ O/ Potassium Oxide, K ₂ O	0,11	0,19	-	0,39
Oxido de Titanio, TiO ₂ / Titanium Oxide, TiO ₂	0,67	1,70	-	0,34
Pérdidas por ignición, LOI/ Loss by Ignition, LOI	6,50	0,46	6	2,58
Propiedades Físicas/ Physical Properties				
Densidad (Kg/m ³)/ Density (Kg/m ³)	2,63	2,60	2,01	3,15
Tamaño medio de partícula (µm)/ Average particle size (µm)	16,15	1,20	0,20-0,50	23,00

En esta Tabla 1 se observa que el FCC está compuesto en gran parte por alúmina y sílice, en un orden cercano al 90% y con un tamaño promedio de partícula de 16,15 µm. Otros materiales utilizados en el estudio, además del cemento portland no adicionado (OPC), son Humo de sílice (HS) y metacaolín (MK), cuyas características se incluyen en la misma Tabla 1 y son utilizados como materiales de referencia con fines comparativos.

Table 1 shows that FCC is mainly formed by aluminum and silica in almost 90% and its average particle size is 16.15 µm. Other materials employed by this study, in addition to the non-blended Portland cement (OPC), are Silica Fume (SF) and Meta-kaolin (MK), which characteristics are included in the same Table 1. They were used as reference material, for comparison purposes only.

En la Figura 1 se presentan las imágenes de la observación por microscopía electrónica de barrido (SEM) del FCC, se confirma que las partículas son de formas esféricas o esferoidales con una alta porosidad lo que le confiere una alta superficie específica y se refleja en una alta reactividad.

Figure 1 shows the pictures from scanning electron microscopy (SEM) for the FCC. It is demonstrated that particles have a spherical or spheroid shape, with a high porosity, which provides a high specific surface reflected by a high reactivity.

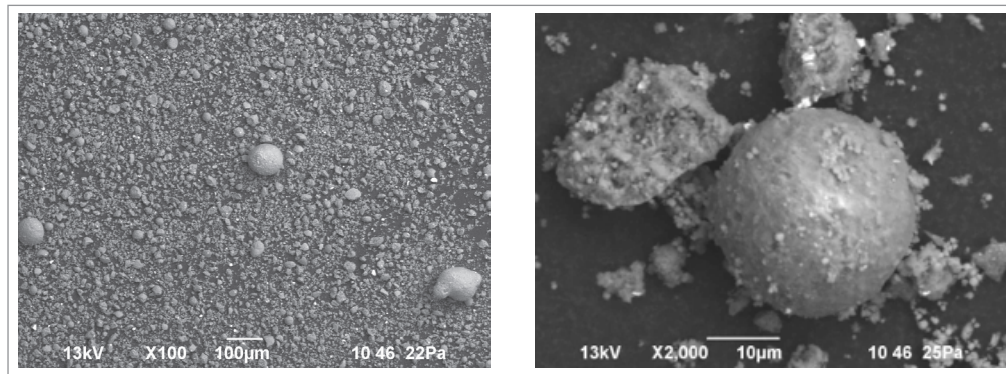


Figura 1. Micrografía SEM del catalizador gastado del craqueo catalítico (FCC)

Figure 1. Scanning Electron Microscopy (SEM) for the spent Fluid Cracking Catalyst Residue (FCC)

2.2 Preparación de mezclas y técnicas utilizadas

Para el seguimiento del proceso de hidratación se elaboraron pastas de cemento Portland Ordinario (OPC), con y sin adición. Las pastas fueron preparadas con una relación agua/cementante (a/C) de 0,35 y una sustitución de cemento por FCC en proporción del 10% y 20%. Como materiales de referencia, además del cemento portland (OPC) sin adición, se utilizaron cementos con incorporación de metacaolín (MK) y humo de sílice (HS) en proporción del 10%. Las muestras fueron curadas a temperatura ambiente en agua saturada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por diferentes periodos de 7, 28, 90, 180 y 360 días. Al cumplir la etapa de curado se procedió a la molienda y “congelación” de los materiales con acetona y etanol, para evitar el avance de las reacciones. Finalmente los materiales se caracterizaron mineralógicamente y microestructuralmente utilizando análisis termogravimétrico (TG), difracción de rayos X (DRX), resonancia magnética nuclear (NMR) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Adicionalmente se evaluó la resistencia mecánica a compresión de los cementantes adicionados con FCC.

2.2 Blended pastes preparation and employed techniques

In order to monitor the hydration process, Ordinary Portland Cement pastes (OPC) were elaborated with and without blended materials. Pastes were prepared with a water/binder ratio (w/B) of 0.35% and the replacement of cement by FCC, in the proportion of 10% and 20%. Besides non-blended Portland cement (OPC), cements were used with addition of meta-kaolin (MK) and silica fume (SF) in a proportion of 10%, as reference materials. The samples were cured at room temperature in saturated water with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ during different periods comprising 7, 28, 90, 180 and 360 days. When curing stage was completed, the samples were grinded and “frozen” by using acetone and ethanol, so as to avoid the progress of reactions. Finally the materials were characterized by their mineral and micro-structural composition by using the thermo-gravimetric analysis (TG), x-ray diffraction (DRX), nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM) analyses. Furthermore, the mechanical compressive strength for FCC blended cements was also assessed.

3. Discusión y análisis de resultados

3.1 Estudio por la técnica de Termogravimetría – Consumo de Portlandita.

La técnica de análisis termogravimétrico (TG/DTG), se realizó en un equipo TA Instruments SDT Q600, a una velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, en una atmósfera de nitrógeno y un flujo de 100 ml/min utilizando crisol de alúmina. La Figura 2 muestra las curvas DTG de la pasta referencia (100% OPC) y las pastas adicionadas con FCC, MK y HS a las diferentes edades de curado, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

El pico número 1 de la Figura 2, ubicado a una temperatura entre $115\text{-}120^\circ\text{C}$, corresponde a la deshidratación del silicato cálcico hidratado (CSH) y se encuentra solapado con el pico 2 correspondiente a la etringita, este último pico está ubicado a una temperatura entre $100\text{-}180^\circ\text{C}$.

3. Discussion and results analysis

3.1 Study by means of Thermo-gravimetric analysis – Portlandite consumption

The thermo-gravimetric analysis (TG/DTG) was carried out by a TA Instrument device SDT Q600, at heating speed of $10^\circ\text{C}/\text{min}$, under a nitrogen atmosphere with a flow of 100 ml/min by employing an alumina crucible. Figure 2 shows the DTG curves of reference paste (100% OPC) and pastes blended with FCC, MK, SF at different curing ages, 7, 28, 90, 180 and 360 days.

The peak number 1 on Figure 2, located at a temperature between $115\text{-}120^\circ\text{C}$, corresponds to the dehydration of calcium silicate hydrate (CSH) and, it is overlapped with peak number 2 corresponding to ettringite, which is located at a temperature ranging from $100\text{-}180^\circ\text{C}$.

El pico número 3 (180-240 °C) es atribuido a la deshidratación de los aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y los silicoaluminatos cálcicos hidratados (CASH). Finalmente el pico 4, ubicado alrededor de los 400 °C, corresponde a la deshidroxilación del hidróxido de calcio (CH) y un pequeño pico en la región de 700°C corresponde a la descomposición de Carbonato de Calcio proveniente de una leve carbonatación del material durante los procesos de curado y preparación de la muestra para el ensayo. Se puede observar que a medida que avanza la hidratación del material se producen cambios en el gráfico DTG; estos cambios son debidos al incremento de los productos de hidratación.

Peak 3 in the range of 180-240°C is attributable to the dehydration process of calcium aluminate hydrates (CAH) and; hydrated calcium aluminosilicates (CASH). Finally peak number 4, around 400°C, corresponds to the de-hydroxylation of calcium hydroxide (CH), and a minor peak in the area at 700°C corresponds to the decomposition of blended carbonate for the test sample. It can be observed that as long as material hydration progresses some changes take place on the DTG graph. Such changes are provoked by the increase of hydration products.

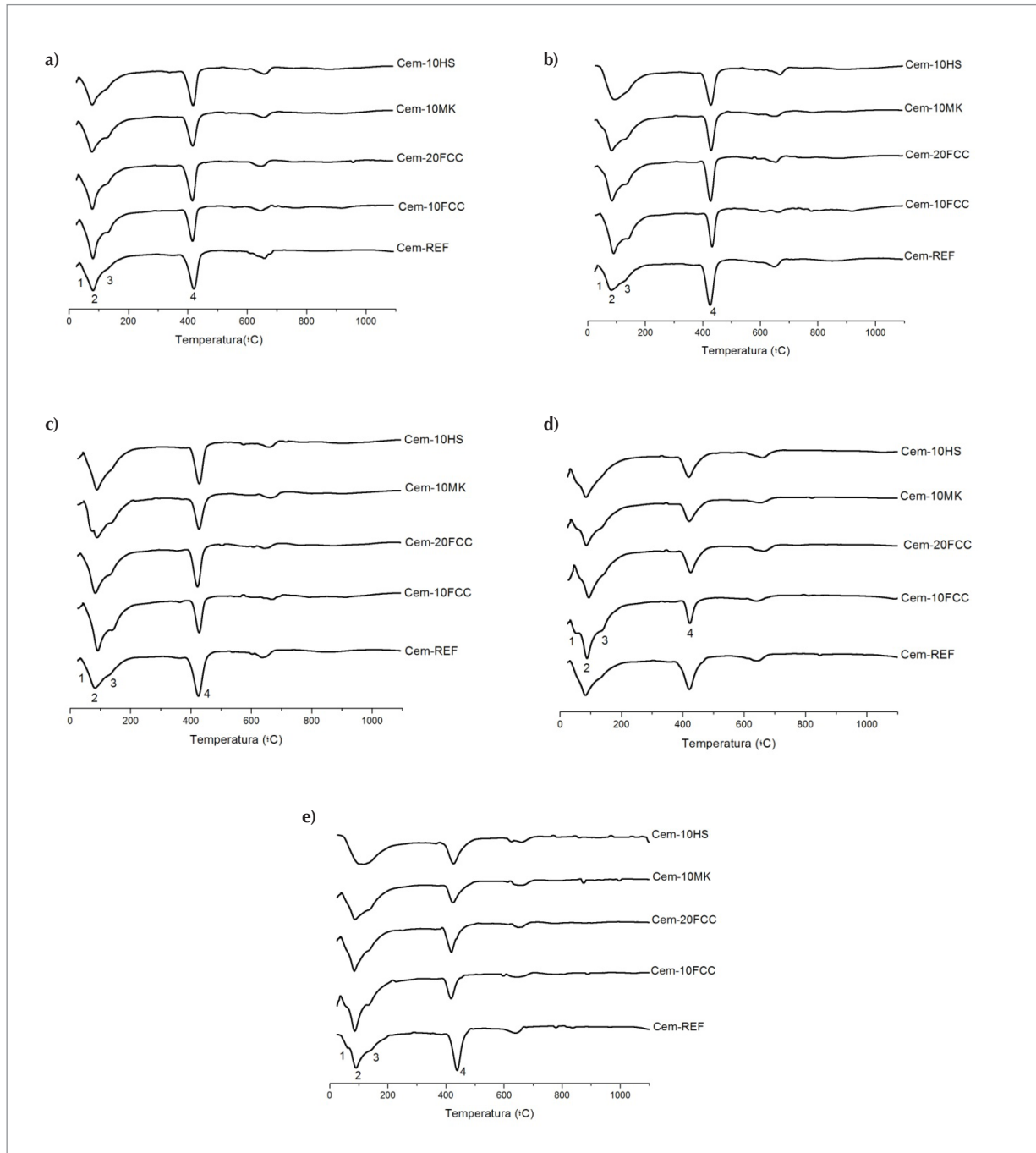


Figura 2. Curvas DTG a diferentes edades de curado. a) 7 días, b) 28 días, c) 90 días, d) 180 días y e) 360 días
Figure 2. DTG curves at different curing ages. A) 7 days; b) 28 days; c) 90 days; d) 180 days and; e) 360 days

A partir de los siete (7) días de curado, se observa que el pico 3 es mayor para las pastas con adición de FCC y MK, lo cual se debe al aporte de alúmina (Tabla 1) y al avance de las reacciones puzolánicas. Este comportamiento coincide con el reportado en otras investigaciones (Pacewska et al., 1998; Pacewska et al., 2000; Borrachero et al., 2002; Dweck et al., 2008). Las gráficas DTG permiten concluir que los productos de hidratación obtenidos con la adición de FCC son muy similares a los reportados por la reacción entre el metacaolín, el humo de sílice y el cemento.

Al analizar el pico ubicado alrededor de 400°C, perteneciente a la deshidroxilación del hidróxido de calcio (CH), se observa que las muestras con adición presentan menor cantidad de hidróxido de calcio en comparación a las muestras sin adición, esto a lo largo de todas las edades de curado, confirmando así el carácter puzolánico del FCC, MK y HS. En general, el cemento con adición del 10% FCC presenta una menor cantidad de CH en comparación a los adicionados con MK y HS en el mismo porcentaje, lo que indica una mayor reactividad del FCC.

El avance en el proceso de hidratación del cemento adicionado está relacionado a la actividad puzolánica del material de adición, la cual puede ser confirmada a partir del consumo del hidróxido de calcio evaluado a partir de la estimación de la pérdida de peso entre 400 y 500°C de la Figura 2. El porcentaje de cal que fijaron el FCC, MK y HS debido a la reacción puzolánica se calculó siguiendo la Ecuación 1 (Tseng et al., 2005; Paya et al., 2003; Zhang et al., 2012).

$$\% \text{ cal fijada} = \frac{(CH)_0 - (CH)_p}{(CH)_0} * 100 \quad (1)$$

Donde, $(CH)_0$ es la cantidad inicial de Ca(OH)_2 presente en la pasta OPC/FCC y $(CH)_p$ es la cantidad de Ca(OH)_2 de la misma pasta a una edad determinada.

Los resultados obtenidos de la Ecuación 1 se presentan en la Tabla 2; en esta se aprecia que el 10% de FCC al cemento presenta la mayor reactividad a lo largo de las edades de curado analizadas, así a 7, 28, 90, 180 y 360 días de curado se reportan consumos de 38,84%, 44,07%, 46,46%, 57,71% y 61,44%, respectivamente; en general, estos valores son superiores a los reportados por las adiciones de MK y HS. Cabe anotar, que la adición del 20% de FCC también reporta valores superiores de consumo de cal en comparación a las otras adiciones, con excepción de 90 y 180 días de curado, donde el consumo fue ligeramente inferior. Este comportamiento coincide con el reportado por otros investigadores (Torres et al., 2009; Pacewska et al., 1998; Pacewska et al., 2002). Los valores aquí presentados aclaran algunos resultados atípicos reportados en anteriores estudios para edades de curado de hasta 28 días (Trochez et al., 2010).

As from seven (7) curing days, it is observed that peak 3 is higher for FCC and MK blended pastes, due to the high alumina content (Table 1) and the progress of pozzolanic reactions. This behavior matches with the one reported by other researches (Pacewska et al., 1998; Pacewska et al., 2000; Borrachero et al., 2002; Dweck et al., 2008). DTG graphs allow us to conclude that hydration products obtained from FCC addition are quite similar to the ones reported by the reaction between meta-kaolin, silica fume and cement.

By analyzing the peak around 400°C, corresponding to the dehydration of calcium hydroxide (CH), it is observed that blended samples contain less amount of calcium hydroxide in comparison to non-blended samples, throughout all curing ages, therefore, proving the pozzolanic nature of FCC, MK and SF. In general, 10% FCC blended cement shows a lower amount of CH, in comparison to the ones containing MK and SF at the same percentage, thus showing a higher reactivity by FCC.

The progress of dehydration of blended cement is associated to the pozzolanic activity of blended material, which can be confirmed by the calcium hydroxide activity consumption assessed from the weight loss calculation between 400 and 500°C on Figure 2. Affixed lime percentage reported by FCC, MK and SF, due to pozzolanic reaction, was calculated by means of the Equation 1 (Tseng et al., 2005; Paya et al., 2003; Zhang et al., 2012).

Where $(CH)_0$ is the initial amount of Ca(OH)_2 contained by the paste OPC/FCC and; $(CH)_p$ is the amount of Ca(OH)_2 in the same paste, at a given age.

The results obtained by Equation 1 are presented by Table 2, which shows that 10% FCC blended cement at has the greatest reactivity, throughout different curing ages under study. Consequently, at 7, 28, 90, 180 and 360 curing days, consumptions of 38.84%, 44.07%, 46.46%, 57.71% and 61.44%, are reported respectively. Generally, such values are higher than the ones reported by MK and SF blended pastes. It is important to mention that the 20% FCC addition also reports higher lime consumption in comparison to other blended pastes, excepting for 90 and 180 days of curing, where the consumption was slightly lower. This behavior is in line with the one reported by other researchers (Torres et al., 2009; Pacewska et al., 1998; Pacewska et al., 2002). The values here presented explain some unusual results reported by former studies regarding curing ages up to 28 days (Trochez et al., 2010).

Tabla 2. Porcentaje de cal fijada para cada tipo de adición
Table 2. Percentage of affixed lime for each blended material

Consumo de Cal (%) Lime consumption (%)	7 días 7 days	28 días 28 days	90 días 90 days	180 días 180 days	360 días 360 days
10% FCC	38,84	44,07	46,46	57,71	61,44
20% FCC	32,17	33,65	37,03	42,89	47,22
10% MK	28,39	33,19	38,87	43,81	45,77
10% HS/ SF	20,29	25,89	29,34	33,91	33,30

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos al evaluar la resistencia mecánica a compresión (ver Figura 3), donde se destaca el desempeño de la mezcla con 10% FCC.

Above results are in line with the ones obtained from mechanical compressive strength (see Figure 3), highlighting the performance of 10% FCC paste.

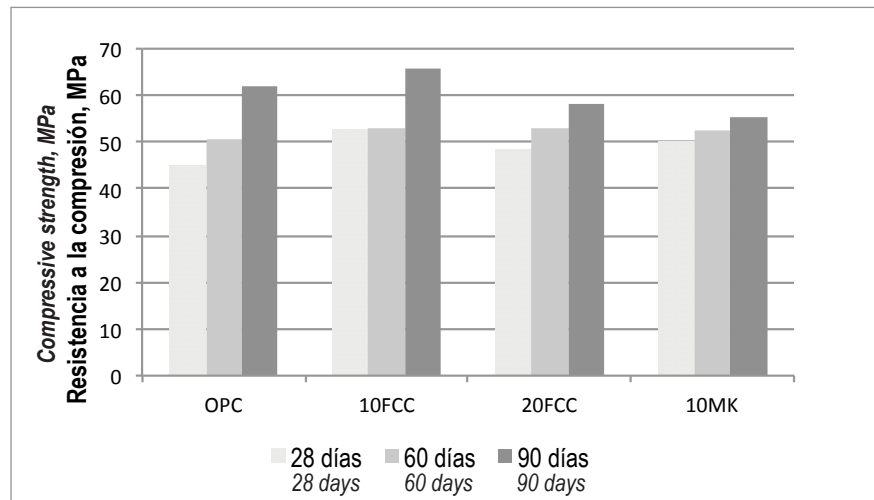


Figura 3. Resistencia de los morteros con y sin adición
Figure 3. Mortars pastes compressive strength, with and without addition

3.2 Análisis de NMR - NMR ²⁹Si de pastas hidratadas

La técnica de espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR) de ²⁹Si se utiliza para identificar el grado de polimerización de los silicatos en la pasta hidratada. Las señales en el espectro que se obtienen son dependientes de la longitud y ángulo del enlace Si-O-Si así como de los átomos vecinos. Inicialmente, las fases anhidras del cemento corresponden a Q0 (-66 a -74 ppm), donde el átomo de Silicio no comparte oxígenos con otros vecinos, y a medida que la hidratación transcurre se da lugar a la polimerización obteniéndose dímeros (Q1, -75 a -82 ppm) o cadenas (Q2, -85 a -95 ppm), dando origen al CSH. La sustitución del Si en el tetraedro por átomos de aluminio (Qn (xAl)), desplaza la señal del espectro hacia valores más positivos. La Figura 4 muestra los espectros NMR 10% ²⁹Si de la pasta de referencia y las pastas adicionadas con FCC, MK y HS, a edades de 1, 7 y 90 días de curado. En todos los espectros se pueden observar componentes del cemento anhidro sin reaccionar a resonancias estrechas ubicadas en -71.3 ppm y -73.3 ppm atribuibles a la belita (C2) y la alita (C3) respectivamente, así como resonancias amplias no muy resueltas con picos pertenecientes a tetraedros Qⁿ de silicato cálcico hidratado (CSH) (Kjorth et al., 1988; Brough et al., 1994; Cong et al., 1998).

3.2 NMR - NMR ²⁹Si analysis on hydrated pastes

The ²⁹Si Nuclear magnetic resonance technique (NMR) is used to identify the level of silicate polymerization on the hydrated paste. The obtained spectrum signals depend on the length and angle of the Si-O-Si link, as well as on the adjacent atoms. Initially, the cement anhydrous phases correspond to Q0 (-66 a -74 ppm), where the silicon atom does not share oxygen with adjacent atoms. As long as hydration progresses, polymerization takes place delivering dimers (Q1, -75 a -82 ppm) or chains (Q2, -85 a -95 ppm), making room for CHS. The replacement of Si in the tetrahedron by aluminum atoms (Qn (xAl)) displaces the spectrum signal towards more positive values. Figure 4 show the NMR ²⁹Si spectrums on the reference paste and 10% FCC, MK and SF blended pastes at ages of 1, 7 and 90 curing days. All spectrums contain non-reactive anhydrous cement components at close resonances ranging from -71.3 ppm and -73.3 ppm attributable to belite (C3) and alite (C2), respectively. The spectrums also contain wide resonances, still unresolved, with peaks pertaining to Qⁿ tetrahedrons of calcium silicate hydrate (CSH) (Kjorth et al., 1988; Brough et al., 1994; Cong et al., 1998).

Las resonancias de esta fase se originan en los grupos de tetraedros de SiO_4 ubicados al final de las cadenas (Q1, a -78ppm), en el centro de las cadenas (Q², a -85 ppm) y ubicados en posición de puente (Q^{2p}, a -82 ppm). Por último se puede observar un pico a -81 ppm, perteneciente a la resonancia de un tetraedro de SiO_4 con un tetraedro de AlO_4 como vecino más cercano (Q² (1Al)) (Richardson et al., 1993; Andersen et al., 2003).

This phase resonances are originated in the SiO_4 tetrahedrons groups located at the end of chains (Q1, a -78ppm), at the center chains (Q², a -85 ppm) and, located at bridging position (Q^{2p}, a -82 ppm). Finally there is a peak at -81 ppm, pertaining to the resonance of a SiO_4 tetrahedron and AlO_4 tetrahedron as the closest neighbor (Q² (1Al)) (Richardson et al., 1993; Andersen et al., 2003).

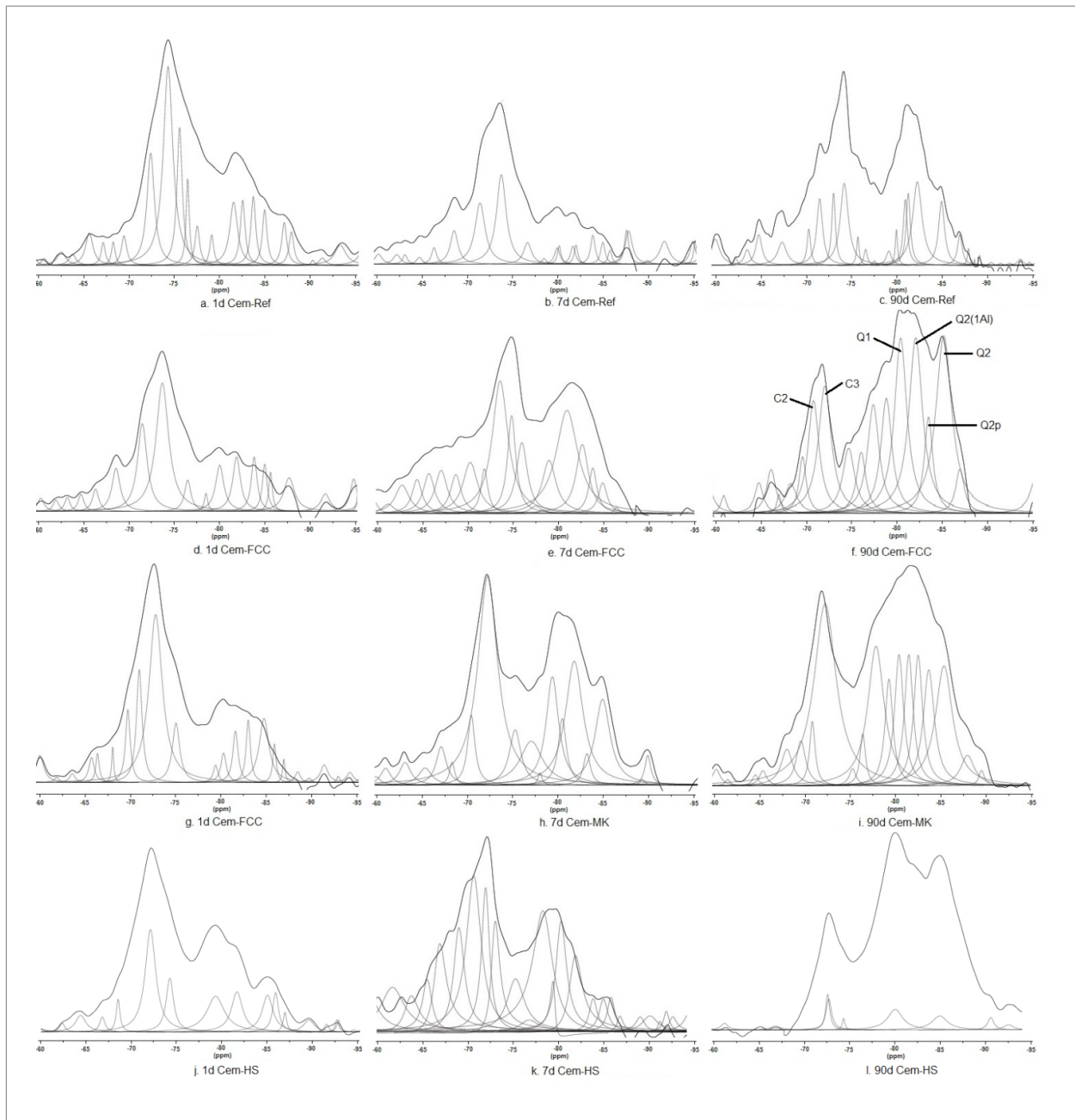


Figura 4. Espectro NMR ^{29}Si de muestra de cemento hidratado a: a). 1 día (Cem-Ref) b). 7 días (Cem-Ref) c). 90 días (Cem-Ref) d). 1 día (Cem-FCC) e). 7 días (Cem-FCC) f). 90 días (Cem-Ref) g). 1 día (Cem-MK) h). 7 días (Cem-MK) i). 90 días (Cem-MK) j). 1 día (Cem-HS) k). 7 días (Cem-HS) l). 90 días. C2: silicato bicálcico (SC_2), C3: silicato tricálcico (SC_3)

Figure 4. NMR ^{29}Si spectrum of hydrated cement sample at: a). 1 day (Ref-Cem) b). 7 days (Ref-Cem) c). 90 days (Ref-Cem) d). 1 day (FCC-Cem) e). 7 days (FCC-Cem) f). 90 days (Ref-Cem) g). 1 day (MK-Cem) h). 7 days (MK-Cem) i). 90 days (MK-Cem) j). 1 day (SF-Cem) k). 7 days (SF-Cem) l). 90 days. C2: bicalcium silicate (SC_2), C3: tricalcium silicate (SC_3)

Al incrementar el tiempo de curado se observa la disminución de los picos C2 y C3, seguido de un incremento en la cantidad de las especies de SiO_4 , Q¹, Q²(1Al), Q² y Q^{2p}, correspondientes a la fase CSH, confirmando así el avance del proceso de hidratación; en particular a los 90 días de curado se observa un mayor grado de reacción en las pastas con adición de FCC y MK. Es de anotar, que en este caso las unidades Q²(1Al) incrementan en mayor grado; este comportamiento obedece al mayor porcentaje de Al_2O_3 presente en la composición química de estas adiciones en comparación a las pastas patrón y las pastas con adición de HS. Al incrementar el grado de sustitución del Si por Al en las posiciones de puente de la cadena de CSH, también se puede conducir a una aceleración de la velocidad de hidratación de la Belita (Andersen et al., 2004).

3.3 Análisis de NMR - NMR ²⁷Al de pastas hidratadas

Los estudios de NMR ²⁷Al en pastas de cemento hidratado permiten hacer el seguimiento de la hidratación de las fases de aluminato cálcico mediante la observación de las especies de Al coordinado tetraédrica, Al (IV), y octaédricamente, Al (VI) (Andersen et al., 2003; Faucon et al., 1998; Faucon et al., 1998a). La figura 5 muestra los espectros NMR ²⁷Al de las pastas adicionadas a 1, 7 y 90 días de curado, donde se aprecia una señal alrededor de 13 ppm en todos los espectros correspondiente al Al(VI) de la etringita (Brunet et al., 2010); la presencia de esta fase se corrobora con los resultados obtenidos en el análisis de DRX. Por otra parte, se debe considerar la resonancia alrededor de 74 ppm atribuida al Al(IV) incorporado en las cadenas de CSH. Estos reemplazos de Si por Al en los tetraedros de estas cadenas es soportado por la observación de Q²(1Al) en NMR ²⁹Si. Este comportamiento es más pronunciado a los 90 días de curado, tanto en las pastas referencia como en las pastas con las diferentes adiciones. Algunos autores mencionan que la resonancia del Al(IV) del aluminato tricálcico (C₃A) en el cemento anhídrido se encuentra a valores aproximadamente de 80 ppm, seguido de un desplazamiento a valores más bajos durante el desarrollo del proceso de hidratación, como consecuencia principalmente del Al(IV) en el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF), este comportamiento fue observado en todos los espectros analizados (Brunet et al., 2010).

By raising curing ages, a decrease of peaks C2 and C3 is observed, followed by an increased amount of SiO_4 , Q¹, Q²(1Al), Q² and Q^{2p}, which correspond to the CSH phase, thus confirming the progress of hydration process. Particularly, the highest reaction level is observed on FCC and MK blended pastes at 90 curing days. It is worth mentioning that in such a case, Q²(1Al) units are highly increased. Such behavior is derived from the high percentage of Al_2O_3 available in the chemical composition of such blended pastes, in comparison to pattern pastes and SF pastes. By increasing the replacement level of Si by Al in bridging positions, in the CSH chain, may lead to the acceleration of Belite hydration speed (Andersen et al., 2004).

3.3 NMR - NMR ²⁷Al analysis on hydrated pastes

NMR ²⁷Al studies on hydrated cement pastes allow us to monitor calcium aluminate hydration phases, by means of the observation of combined tetrahedral Al samples, Al (IV); and octahedral, Al (VI) (Andersen et al., 2003; Faucon et al., 1998; Faucon et al., 1998a). Figure 5 presents NMR ²⁷Al spectrums of blended pastes at 1, 7 and 90 curing days, where a signal of about 13 ppm is available for all the spectrums corresponding to Al(VI) of ettringite (Brunet et al., 2010). The presence of such phase is proven by the results obtained from DRX analysis. On the other hand, a resonance close to 74 ppm, which is attributed to the Al(IV) added to CSH chains, shall be considered. The replacements of Si by Al in the chain tetrahedrons are supported by the observation of Q²(1Al) on NMR ²⁹Si. This behavior is prominent at 90 curing days, as much for reference pastes as for different blended pastes. Some researches state that the Al(IV) resonance of tri-calcium aluminate (C₃A) on anhydrous cement is close to 80 ppm, followed by displacement of lower values during the progress of hydration process, mainly as a consequence of Al(IV) in the tetra-calcium ferro-aluminate (C₄AF). This behavior was observed in all analyzed spectrums (Brunet et al., 2010).

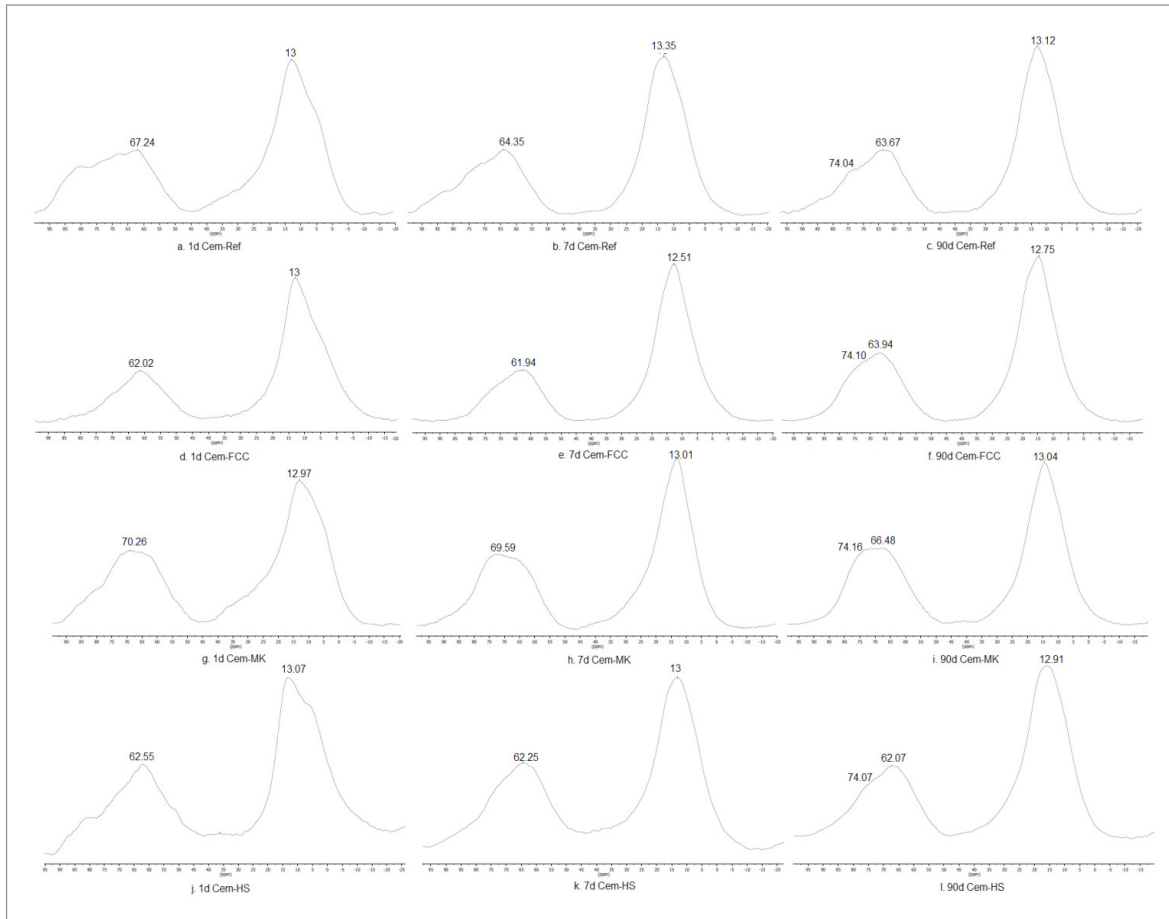


Figura 5. Espectro NMR ^{27}Al de muestra de cemento hidratado a: a). 1 día (Cem-Ref) b). 7 días (Cem-Ref) c). 90 días (Cem-Ref) d). 1 día (Cem-FCC) e). 7 días (Cem-FCC) f). 90 días (Cem-Ref) g). 1 día (Cem-MK) h). 7 días (Cem-MK) i). 90 días (Cem-MK) j). 1 día (Cem-HS) k). 7 días (Cem-HS) l). 90 días

Figure 5. NMR ^{27}Al spectrum of hydrated cement sample at: a). 1 day (Ref-Cem) b). 7 days (Ref-Cem) c). 90 days (Ref-Cem) d). 1 day (FCC-Cem) e). 7 days (FCC-Cem) f). 90 days (Ref-Cem) g). 1 day (MK-Cem) h). 7 days (MK-Cem) i). 90 days (MK-Cem). 1 day (SF-Cem) k). 7 days (SF-Cem) l). 90 days

3.4 Evaluación por difracción de rayos X

En la Figura 6 se presentan los resultados de la técnica de difracción de rayos X. En esta Figura se observa que todos los patrones de difracción son similares, sin embargo las intensidades de los productos de hidratación son diferentes.

3.4 X-ray diffraction analysis

Figure 6 present the results of X-ray diffraction technique. This Figure shows that all diffraction patterns are similar; however the intensity of blended products is different.

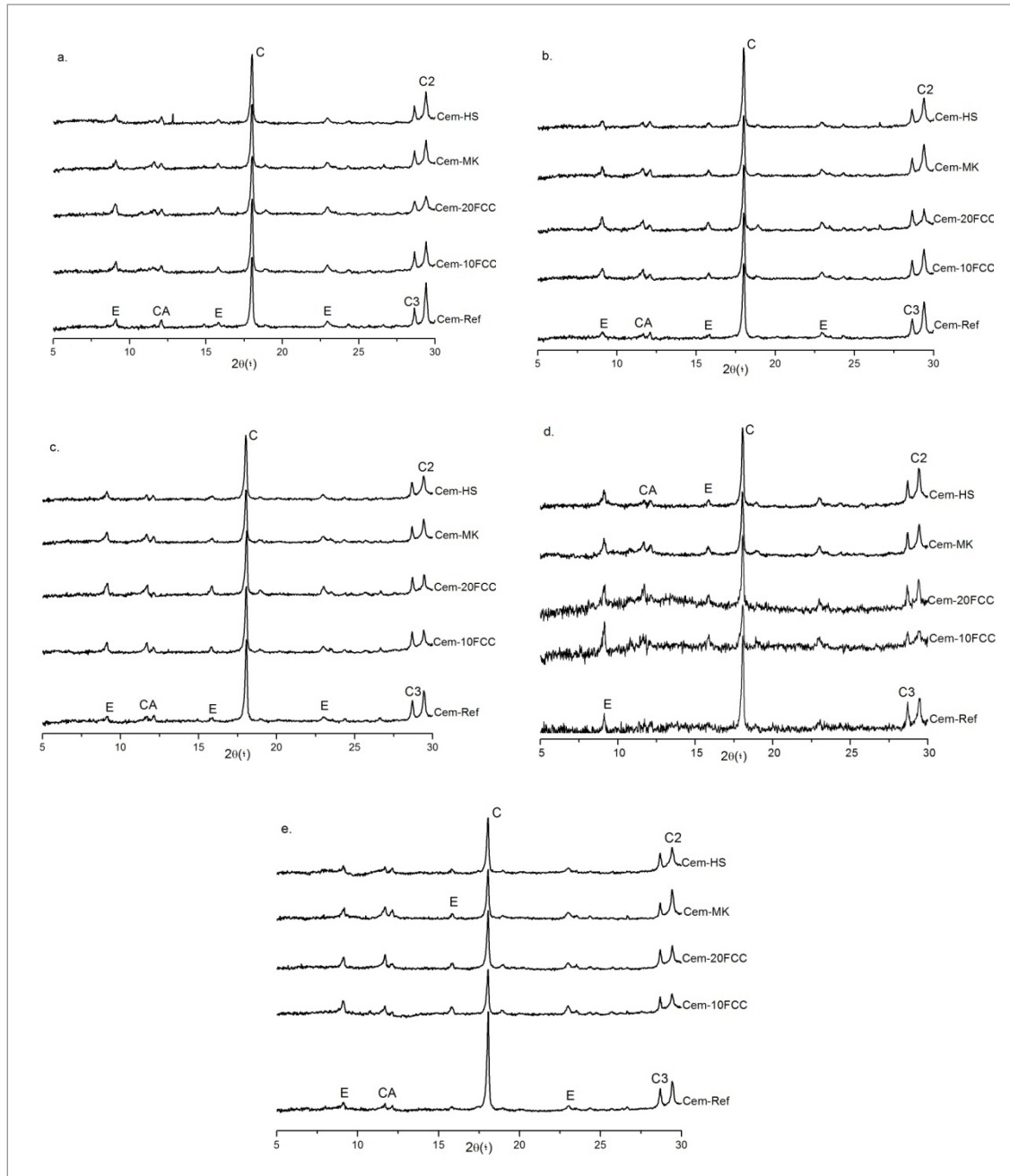


Figura 6. Difractogramas de pastas de OPC adicionadas con FCC, MK y HS. a) 7 días, b) 28 días, c) 90 días, d) 180 días y e) 360 días. E: Etringita, CA: CAH10, C: Ca(OH)₂, C3: Silicato tricálcico (SC3), C2: Silicato bicálcico (SC2)

Figure 6. Diffraction graphs of OPC pastes blended with FCC, MK and SF. a) 7 days, b) 28 days, c) 90 days, d) 180 days and e) 360 days. E: Ettringite, CA: CAH10, C: Ca (OH)₂, C3: Tricalcium Silicate (SC3), C2: Bicalcium Silicate (SC2)

Los productos de hidratación observados son: aluminatos cálcicos hidratados, etringita y portlandita, confirmando los resultados obtenidos por las técnicas TG / DTG y NMR. Silicatos bicálcicos (C2) y tricálcicos (C3), también se observaron en todas las pastas evaluadas, presentando una disminución con el tiempo de curado, evidencia del avance progresivo del proceso de hidratación. Se resalta que existe menor disposición de estos silicatos en las pastas con adición del 20%, comportamiento atribuido por García de Lomas et al. (2007) al efecto de dilución debido al mayor porcentaje de sustitución realizado.

The observed hydration products are: calcium silicate hydrates, ettringite and portlandite, which confirm the results obtained by TG / DTG and NMR techniques. Bicalcium silicates (C2) and Tricalcium silicates (C3) were also observed in all the analyzed pastes, which show a decrease throughout curing ages, thus evidencing a progressive advance of hydration process. It is worth highlighting that the ability of such silicates is lower for 20% blended pastes. This behavior is attributed, by Garcia de Lomas et al. (2007), to the dilution effect provoked by the higher percentage of replacement carried out.

Este mismo comportamiento frente a las edades de curado, fue observado en el pico correspondiente a la portlandita, ubicado a un valor 2θ alrededor de 17,8. A edades tempranas, se ve una disminución más marcada en las pastas con adición de FCC y MK; este comportamiento es debido a la similitud en sus características químicas. A la edad de 90 días las muestras adicionadas, presentan una disminución significativa de la portlandita en comparación a las pastas patrón, concordando con resultados reportados por Hsu et al. (2001). El pico de intensidad reducida, ubicado a un valor 2θ de 8.6 corresponde a la fase etringita.

3.5 Observación por microscopía electrónica

En la Figura 7 se presentan las micrografías SEM de las pastas de cemento referencia y adicionadas con FCC, MK y HS curadas a 3 días. Estas micrografías confirman la presencia de los productos de hidratación encontrados en el análisis por difracción de rayos X. En las pastas de cemento referencia y con adición de humo de sílice se observan pequeñas agujas, indicando la formación de etringita, sin embargo las pastas adicionadas con FCC y MK poseen una mayor cantidad de esta fase, además de la presencia de aluminatos cálcicos hidratados en forma de hexágonos, debido a su alto contenido de Al_2O_3 . En general todas las pastas presentan la formación del gel silicato cálcico hidratado.

In relation with curing ages, the same behavior was observed for the portlandite peak, located at a value of 2θ around 17.8. At early ages, a marked decrease is observed for FCC and MK blended pastes, which behavior is due to similarities of chemical composition. At 90 curing days, blended samples show a significant portlandite decrease in comparison to pattern pastes, thus matching the results reported by Hsu et al. (2001). Reduced peak intensity, located at a value of 2θ around 8.6, corresponds to the ettringite phase.

3.5 Scanning electron microscopy analysis

Figure 7 presents the SEM micrographs of reference cement pastes and FCC, MK and FS blended pastes cured at 3 days. Such micrographs confirm the presence of hydration products found by the X-ray diffraction analysis. Small needles are observed in the reference cement pastes and SF blended pastes, thus indicating the formation of ettringite; however, FCC and MK blended pastes have a higher amount of ettringite and they contain calcium aluminate hydrates of hexagon shape, due to a high content of Al_2O_3 . In general all pastes show the formation of calcium silicate hydrate gel.

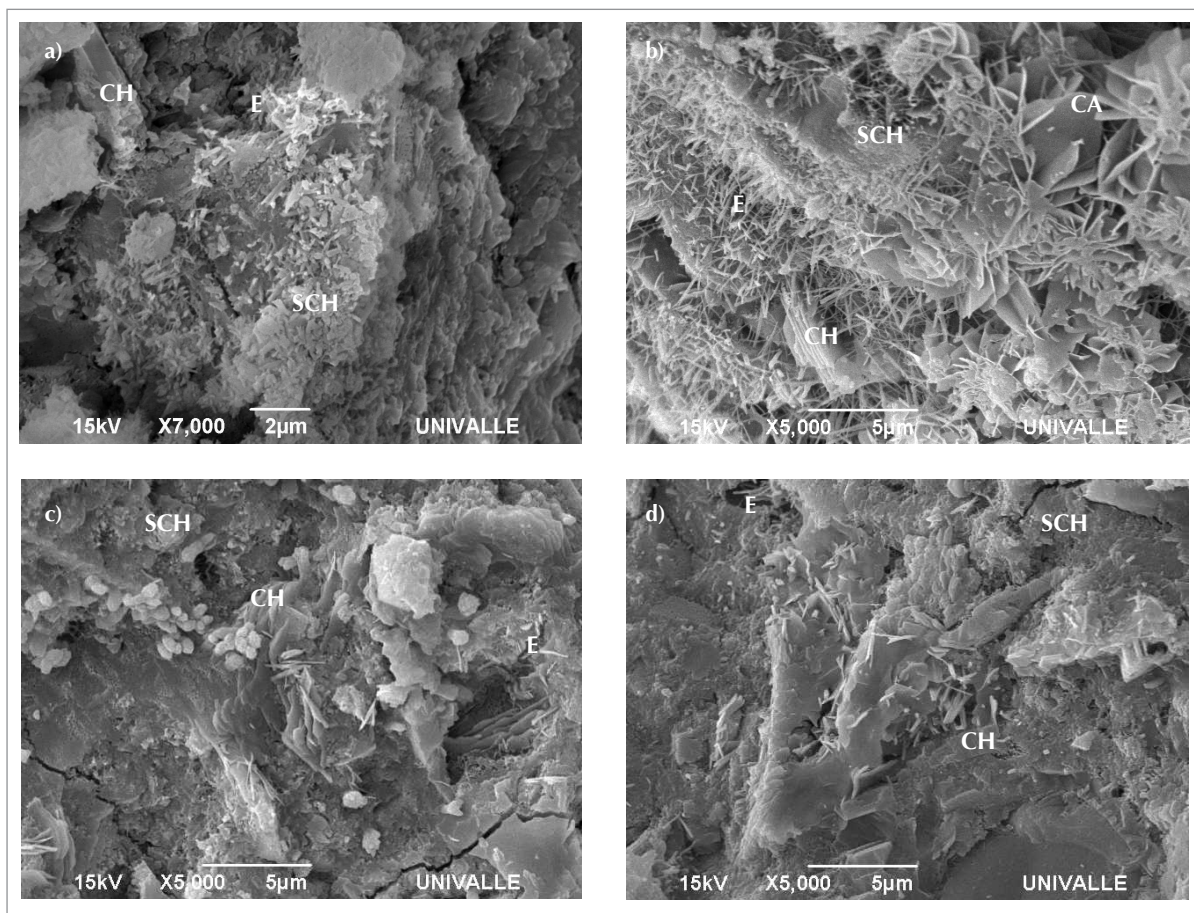


Figura 6. Micrografías SEM de pastas hidratadas a 3 días de curado. a) OPC, b) OPC-FCC, c) OPC-MK y d) OPC-HS. (E: Etringita, CA: CAH_{10} , C: $Ca(OH)_2$)

Figure 6. Photomicrograph of SEM hydrated pastes at 3 curing days a) OPC, b) OPC-FCC, c) OPC-MK and d) OPC-HS. (E: Etringite, CA: CAH_{10} , C: $Ca(OH)_2$)

4. Conclusiones

Con base en los resultados de la presente investigación:

- Se comprobó el potencial que posee el FCC como material puzolánico en matrices cementicias de cemento portland, presentando la más alta reactividad las mezclas con el 10% de adición, con una proporción de cal fijada del 61% a 360 días de curado, valor que supera el reportado por adiciones de HS o MK incorporadas al cemento en igual porcentaje.
- Se identificaron, mediante las diferentes técnicas de caracterización utilizadas, que los principales productos de hidratación del cemento adicionado con FCC son el gel silicato cálcico hidratado (CSH), la etringita, el aluminato y el silicoaluminato cálcico (CAH y CASH).
- Cabe anotar, que existe la opción de utilizar hasta un 20% de FCC en reemplazo de cemento portland dado que esta mezcla presenta un desempeño similar a las pastas con adición de 10%MK y 10%HS.

5. Agradecimientos

Los autores del presente artículo, miembros de los grupos Materiales Compuestos de la Universidad del Valle y Materiales y Medio Ambiente de la Universidad Nacional sede Palmira agradecen a sus instituciones, al Centro de Excelencia de nuevos Materiales (CENM-Univalle), y al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología Colciencias por el apoyo para la realización de este estudio.

6. Referencias/References

- ACI 201.2R (2008), Guide to Durable Concrete
- Andersen M.D., Jakobsen H.J., Skibsted J. (2003), Incorporation of aluminum in the calcium silicate hydrate (C-S-H) of hydrated Portland cements: a high-field ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR investigation. *Inorg. Chem*, 42(7), 2280-2287.
- Andersen M.D., Jakobsen H.J., Skibsted J. (2004), Characterization of white Portland cement hydration and the C-S-H structure in the presence of sodium aluminate by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR spectroscopy. *Cement and Concrete Res.*, 34(5), 857-868.
- Borrachero M.V., Monzó J., Payá J., Peris-Mora E., Vunda C., Velázquez S., Soriano L. (2002), El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica, en Proceedings del VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía, España.
- Brough A., Dobson C.M., Richardson I.G., Groves G.W. (1994), Applications of selective ^{29}Si isotopic enrichment to studies of the structure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gels. *J. Am. Ceram. Soc.*, 77(2), 593-596.
- Brunet F., Charpentier T., Chao C.N., Peycelon H., Nonat A. (2010), Characterization by solid-state NMR and selective dissolution techniques of anhydrous and hydrated CEM V cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 208-219.
- Carrasco M.F., Menendez G., Bonavetti V., Irassar E.F. (2005), Strength optimization of "tailor - made cement" with limestone filler and blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1324-1331.
- Chen H.L., Tseng Y.S., Hsu K.C. (2004), Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars. *Cement & Concrete Composites*, 26(6), 657-664
- Cong X., Kirkpatrick R.J., Yarger J.L., Mcmillan P.F. (1998), The structure of calcium silicate hydrate: NMR and Raman spectroscopic results. *Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials*, 143-158.
- Dweck J., Pinto C.A., Büchler P.M. (2008), Study of a Brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 92(1), 121-127.
- Faucon P., Charpentier T., Bertrandie D., Nomat A., Virlet J., Petit J.C. (1998), Characterization of calcium aluminate hydrates of cement pastes by ^{27}Al MQ-MAS NMR. *Inorg. Chem*, 37(15), 3726-3733.
- Faucon P., Charpentier T., Nomat A., Petit J.C. (1998a), Triple-quantum two-dimensional ^{27}Al magic angle nuclear magnetic resonance study of the aluminium incorporation in calcium silicate hydrates. *J. Am. Chem. Soc.*, 120(46), 12075-12082.

4. Conclusions

Based on the results of the current research:

- The potential of FCC as pozzolanic material was proven in Portland cement matrixes, showing the highest reactivity in 10% blended samples, with a proportion of affixed lime of 61% at 360 curing days. This value exceeds the ones reported by FS and MK blended pastes at the same percentage.
- By means of different characterization techniques, it was determined that the main hydration products for FCC blended cement are: calcium silicate hydrate (CSH), ettringite, calcium aluminate hydrates (CAH) and hydrated calcium aluminosilicates (CASH).
- It is worth mentioning the possibility of using up to a 20% FCC in replacement of Portland cement, as this mixture presents a similar behavior as 10%MK and 10%SF blended pastes.

5. Acknowledgments

The authors of this study - members of Composite Material Group at Universidad del Valle, and Materials and Environment at the Universidad Nacional, Palmira - wish to express their gratitude to their respective universities, to the Excellence Center of New Materials (CENM-Univalle) and to the Administrative Department of Science and Technologies (Colciencias) for the support provided for the development of this research.

- García de Lomas M., Sanchez de Rojas M.I., Frías M. (2007)**, Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 90(2), 443-447.
- Hjorth J., Skibsted J., Jakobsen H.J. (1988)**, ^{29}Si MAS NMR studies of Portland cement components effects of microsilica on the hydration reaction. *Cement and Concrete Research*, 18(5), 789-798.
- Hsu K.C., Tseng Y.S., Ku F.F., Su N. (2001)**, Oil Cracking Waste Catalyst as an Active Pozzolanic Material for Superplasticized Mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1815-1820.
- Kumar P., Monteiro P. (2006)**, *Concrete Structure, Properties and Materials*. Prentice Hall, New Jersey.
- Pacewska B., Wilińska I., Kubissa J. (1998)**, Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive. *Thermochimica Acta*, 322(2), 175-181.
- Pacewska B., Wilińska I., Bukowska M. (2000)**, Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 60(1), 71-78.
- Pacewska B., Wilińska I., Bukowska M., Nocuń-Wczelik W. (2002)**, Effect of waste inosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1823-1830.
- Payá J., Monzó J., Borrachero M.V., Peris-Mora E., Amahjour F. (2000)**, Mechanical treatment of fly ashes: Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 543-551.
- Payá J., Monzó J., Borrachero M.V., Velázquez S., Bonilla M. (2003)**, Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1085-1091.
- Payá J., Monzó J., Borrachero M.V., Velázquez S. (2003a)**, Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(4), 603-609.
- Paya J., Borrachero MV., Monzó J., Soriano L. (2009)**, Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. *Materiales de Construcción*, 59(296), 37-52.
- Pinto C.A., Bochler P., Dweck J. (2007)**, Pozzolanic Properties of a Residual FCC Catalyst during the Early Stages of Cement Hydration Evaluation by thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 87(3), 715-720.
- Richardson I.G., Brough A.R., Brydson R., Groves G.W., Dobson C.M. (1993)**, Location of aluminum in substituted calcium silicate hydrate (C-S-H) gels as determined by ^{29}Si and ^{27}Al NMR and EELS. *J. Am. Ceram. Soc.*, 76(9), 2285-2288.
- Torres J., Baquero EA, Silva AR. (2009)**, Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de la industria del petróleo, *Dyna*, 72(158), 49-53.
- Torres J., Trochez J., Mejía de Gutiérrez R. (2012)**, Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 141-156.
- Trochez J., Torres J., Mejía de Gutiérrez R. (2010)**, Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinera colombiana. *Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 55, 26-34.
- Tseng Y.S., Huang C.L., Hsu K.C. (2005)**, The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 782-787.
- Zhang T., Yu Q., Wei J., Gao P., Chen P., Hu J. (2012)**, Micro-structural development of gap-graded blended cement pastes containing a high amount of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 1024-1032.
- Zornoza E. (2007)**, El papel del catalizador usado de craqueo catalítico FCC como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Zornosa E., Paya J., Garcés P. (2008)**, Chloride-induced corrosion of steel embedded in mortars containing fly ash and spent cracking catalyst. *Corrosion Science*, 50(6), 1567-1575.

El estándar ISO14006: Una herramienta que ayuda a mejorar la competitividad de los estudios de arquitectura

The standard ISO14006: a helpful tool to improve the competitiveness of the architecture firms

Beñat Landeta^{1*}, Germán Arana^{**}, Patxi Ruíz de Arbulo*, Pablo Díaz de Basurto*

* Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco. ESPAÑA

** Escuela Universitaria Politécnica de San Sebastián. Universidad del País Vasco. ESPAÑA

Fecha de Recepción:12/12/2012
Fecha de Aceptación:22/07/2013
PAG 155 - 171

Resumen

En el presente artículo se analiza el proceso de adopción del estándar de ecodiseño ISO14006 y su influencia en los resultados de los estudios de arquitectura. Con estos objetivos, tras una introducción y una descripción del estándar de ecodiseño ISO14006, se analiza su difusión. En este apartado se comprueba el fuerte impacto que han tenido estos estándares entre los estudios de arquitectura. Posteriormente, se muestra la metodología de investigación utilizada basada en un estudio de nueve casos, cuyos resultados se han cruzado con una serie de entrevistas en distintas fases temporales realizadas a consultores, auditores, organizaciones tractoras y un miembro del comité técnico ISO/TC207. En la investigación se exponen las motivaciones, dificultades y resultados del proceso de adopción y certificación del estándar ISO14006 por parte de los estudios de arquitectura. Entre los principales resultados, se constata que los estudios analizados obtienen ventajas competitivas con la adopción de este estándar que les permite mejorar su posición en el mercado. Por último, se muestran unas conclusiones de interés tanto para los estudios de arquitectura como para las instituciones, en general.

Palabras Clave: Ciclo de vida, ecodiseño, ISO14006, gestión medioambiental, estudio de arquitectura

Abstract

In this article, the process of adopting the eco-design standard ISO14006 and its influence on the results in the architecture firms sector have been analyzed. With these aims, following an introduction and a description of the eco-design standard ISO14006, its dissemination has been presented. About this aspect, it should be remarked the strong impact that this standards has among the architecture firms. Subsequently, the research methodology based on the study of nine cases is shown. The results have been crossed with the data obtained from interviews with consultants, auditors, organizations that act as driving forces and a member of the technical committee ISO/TC207 at different times in the course of the investigation. Motivations, challenges and results of the process of adoption and certification of ISO14006 by architecture firms are then analyzed. Among the major findings, it was found that the adoption of the standard ISO14006 can be a helpful tool in order to improve the competitiveness of the architecture firms. Finally, in the last chapter of the article, some interesting conclusions both for architecture firms and institutions, in general, are shown.

Keywords: Life cycle, eco-design, ISO14006, environmental management, architecture firm

1. Introducción

El modelo de desarrollo que ha caracterizado nuestra civilización en los dos últimos siglos conduce irremediamente a una situación de degradación ambiental de nuestras ciudades (Damasceno Do Nascimento y Caldas, 2008). Para evitar este aspecto, el sector de la construcción, que destaca por el elevado impacto ambiental que genera (Martí i Ragué, 2010), debería tener entre sus principales objetivos disminuir este impacto.

Así las cosas, en todos los ámbitos del sector de la construcción en general, y en el de los estudios de arquitectura en particular, es preciso el desarrollo y adopción de sistemas de gestión empresarial basado en estándares para reducir el impacto sobre el medio ambiente (IHOBE, 2010). La integración del concepto Green-Lean en proyectos de construcción, así como el empleo de estándares de gestión de ecodiseño y el control operacional integrado, entre otros, tratan de mejorar el desempeño ambiental de los edificios y facilitan a las empresas la obtención de ventajas competitivas asociadas al cumplimiento de objetivos medioambientales (Martínez et al., 2009; Arana y Heras, 2011).

1. Introduction

The development model defining our civilization, over the past two centuries, inevitably leads to the environmental deterioration of our cities (Damasceno Do Nascimento and Caldas, 2008). So as to avoid such situation, the construction sector, which is characterized by generating high environmental impacts, should mainly focus on decreasing such damages (Martí & Ragué, 2010).

Therefore, in general the scopes of construction sector and; in particular the architecture firms, should develop and implement management systems based on standards reducing environmental impacts (IHOBE, 2010). The implementation of the Green-Lean concept in construction projects, as well as the use of eco-design management standards and integrated operational control, among others, endeavor companies to improve building environmental performance and to achieve competitive advantages related to the fulfillment of environmental objectives (Martínez et al., 2009; Arana and Heras, 2011).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: g.arana@ehu.es

En relación a los estándares más específicos del sector, ISO y CEN han desarrollado una serie de estándares destinados a controlar la sostenibilidad ambiental del sector de la construcción que se resumen en la Tabla 1.

Regarding the most specific standards in the sector, ISO and CEN, they have developed a series of standards intended for controlling environmental sustainability in the construction sector, which are summarized by Table 1.

Tabla 1. Estándares ambientales elaborados por ISO y CEN orientadas al sector de la construcción.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de ISO y CEN

Table 1. Environmental standards elaborated by ISO and CEN oriented to the construction sector.

Source: self elaboration from data provided by ISO and CEN

Estándar/ Standard	Objeto/ Objective
ISO/FDIS 15392 (2008)	Principios generales de la sostenibilidad en la construcción. <i>General sustainability principles in construction sector</i>
ISO/TS 21929 (2006)	Panel de indicadores destinados a medir la sostenibilidad de edificios. <i>Indicators panel intended for measuring buildings sustainability</i>
ISO 21930 (2007)	Principios para realizar una declaración ambiental de los edificios. <i>Principles to make a building environmental statement</i>
PrEN 15804 (2008)	Principios para realizar una declaración ambiental de los edificios. <i>Principles to make a building environmental statement</i>
PrEN 15643 (2008)	Integración de los impactos ambientales en el sector de la construcción. <i>Integration of environmental impacts in the construction sector</i>

Sin embargo, también se observa que una serie de estándares no específicos del sector de la construcción están teniendo una fuerte influencia en él (Pellicer et al., 2008). Así, y en lo que respecta a la gestión medioambiental, destaca el papel desarrollado por la familia de estándares ISO14000 (ISO, 2004), entre los que, en el campo del ecodiseño debemos destacar el informe técnico ISO/TR14062. Éste describe el proceso de integración de aspectos ambientales en el proceso de diseño y desarrollo de productos (ISO, 2002). Pero no es hasta julio de 2011 cuando se publica el estándar internacional de ecodiseño ISO14006:2011 (ISO, 2011), basado en el estándar español UNE150301:2003 (AENOR, 2003). Va más allá de otros estándares medioambientales como la ISO14040 (ISO, 2006) —que trata el análisis del ciclo de vida del producto—, o la citada ISO/TR14062 (ISO, 2002), ya que integra aspectos propios del proceso del diseño, la evaluación de los impactos ambientales de los productos diseñados, y la gestión y tratamiento de dichos impactos en el Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA) de la organización.

Teniendo en cuenta el grado de difusión del estándar UNE150301 en España, se espera que el estándar internacional de ecodiseño, la ISO14006, tenga una difusión importante en el sector de la construcción (Sáez de Cortázar, 2011). Así, el objetivo de este artículo consiste en analizar las motivaciones, el proceso de implantación y los resultados del estándar ISO14006 en los estudios de arquitectura pioneros en la adopción de estos estándares de gestión, con objeto de que pueda servir de referencia a otros estudios, a miembros de las administraciones públicas (AA.PP.) y al resto de los stakeholders implicados en este proceso a la hora de fijar su estrategia y poder detectar los aspectos clave del proceso.

However, a series of non-specific standards in the construction sector are strongly influencing it (Pellicer et al., 2008). Therefore, as far as the environmental management system is concerned, the role played by the standard family ISO 14000 (ISO, 2004) is significant. In the eco-design field, the technical report ISO/TR14062 is remarkable. It describes the integration process of environmental aspects during products' design and development processes (ISO, 2002). In July 2011 the international eco-design standard ISO14006:2011 (ISO, 2011) was published, based on the Spaniard standard UNE150301:2003 (AENOR, 2003). Such standard goes far beyond other environmental standards such as ISO14040 (ISO, 2006) - dealing with the analysis of a product life cycle - or the quoted ISO/TR14062 (ISO, 2002), since it integrates inherent aspects of the design process, the assessment of environmental impacts generated by designed products, the management and treatment of such impacts on the Environmental Management System (EMS) in the organization.

Considering the dissemination level of the standard UNE150301 in Spain, it is expected that the international eco-design standard, ISO ISO14006, will be significantly broadcasted in the construction sector (Sáez de Cortázar, 2011). Consequently, the purpose of this paper is to analyze the driving forces, the implementation process and results of the standard ISO 14006 on architecture firms first implementing such management standards, so as to serve as a benchmark to other firms, members of public organizations and the stakeholders involved in this process when determining an strategy and detecting the key aspects in the process.

Por estos motivos, en el siguiente apartado se hace una breve descripción del estándar. A continuación, se procede a analizar su difusión sectorial, lo que permite observar la gran aceptación que ha tenido el estándar de ecodiseño entre los estudios de arquitectura. En el apartado 4, se analiza en primer lugar la metodología seguida en esta investigación para posteriormente pasar a detallar en profundidad un caso representativo del proceso de adopción. Por último, en el apartado final, se muestran la discusión y conclusiones obtenidas teniendo en cuenta, no sólo el caso descrito sino también los otros ocho estudios de casos realizados de empresas del sector de la construcción y las entrevistas realizadas a agentes involucrados de diferentes ámbitos profesionales y expertos en materia de ecodiseño del sector.

2. Características del estándar ISO14006

El objetivo principal de la ISO14006 es el mismo que perseguía su antecesor en España, el estándar UNE150301, servir de guía para aquellas organizaciones que deseen incorporar la variable ambiental en el proceso de diseño y desarrollo del producto, en la medida en que la organización pueda tener control o influencia, y quieran integrar dicho proceso en su SGMA.

La estructura, terminología y requisitos del estándar ISO14006 están basados en los estándares ISO9001 y en la ISO14001, para facilitar su integración con los Sistemas de Gestión de la Calidad y Medioambiental, respectivamente. Los tres primeros apartados de la ISO14006 son los habituales en los estándares de gestión, donde tras una breve introducción, se especifican el objeto y alcance del estándar y los documentos de referencia claves para su aplicación.

El capítulo 4 se centra en el papel decisivo que debe jugar la alta dirección para el establecimiento de un enfoque sistemático y estructurado que permita implementar las directrices propias del ecodiseño en el SGMA de la organización. Siguiendo la estructura de la tabla 2, en el capítulo 5 se proporcionan las directrices para gestionar el ecodiseño, que a su vez sigue el esquema del estándar ISO14001. Por último, en el apartado 6 se proporcionan las instrucciones necesarias para identificar, controlar y mejorar de forma continua y sistemática los aspectos ambientales de todos los productos de la organización en la fase de diseño y desarrollo.

Consequently, the following section briefly describes the standard. Its dissemination in the sector is further on analyzed, showing that the eco-design standard has been widely accepted by architecture firms. Section 4 analyzes the methodology used by this research and describes in detail a representative case of the process implementation. Finally, the last section shows discussions and conclusions not only considering this specific case, but also the other eight cases carried out by construction sector companies. It also presents interviews held with involved entities, belonging to diverse professional fields eco-design experts.

2. Characteristics of the standard ISO 14006

The main purpose of the ISO 14006 is the same pursued by its Spaniard predecessor, the standard UNE 150301, which is to serve as a benchmark for the organizations willing to implement this environmental variable in the product design and development stages, as long as the organization is willing to control and influence the process integration into their EMS.

The structure, terminology and requirements of the standard ISO 14006 are based on the standards ISO9001 and ISO14001, in order to facilitate the integration with the Quality and Environmental Management Systems of the organizations, respectively. The first three sections of ISO14006 are the typical management standards, which describes its objective and scope as well as the key reference documents for its implementation.

Chapter 4 is focused on the crucial role played by chief executives when determining a systematic and well structured approach for the implementation of a guiding plan inherent to eco-design into the EMS in the organization. Following the structure provided by Table 2, the chapter 5 shows the guiding plan for an eco-design management system, which in turn fulfills the standard ISO 14001. Finally, section 6 provides the required directions to systematically and continuously identify, to control and improve the environmental aspects during products' design and development stages in the organization.

Tabla 2. Estructura del estándar ISO14006:2011. Fuente: elaboración propia a partir del estándar ISO14006:2011
Table 2. Structure of the Standard ISO14006:2011. Source: Self elaboration according to Standard ISO14006:2011

1.	Objeto y campo de aplicación/ 1. Objective and field of application
2.	Referencias normativas/ 2. Regulatory references
3.	Términos y definiciones/ 3. Terms and definitions
4.	Rol de la alta dirección en el ecodiseño/ 4. Role played by chief executives in deco-design
4.1.	beneficios de realizar ecodiseño/ 4.1. Benefits from implementing eco-design
4.2.	tareas relativas al ecodiseño/ 4.2. Tasks related to eco-design
5.	Directrices para la incorporación del ecodiseño en un sga/ 5. Guidelines for implementing eco-design into EMS
5.1.	directrices generales/ 5.1. Overall guidelines
5.2.	política ambiental/ 5.2. Environmental policy
5.3.	planificación/ 5.3. Planning
5.4.	implementación y operación/ 5.4. Implementation and operation
5.5.	verificación/ 5.5. Verification
5.6.	revisión por la dirección/ 5.6. Inspection by chief executives
6.	Actividades de ecodiseño en el diseño y desarrollo del producto/ 6. Eco-design activities developed for the design and development of a product
6.1.	generalidades / 6.1. Basic concepts
6.2.	enfoque de ciclo de vida / 6.2. Life cycle approach
6.3.	proceso de ecodiseño / 6.3. Eco-design process
6.4.	evaluación ambiental de los productos / 6.4. Environmental assessment on products
6.5.	análisis de los requisitos ambientales de las partes interesadas / 6.5. Analysis of environmental requirements from involved entities
6.6.	revisión del ecodiseño / 6.6. Eco-design review
6.7.	implicación de la cadena de valor / 6.7. Implications of value chain
Anexo A (informativo). La alta dirección y las cuestiones estratégicas en el ecodiseño/ Annex A (informative). Chief executives and strategic issues on eco-design	
Anexo B (informativo). Correlación de la norma ISO 14006:2011 con otras normas internacionales sobre ecodiseño/ Annex B (informative). Correlation of standard ISO 14006:2011 with other international standards on eco-design	
Bibliografía/ Bibliography	

3. Difusión del estándar ISO14006 en España

Según los datos facilitados por los distintos organismos certificadores, tal como se muestra en la Figura 1, en marzo de 2013 había 177 organizaciones certificadas. Cabe destacar que de ellas 142 empresas desarrollan su actividad dentro del sector de la construcción, de las cuales 136 son estudios de arquitectura. Esta circunstancia se debe a la creciente sensibilización y preocupación por el medio ambiente de la sociedad, y en especial de las AA.PP., con el establecimiento progresivo de normas de obligado cumplimiento en el sector de la construcción cada vez más restrictivas y la creciente relevancia que se otorga a los aspectos ambientales en las licitaciones de obras públicas (Arana et al., 2012).

3. Broadcasting the standard ISO14006 in Spain

According to information delivered by diverse certification organizations, shown on Figure 1, in March 2013 there were 177 certified organizations. It is worth mentioning that 142 companies develop their activities within the construction sector; 136 out of them correspond to architecture firms. This situation responds to the growing environmental awareness and concern by the society and, especially by public organizations, due to the progressive establishment of mandatory regulations in the construction sector, which are even more restrictive, and due to the increasing relevance granted to environmental aspects in public works tenders (Arana et al., 2012).

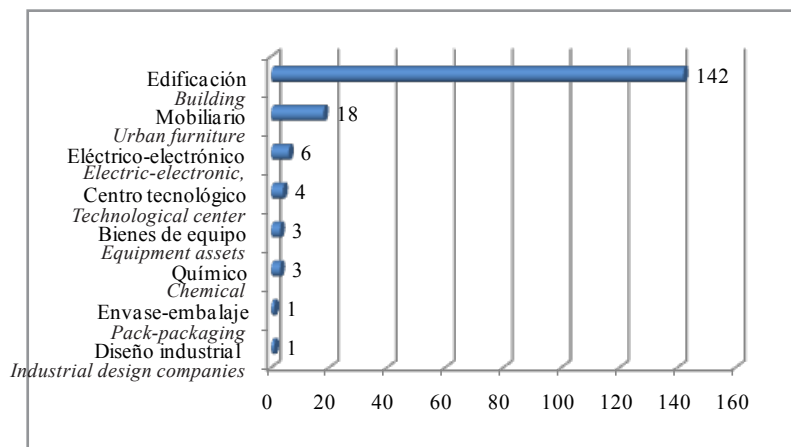


Figura 1. Empresas certificadas conforme a la ISO14006 por sectores de actividad (marzo de 2013).

Fuente: elaboración propia, a partir de los datos de empresas certificadoras

Figure 1. Companies certified as per ISO 14006, per activity sector (March, 2013). Source: self elaboration, from data obtained from certification companies

4. Análisis de casos

4.1 Metodología

Dado que cuando se comenzó el trabajo de investigación todavía no se había publicado el estándar ISO14006, se optó por utilizar una metodología cualitativa de obtención de información referente al proceso de adopción del estándar UNE150301, basada en el estudio de casos. Tal y como señala Yin (2009), esta metodología permite profundizar más en el caso a estudiar y obtener una mejor comprensión de su naturaleza. En la primera fase de la investigación, que se llevó a cabo entre enero de 2009 y noviembre de 2011, se analizaron seis casos de empresas que habían adoptado el estándar UNE150301 (Oneka Arquitectura, Ramón Ruíz Cuevas Arquitectos, Ache Arquitectura, Gausark y Toledo Taldea). Estos estudios iniciales de naturaleza exploratoria nos permitieron conocer el proceso de adopción que seguían los estudios de arquitectura a la hora de adoptar estándares de ecodiseño.

Con la publicación del estándar ISO14006 hubo que modificar la metodología de investigación. En la Figura 3 se describe el nuevo esquema, siguiendo las pautas marcadas en la literatura para su desarrollo (Miles y Huberman, 1994; Yin, 2009). Posteriormente, se redefinieron los propósitos de la investigación y se seleccionaron nuevos casos de estudios de arquitectura certificados conforme a la ISO14006 que nos permitieran conocer con detalle el proceso de adopción de este estándar internacional.

A su vez, de forma paralela, se mantuvieron entrevistas con miembros de organizaciones tractoras, auditores, consultores y un miembro del comité técnico ISO/TC207 encargado de la elaboración del estándar. A partir de estas entrevistas y las experiencias previas, se diseñó el procedimiento a seguir en los casos de estudio. Se trabajó siguiendo un protocolo semi-estructurado con objeto de no limitar los resultados de la investigación, pero manteniendo pautas comunes para focalizar la investigación en el propósito a estudiar y garantizar la consistencia interna y la fiabilidad del estudio (Maxwell, 2005).

Resueltas las cuestiones metodológicas, entre noviembre de 2011 y marzo de 2012, se seleccionaron tres nuevos estudios de caso (Hirilan, LKS y MAAB) y se volvieron a estudiar los seis casos previamente analizados ya que las seis empresas se habían adaptado al estándar ISO14006. La selección se limitó a estos nueve casos porque se constató que se recogían cada vez menos aportaciones, produciéndose un fenómeno de saturación teórica (Yin, 2009).

4. Analysis cases

4.1 Methodology

Since this research study began when the standard ISO 14006 had not been published yet, it was decided to employ a qualitative methodology to achieve information related to the implementation process of the standard UNE150301, based on the study of cases. As stated by Yin (2009), such methodology enables to go in detail on the study case and to reach a better understanding of its nature. The first stage of the research, which was conducted between January 2009 and November 2011, analyzed six cases of firms that had implemented the standard UNE150301 (Oneka Arquitectura, Ramón Ruíz Cuevas Arquitectos, Ache Arquitectura, Gausark and Toledo Taldea). Those initial researches, of exploratory nature, enabled us to understand the process implemented by architecture firms when integrating eco-design standards.

After the standard ISO14006 was published, the research methodology had to be modified. Figure 3 describes the new scheme, following the development guidelines provided by the literature (Miles and Huberman, 1994; Yin, 2009). Afterwards, the research purposes were re-defined, and new cases of architecture firms certified in accordance to ISO 14006 were selected, in order to understand in detail the implementation process of this international standard.

At the same time, interviews were held in parallel with members of driving organizations, auditors, consultants and a member of the technical committee ISO/TC207, who was the chief of the standard elaboration. From such interviews and previous experiences, the procedure to be followed was designed for the study cases. The research was conducted by following a semi-structured protocol, in order to avoid restricting its results, but keeping common guidelines and focusing on the research objective to be studied, so as to guarantee the consistency and reliability of the research (Maxwell, 2005).

After solving methodological issues, between November 2011 and March 2012, three new study cases were selected (Hirilan, LKS and MAAB). The six cases previously studied were reviewed once again, since the six firms had already implemented the standard ISO14006. Selection was restricted to nine cases, as it was proven that collected inputs were progressively less, and a theoretical saturation phenomenon was taking place (Yin, 2009).



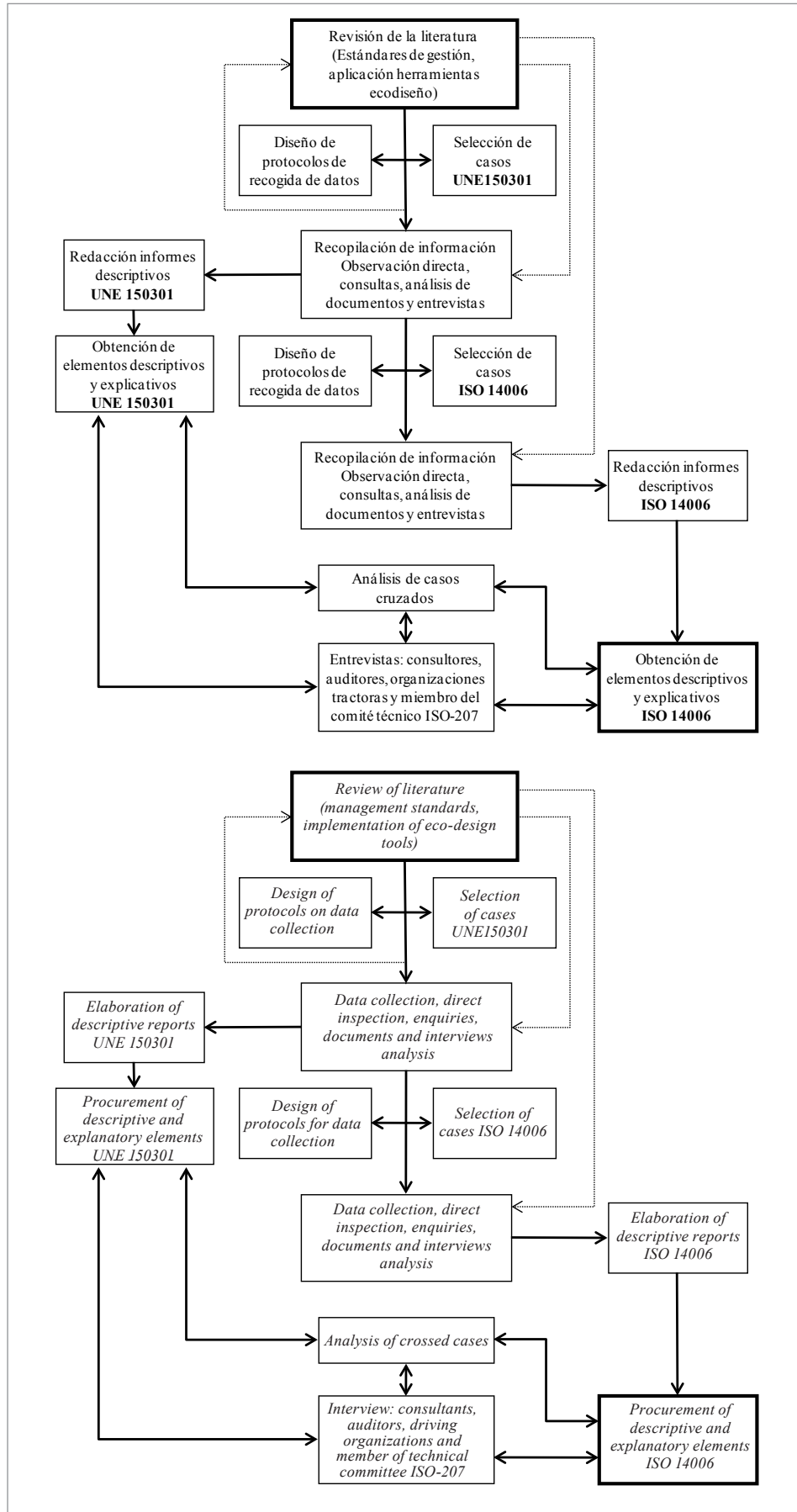


Figura 2. Proceso de investigación realizado. Fuente: elaboración propia, basado en Yin (2009) y Miles y Huberman (1994)
Figure 2. Executed research process. Source: self elaboration, based on YIN (2009), Miles and Huberman (1994)

En total se realizaron 27 entrevistas con directivos y técnicos de las empresas y se accedió a 52 documentos de carácter interno. Para garantizar la fiabilidad y validez de la información obtenida se trató de cruzar la información con distintas fuentes (Maxwell, 2005). La información de cada empresa clasificada se cruzó con la del resto de empresas y se trianguló con la obtenida a través de las entrevistas con dos miembros de organizaciones tractoras, dos consultores, dos auditores y un miembro del comité técnico ISO/TC207 encargado de la elaboración de la ISO14006. Dichas entrevistas se realizaron en el transcurso de la investigación en tres etapas diferentes, coincidiendo con la labor de obtención de elementos descriptivos y explicativos de la UNE150301 e ISO14006 y el análisis de casos cruzados.

Tal como hemos comentado previamente, debido a la longitud del artículo en este apartado sólo se muestra un caso en profundidad, si bien posteriormente en el apartado de discusión y conclusiones se ha tenido en cuenta el proceso de investigación global.

4.2 Desarrollo del caso de LKS

4.2.1 Presentación de la empresa

LKS Ingeniería, S.Coop. (en adelante LKS) pertenece al Grupo LKS, cuenta con cerca de 1.050 personas en plantilla y genera una facturación anual de aproximadamente 70 millones de euros. Desarrolla su actividad en el mercado nacional e internacional, con presencia en Chile, Costa Rica, República Dominicana, México, Francia, Colombia, Uruguay, India y China. LKS está integrado en la Corporación Mondragón, el primer grupo empresarial del País Vasco, el séptimo de España y líder mundial en cooperativismo.

LKS es hoy, por tamaño y volumen de negocio, la mayor empresa de servicios de ingeniería y construcción certificada conforme al estándar ISO14006 de ecodiseño en España. Un aspecto destacado de LKS es su apuesta por el desarrollo sostenible de su actividad, que añade así la dimensión ambiental al compromiso cooperativista por el desarrollo social y económico de su estrategia empresarial.

4.2.2 Experiencia en la implantación de sistemas de gestión

La primera experiencia de LKS en cuanto a la adopción y certificación de sistemas de gestión no fue muy satisfactoria. En 1998 logró su primer certificado conforme a un sistema de gestión, el de la calidad según la ISO9001. Pero en 2001 optó por no mantener el certificado principalmente por dos motivos: desavenencias con el equipo auditor y el escaso éxito comercial que suponía el mantenimiento de la certificación. No obstante, sí se mantuvieron los procedimientos establecidos en el sistema de gestión, pero con el tiempo, sin la presión de la certificación, el mantenimiento del sistema se hacía cada vez más difícil, hasta que se tomó la determinación de restablecer una sistemática basada en la gestión por procesos según los estándares ISO9001 e ISO14001. El sistema se completó con la inclusión en 2009 de los estándares UNE150301 de ecodiseño y OHSAS18001 de seguridad y salud en el trabajo.

4.2.3 Adopción del estándar ISO14006

La implementación del estándar de ecodiseño ISO14006 en 2011 en la organización fue relativamente sencilla.

27 interviews were held with chief officers and technicians and, 52 documents of restricted nature were reviewed. In order to guarantee the reliability and soundness of collected information, inputs were crossed with different sources (Maxwell, 2005). Information from each certified firm was crossed with the information from the other firms and later it was triangulated with data obtained by means of interviews held with two members of driving organizations, two consultants, two auditors and a member of technical committee ISO/TC207 who was the chief of the standard ISO14006 elaboration. Such interviews were held in three different stages throughout the research, coinciding with the task of gathering descriptive and explicative elements from UNE150301 & ISO14006 and crossed cases analysis.

As previously stated, due to the extension of this paper, this section only shows one case in detail. However, discussion and conclusion section considers the global research process.

4.2 Development of the LKS case

4.2.1 Introducing the Firm

LKS Ingeniería, S.Coop. (Hereinafter LKS) is a member of the LKS Holding. It has a payroll of 1,050 employees and its yearly income is 700 millions of Euros approximately. It operates locally and abroad, with presence in Chile, Costa Rica, Dominican Republic, Mexico, France, Colombia, Uruguay, India and China. LKS integrates the Mondragon Corporation, the first business group of the Basque Country, seventh in Spain and a worldwide leader in cooperative movement.

Nowadays, LKS, due to its business size and volume, is the biggest Engineering Services and Construction Company certified according to the eco-design standard ISO14006 in Spain. LKS has a remarkable policy of sustainable development within its activities, including the environmental aspects into the cooperative commitment of social and economic development of its business strategy.

4.2.2 Experience in implementing management systems.

The first experience LKS had when implementing certified management systems was not quite satisfactory. In 1998 LKS achieved its first certificate in quality management system according to ISO9001. However, in 2001 the firm decided not to maintain the certification mainly because of two reasons: disagreement with the auditor team and the low business success that maintaining the certification meant. Nevertheless, the procedures implemented into the management system were kept. In the course of time, under no pressure for achieving the certification, maintaining the system became progressively hard, so it was decided to reestablish a system based in processes management as per standards ISO9001 and ISO14001. In 2009 the system was completed with the incorporation of eco-design standard UNE150301 and work safety and health standard OHSAS18001.

4.2.3 Implementing standard ISO14006

In 2011 the implementation of the eco-design standard ISO14006 into the organization was relatively simple.



Ello fue posible debido al impulso de la Dirección, al trabajo previo realizado en materia medioambiental por el Comité de Sostenibilidad de LKS y a la experiencia adquirida hasta entonces con el estándar UNE150301.

En un comienzo, los preceptos del estándar se aplicaron a los proyectos residenciales pero al poco tiempo se comenzó a ecodiseñar el resto de proyectos según el estándar, con la excepción de las edificaciones industriales, ya que éstas no proporcionan prácticamente margen para adoptar medidas ambientales en la etapa de concepción del proyecto.

En líneas generales, en la fase de diseño y desarrollo de cada edificio se identifican los aspectos ambientales más significativos para cada fase del ciclo de vida de la edificación. Después se evalúa la criticidad y la magnitud de los aspectos ambientales, siguiendo criterios contenidos en la bibliografía sobre el tema. Finalmente, en función de los impactos ambientales más significativos se establecen unos objetivos de mejora.

Con la ayuda de una base de datos creada por el Comité de Sostenibilidad de LKS, donde se recogen las características de comportamiento ambiental de los materiales, y el software ECOTEC para la simulación del comportamiento térmico de la edificación en la fase de uso, el responsable de proyecto determina las acciones de mejora ambiental a emprender. En esta fase, resulta especialmente importante el esfuerzo por generar nuevas soluciones, y mejorar y aplicar las existentes para reducir el consumo de energía del edificio.

Desde que se aplicara por primera vez la metodología de ecodiseño en un proyecto de construcción de 84 viviendas de protección oficial en Salburúa (Vitoria-Gasteiz), siguiendo las directrices del estándar, en LKS se ha venido trabajando en la evolución de conceptos y soluciones técnicas sostenibles en los proyectos.

Un ejemplo de ello es la ampliación y reforma del pabellón Fernando Buesa Arena inaugurado en abril de 2012 en Vitoria-Gasteiz, ciudad distinguida con el premio "Capital Verde Europea 2012". El pabellón se amplió de 9.750 espectadores a los 15.504 actuales, pasando a ser el tercer pabellón de baloncesto con mayor capacidad de la Unión Europea (UE-27) y el primero de España, e incluso el de mejor puntuación obtenida (67,67%) en la certificación de sostenibilidad ambiental BREEAM (BRE, 2013). Esta ampliación, tal como se muestra en la Figura 3, se realizó con la elevación de un cuarto anillo de gradas. Para ello, se levantaron doce torres que circundan el pabellón hasta una altura de 48 metros, sobre las cuales se apoyó la nueva cubierta de 120 metros de diámetro.

It was possible due to the support provided by chief officers, due to the previous environmental work conducted by LKS Sustainability Committee and the experience achieved so far with the standard UNE150301.

At the very beginning, the standard's rules were applied in residential projects and shortly after other projects were eco-designed in accordance with this standard, with the exception of industrial buildings as they do not offer any allowance to implement environmental measures in the design stage of the project.

Generally, in the design and development stage of each building the most relevant environmental aspects are identified for each phase of the building life cycle. Afterwards critical aspects and magnitude of environmental aspects are assessed following criteria contained in the subject literature. Finally, based on the most significant environmental aspects, the improvement objectives are established.

Supported by a data base created by LKS Sustainability Committee, which contains the characteristics of material environmental behavior, and by employing the ECOTEC software for the simulation of the building thermal behavior under operation stage, the project manager determines the environmental improvements to be carried out. In this stage the endeavor to create new solutions to improve and implement the existing ones for reducing the building energy consumption becomes especially significant.

Since the eco-design methodology was first implemented into a construction project, including 84 public housing units in Salburua (Vitoria-Gasteiz), in accordance with this standard's guideline, LKS has been working in improving concepts and sustainable technical solutions for its projects.

An example is the enlargement and remodeling of the indoors sport arena Fernando Buesa, opened in April 2012 in Vitoria-Gasteiz, city distinguished with the award "Green European Capital 2012". The multi-purpose arena increased its seating capacity from 9,750 up to 15,504 people, thus becoming the third basketball stadium of greater seating capacity in the European Union (EU-27) and the first in Spain. It has even achieved the highest score (67.67%) of the environmental sustainability certification BREEAM (BRE, 2013). The enlargement work shown by Figure 3 was carried out by assembling a fourth seating platform. To do so, twelve 48 metres length towers were constructed to support the new cover structure of 120m diameter.

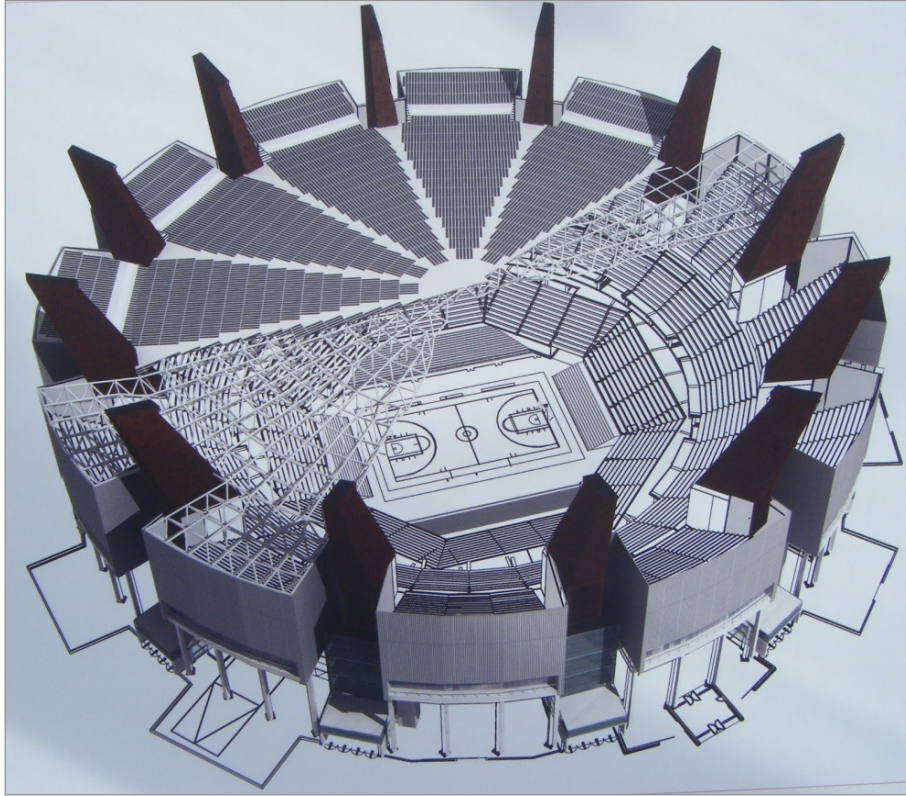


Figura 3. Pabellón multiusos Fernando Buesa Arena. Fuente: Servicio de Secretaría Técnica de Arquitectura de la Diputación Foral de Álava (2010)
Figure 3. Multi-purpose arena Fernando Buesa. Source: Architecture Chief Technical Office at the Floral de Alava City Government (2010).

En el proyecto se trató de mejorar el comportamiento ambiental del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida, y dar así una respuesta a las demandas en materia medioambiental de los clientes. En una primera fase se evaluaron los aspectos ambientales del proyecto en todo su ciclo de vida. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 3, que sirvió a la empresa para jerarquizar los aspectos a mejorar.

Concretamente, se consideraron significativos los aspectos con un nivel de significancia (Magnitud x Criticidad) de valor igual o mayor a 15, es decir, en la fase de "Extracción y Fabricación de productos" los consumos de energía y materias primas, en la fase de "Ejecución de obra" las emisiones a la atmósfera y por último en la fase de "Uso y mantenimiento" el consumo de energía y las emisiones de gases a la atmósfera.

The project intended to improve the building environmental behavior during its complete life cycle and, therefore, to meet the environmental requirements from clients. The first stage assessed the project environmental aspects considering its complete life cycle. The results from such evaluation are shown by Table 3, which was used by the company in order to set up a hierarchy of the aspects to be improved.

Concretely, significant aspects were considered, with an importance level (magnitude x critical nature) equal or higher than 15. That is to say, in the stage "Extraction and Elaboration of products" the consumption of energy and raw materials was considered. In the stage "Works Execution" greenhouse gas into the atmosphere was accounted. Finally, in the stage "Operation and Maintenance" the energy consumption and greenhouse gas into the atmosphere were considered.

Tabla 3. Identificación y evaluación de los aspectos ambientales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos de LKS**Table 3.** Identification and evaluation of environmental aspects. Source: self elaboration from data obtained from LKS

ASPECTO AMBIENTAL ENVIRONMENTAL ASPECT	MAGNITUD/ MAGNITUDE		CRITICIDAD/ CRITICAL NATURE	SIGNIFICANCIA/ IMPORTANCE	
	CRITERIO/ CRITERION	M	CRITERIO/ CRITERION	C	M x C
Extracción y Fabricación de Productos/ Extraction and Elaboration of products					
Consumo de materias primas/ Raw materials consumption	Obra nueva Sc > 10.000m ² New Building Sc > 10.000m ²	5	3	3	15
Consumo de energía/ Energy consumption	Obra nueva Sc > 10.000m ² New Building Sc > 10.000m ²	5	10-35	4	20
Ejecución de la obra/ Work Execution					
Consumo de energía/ Energy consumption	Obra nueva: volumen movimientos tierras <20.000m ³ . / New building: volume of earth movement <20,000m ³ .	3	No requiere excavación/ No excavation required	1	3
Consumo de agua/ Water consumption	Derribo y movimiento de tierras (precisa transporte)/ Demolition and earth movement (require transportation)	4	Zona pluviométrica III/ Rainfall area III	3	12
Emissiones a la atmósfera/ Emissions into the atmosphere	Existe derribo y movimiento tierras (precisa transporte)/ Demolition and earth movement carried out (require transportation)	4	ZONA C, 4-5/ AREA C, 4-5	4	16
Emisión de ruidos/ Noise pollution	Obra nueva con derribo previo / New building, previous demolition carried out	5	<50 dB(A)	1	5
Generación de residuos/ Generation of waste residues	Escombros procedentes de derribos/ Debris produced by demolition tasks	4	ÚNICAMENTE envases contaminados por productos tóxicos / ONLY packs polluted by toxic products	2	8
Uso y Mantenimiento/ Operation and Maintenance					
Consumo de energía/ Energy consumption	Arquitectura: ocio/ Architecture: leisure	5	D1, C2, C3, C1	4	20
Consumo de agua/ Water consumption	Arquitectura: ocio (sin jardín)/ Architecture: leisure (no garden)	4	Zona pluviométrica III/ Rainfall area III	3	12
Emissiones de gases a la atmósfera/ Gas emissions into the atmosphere	Arquitectura: ocio/ Architecture: leisure	5	D1, C2, C3, C1	4	20
Vertidos de aguas residuales/ Disposal of waste water	Arquitectura: ocio / Architecture: leisure	4	Red de separación/ Separation network	1	4
Emisión de ruidos/ Noise pollution	Actividades-recreativas y de ocio/ Recreation-leisure activities	3	Sector con predominio de suelo industrial/ Sector prevailing industrial land	1	3
Impacto visual/ Visual impact	> 30.000m ³	5	Suelo urbano: altura o volumen mayor significativo (>25%)/ Urban land: significantly higher height and volume (>25%)	2	10
Ocupación suelo/ Land use	NO SE EVALUA/ NOT EVALUATED				
Biodiversidad/ Bio-diversity	NO SE EVALUA/ NOT EVALUATED				
Fin de vida/ End of life cycle					
Consumo de energía/ Energy consumption	>50.000m ³	3	> 80% Construcción industrializada/ > 80% Industrial construction	1	3
Generación de residuos/ Waste material production	>100.000m ³	5	> 80% Construcción industrializada/ > 80% Industrial construction	1	5
Emisión de ruidos/ Noise pollution	NO SE EVALUA/ NOT EVALUATED				

Posteriormente, a partir de esta evaluación se desarrolló un panel de indicadores con los objetivos a alcanzar. Y para lograr dichos objetivos se elaboró un plan de acción en el que se definieron las estrategias y medidas a adoptar. En este plan se decidió incluir la reducción de los residuos generados en la fase de ejecución de obra y el consumo de agua en todas las fases como aspectos significativos, ya que tanto LKS como el cliente consideraban que estos aspectos eran relevantes. A continuación se resumen los objetivos de mejora de este plan, del que se describen las medidas a tomar en las Tablas 4 y 5:

Reducir en la fase de extracción y fabricación de productos utilizados:

- 10% el consumo de materias primas.
- 10% el consumo de energía.

Reducir en la fase de ejecución de obra:

- 25% las emisiones a la atmosfera.
- 15% el consumo de agua.
- 20% los residuos generados.

Reducir en la fase de uso y mantenimiento:

- 20% el consumo de energía.
- 20% las emisiones a la atmosfera.
- 60% el consumo de agua potable.

Subsequently, from this evaluation an indicator panel was elaborated including the objectives to be reached. So as to achieve such objectives an action plan was designed, which defined the strategies and measures to be adopted. This plan included the reduction of residues generated by the work execution stage, as well as water consumption in every stage, which were considered as relevant aspects by LKS and the client. A summary of objectives of this improvement plan is described by Tables 4 and 5, showing measures to be implemented:

Reducing from the extraction and elaboration of products stage:

- *10% of raw material consumption*
- *10% of energy consumption*

Reducing from the works execution stage

- *25% of greenhouse gas emissions into the atmosphere*
- *15% of water consumption*
- *20% of waste material*

Reducing from operation and maintenance stage

- *20% of energy consumption*
- *20% of greenhouse gas emission into the atmosphere*
- *60% of drinking water consumption*

Tabla 4. Definición de objetivos, estrategias y medidas ambientales a ejecutar en las fases de extracción y fabricación de productos, y ejecución de obra. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos de LKS**Table 4.** Definition of objectives, strategies and environmental measures to be implemented into the stage of extraction and elaboration of products and works execution stage. Source: self elaboration from data obtained from LKS

FASE:/ STAGE:	EXTRACCIÓN Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS UTILIZADOS/ EXTRACION AND ELABORATION OF EMPLOYED PRODUCTS
OBJETIVO:/ OBJECTIVE:	REDUCCION DEL CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS Y CONSUMO DE ENERGIA/ REDUCTION OF RAW MATERIAL CONSUMPTION AND ENERGY CONSUPTION
Estrategia:/ Strategy:	Consumo de un 10% menos de materiales de bajo impacto ambiental con un 10% menos de energía embebida en los mismos. Sistemas de fachada y cubierta sostenible con calificación BRE (Building Research Establishment Ltd.): A/A+/ 10% lower consumption of raw materials with low environmental impact. 10% of energy reduction absorbed by them. Sustainable front walls and cover roof systems as per BRE standard (Building Research Establishment Ltd.): A/A+
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Selección de sistemas constructivos según la Guía Verde del BRE. /1.Selection of constructive systems as per BRE Green Guidelines.
	2. Utilización preferente de aislamientos térmicos no procedentes del petróleo y sin CFCs./ 2. Preferential use of thermal isolation not coming from petroleum derivatives and not containing CFCs.
	3. Pinturas interiores con niveles bajos de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV)./ 3. Indoors paintings with low emission levels of volatile organic compounds (VOC)
	4. Aprovisionamiento responsable basado en el ámbito y el alcance de la certificación obtenida por el proveedor o fabricante del material./ 4. Responsible procurement based on the certification field and scope achieved by the product supplier or manufacturer.
	5. Toda la madera no certificada utilizada en la construcción debe ser de procedencia legal y no incluida en la lista CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora)./ 5. All non-certified woods employed in the construction shall have a legal origin and they shall not be included by the CITES list (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora).
FASE:/ STAGE:	EJECUCIÓN DE LA OBRA/ WORK EXECUTION
OBJETIVO:/ OBJECTIVE:	REDUCCION DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIONES A LA ATMOSFERA/ REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION AND EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE
Estrategia:/ Strategy:	Aplicar al menos 5 buenas prácticas de las recogidas en la certificación BREEAM sobre requisitos de gestión./ Applying at least 5 good practices provided by BREEAM standard regarding management requirements.
	1. Reutilización de la cubierta existente en el emplazamiento para reducir las emisiones de demolición y transporte en obra./ 1. Recycling the existing cover roof at the same location to reduce emissions derived from demolition and transportation at the job site.
	2. Construcción de fachadas más ligeras e industrializadas para reducir la cantidad total de material necesario, el transporte de materiales, el peso a soportar por la estructura y, por tanto, reducción del peso de la estructura del edificio./ 2. Construction of lighter and industrialized front walls to reduce the amount of total material to be used, as well as material transportation, weight to be supported by the structure and, therefore, reducing the building structural weight.
	3. Monitorización de los consumos y emisiones en obra./ 3. Controlling consumption and emissions at the job site.
	4. Utilización de elementos constructivos y estructuras prefabricadas, elección de productos industrializados de ejecución rápida y aprovechamiento planificado de los medios auxiliares, con el fin de reducir las emisiones en obra en un 25%./ 4. Utilization of prefabricated constructive elements and structures. Selection of industrialized fast execution products. Planned exploitation of secondary goods, in order to reduce emission down to 25% at the job site.
	5. Aplicación de las mejores prácticas ambientales en la construcción en relación a la contaminación atmosférica por polvo, resultante de las actividades./ 5. Implementation of the best environmental practices in construction regarding dust atmosphere pollution resulting from work activities.
OBJETIVO:/OBJECTIVE:	REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA/ REDUCTION OF WATER CONSUMPTION
Estrategia:/Strategy:	Estrategia: Reducción de un 15% del consumo de agua de obra./ Strategy: 15% reduction of water consumption at the job site
	1. Especificación de sistemas de construcción seca para reducción del consumo de agua en un 10%./ 1. Specification of dry construction systems to reduce water consumption in 10%.
	2. Seguimiento, información y establecimiento de objetivos de consumo de agua procedentes de las actividades de la obra./ 2. Following-up information and objectives on water consumption for activities developed at the job site.
OBJETIVO:/OBJECTIVE:	REDUCCION DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS/ REDUCTION OF WASTE RESIDUES
Estrategia:/Strategy:	Estrategia: Reducción de un 20% de los residuos en obra. /Strategy: 20% reduction of waste residues at the job site.
	1. Reutilización, reciclado u otra forma de valorización del 60% (en peso o volumen) del Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) total generado en obra (exceptuando los residuos peligrosos)./ 1. Reutilization, recycling and any other method of energy recovery for the 60% (weight and volume) of the total construction and demolition recycled residues (CDR) generated at the job site (excepting for dangerous residues).

Tabla 5. Definición de objetivos, estrategias y medidas ambientales a ejecutar en la fase de uso y mantenimiento. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos de LKS.

Table 5. Definition of objectives, strategies and environmental measures to be implemented into the operation and maintenance stage
Source: self elaboration from data obtained from LKS

FASE:/STAGE:	USO Y MANTENIMIENTO/ OPERATION AND MAINTENANCE
OBJETIVO:/ OBJECTIVE	REDUCCION DEL CONSUMO DE ENERGIA Y REDUCCION DE LAS EMISIONES A LA ATMOSFERA/ REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION AND REDUCTION OF EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE
Estrategia pasiva 1:/ Passive strategy 1:	Hacer un diseño que reduzca la demanda energética para calefacción en invierno y climatización en verano./ Designing a system to reduce energetic consumption for heating during winter and air conditioning in summer.
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Reducción de la transmitancia térmica en cubiertas y fachadas respecto lo establecido en el DB-HE-1 del Código Técnico de la Edificación (CTE)./ 1. Reduction of thermal transmittance in cover roofs and front walls in accordance with the DB-HE-1 of Building Technical Code (BTC).
	2. Instalación de vidrios de baja emisividad térmica 6t /15/4+4 (U=1,6 w/m2°k)./ 2. Installing low thermal emissivity glasses 6t /15/4+4 (U=1,6 w/m2°k).
	3. Eliminar el sobrecalentamiento de las oficinas en las fachadas con mayor soleamiento mediante vuelos./ 3. Installing cantilevers to protect offices' front walls from overeating due to sun exposure.
Estrategia pasiva 2:/ Passive strategy 2:	Luz natural./ Day light
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Optimización de la luz natural en zonas comunes./ 1. Day light optimization for common areas
Estrategia activa 1:/ Active strategy 1:	Instalaciones eficientes 1. Climatización (oficinas). Reducción del consumo de gas y reducción de emisiones a la atmosfera./ Efficient installations. 1. Air conditioning (Offices). Reduction of gas consumption and reduction of gas emissions into the atmosphere.
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Climatizadoras de alto rendimiento y bajos niveles de emisiones de NOx./ 1. High performance air conditioning equipment for low NOx emissions levels
	2. Instalación de un sistema de geotermia para la climatización de las oficinas y locales anejos./ 2. Installation of a geothermal system for air conditioning in offices and attached premises.
	3. Contadores individuales monitorizados de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción./ 3. Separate control devices for solar water heating (SWH) and air conditioning.
	4. Optimización de la difusión de aire en el pabellón, con una reducción del consumo energético del sistema de climatización en un 75%, en el 82% del tiempo que se usa el pabellón (periodos de entrenamiento)./ 4. Optimization of air flow inside the multi-purpose arena by reducing the energetic consumption of air conditioning system down to 75%, and 82% for the time the arena is occupied (training periods).
Estrategia activa 2:/ Active strategy 2:	Instalaciones eficientes 2. Ascensores./ Efficient installations 2. Elevators
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Modo stand-by de ahorro energético cuando el ascensor no está en funcionamiento./ 1. Stand-by mode for energetic saving when the elevator is not operating.
	2. Regulador de velocidad para la mejora del rendimiento del motor, ajustando su funcionamiento al par y la velocidad que se requiera en cada momento./ 2. Speed regulator to improve engine performance by adjusting operation in pairs and adapting speed at any required moment.
	3. Sistema regenerativo que aprovecha la energía generada durante las deceleraciones del ascensor para devolver energía a la red eléctrica./ 3. Regenerative system taking advantage of energy produced during elevator decelerations to feed energy back to the power supply.
	4. Sistema de iluminación eficiente (LED)./ 4. Efficient lighting system (LED).
Estrategia activa 3:/ Active strategy 3:	Compensación de los consumos y emisiones del edificio con la generación de energía renovable in situ/ Compensation of building consumption and emissions with in situ renewable energy.
	1. Producción de energía eléctrica en la cubierta del pabellón con paneles fotovoltaicos: 425.000kWh.año. Se evita la emisión de 170tn de CO2 al año./ 1. Generation of electric energy on the arena roof by using photovoltaic panels: 425,000kWh.year. CO2 emission of 170 ton is avoided per year.
	2. Producción de energía eléctrica en la cubierta mediante generadores eólicos: 45.000kWh.año./ 2. Generation of electric energy on the arena roof by using wind turbines: 45,000kWh.year.
OBJETIVO:/ OBJECTIVE:	REDUCCION DEL CONSUMO DE AGUA/ REDUCTION OF WATER CONSUMPTION
Estrategia:/ Strategy:	Ahorro en el consumo del agua potable en un 60%./ 60% saving of drinking water consumption
	Medidas ambientales:/ Environmental measures:
	1. Minimizar el consumo de agua potable en instalaciones sanitarias mediante la instalación de aparatos sanitarios de bajo consumo de agua: – Los inodoros de doble descarga no podrán superar 4,5l/3l. de consumo y los inodoros de simple descarga no podrán superar los 4,5l. – Todos los urinarios del edificio tendrán como máximo un caudal efectivo de descarga de 1,2l./ 1. Minimizing the consumption of drinking water used by plumbing equipment by means of the installation of flushing toilets with low water consumption. – Double flushing toilets cannot exceed 4.5l/3l consumption. Single flushing toilets cannot exceed 4.5l consumption. – All urinary devices in the building will have a maximum effective flushing flow of 1.2l.
	2. Todos los grifos llevarán una etiqueta indicativa con explicación del correcto funcionamiento del mismo para el ahorro del agua./ 2. All taps will hold an explanatory label with correct use instructions for water saving.
	3. Instalación de 12 depósitos de recogida de agua de lluvia (un depósito por torre), para el aprovechamiento de esta agua para la descarga de urinarios e inodoros./ 3. Installation of 12 rainfall water tanks (one tank per tower), so as to take advantage of this water for toilets and urinary devices flushing systems.



Las medidas de mejora adoptadas en cada uno de los aspectos ambientales contemplados en el proyecto contribuyeron de forma considerable a la mejora del comportamiento ambiental del edificio. Gran parte de las medidas aplicadas se orientaron principalmente a reducir los impactos ambientales de dos de los aspectos más críticos del proyecto, que corresponden a la fase de uso: el consumo de energía y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Ello ha supuesto, entre otras mejoras ambientales, la reducción del consumo energético en un 40% y las emisiones de CO₂ en un 44,6% respecto al edificio de referencia según el Código Técnico de la Edificación (CTE) (España, 2006), que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en España, con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad, la sostenibilidad de la edificación y la protección del medio ambiente.

El nuevo Fernando Buesa Arena es fruto de la puesta en práctica del conocimiento y la experiencia adquirida por LKS en la mejora del comportamiento ambiental de edificios. Ello ha sido posible gracias a la formación continua del personal de oficina técnica en materia de arquitectura bioclimática y del propio sistema de gestión del ecodiseño, desde que en 2009 LKS lograra el certificado de ecodiseño según el estándar UNE150301.

En el caso de LKS, el principal beneficio de la certificación ha sido principalmente “el lanzamiento de la empresa en la dirección en la que quería ir”, es decir, un impulso y un apoyo para continuar en el desarrollo y mejora de un modelo de negocio sostenible a largo plazo. Por otro lado, la integración del ecodiseño en el mapa de procesos del sistema de gestión y en el diagrama de redacción de los proyectos ha supuesto un esfuerzo menor en el cumplimiento de especificaciones ambientales en concursos públicos y ha contribuido a mejorar el nivel de gestión de los edificios en la fase de diseño y desarrollo. Además, les ha servido como base para conseguir los certificados LEED (Katz, 2012) y BREEAM (BRE, 2013) de evaluación de la sostenibilidad de edificios.

Sin embargo, la adopción de este tipo de soluciones constructivas en la fase de proyecto incrementa ligeramente el coste de los edificios, debido principalmente a la utilización de medidas activas de ahorro energético y energías renovables, y medidas pasivas, fundamentalmente con la utilización de materiales y sistemas constructivos, en muchas ocasiones, más caros que empleados tradicionalmente. No obstante, el ahorro económico estimado en la fase de uso y mantenimiento del edificio, con una vida útil estimada de hasta 100 años en edificación residencial (España, 2011) justifica la adopción de estas medidas. Sin embargo, pese a la constatación de estos beneficios, las AA.PP. muestran una tímida actitud por estas cuestiones. Desde el nacimiento del estándar, no han manifestado una clara determinación por impulsar el ecodiseño como herramienta para el desarrollo sostenible de la edificación. Esta situación y el hecho de que el estándar de ecodiseño no haya nacido con fines de certificación, hace pensar en LKS que el estándar ISO14006 tiene un futuro incierto. En todo caso, LKS dispone de documentación con información sobre el Sistema Integrado de Gestión, elaborada expresamente para su inclusión en aquellas licitaciones en las que vaya a ser valorada.

The improvement measures implemented into each environmental aspect, considered by this project, contributed to improve the environmental behavior of this building. The implemented measures were mainly oriented to reduce environmental impacts on the two most critical aspects of the operation stage: energy consumption and emissions of CO₂ into the atmosphere. Such measures, among other environmental measures, have reduced the energy consumption in 40%, and CO₂ emissions in 44.6% in comparison to the reference building, as per the Building Technical Code (CTE) (Spain, 2006). Such Code establishes the requirements to be fulfilled by buildings in Spain, in order to guarantee inhabitants safety, society welfare, building sustainability and environmental protection.

The new Fernando Buesa Arena is the result of applying knowledge and experience achieved by LKS in improving buildings environmental behavior. It was possible due to the permanent training provided to the technical staff on subjects such as bio-climatic architecture and eco-design management system, since 2009, which is the year LKS achieved the eco-design certification according to the standard UNE150301.

The most important benefit of LKS certification is that “the company was launched towards the direction they wanted to go”, i.e., it is an endeavor and support to continue developing and improving a business model, which is sustainable in the long term. On the other hand, the implementation of eco-design into the processes map of the management system and into the project design diagram has meant a lower effort when fulfilling the environmental standards demanded by public tenders and, it has also helped to improve the buildings management level in design and development stages. Furthermore, this standard served as a basis for achieving LEED (Katz, 2012) and BREEAM (BRE, 2013), certificates on building sustainability assessment.

However, the implementation of these kinds of constructive solutions into the project stage slightly increases buildings expenses, mainly due to the application of active measures of energetic saving and renewable energies. In most cases the cost of applying passive measures is higher, as materials and constructive systems are more expensive than the traditional ones. Nevertheless, the estimated economic savings in the stage of building operation and maintenance, considering a life cycle of 100 years for a residential building (Spain, 2011), justifies the adoption of such measures. In spite of the fact that the benefits are proven, the public organizations are diffident in regards to these matters. Since the standard was created, public organizations have not been clearly determined to implement the eco-design as a tool for buildings sustainable development. Such situation and the fact that the eco-design standard was not elaborated for certification purposes, lead LKS to consider that the standard ISO14006 had an uncertain future. Anyway, LKS has the information regarding the Integrated Management System, especially elaborated for tenders demanding for it.

A pesar de estos inconvenientes, en LKS se muestran satisfechos con la adopción y certificación del estándar de ecodiseño. En su opinión, resulta más gratificante que otros estándares, porque los resultados se muestran de forma más explícita, no solamente en términos de rentabilidad para la propia organización, sino también en términos ambientales, lo que para los mismos trabajadores crea satisfacción, conocedores de que fruto de su trabajo el medioambiente y la sociedad se ven beneficiados.

5. Discusión y conclusiones

En estos días en que nos encontramos inmersos en una crisis económica que no acabamos de superar, los estudios de arquitectura que desarrollan su actividad en un sector especialmente castigado, tienen que buscar elementos diferenciadores para poder obtener unos resultados que les permitan sobrevivir en el mercado (Arana et al., 2012).

Es por ello que tal y como hemos podido comprobar en los nueve casos analizados y en las 21 entrevistas realizadas con siete agentes involucrados en el proceso de difusión del estándar, las empresas tienen como principal objetivo encontrar un elemento diferenciador que les aporte una ventaja competitiva en concursos. Asimismo, buscan una herramienta que les permita mejorar su proceso creativo e integrar en él aspectos no sólo relacionados con el medio ambiente sino también con la mejora de la calidad de sus soluciones, como es por ejemplo, la disminución de los consumos de energía y agua en la fase uso. En relación a los aspectos ambientales, consideran que las posibilidades de reducir el impacto en la fase de elaboración del proyecto es muy elevada, y es por ello que en la mayoría de estudios piensan que el estándar podría ser una herramienta muy válida.

En cuanto al proceso de adopción, las empresas que han implantado el estándar ISO14001 consideran que, comparativamente, la adopción de la ISO14006 les ha supuesto mucho más esfuerzo, aunque han obtenido unos resultados significativamente mejores, ya que el impacto ambiental directo que produce un estudio de arquitectura no es en absoluto comparable al de los proyectos que diseñan. Además, señalan que pese a no lograr que el cliente aprobase todas sus propuestas, han conseguido reducciones de impactos ambientales significativas, principalmente debido a que han conseguido reducir la energía consumida en todas las fases del ciclo de vida.

Sin embargo, en todos los casos señalan que uno de los principales problemas que han tenido está relacionado con la aprobación por parte del cliente de las medidas para reducir el impacto ambiental, ya que suponen un aumento de costes, y normalmente suelen ser rechazadas aunque en muchos casos supongan una reducción de costes, principalmente en la fase de uso.

Para evitar estos problemas, las AA.PP. juegan un papel fundamental a la hora de establecer normas de obligado cumplimiento y de valorar los aspectos ambientales en las licitaciones públicas. Sin embargo, las AA.PP. no están actuando como agentes tractores en la medida en que se les demanda desde distintos sectores de la sociedad. Especialmente en tiempos de crisis económica como la actual, actúan demasiado tarde a la hora de implantar normativas ambientales.

In spite of such inconveniences, LKS executives are satisfied with the implementation and certification of eco-design standard. In their opinion, this standard is more rewarding than others, as results are clearly seen, not only in profitability terms for the organization itself, but also in environmental terms, which offers workers satisfaction as they understand their work provides benefits for the environment and for the society.

5. Discussion and conclusions

Nowadays, we are facing a deep economic crisis that we have not been able to overcome yet; therefore, the architecture firms are developing their activities within an especially afflicted sector. They struggle to find differentiator elements for achieving results that would allow them to survive in this market (Arana et al., 2012).

Consequently, from the nine analyzed cases and 21 interviews held with seven entities involved in the broadcasting process for this standard, we have observed that companies' main objective is to find differentiator elements providing comparative advantages when tendering their projects. Similarly, they need a tool allowing them to improve their creative process and integrate aspects not only related to the environment, but also related to the improvement of the quality of their solutions, such as reduction of energy and water consumption in the operation stage. Regarding environmental aspects, they consider that the possibilities of reducing environmental impact during the project elaboration stage are quite high and, therefore, most architecture firms think this standard may become a valid tool for such purposes.

As far as this process implementation is concerned, companies that have adopted the standard ISO14001 consider that, in comparative terms, the implementation of ISO14006 has demanded a larger effort, although they have achieved significantly better results, since direct environmental impacts produced by an architecture firm is not comparable to the impacts produced by the projects they design. Furthermore, they state that in spite of not convincing clients to accept all their proposals, they have managed to achieve significant environmental impacts reductions, mainly because they have reduced energy consumption in all stages of a project life cycle.

However, in all study cases, they state that one of the major problems they have faced is related to obtain the client approval to implement measures to reduce environmental aspects. Clients assume that such measures would increase costs, so they usually reject them; even though in many cases they represent a cost reduction, mainly during the operation stage.

In order to avoid such situations, the public organizations play a fundamental role at the time of establishing mandatory regulations and recognizing the value of environmental aspects in public tenders. However, public organizations are not acting as driving agents, as demanded by diverse sectors of the society. Especially in times of economic crisis, as the current one, they are taking too long in implementing actions regarding environmental regulations.



Este retraso, en el sector de la construcción, dificulta la puesta en valor del esfuerzo en la mejora de la calidad y el desempeño ambiental de los edificios en todo su ciclo de vida, y resta competitividad a las empresas más respetuosas con el medio ambiente. Y por otro lado, aumentan los costes derivados en la fase de uso de edificios poco sostenibles que repercute directamente en el usuario final.

A pesar de todo ello, se observa que los estudios de arquitectura analizados se encuentran satisfechos con la adopción del estándar de ecodiseño. En general, señalan que ha contribuido en la mejora de su imagen y su posición en los concursos. Asimismo, señalan que el proceso de mejora continua les ha permitido reducir costes en la fase de uso principalmente, a través de la optimización del consumo de agua y energía. Por todos estos motivos, existe un acuerdo unánime entre los estudios a la hora de señalar que la adopción del estándar de ecodiseño les ha servido para mejorar su posición competitiva, pese a que en relación al esfuerzo realizado algunos de ellos esperaban mejores resultados.

En cualquier caso, dado que el estándar ISO14006 se encuentra en sus primeras fases de difusión y que la investigación se ha realizado en una zona geográfica concreta como es España, hay que ser cautos a la hora de extrapolar estos resultados a otros países, así como a la hora de señalar si algunas de estas mejoras serán estables en el tiempo, puesto que en cuanto a las mejoras externas obtenidas por la adopción de estándares de gestión se refiere, éstas disminuyen a medida que va avanzando la fase de crecimiento de la difusión del estándar (Llach et al., 2011).

For the construction sector, such delay complicates the implementation of valuable efforts made to improve quality and the environmental behavior of buildings during their whole life cycle, thus decreasing the competitiveness level of the most engaged companies in environmental concerns. On the other hand, the costs derived from the operation stage, in poor sustainable buildings, directly affect the final user.

In spite of above, it is observed that the studied architecture firms are satisfied with the implementation of the eco-design standard. In general, they declare that it has contributed in improving their corporate image and status in tenders. In the same way, they indicate that the progressive improvement process allows cost reduction mainly in the operation stage, by means of the optimization of water and energy consumption. Due to above reasons, there is a unanimous consensus among architecture firms when stating that the implementation of the eco-design standard has improve their competitiveness level. Although some firms expected better results in comparison to the effort they had made.

Anyway, since standard ISO14006 is in its first diffusion stages and the research has been developed in a restricted geographical zone, such as Spain; it is advisable to be careful when extrapolating results into other countries. Being careful is also suggested when indicating if some improvements will be steady in the course of time, because as far as the external improvements achieved by the implementation of a management standard are concerned, they tend to decrease as long as the growth phase of the standard diffusion progresses (Llach et al., 2011).

6. Referencias/References

- AENOR (2003)**, UNE150301: 2003. Gestión ambiental del proceso de diseño y desarrollo. Ecodiseño, AENOR, Madrid.
- Arana G., Heras I. (2011)**, Paving the way for the ISO14006 ecodesign standard: an exploratory study in Spanish companies, *Journal of Cleaner Production*, 19 (9), 1007-1015.
- Arana G., Cilleruelo E., Aldasoro J.C. (2012)**, ISO14006. Experiencias previas de estudios de arquitectura que han adoptado el estándar de ecodiseño UNE150301:2003, *Informes de la Construcción*, doi: 10.3989/ic.11.010.
- Arana G., Heras I., Cilleruelo E. (2011)**, A case study of the adoption of a reference standard for ISO14006 in the lift industry, *Clean Technologies and Environmental Policy*, doi: 10.1007/s10098-011-0427-4.
- Building Research Establishment (BRE) (2013)**, (25 de marzo) What is BREEAM? <http://www.breeam.org/about.jsp?id=66>.
- Damasceno Do Nascimento E.M., Caldas I. (2008)**, Impactos ambientales en la ciudad de Manaos: una búsqueda de comprensión, *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(2), 94-101.
- Eisenhardt K. (1989)**, Building theories from case study research, *Academy of Management Review*, 14 (4), 532-550.
- España (2011)**, Real Decreto 1492/2011, de 24 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de valoraciones de la Ley de Suelo, *Boletín Oficial del Estado*, 270, 116626 - 116651.
- España (2006)**, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, *Boletín Oficial del Estado*, 74, 11816-11831.
- Gangofells M., Casals M. (2012)**, Un enfoque basado en ontología para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra, *Revista Ingeniería de Construcción*, 27 (3), 103-127.
- Heras I., Arana G., Díaz de Junguitu A., Espí M.T., Molina J.F. (2008)**, Los Sistemas de Gestión Medioambiental y la competitividad de las empresas de la CAPV, Instituto Vasco de Competitividad, Bilbao.
- IHOBE (2010)**, Guías sectoriales de ecodiseño, Sociedad de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (IHOBE), Bilbao.
- Sáez de Cortázar A. (2011)**, Ayudas y herramientas para ecodiseñar materiales de construcción, Bilbao Ecodesign Meeting 2011, Sociedad de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (IHOBE), Bilbao.
- ISO (2004)**, ISO14001:2004. Environmental management systems. Requirements with guidance for use, ISO, Geneva.
- ISO (2002)**, ISO/TR14062:2002. Environmental management. Integrating environmental aspects into product design and development, British Standards Institution, London.

- ISO (2006)**, ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and Framework, ISO, Geneva.
- ISO (2011)**, ISO14006:2011. Environmental management systems. Guidelines for incorporating ecodesign, ISO, Geneva.
- Katz A. (2012)**, About LEED, EE.UU. Green Building Council (USGBC), <http://www.usgbc.org/articles/about-leed>.
- Llach J., Marimon F., Bernardo M. (2011)**, ISO9001 diffusion analysis according to activity sectors, Industrial Management & Data Systems, 111 (2), 298-316.
- Martí i Ragué X. (2010)**, Edificación sostenible, X Congreso Nacional de Medioambiente (CONAMA), Madrid, España, noviembre.
- Martínez P., González V. and Fonseca E. (2009)**, Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación y construcción de proyectos, Revista de Ingeniería de la Construcción, 24 (1), 05-32.
- Maxwell J. (2005)**, Qualitative Research Design. An Interactive Approach, Thousand Oaks, Sage Publications, California.
- Miles M.B., Huberman A.M. (1994)**, Qualitative data analysis, Sage, California.
- Pellicer E., Yepes V., Correa C., Martínez G. (2008)**, Mejorando la I+D+i mediante la estandarización y la certificación: el caso del sector de la construcción Español, Revista Ingeniería de Construcción, 23 (2), 112-121.
- Servicio de Secretaría Técnica de Arquitectura (2010)**, Exposición del Proyecto de reforma y ampliación del pabellón "Fernando Buesa Arena", Diputación Foral de Álava, Vitoria-Gasteiz, España.
- Yin R.K. (2009)**, Case Study Research: Design and Methods, Sage, California.



Trends in productivity improvement in construction projects in Palestine

Tendencias para optimizar la productividad en los proyectos de construcción en Palestina

Adnan Enshassi^{1*}, Bernd Kochendoerfer^{**}, Karem Abed^{***}

* Department of Civil Engineering, IUG, PALESTINE

** Fachgebiet Bauwirtschaft und Baubetrieb, Technische Universität Berlin, GERMANY

*** PECDAR, Gaza, PALESTINE

Fecha de Recepción:19/04/2013
Fecha de Aceptación:20/06/2013
PAG 173 -206

Abstract

Labor productivity in construction industry is gaining increasing attention as the industry faces multiple problems related to its workforce. Most of construction projects in the Gaza Strip were suffering from declining productivity and thus causing projects delay, and cost overruns. The aim of this paper is to determine contractors' perceptions towards the identified productivity improvement factors according to their relative importance in construction projects in the Gaza Strip. A comparison was made with other developed and developing countries. Eighty-three productivity improvement factors were considered in the questionnaire and categorized into eleven groups. A survey was conducted among construction firms in the Gaza Strip to rank these factors by their degree of influence on productivity of construction projects. Ninety questionnaires were randomly distributed among local contractors whereas seventy three valid questionnaires were collected from respondents. The findings of this study indicated that the most significant productivity improvement factors are: closures and economical difficulties, political situation, delivery on time, field management, and material availability. External circumstances group was found the most important group which affects productivity improvement in the Gaza Strip as the unstable political atmosphere affects badly the construction industry. A proactive relationship has to be established among all parties in order to allocate effective productivity improvement plans. It is hoped that, by identifying and ranking the major problems affecting construction productivity should help contractors to facilitate proper solutions as well as determining potentials for productivity improvement. The industry needs to collaborate more with universities and research institutions in order to plan an effective strategy through which construction industry could be enhanced. Training can increase productivity, morale, reduce the load on supervisors, improve safety, and increase organizational stability and flexibility.

Keywords: Construction, contractors, improvement, productivity

Resumen

La productividad laboral en la industria de la construcción está ganando una creciente atención en cuanto la industria enfrenta múltiples problemas relacionados con su fuerza laboral. La mayoría de los proyectos de construcción en la Franja de Gaza sufre una disminución de productividad provocando demoras y exceso de costos. El objetivo de este artículo es determinar las perspectivas de los contratistas hacia factores de optimización de la productividad ya identificados, de acuerdo a su importancia relativa en proyectos de construcción en la Franja de Gaza. Se realizó una comparación con otros países desarrollados y en vías de desarrollo. Ochenta y tres factores de optimización de la productividad fueron considerados por el cuestionario y categorizados en once grupos. Se realizó una encuesta entre empresas constructoras de la Franja de Gaza para clasificar los factores, de acuerdo a su grado de influencia sobre la productividad de los proyectos de construcción. Noventa cuestionarios fueron distribuidos al azar entre contratistas locales, mientras que setenta y tres cuestionarios válidos fueron contestados localmente. Los descubrimientos de este estudio indicaron que los factores de optimización de la productividad más relevantes son: el cierre, dificultades económicas, situación política, tiempos de entrega, administración en obra y disponibilidad de material. El grupo de circunstancias externas que más afecta la optimización de productividad en la Franja de Gaza es la atmósfera de inestabilidad política que daña la industria de la construcción. Se debe establecer una relación proactiva entre las partes para instaurar planes de optimización a la productividad. Se espera que al identificar y clasificar los grandes problemas que afectan la productividad en la construcción, se facilitarán soluciones adecuadas a los contratistas, y a su vez se determinarían los potenciales factores para la optimización de la productividad. La industria requiere colaborar más con las universidades e instituciones de investigación para planificar una estrategia eficiente, a través de la cual se pudiera optimizar la industria de la construcción. El entrenamiento puede aumentar la productividad, la motivación, reducir la carga a los supervisores, optimizar la seguridad e incrementar la estabilidad y flexibilidad organizacional.

Palabras Clave: Construcción, contratistas, optimización, productividad

1. Introduction

The flow of monetary aids to the Gaza Strip through the World Bank, EUC, USAID and others, contributed to create an ideal climate to improve many sectors like construction, education and investment. The growth in different sectors in the Palestinian society required the support of effective construction industry.

1. Introducción

El flujo de la ayuda monetaria a la Franja de Gaza, a través del Banco Mundial, EUC, USAID y otros, ha contribuido a crear un clima ideal para mejorar sectores tales como la construcción, educación e inversión. El crecimiento de diferentes sectores de la sociedad palestina requirió del apoyo efectivo de la industria de la construcción.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: aenshassi@gmail.com

Roads, infrastructure projects (sewage and water), governmental buildings and Gaza airport have been constructed to facilitate the life for the Palestinian citizens. Until 2000, contractors enjoyed very good business and achieved satisfactory profits. However since then, uptight tense political climate affected in winding down of many plans for development which in turn created what was perceived to be a recession in the construction industry in the Gaza Strip. The contractors' profits margins as well as the demand for construction have been in decline. This situation affected the local contractors to become more competitive in order to survive and remain in the market. Construction market in the Gaza Strip forced many contractors to look for other alternatives or to improve their abilities by using proper managerial tools to stay within the circle of competitiveness. Among these tools, controlling construction productivity became an effective way to improve the contractor's abilities and to facilitate the performance of their projects.

The Palestinian Authority (PA) is highly dependent on two sources of income. The first is annual aid package from western donors of about \$1 billion per year. In year 2005, donors gave the PA \$1.3 billion, for humanitarian and emergency (\$500m/38%), for development, (\$450m/35%), and for budgetary assistance (\$350m/27%), much of it now suspended. The second is a monthly transfer by Israel of \$55 million in customs and tax revenues that it collects for the PA, a source of revenue that is absolutely critical to the Palestinian budget and totally suspended. In fact, Israel is now withholding close to half a billion dollars in Palestinian revenue that is desperately needed in Gaza (Roy, 2006). Unemployment in Gaza is close to 40% and is set to rise to 50% (Palestinian Bureau of Statistics 2007). The private sector-that generates 53% of all jobs in Gaza has been devastated, businesses have been bankrupted and 75,000 out of 110,000 workers are now without a job. At present, 95% of Gaza's industrial operations are suspended because they cannot access inputs for production nor can they export what they produce. The construction industry is paralyzed with tens of thousands of labors out of work (OCHA, 2007). The agriculture sector has also been badly hit and nearly 40,000 workers who depend on cash crops now have no income (World Bank, 2008). Data compiled by Gisha (2007) showed that Gaza's industry is collapsing. Out of the 3,900 factories in Gaza producing food, pharmaceuticals, construction materials, wood, paper, craftwork, engineering materials, metals, plastics and rubber, more than 2,900 factories have ceased to produce.

Proyectos de infraestructura, caminos (aguas y alcantarillado), edificios gubernamentales y aeropuerto de Gaza han sido construidos para facilitar la vida de los ciudadanos palestinos. Hasta el año 2000, los contratistas disfrutaban de un muy buen negocio y alcanzaban ganancias satisfactorias. Sin embargo, desde entonces, un clima político bastante tenso afectó derrumbando muchos planes para el desarrollo, que a su vez produjeron una recesión en la industria de la construcción de la Franja de Gaza. Los márgenes de ganancias de los contratistas, así como la demanda por construcción, han ido decayendo. Esta situación afectó a los contratistas locales tornándolos más competitivos, con el fin de sobrevivir y poder mantenerse en el mercado. El mercado de la construcción en la Franja de Gaza forzó a muchos contratistas a buscar otras alternativas o a mejorar sus habilidades empleando herramientas de gestión adecuadas para mantenerse dentro del círculo de competitividad. Dentro de aquellas herramientas, el control de la productividad en la construcción se transformó en una forma eficiente para mejorar las habilidades de los contratistas y facilitar el desarrollo de sus proyectos.

La Autoridad Palestina (AP) depende directamente de dos fuentes de ingresos. La primera es el paquete de ayuda anual, de donantes occidentales, de alrededor de mil millones de dólares por año. En el año 2005, los donantes entregaron a la AP \$ 1.3 mil millones, para asistencia humanitaria y de emergencia (\$500m/38%), para desarrollo (\$450m/35%), y para asistencia presupuestaria (\$350m/27%), mucho de lo cual hoy se encuentra suspendido. La segunda fuente es una transferencia mensual proveniente de Israel de \$55 millones en ingresos aduaneros y tributarios que reúne para la AP; fuente de ingresos que es absolutamente crítica para el presupuesto palestino y que ha sido totalmente suspendido. De hecho, Israel hoy retiene cerca de quinientos millones de dólares en ingresos palestinos, que son desesperadamente necesarios para Gaza (Roy, 2006). El desempleo en Gaza alcanza cerca del 40% y podría llegar al 50% (Oficina de Estadísticas Palestinas 2007). El sector privado que genera el 53% del total de empleos en Gaza ha sido devastado, las empresas han quebrado y 75.000 de 110.000 trabajadores se encuentran desempleados. Actualmente el 95% de las operaciones industriales en Gaza se encuentran suspendidas, debido a que no logran acceder a suministros para la producción, o porque no pueden exportar sus productos. La industria de la construcción se encuentra paralizada, con decenas de miles de trabajadores fuera de sus labores (OCHA, 2007). El sector agrícola también ha sido golpeado negativamente y cerca de 40.000 trabajadores, quienes dependen del dinero de las cosechas, no obtienen ingreso alguno (Banco Mundial, 2008). La información recogida por Gisha (2007) demostró que la industria de Gaza está colapsada. De un total de 3.900 fábricas productoras de alimentos, remedios, materiales de construcción, madera, trabajos calificados, materiales para la ingeniería, metales, plásticos y caucho, 2.900 han cerrado su producción en Gaza.

Productivity is one of the significant components of every company's success and competitiveness in the construction market. A construction contractor stands to gain or lose, depending on how well his company's productivity responds to competition. Construction companies may gain advantage over their competitors by improving upon productivity to build projects at lower costs; yet, most contractors do not systematically and properly address this strategic issue or evaluate its impact on the project's profit (Mojahed and Aghazadeh 2007). Productivity is a significant issue in the construction industry in large areas of the world. In Palestine like several other countries, productivity in construction industry still suffers from lack of accurate measurements and effective strategies to enhance construction productivity. The low interest in productivity in the Gaza Strip caused disruption in many projects as well as uncontrollable construction process. Increased productivity can have a large impact on the overall construction process and consequently results in significant cost and time savings. Any opportunity to achieve productivity improvements over the historical norm will require better planning. The aim of this paper is to determine contractors' perceptions towards the identified productivity improvement factors according to their relative importance in construction projects in the Gaza Strip. This will assess contractors to eliminate or minimise productivity problems, hence improve productivity.

2. Literature review

Construction productivity improvement is a key issue for businesses and nations to increase profitability, reduce costs, create and sustain competitive advantage. To remain world-class players in a highly competitive global market, construction decision makers must promote individual productivity strategies that match business needs (Flanagan et al., 2005; Productivity Commission of the Australian Government, 2005). Several researches studied the factors affecting construction productivity in order to find the potentials for productivity improvement. A survey of top contractors conducted by Arditi and Mochtar (1996), in Indonesia indicated that certain functions including procurement practices, cost control, scheduling and management integration need much improvement. The functions that were identified as needing more improvement were prefabrication, new materials, value engineering, specifications, labor availability, labor training, and quality control, whereas those that were identified as needing less improvement than in the previous surveys were field inspection and labor contract agreements (Arditi and Mochtar 2000). Construction tasks are generally complex and hard to quantify when assessing and measuring productivity (Janssen, 2008). In many countries the construction industry attracted criticism for low productivity and poor quality (Eriksson and Westerberg 2011).

La productividad es uno de los componentes cruciales para el éxito de una empresa, así como lo es la competitividad en el mercado de la construcción. Un contratista de la construcción se dispone a ganar o perder, dependiendo de lo bien que responda la productividad de su empresa a la competencia. Las empresas constructoras pueden tomar ventaja sobre sus competidores mejorando la productividad, al desarrollar proyectos a menor costo. Sin embargo la mayoría de los contratistas no orientan sistemáticamente, o en forma adecuada, su estrategia o evalúan su impacto en la rentabilidad del proyecto (Mojahed y Aghazadeh 2007). La productividad es un aspecto crucial en la industria de la construcción en extensas áreas del mundo. En Palestina, al igual que en muchos otros países, la productividad en la construcción aún sufre de un déficit de medidas precisas y de estrategias eficientes para aumentar la productividad de la construcción. El poco interés en la productividad y el proceso constructivo sin control en la Franja de Gaza, han provocado la interrupción de numerosos proyectos. La productividad optimizada puede tener un gran efecto sobre el proceso constructivo total y, en consecuencia, conllevar a ahorros de tiempo y costos. Una oportunidad de alcanzar una mejor productividad, sobre los registros históricos, requerirá de una mejor planificación. El objetivo de este artículo es determinar las percepciones de los contratistas hacia los factores de optimización de la productividad identificados, de acuerdo a su importancia relativa en proyectos de construcción en la Franja de Gaza. Los contratistas evaluarán eliminar o minimizar problemas constructivos, por lo tanto mejorarán la productividad.

2. Revisión de literatura

La optimización en la productividad de la construcción es un tema clave para la actividad comercial de los países, en cuanto a aumentar la rentabilidad, reducir costos, crear y mantener ventajas competitivas. Para mantenerse como actores reconocidos dentro de un mercado global altamente competitivo, los entes tomadores de decisiones en la construcción deben promover estrategias de productividad individuales, que se ajusten a las necesidades comerciales (Flanagan et al., 2005. Comisión de Productividad, Gobierno de Australia, 2005). Muchos investigadores han estudiado los factores que afectan la productividad en la construcción, con el fin de encontrar los factores potenciales para la optimización de la productividad. Una encuesta realizada a contratistas reconocidos por Arditi y Mochtar (1996), en Indonesia, indicó que ciertas funciones que incluyen prácticas de abastecimiento, control de costos, integración de gestión y horarios necesitan ser optimizadas. Aquellas funciones que necesitan mayor optimización son las de prefabricación, nuevos materiales, ingeniería de valor, especificaciones, disponibilidad de mano de obra, entrenamiento de mano de obra y control de calidad. Mientras tanto las funciones identificadas que requieren menor optimización que aquellas en las encuestas previas, son inspección en obra y acuerdos de contratos laborales (Arditi y Mochtar 2000). Las tareas de construcción generalmente son complejas y difíciles de cuantificar cuando se evalúa y mide la productividad (Janssen, 2008). En muchos países la industria de la construcción atrae críticas debido a la baja productividad y la mala calidad (Eriksson y Westerberg 2011).



Improving productivity is a management issue, and the introduction of new techniques or technologies may be a necessary but not a sufficient condition. In order to improve productivity in construction it should be necessary to improve methods, improve training programs, enhance worker motivation, improve strategic management and improve procurement management (Rojas and Aramvareekul, 2003). Thomas et al. (2003) stated that new management thinking, like lean production, has suggested that better labor performance can be achieved by improving the reliability of flows. Lean thinking portrays reliable flows as the timely availability of resources, materials, information, and equipment. Site management fully accepts their responsibility for setting out the key workplace conditions for improved productivity and for maintaining an uninterrupted flow of work. Hence, the quality and authority of site management, the quality of their construction planning and their ability to administer the plan were seen as important determinants of productivity and site management seen as a key profession within the industry (Williams, 2005). DeVilbissand Gilbert (2005) stated that unresolved conflict is recognized as a significant source of unproductive stress.

In Haskell's view (2004), the potential for further productivity enhancements falls into five categories: information technology, project delivery, automation and prefabrication, workforce development, and materials. Construction method is a significant factor which has an impact on construction productivity (Kim et al., 2005). Mojahed and Aghazadeh (2007) mentioned that improvement in construction productivity is not possible without identifying factors that influence productivity. Previous studies regarding productivity indicated that a broad range of factors affect productivity. These factors may be divided into industry-level, company-level, and project level. Some of the productivity factors at industry-level include governmental interference, regulation burdens, local unions, and politics. Some of the factors that are at project level are labor-related and include motivation, experience, skill, and training. Some of the factors that are at company level are management-related and include planning and direction of project. Adrian (2003) stated that leadership skills contribute to productivity improvement. Kazaz and Ulubeyli (2007) mentioned that improved productivity is also required; if all production inputs are well-utilized, capital improvements and enhanced productivity goes hand in hand.

Several scholars have identified a range number potential factors which may led to an improvement in productivity, They have categorized these factors into 9 groups (Arditi and Mochtar 1995; Hanna et al., 2005; Thomas et al., 2002; Thomas et al., 2003; Makulsawaudom and Emsley, 2001,

Optimizar la productividad es un tema de gestión, y la introducción de nuevas técnicas o tecnologías puede ser una condición necesaria, pero no suficiente. Con el fin de optimizar la productividad en la construcción, será necesario mejorar métodos, programas de entrenamiento, incrementar la motivación del trabajador, optimizar la gestión estratégica y mejorar la administración del abastecimiento (Rojas y Aramvareekul, 2003). Thomas et al. (2003) indicó que un nuevo concepto de administración, como la producción eficiente, sugiere que un mayor desempeño laboral puede ser alcanzado optimizando la confiabilidad de los flujos. El pensamiento eficiente retrata flujos confiables, así como la disponibilidad oportuna de recursos, materiales, información y equipos. La gestión en terreno se hace cargo íntegramente de entregar las condiciones óptimas en el lugar de trabajo, con el fin de optimizar la productividad y mantener un ininterrumpido flujo de trabajo. Por lo tanto, la calidad y autoridad de la gerencia en terreno, la calidad de su planificación para la construcción y su habilidad para administrar el proyecto, fueron consideradas importantes y determinantes para la productividad. La administración en obra fue evaluada como una profesión crucial dentro de la industria (Williams, 2005). DeVilbissand Gilbert (2005) indicó que un conflicto no solucionado es reconocido como una fuente de estrés no productivo.

De acuerdo a la visión de Haskell (2004), el potencial para optimizaciones futuras de la productividad cae en cinco categorías: tecnología de la información, entrega del proyecto, automatización y prefabricación, desarrollo de la fuerza laboral y materiales. El método de construcción es un factor importante que impacta en la productividad de la construcción (Kim et al., 2005). Mojahed y Aghazadeh (2007) mencionaron que la optimización de la productividad en la construcción no es posible sin identificar los factores que influyen a la productividad. Estudios anteriores relacionados a la productividad indicaron que un amplio rango de factores influye en ella. Estos factores pueden ser divididos en nivel industrial, nivel de la empresa y nivel del proyecto. Algunos de los factores de productividad a nivel industrial incluyen interferencia gubernamental, cargas regulatorias, sindicatos locales y políticas. Algunos de estos factores que están a nivel de proyecto, están relacionados con la mano de obra e incluyen la motivación, experiencia, capacidad y entrenamiento. Algunos de los factores a nivel de la empresa están relacionados con la gestión, e incluyen planificación y dirección del proyecto. Adrian (2003) estableció que las habilidades de liderazgo contribuyen a la optimización de la productividad. Kazaz y Ulubeyli (2007) mencionaron que la productividad optimizada también es necesaria; si todos los insumos de la producción son bien utilizados, entonces los aumentos de capital y la productividad optimizada van de la mano.

Numerosos académicos han identificado una gama de factores potenciales, que pueden llevar a una optimización de la productividad. Ellos han categorizado estos factores en 9 grupos (Arditi y Mochtar 1995; Hana et al., 2005; Thomas et al., 2002; Thomas et al., 2003; Makulsawaudom y Emley 2001;

Kazaza and Ulubeylib 2007, Thomas and Horman 2006, Mojahed and Aghazadeh 2007, Rojas and Aramvareekul 2003, Shash and AL-Amir 1997). Poor productivity is a concern because of its effect on costs and competitiveness, the viability of the work in hand and ultimately on the industry itself (Enshassi et al., 2007, Williams, 2005). Labor can account for up to a third of the total productive or non-productive time on construction sites (Adrian, 2003). Its component in cost of construction has even risen in recent years as the employers are always met with demands for a higher base pay and increasing fringed benefits. The accuracy of information on labor productivity rates is therefore crucial for the determination of the direct relationship between these rates and subjects such as estimating, cost control, scheduling and resource management (Herbsman and Elis, 1990). Productivity of labor is of particular concern to construction operations because they are heavily labor intensive (Productivity Commission of the Australian government, 2005). Ruddock and Ruddock (2009) reassessed productivity in the construction sector to reflect hidden innovation and knowledge economy.

Rojas and Aramvareekul (2003) presented the results of a survey instrument applied to determine the relative level of relevance of construction labor productivity drivers and opportunities. Management skills and manpower issues were identified as the two areas with the greatest potential to affect productivity according to survey respondents. A model for automated control was developed and verified in the field by Navon and Goldschmidt (2003) in order to demonstrate that labor inputs can be automatically measured and controlled. The concept behind this development is that indirect data- workers location measured automatically at regular time intervals can be controlled automatically and converted into labor inputs using computerized algorithms. Lee et al. (2004) proposed relevant indicators to measure labor factors, i.e., worker loyalty and labor resource stability that affect the planned normal workflow. Hanna et al. (2005) provided a comprehensive analysis of the impact of extended duration overtime on construction labor productivity. The results show a decrease in productivity as the number of hours worked per week increase and/or as project duration increases. Abdul Kadir et al. (2005) evaluated and ranked the importance, frequency and severity of project delay factors affect the construction labour productivity for Malaysian residential projects.

Lbbs (2005) studied the impact of construction changes on productivity. Project change is disruptive and detrimental to labor productivity. If changes are necessary, they should be recognized and incorporated as early as possible. Moselhi et al. (2005) conducted a study to investigate the impact of change orders on construction productivity and introduced a new neural network model for quantifying this impact.

Kazaza y Ulubeylib 2007; Thomas y Horman 2006; Mojahed y Aghazadeh 2007; Rojas y Aramvareekul 2003; Sash y AL-Amir 1997). La baja productividad es una preocupación debido a su efecto sobre los costos y la competitividad, sobre la viabilidad del trabajo bajo control y por último sobre la industria misma (Enshassi et. al., 2007; Williams 2005). La mano de obra es la razón de hasta un tercio del tiempo total productivo y no productivo en las obras de construcción (Adrian, 2003). Su componente en costos de producción incluso ha aumentado en años recientes, en cuanto los empleadores siempre cumplen con las demandas de mejoras salariales, aumentando los beneficios adicionales. La precisión de la información de las tasas de productividad laboral es, por lo tanto, crucial para la determinación de una relación directa entre aquellas tasas y aspectos tales como la estimación, control de costos, administración de recursos y horarios (Herbsman y Elis, 1990). La productividad de la mano de obra es de particular importancia para las operaciones de la construcción, debido a que constituye una labor intensiva y pesada (Comisión de Productividad del Gobierno Australiano, 2005). Ruddock y Ruddock (2009) reevaluaron la productividad en el sector de la construcción, para reflejar la oculta innovación y conocimiento de la economía.

Rojas y Aramvareekul (2003) presentaron los resultados de una encuesta instrumental aplicada para determinar el nivel de importancia relativa de los elementos fundamentales de la productividad laboral en la construcción y sus oportunidades. Los temas relacionados con las habilidades administrativas y la fuerza laboral fueron identificados como las dos áreas con mayor potencial para afectar la productividad, según quienes respondieron la encuesta. Un modelo automatizado de control fue desarrollado y probado en terreno por Navon y Goldschmidt (2003), con el fin de demostrar que los insumos laborales pueden ser automáticamente medidos y controlados. El concepto tras este desarrollo es que los datos indirectos – ubicación de los trabajadores medida automáticamente en intervalos de tiempo regulares – pueden ser controlados automáticamente y traducidos en registros laborales, empleando algoritmos computacionales. Lee et al. (2004) propusieron importantes indicadores para medir factores laborales, es decir, lealtad del trabajador y estabilidad del recurso laboral que afectan un flujo de trabajo planificado y normal. Hanna et al. (2005) entregaron un análisis exhaustivo sobre el impacto de la duración del sobre tiempo en la productividad laboral de la construcción. Los resultados muestran una disminución de la productividad en cuanto el número de horas semanales trabajadas aumenta y/o la duración de un proyecto se extiende. Abdul Kadir et al. (2005) evaluaron y clasificaron la importancia, frecuencia y severidad de los factores que demoran un proyecto y afectan la producción laboral en proyectos residenciales de Malasia.

Lbbs (2005) estudió el impacto de los cambios de productividad en la construcción. Los cambios en un proyecto interrumpen y son perjudiciales para la productividad laboral. Si los cambios son necesarios, deben ser identificados e incorporados a la brevedad posible. Moselhi et. al. (2005) realizaron un estudio para investigar el impacto de las órdenes de cambio sobre la productividad de la construcción e introdujeron un nuevo modelo de red neuronal, para cuantificar este impacto.



Factors contributing to the adverse effects of change orders on labor productivity were identified and a new model is expanded to account primarily for the timing of change order, among other factors. Kazaz and Ulubeyli (2007) have studied the factors affecting productivity among members of the construction workforce in Turkey. The results show that monetary factors remain pre-eminent in influencing productivity, but that socio-psychological factors appear to be of increasing importance in this developing economy. Tran (2011) conducted a thorough study into labour productivity in the New Zealand construction industry. He stated that productivity growth is strongly correlated to economic growth and increase welfare. Productivity growth in the construction sector may have significant effect on the affordability of housing in the country.

3. Methodology

Research population

The population in this research included contracting firms registered in the Palestinian Contractors Union (P.C.U) records. Contractors are classified, according to the Palestinian Contractors Union, into five major categories depending on their size, financial strength, experience, equipment owned by the company, and qualifications of staff. First Class describes largest contractors whereas fifth class designates the smallest. The fifth class contractors were excluded due to the small size of their companies which would not give convincing response regarding construction productivity as a result of their poor practical experience. The targeted population was the contracting firms that have a valid registration in the PCU in the following fields: building, infrastructure work and electro-mechanics.

Sample size

Statistical formulas were used in order to calculate the sample size for the contractors (Creative Research System, 2009).

Where

SS = Sample size

Z = Z value (e.g. 1.96 for 95% confidence level)

P = Degree of variance between the elements of population percentage (0.50 used for sample size needed).

C = Confidence interval (margin of error) (e.g., 8%)

Los factores que contribuyen sobre los efectos adversos de los cambios de órdenes en la productividad laboral fueron identificados y un nuevo modelo se expandió principalmente para explicar el cronometraje de la orden de cambio, entre otros factores. Kzaz y Ulubeyli (2007) estudiaron los factores que afectan la productividad de la mano de obra de la construcción en Turquía. Estos resultados muestran que los factores monetarios permanecen preeminentes, influenciando así la productividad, sin embargo los factores socio-sicológicos parecen tener una creciente importancia en esta economía en desarrollo. Tran (2011) realizó un estudio acabado sobre productividad laboral en la industria de la construcción en Nueva Zelanda. El indicó que el crecimiento de la productividad laboral está estrechamente relacionado con el crecimiento económico y el aumento de los beneficios sociales. El crecimiento del sector de la construcción puede tener un efecto importante en el acceso razonable a la vivienda en el país.

3. Metodología

Población investigada

La población en este estudio consideró empresas contratistas inscritas en el registro del Sindicato Palestino de Contratistas (S.P.C.). Los contratistas fueron calificados de acuerdo al Sindicato Palestino de Contratistas, en cinco principales categorías, dependiendo del tamaño, solvencia financiera, experiencia, equipos adquiridos por la empresa y habilidades de los funcionarios. La primera clase describe a los grandes contratistas, mientras que la quinta clase corresponde a los menores. Los contratistas de quinta clase fueron excluidos, debido al gran tamaño de empresas que no proporcionaron respuestas relacionadas con la productividad en la construcción, como resultado de su baja experiencia. La población objetivo corresponde a empresas que poseen un registro válido en el SPC, en las siguientes áreas: edificación, trabajos de infraestructura y electro-mecánicos.

Tamaño de la muestra

Fórmulas estadísticas fueron empleadas para calcular el tamaño de la muestra de los contratistas (Sistema Creativo de Investigación, 2009).

$$SS = \frac{Z^2 * P * (1 - P)}{C^2} \quad (1)$$

Donde:

SS = Tamaño de la muestra

Z = Valor Z (ejemplo 1,96 para 95% nivel de confianza)

P = Grado de variación entre los elementos del porcentaje de población (0,50 empleado para tamaño de la muestra requerida).

C = intervalo de confianza (margen de error), (ejemplo 8%)

$$SS = \frac{1.96^2 \times 0.5 \times (1 - 0.5)}{0.08^2} = 150 \text{ contractors} \quad (2)$$

Correction for finite population:

Corrección de la población finita:

$$SS_{new} = \frac{SS}{1 + \frac{SS-1}{POP}} \quad (3)$$

Where POP is the population = 139 (POP represents the overall number of local contractors registered in the P.C.U)

Donde POP es la población = 139 (POP representa el número general de contratistas locales inscritos en el S.P.C)

$$SS_{new} = \frac{150}{1 + \frac{150-1}{139}} = 72 \quad (4)$$

The total number distributed to contractors was 90 questionnaires. The total number of valid returned questionnaires was 73. The number of valid questionnaires was 73 although number of collected questionnaires was 80. Seven questionnaires out of eighty were unqualified to be included in the analysis process. These invalid questionnaires were either uncompleted or filled using one scale.

El número total de cuestionarios distribuidos entre los contratistas fue de 90. El número total de cuestionarios contestados fue de 73. El número válido de cuestionarios fue 73, aunque se recibieron 80 cuestionarios contestados. Siete cuestionarios de 80, no calificaron para ser incluidos en el proceso de análisis. Aquellos cuestionarios estaban incompletos o empleaban una sola escala.

Questionnaire design

An extensive literature has been reviewed in order to extract the most significant productivity improvement factors (Arditi and Mochtar 1995, Shash and AL-Amir 1997, Makulsawaudom and Emsley 2001, Thomas et al., 2002, Rojas and Aramvareekul 2003, Hanna et al., 2005, Thomas and Horman 2006, Mojahed and Aghazadeh 2007, Kazaza and Ulubeylib 2007). A draft questionnaire has been built using the factors extracted from literature review. A pilot test was performed for preliminary questionnaire. Ten experts were involved in this pilot test. They have at least 15 years experience in the construction industry. They were asked to critically review the design and structure of the questionnaire. Their valuable comments were used to revise the research questionnaire. Additional factors have been added to some groups; namely are labor, machinery, material, IT applications and contracting groups. Additional two main groups related to company characteristics and external circumstances have been added to the questionnaire. Also some factors have been modified in order to be consistent with the local conditions and circumstances in the Gaza Strip.

Diseño del cuestionario

Gran cantidad de literatura fue revisada con el fin de extraer los factores más relevantes de optimización de productividad (Arditi y Mochtar 1995, Shash y AL-Amir 1997, Makulsawaudom y Emsley 2001, Thomas et al., 2002, Rojas y Aramvareekul 2003, Hanna et al., 2005, Thomas y Horman 2006, Mojahed y Aghazadeh 2007, Kazaza y Ulubeylib 2007). Se construyó un cuestionario borrador empleando los factores encontrados en la revisión de la literatura. Se realizó una prueba piloto para un cuestionario preliminar. Diez expertos participaron de esta prueba piloto, quienes poseían al menos 15 años de experiencia en la industria de la construcción. Se les solicitó revisar, en forma crítica, el diseño y la estructura del cuestionario. Sus valiosos comentarios fueron empleados para revisar el cuestionario investigativo. Los factores adicionales que principalmente fueron incluidos a ciertos grupos son: mano de obra, maquinaria, material, aplicaciones TI y grupos contratistas. Además dos grupos principales, relacionados con características y circunstancias externas, fueron incluidos en el cuestionario. Algunos factores también fueron modificados, con el fin de adquirir consistencia en relación a las condiciones locales y las circunstancias propias de la Franja de Gaza.

The final version of the questionnaire included 83 factors which are believed to affect construction productivity improvement. These factors are categorized into eleven groups: contractor's characteristics, labor, material, management, regulations, contracting, machinery, engineering, labor productivity improvement techniques, IT application in construction and external circumstances. Three-point Likert scale which is commonly used has been adopted in this research. This scale illustrates three options as follows:

La versión final de cuestionario incluyó 83 factores, que se cree afectan la optimización de la productividad en la construcción. Estos factores fueron calificados en once grupos: características del contratista, mano de obra, material, administración, regulaciones, contratos, maquinaria, ingeniería, técnicas de optimización de la productividad laboral, aplicación de TI en la construcción y circunstancias externas. La escala de tres puntos de Likert, comúnmente empleada, fue adaptada a esta investigación. Esta escala ilustra las siguientes tres opciones:

- If respondents strongly agree, response is given (3) points.
- If respondents somewhat agree, response is given (2) points.
- If respondents disagree, response is given (1) points

- Si los encuestados están totalmente de acuerdo, la respuesta tiene (3) puntos.
- Si los encuestados están parcialmente de acuerdo, la respuesta tiene (2) puntos.
- Si los encuestados no están de acuerdo, la respuesta tiene (1) punto.

The respondents were asked to rate their level of agreement regarding the identified productivity factors. The questionnaires were sent to top management as well as key persons to assess the most important factors affecting construction productivity in their organizations.

Data measurement

In this paper, ordinal scales were used. Ordinal scale is a ranking or a rating data that normally uses integers in ascending or descending order. The numbers assigned to the level of effect [1 (low), 2 (medium), 3 (high)] do not indicate that the interval between scales are equal, nor do they indicate absolute quantities. The relative importance index methods (RII) are used to determine the ranks of all performance factors. The relative importance index is computed as (Odeh and Battaineh 2002, Wanous et al 2003):

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^3 W_i X_i}{\sum_{i=1}^3 X_i} \quad (5)$$

Where

i = response category index = 1, 2, and 3 for low, medium, and high, respectively.

W_i = the weight assigned to the i^{th} response = 1, 2, and 3, respectively.

X_i = frequency of the i^{th} response given as percentage of the total responses for each item.

4. Results

Characteristics of respondents

Type of entity for the participating contractors

The survey indicated (Figure 1), that about half (50.7%) of the entire participating contractors are corporation contractors whereas 24.7% are family-owned and 21.9% are partnership. The previous results show that the local contractors in the Gaza Strip are mostly of the corporation type.

Los encuestados debieron clasificar su nivel de acuerdo, con relación a los factores de productividad identificados. Los cuestionarios fueron enviados a los altos directivos y a las personas claves, con el fin de evaluar los factores más importantes que afectan la productividad en la construcción, dentro de sus organizaciones.

Medición de los datos

En este artículo se emplearon escalas ordinales. Una escala ordinal corresponde a un dato de calificación o estimación, que normalmente emplea integrales, en orden ascendente o descendente. Los números asignados al nivel del efecto [1 (bajo), 2 (medio), 3 (alto)] no indican que el intervalo entre escalas sea igual, tampoco indican cantidades absolutas. Los métodos de índice de importancia relativa (IIR) son empleados para determinar la calificación del desempeño de todos los factores. El índice de importancia relativa es computarizado de la siguiente forma (Odeh y Battaineh 2002, Wanous et al 2003):

Donde

i = respuesta índice de categoría = 1, 2 y 3 para bajo, medio y alto, respectivamente.

W_i = el peso asignado a la respuesta i -ésima = 1, 2 y 3, respectivamente.

X_i = frecuencia de la respuesta i -ésima entregada como porcentaje de las respuestas totales para cada ítem.

4. Resultados

Características de los encuestados

Tipo de entidades dentro de los contratistas participantes

La encuesta mostrada en la (Figura 1), indica que cerca de la mitad (50,7%) del total de los contratistas participantes son empresas contratistas; mientras que el 24,7% son empresas familiares y 21,9% son sociedades. Los resultados previos muestran que los contratistas locales en la Franja de Gaza, son principalmente del tipo corporaciones.

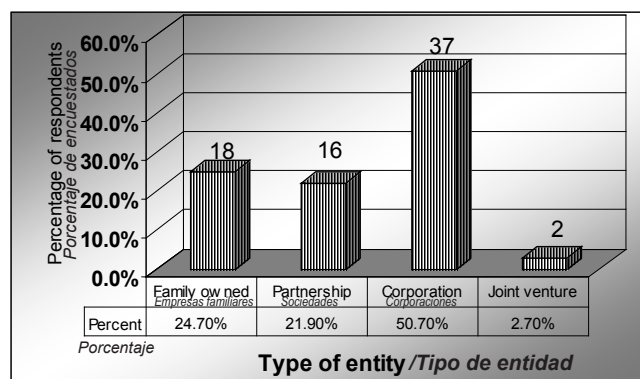


Figure 1. Type of entity for local contractors

Figura 1. Tipo de entidades dentro de los contratistas participantes

Type of participating contractors

As shown in Table 1 three participants have answered this question. The majority of the participating contractors (54.3%) were classified as building contractors in different classes while (45.8%) of the respondents were classified as infra structure and water works contractors.

Tipos de contratistas participantes

Como se muestra en la Tabla 1, los participantes respondieron esta pregunta. La mayoría de los contratistas participantes (54,3%) fueron calificados como constructores de edificaciones de distintas clases, mientras el (45,8) de los encuestados fueron calificados como contratistas en trabajos de infraestructuras y aguas.

Table 1. Type of local contractors

Tabla 1. Tipo de contratistas locales

Type of contractor/ Tipo de contratista	N	Percent/ Porcentaje
Building/ Edificaciones	38	54.3%
Industrial works/ Trabajos Industriales	2	2.9%
Infrastructure/ Infraestructura	17	24.3%
Water works/ Trabajos para Aguas	13	18.6%
Total	70	100%

The previous result is consistent with the type of the projects implemented in the Gaza Strip during the last decade as the building projects including buildings, schools, and universities. Only two industrial work contractors have been registered from the participating contractors. This could be attributed to the fact that the industrial works requires specialized and qualified contractors in order to implement such projects; also the volume of industrial works is inconsiderable in an area like Gaza Strip compared with other works like buildings and infra structure.

El resultado anterior es consistente con el tipo de proyectos implementados en la Franja de Gaza durante la última década, tales como proyectos de edificaciones que incluyen escuelas y universidades. Sólo dos contratistas de trabajos industriales se han registrado, de todos los contratistas participantes. Esto puede atribuirse al hecho que los trabajos industriales requieren de contratistas especializados y calificados para implementar aquellos proyectos, además que el volumen de trabajos industriales no es relevante en un área como la Franja de Gaza, en comparación con otros trabajos tales como edificaciones e infraestructura.

Respondents' job title

It is noticed in Figure 2 that (41.1%) of respondents occupied the Site/office engineer position whereas project managers respondents came secondly with a percentage of 30.1%.

Puesto de trabajo de los encuestados

En la Figura 2 (41,1%) de los encuestados ocupaba el puesto de ingeniero en terreno/oficina, mientras que los gerentes encuestados alcanzaban en segundo lugar un porcentaje de 30,1%.

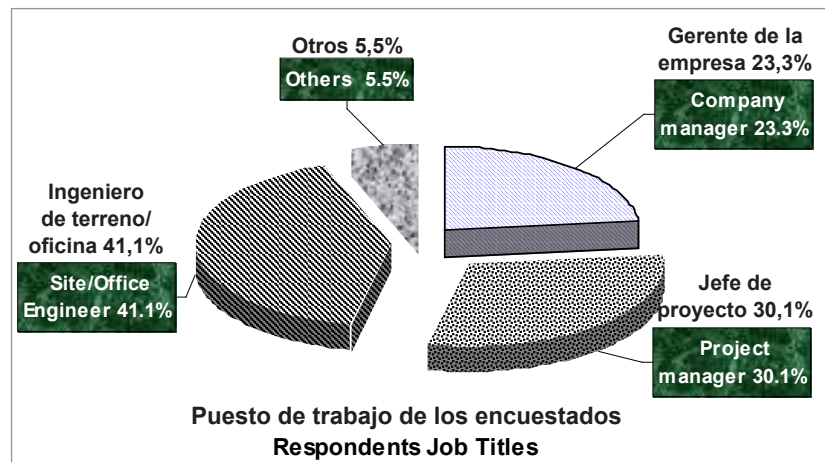


Figure 2. Job title of respondents

Figura 2. Puesto de trabajo de los encuestados



Years of experience for the respondents

The number of years in business for the respondents ranges between one year and 27 years, the average is 10.32 years with standard deviation of 5.01 years. The value of standard deviation is relatively low comparing to the average value which indicating that there is low variability in the collected data (years of respondents' experience).

Figure 3 shows that (38.3%) of respondents have years in business exceeds five years up to ten, on the other hand the number of years in business of (28.8%) of the respondents range from eleven (11) years to fifteen (15) years. That means that the majority of the respondents had spent adequate time in the field of construction in order to give relatively accurate judgment on different factors affecting productivity in the local construction industry.

Años de experiencia de los encuestados

El número de años en el negocio de los encuestados varía entre un año y 27 años; el promedio es de 10,32 años, con una desviación estándar de 5,01 años. El valor de la desviación estándar es relativamente bajo en comparación con el valor promedio, lo cual indica que existe poca variabilidad entre los datos recogidos (años de experiencia de los encuestados).

La Figura 3 muestra que (38,3%) de los encuestados poseen entre cinco y diez años de experiencia, por otra parte el número de años de experiencia de los encuestados que va desde once (11) hasta quince (15) años es de (28,8%). Esto significa que la mayoría de los encuestados ha pasado bastante tiempo en terreno, como para proporcionar una visión precisa sobre los factores que afectan la productividad en la industria local de la construcción.

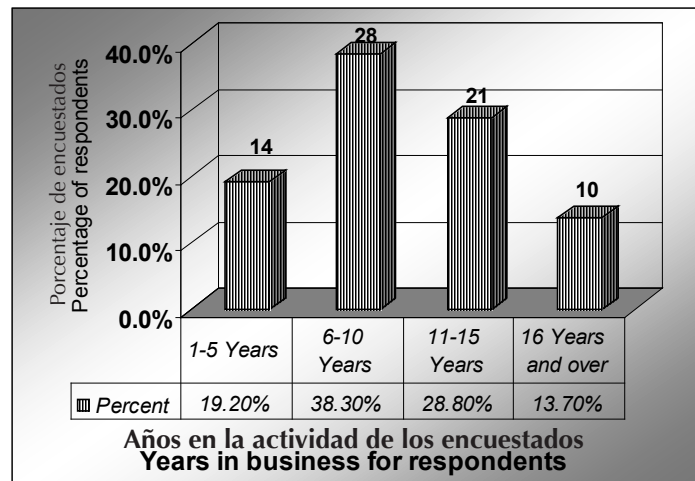


Figure 3. Years in business for respondents

Figura 3. Años en la actividad de los encuestados

Average annual business volume for the respondents

The annual business volume of the respondents ranges between \$0.1 million dollars and \$10 million dollars, the average is \$1.4 with standard deviation \$1.96 million dollars. The value of standard deviation is relatively high comparing to the average annual business volume which indicating that there is high variability in the collected data (annual business volume). Table 2 shows that the respondents have been distributed to three groups. (29.6%) of the responding contractors have registered that they have annual business volume of less than one million dollar whereas the second group of contractors (33.8% of the overall contractors) revealed that their own annual business volume ranges from one to two million dollars and the last group of respondents (36.6% of all respondents) have an annual business of two million dollar and above.

Promedio anual de volumen del negocio de los encuestados

El promedio anual del volumen del negocio de los encuestados varía entre \$0,1 millones de dólares y \$10 millones de dólares; el promedio es de \$1,4 con una desviación estándar de \$1,96 millones de dólares. El valor de la desviación estándar es relativamente alto, en comparación con el volumen anual promedio del negocio, lo que indica que existe una alta variación de los datos recogidos (volumen anual del negocio). La Tabla 2 muestra que los encuestados han sido distribuidos en tres grupos. El (29,6%) de los contratistas encuestados registran un volumen anual del negocio menor a un millón de dólares, mientras que un segundo grupo de contratistas (33,8% del total de contratistas) reveló que su propio volumen anual del negocio varía entre uno y dos millones de dólares; el último grupo de encuestados (36,6% de todos los encuestados) tienen un volumen anual del negocio de dos millones de dólares y más.

Table 2. Average annual business for respondents
Tabla 2. Promedio anual de los encuestados en el negocio

Average annual business volume (\$Million) Volumen del promedio anual en el negocio (\$Millones)	Frequency Frecuencia	Percent Porcentaje
Less than \$1M/ Menos de \$1M	21	29.6%
1-Less than \$2M/ 1-Menos de \$2M	24	33.8%
\$2M and above/ \$2M y más	26	36.6%
Total	71	100.0%

Years in business for the contractors

The number of years in business for contracting companies ranges between 3 years and 40 years, the average is 12.34 years with standard deviation of 5.67 years. The value of standard deviation is accepted which mean low variability in the data of years of business. Figure 4.4 shows that the majority of respondents (around 70% of overall respondents) have a period of extended experience that ranges from ten to twenty years. A round 10% of overall respondents) have more than twenty years experience in construction industry. Around 20% of the responding contractors revealed that they have less than ten years of experience in construction sector.

Contratistas y sus años en el negocio

El número de años de experiencia de las empresas constructoras varía entre 3 años y 40 años; el promedio es de 12.34 años, con una desviación estándar de 5,67 años. El valor de la desviación estándar es aceptable, lo que significa una baja variabilidad en los datos de años de experiencia. La Figura 4 muestra que la mayoría de los encuestados (alrededor de 70% del total de encuestados) tienen un período de vasta experiencia, que varía entre diez y veinte años. Alrededor de un 10% del total de los encuestados) tiene más de veinte años de experiencia en la industria de la construcción. Alrededor del 10% de los contratistas encuestados revelaron que tenían menos de diez años de experiencia en el sector de la construcción.

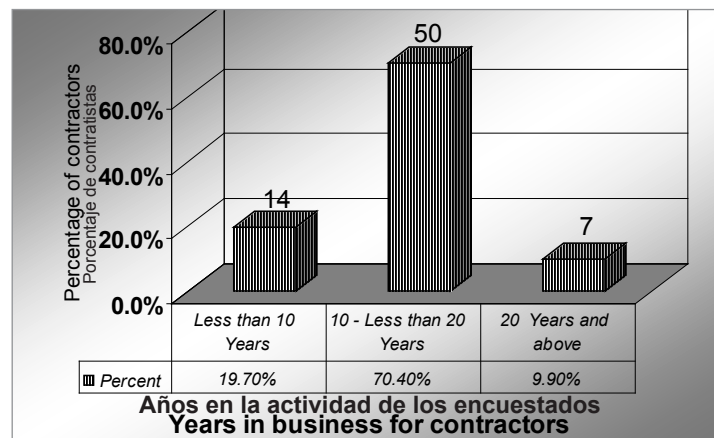


Figure 4. Years in business for the contractors
Figura 4. Años en la actividad de los encuestados

Total sales of respondents

Table 3 that (27.4%) of contractors responded that total sales of their companies since establishing in construction field up to date range from six to ten millions dollar whereas 26% of the contractors revealed that they have total sales ranging from ten to twenty millions dollar.

Total de ventas de los encuestados

La Tabla 3 muestra que el (27,4%) de los encuestados respondieron que el total de ventas en sus empresas, desde que se establecieron en el campo de la construcción hasta la fecha, varía entre los 4 a diez millones de dólares. Mientras que el 26% de los contratistas revelaron que el total de sus ventas oscila entre los diez y veinte millones de dólares.

For the large companies, only 15.1% of the respondents registered that their total sales were higher than twenty millions, on the other hand for the small size contractors, 11% of the respondents mentioned that their own total sales didn't reach one million dollars whereas 6.8% of contractors responded that their total sales were bracketed between one to three millions and 13.7% of respondents mentioned the range between three to six millions for their total sales.

En las grandes empresas, sólo el 15.1% de los encuestados reportaron que sus ventas totales eran superiores a los veinte millones. Por otra parte, dentro de los pequeños contratistas, el 11% de los encuestados mencionaron que sus ventas totales no alcanzaban un millón de dólares, mientras que el 6.8% respondió que sus ventas totales estaban fijadas entre uno y tres millones de dólares; el 13,7% de los encuestados mencionó que sus ventas totales se encontraban entre tres y seis millones de dólares.

Table 3. Total sales of respondents
Tabla 3. Ventas totales de los encuestados

Annual Sales (million dollars)/ Ventas Anuales (millones de dólares)	Frequency/ Frecuencia	Percent/ Porcentaje
Under one millions/ Bajo un millón	8	11.0%
Under 3 millions/ Bajo 3 millones	5	6.8%
Under 6 millions/ Bajo 6 millones	10	13.7%
Under 10 millions/ Bajo 10 millones	20	27.4%
Under 20 millions/ Bajo 20 millones	19	26.0%
Over 20 millions/ Sobre 20 millones	11	15.1%
Total	73	100.0%

Considering the fact that a contractor whose total sales are less than six millions dollar is small size company, contractor whose total sales range between six to ten millions is medium-size contractor and contractor whose total sales exceeds ten millions is big size contractor, then as a result 31% of the contractors could be considered as small size company, 27.4% of the respondents could be classified as medium-size contracting companies and the remaining percentage around 40% could be big size companies.

Considerando que un contratista cuyas ventas totales son inferiores a seis millones de dólares corresponde a un pequeño empresario; un contratista cuyas ventas totales varían entre seis y diez millones es un empresario mediano; y uno cuyas ventas totales exceden los diez millones corresponde a un gran empresario, entonces el 24.7% de los encuestados pueden ser calificados dentro de empresas contratistas medianas y pequeñas y el 40% restante correspondería a grandes empresas.

Geographic location of implemented projects

Table 4 shows that the majority of projects implemented by the contractors are located in the Gaza governorate. This result seems to be normal as a considerable number of vital projects were implemented in the Gaza governorate due to its importance and high population.

Ubicación geográfica de los proyectos implementados

La Tabla 4 muestra que la mayoría de los proyectos, implementados por los contratistas, se encuentran ubicados en la Gobernación de Gaza. Esto parece ser normal, puesto que un considerable número de proyectos cruciales fueron implementados en la Gobernación de Gaza debido a su importancia y a su alta población.

Table 4. Geographic location of projects
Tabla 4. Ubicación geográfica de los proyectos

Geographic Location of Projects Ubicación Geográfica de los Proyectos	Frequency/ Frecuencia	Percent/ Porcentaje
Northern Area Governorate/ Gobernación Área Norte	14	19.4%
Gaza Governorate/ Gobernación de Gaza	54	75%
Middle Area Governorate/ Gobernación Área Intermedia	3	4.2%
Khanyounis Governorate/ Gobernación de Khanyounis	1	1.4%
Total	72	100.0%

Permanent employees of contractors

Figure 5 show that more than 75% of the respondents have a number of fixed-term employees which is less than 20 persons. That means that majority of local contracting firms have this figure of permanent employees. These employees often include engineers, accountants, administrative employees and few of fixed term skilled labors. Actually, having less than 20 permanent employees for 75% of the overall respondents is relatively low. The reason behind such result might be attributed to the nature of construction sector in the Gaza Strip. The local construction market is unstable due to economic as well as political circumstances; as a result the contractors used to hire engineers, skilled labor or sub-contractors during implementing their projects and release those employees at the end of projects. Such situation may affect badly the development of contractors due to the multiple changes and unstable working staff in the contracting companies.

Contratistas y sus empleados con contrato permanente

La Figura 5 muestra que más del 75% de los encuestados tienen una cantidad de empleados a plazo fijo, que es menor a 20 personas. Esto significa que la mayoría de las empresas contratistas locales tiene esta figura de empleados con contrato permanente. Estos empleados generalmente son ingenieros, contadores, empleados administrativos y unos pocos obreros especializados a plazo fijo. En realidad tener menos de 20 empleados con contrato permanente, para un 75% de total de los encuestados, es relativamente poco. La razón detrás de este resultado puede ser atribuida a la naturaleza del sector de la construcción en la Franja de Gaza. El mercado de la construcción local es inestable, debido a circunstancias políticas y económicas; por lo cual los contratistas acostumbran a contratar ingenieros, mano de obra especializada o subcontratistas durante la fase de implementación de sus proyectos y los liberan cuando éstos han concluido. Esta situación puede afectar negativamente el desempeño de los contratistas, debido a los múltiples cambios y al inestable grupo de operarios en las empresas contratistas.

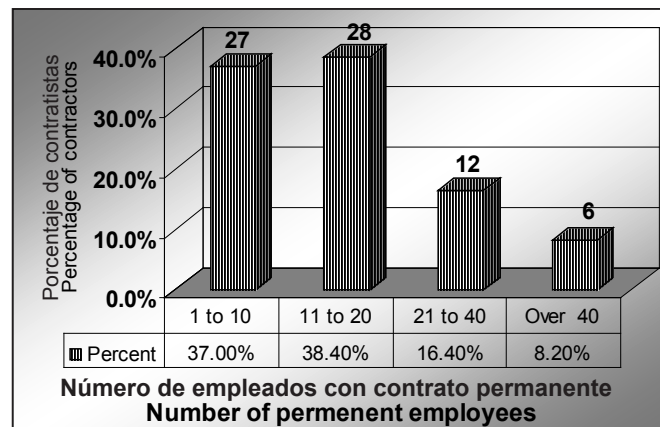


Figure 5. Permanent employees of respondents

Figura 5. Encuestados y sus empleados con contrato permanente

Also it is shown in Figure 5 that only twelve contractors (16.4% of all respondents) have a number of permanent employees ranging from 21 persons up to 40 ones whereas 8.2% of sharing contractors revealed that they have more than 40 fixed term employees. Indeed, these contractors are classified as large companies and may have other branches except main office or have other additional activities related to construction sector like asphalt plant, tiles or manholes factory or concrete plant.

La Figura 5 también muestra que sólo doce contratistas (16.4% del total de encuestados) tienen una cantidad de empleados con contrato permanente, que van desde 21 hasta 40 personas; mientras que el 8.2% de los contratistas participantes reveló tener más de 40 empleados a plazo fijo. Por cierto estos contratistas están calificados dentro de las grandes empresas y pueden tener otras sucursales, además de la oficina principal, o tener otras actividades adicionales relacionadas con el sector de la construcción, como plantas de asfalto, fábricas de cerámicas, cámaras o plantas de concreto.

Construction machinery of respondents

Table 5 shows the value of construction machinery that the company has for implementing construction projects. The more the company has dollar value of machinery, the bigger size the contractor could be considered. Around (42%) of all respondents have provided that they have only less than 200.000 dollar value of construction machinery while 41% of contractors have shown that they have construction machinery value of more than 200.000 \$ and less than half million dollars.

Encuestados y sus maquinarias de construcción

La Tabla 5 muestra el valor de la maquinaria que posee la empresa para implementar sus proyectos de construcción. Entre más dólares ha invertido la empresa en maquinaria, más valorado será el contratista. Alrededor del (42%) de los encuestados informaron que sólo poseen menos de 200.000 dólares en maquinaria de construcción, mientras que el 41% de los contratistas demostraron tener maquinaria de construcción avaluada en más de 200.000 dólares y menos de medio millón de dólares.

Only two contractors revealed that they have machinery value of more than one million \$. These contractors are the biggest among all the contractors and used to execute different types of projects either in the Gaza Strip or outside.

Solo dos contratistas revelaron tener maquinaria evaluada en más de un millón de dólares. Estos contratistas son los más grandes entre todos y suelen desarrollar distintos tipos de proyectos, ya sea en la Franja de Gaza o fuera de ella.

Table 5. Value of construction machinery of respondents
Tabla 5. Valor de la maquinaria de construcción de los encuestados

Dollar Value of Construction Machinery Valor en Dólares de la Maquinaria de Construcción	Frequency/ Frecuencia	Percent/ Porcentaje
Under \$200.000/ Bajo \$200.000	31	42.5%
Under \$500.000/ Bajo \$500.000	30	41.1%
Around 1 million/ Alrededor de 1 millón	10	13.6%
Under 3 million/ Bajo 3 millones	1	1.4%
Over 5 million/ Sobre 5 millones	1	1.4%
Total	73	100.0%

Also Table 6 shows percentage of construction equipments rented by contractors during implementation the course of work. It is noticed in Table 6 that the majority of respondents (around 41% of all respondents) used to rent only less than 25% of machinery required to execute their works with respect to the type of work implemented by these contractors. That means those contractors have the necessary machine required to implement construction work with respect to the type of work implemented by contractors. Around 23% of contractors provided that they have sufficient equipment to implement their projects separately with no need to hire a single machine. Mostly these contractors are large scale contractors, so it is normally for them to own both of heavy type machinery like shovels, trucks, excavators and small equipment like vibrators, plate compactors and other tools. Around 7% of respondents used to rent more than 50% of equipments required to their works up to a percentage reach to 75%. These respondents are usually small size contractors and mostly may have only small equipment and tools.

La Tabla 6 también muestra el porcentaje de equipos de construcción arrendados por los contratistas, durante la implementación del trabajo. En la Tabla 6 se aprecia que la mayoría de los encuestados (alrededor de 41% del total encuestado) sólo arriendan menos del 25% de la maquinaria requerida para ejecutar sus trabajos, en relación con el tipo de trabajo implementado por dichos contratistas. Esto significa que aquellos contratistas poseen la maquinaria necesaria para implementar sus proyectos por separado, sin necesidad de contratar equipo alguno. La mayoría de estos contratistas son contratistas a gran escala, por lo tanto es normal que posean maquinaria del tipo pesado, como palas, camiones, excavadoras y equipos pequeños como vibradores, rodillos compactadores y otras herramientas. Alrededor del 7% de los encuestados suelen arrendar más del 50% de la maquinaria necesaria para su trabajo, alcanzando un 75%. Generalmente estos encuestados son pequeños contratistas que sólo poseen equipamiento liviano y herramientas.

Table 6. Construction equipment rented by respondents
Tabla 6. Equipo de construcción arrendado por los encuestados

Percentage of Construction Equipment rented/ Porcentaje de Equipo de Construcción Arrendado	Frequency/ Frecuencia	Percent/ Porcentaje
None/ Ninguno	17	23.3%
Under 25%/ Bajo 25%	30	41.1%
Under 50%/ Bajo 50%	21	28.8%
Under 75%/ Bajo 75%	5	6.8%
Total	73	100.0%

Productivity improvement factors

83 productivity improvement factors have been studied in this study which is distributed into 11 groups. Ranking of productivity improvement factors have been made twice throughout this research; ranking within each group; and the other one was covering the overall factors.

Company characteristics group

Company characteristics group include seven productivity improvement factors (Table 7). The most important factors will be discussed.

Factores de Optimización de Productividad

83 factores de optimización de productividad han sido analizados en este estudio, que se dividió en 11 grupos. La calificación de factores de optimización de productividad fue realizada dos veces a lo largo de esta investigación, clasificando dentro de cada grupo y luego cubriendo los factores generales.

Grupo características de la empresa

El grupo características de la empresa incluye siete factores de optimización de productividad (Tabla 7). Se discutirán los factores más importantes.

Table 7. RII and Ranks for contractor characteristics factors (group 1)
Tabla 7. IIR y Calificación para los factores características del contratista (grupo1)

Contractor Characteristics Factors/ Factores Características del Contratista	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación dentro de todos los grupos
Financial Strength/ Solvencia financiera	0.913	1	8
Previous Experience/ Experiencia previa	0.881	2	11
Company Policy/ Política de la empresa	0.877	3	12
Human Recourses/ Recursos humanos	0.854	4	18
Company assets/ Activos de la empresa	0.735	5	48
Company Size/ Tamaño de la empresa	0.722	6	53
Management Style/ Estilo de administración	0.703	7	58

The "Financial Strength" factor occupied the first rank with RII value of 0.913 whereas it was ranked in the 8th position among overall the 83 factors (Table 8). Such results ensure increased importance of "Financial Strength" factor in enhancing construction productivity among the overall factors. Indeed, one of the most important drivers in achieving success in any business is the availability of suitable capital. The availability of financial strength together with qualified human resources should definitely bring success, profitability and rapid improvement in any construction company. The case of construction projects is highly dependent on the contractor's financial strength either in procuring the necessary insurances, bonds or in delivering material and labor required to build the projects.

The "Contractor's Previous Experience" factor was ranked by respondents secondly with relative index value of 0.881 and was ranked in the 11th position among the overall eighty three factors. The high rank of "Contractor's Previous Experience" factor either at the level of its group or among the 83 factors, reflects high significance of such factor in improving construction productivity. The more experienced company, the higher productive contractors among others. On the other hand, the poor experienced contractor will face many difficulties in judging the matters and approving right procedures to execute the work and that will reflect bad implications on its productivity rates and projects progress. Mojahed and Aghazadeh (2007) ranked "Skills and experience" factor firstly among many other factors while conducting survey study among the construction contractors in the deep south USA.

El factor "Solvencia Financiera" ocupó el primer lugar con un valor de IIR de 0,913, mientras que fue calificado en la 8va posición entre los 83 factores (Tabla 8). Dichos resultados confieren una enorme importancia al factor "Solvencia Financiera" en la optimización la productividad en la construcción, entre todos los factores generales. Por cierto, uno de los elementos fundamentales para alcanzar el éxito en cualquier negocio es la disponibilidad adecuada de capital. La disponibilidad de solvencia financiera junto con recursos humanos calificados debiera definitivamente proporcionar éxito, rentabilidad y una rápida optimización en cualquier empresa constructora. En el caso de proyectos de construcción, éstos dependen altamente de la solvencia financiera del contratista, ya sea para proporcionar las requeridas pólizas de seguros, la liquidez, el abastecimiento de materiales y mano de obra para ejecutar los proyectos.

El factor "Experiencia Previa del Contratista" fue calificado por los encuestados como el segundo con mayor índice de importancia relativa 0.881, y en el lugar 11° entre los 83 factores generales. La alta calificación del factor "Experiencia Previa del Contratista", ya sea dentro del nivel de su grupo, o entre los 83 factores, refleja la gran importancia que tiene en la optimización de la productividad en la construcción. Entre más experiencia posee la empresa, más productiva es entre los contratistas. Por otra parte, un contratista con poca experiencia enfrentará muchas dificultades al lidiar con situaciones y aprobar procedimientos adecuados para ejecutar el trabajo, lo que traerá repercusiones negativas en tus tasas de productividad y en el desarrollo de sus proyectos. Mojahed y Aghazadeh (2007) clasificaron el factor "Habilidad y Experiencia" como el primero entre muchos otros factores, mientras elaboraban un estudio tipo encuesta, entre contratistas de la construcción en el extremo sur de Norteamérica.



With a relative index of 0.877, "Company Policy" factor was ranked as third major productivity improvement factor whereas was ranked in the 12th position among the overall eighty three factors. Such results reflect high significance of "Company Policy" factor in improving construction productivity. Company policy include many issues such as setting short and long terms goals with strategies and action plans to achieve them, also machinery of selecting projects, how to select personnel, distribution of work and promotion procedures. The previous components of company policy can affect heavily the projects productivity. "Human Resources" factor came at the fourth rank in the company characteristics group with relative index of 0.854 and was ranked in the 18th position among the overall eighty three factors. Construction industry is a labor intensive industry so it became important to concentrate on the matter of human in the construction industry.

Labor group

Labor group includes fourteen productivity improvement factors. Table 8 illustrates the respondents' opinions about the productivity improvement factors related to labor issues.

Con un índice de importancia relativa de 0,877, el factor "Política de la Empresa" fue calificado como el tercer factor principal de optimización de la productividad, mientras fue calificado en el lugar 12° entre los ochenta y tres factores generales. Dichos resultados reflejan la gran importancia del factor "Política de la Empresa" en la optimización de la productividad. La política de la empresa incluye temas tales como la determinación de objetivos a corto y a largo plazo, con estrategias y planes de acción para alcanzarlos, también la selección de maquinaria para los proyectos, la forma de seleccionar al personal, la distribución del trabajo y los procedimientos de ascensos. Los componentes previos de la política de la empresa pueden afectar significativamente la productividad de los proyectos. El factor "Recurso Humano" ocupó el lugar cuarto en el grupo características de la empresa, con un índice de importancia relativa de 0,854 y fue calificado en el lugar 18° entre los ochenta y tres factores generales. La construcción es una industria de trabajo intenso, por lo que fue necesario concentrar esfuerzos en el tema de los recursos humanos en este sector.

Grupo Mano de Obra

El grupo mano de obra incluye catorce factores de optimización de productividad. La Tabla 8 ilustra las opiniones de los encuestados sobre los factores de optimización de productividad, relacionados con temas de mano de obra.

Table 9. RII and Ranks for factors related to labor (group 2)

Tabla 9. IIR y Clasificaciones para los factores relacionados con el grupo mano de obra (grupo 2)

Labor Factors/ Factores de mano de obra	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Crew Arrangements/ Distribución de cuadrillas	0.886	1	10
Incentives/ Incentivos	0.845	2	21
Work Conditions/ Condiciones de Trabajo	0.817	3	28
Loyalty/ Lealtad	0.813	4	29
Labor Availability/ Disponibilidad de mano de obra	0.808	5	32
Safety/ Seguridad	0.796	6	34
Quality control/ Control de calidad	0.758	7	42
Working Hours/ Horas trabajadas	0.755	8	43
Relations with Forman/ Relación con el capataz	0.726	9	51
Labor Relations/ Relaciones laborales	0.708	10	56
Contract Agreement/ Acuerdo de contrato	0.685	11	64
Local Regulations/ Normativa local	0.676	12	66
Training/ Entrenamiento	0.557	13	79
Project Location/ Ubicación del proyecto	0.53	14	81

"Crew Arrangement" factor was ranked first with RII value of 0.886 among the labor group factors and was ranked in the 10th position among the eighty three factors. The high rank of "Crew Arrangement" factor among either labor group factors or the overall 83 factor, prove increased importance of such factor in enhancing construction productivity. Indeed, increased productivity can be obtained through the cooperation and collaboration of workers.

El factor "Distribución de Cuadrilla" fue calificado como el primero, con un valor IIR de 0,886 entre el grupo de factores de mano de obra y calificado en el lugar 10° entre los ochenta y tres factores. La alta calificación del factor "Distribución de Cuadrilla" entre los factores del grupo mano de obra, o entre los 83 factores, demuestra la gran importancia de este factor en la optimización de la productividad de la construcción. Por cierto, la productividad optimizada puede ser obtenida a través de la cooperación y colaboración de los trabajadores.

“Crew arrangement” is considered a vital proactive management tool through which construction productivity could be optimized. Ghio (2000) highlighted the high significance of “Crew Arrangement” factor in enhancing construction productivity while describes the work conducted to improve productivity during the construction of a shopping centre in South America.

“Incentives” factor was ranked second with a value of RII equal to (0.845) and was ranked 21st among all other productivity improvement factors. The use of special motivational programs through financial incentives is common on multiple international construction industries and such programs have been found to be useful and effective. Such programs are considered to be effective in raising productivity, increasing the satisfaction of workers, improving construction quality, shortening project time, and lowering overall production costs. Despite the overall benefits of incentive systems, many construction employers in the Gaza Strip do not apply such programs in their administration, and they do not always provide an attractive incentive either to the labor or to the other employee. Similar result was obtained by Kazaz and Ulubeyli (2007) while discussing both of economic and socio-psychological factors affecting labor productivity.

With a relative index value of 0.817 “Work Conditions” factor was ranked third whereas was ranked 28th among the overall 83 factors. Working conditions in a construction site could be very difficult from those found at another industry, and this can affect the worker’s morale and productivity. Such problems as congestion, changes, site access difficulties, or weather conditions may have an influence on construction productivity. The result obtained in this regard comes consistent with result stated by Rojas and Aramvareekul (2003). Applying efforts and practical solutions in order to minimize the bad effects of such conditions on construction productivity should be considered as a major priority. “Worker Loyalty” factor was ranked fourth among the labor group factors with a relative index value of 0.813 and was ranked 29th among the overall factors. The previous findings suggest that worker commitment and loyalty enhance both labor productivity and financial performance at the firm level thereby highlighting a hitherto neglected channel for improved firm performance. The “Labor Availability” factor was ranked in the fifth position among the factors of labor group with a relative index value equal to 0.808 and was ranked 32nd among all the productivity improvement factors.

With a relative index of 0.796 “Safety” factor occupied the 6th position whereas was ranked 34th among the overall 83 factors. Safety has always a priority at any construction job site because the dangerous nature of most construction works renders them liable to many accidents. Occupational injuries can harm the reputation of a company, decrease productivity, and result in huge costs.

La “Distribución de cuadrilla” es considerada como una herramienta de administración vital y proactiva, a través de la cual la productividad puede ser mejorada. Ghio (2000) destacó el factor “Distribución de Cuadrilla” en la optimización de la productividad de la construcción, mientras describía el trabajo a desarrollar para mejorar la productividad durante la construcción de un centro comercial en Sudamérica.

El factor “Incentivos” fue calificado en segundo lugar, con un valor de IIR igual a (0,845) y en el lugar 21° entre todos los otros factores de optimización de productividad. El empleo de programas especiales de motivación, por medio de incentivos económicos es habitual en múltiples industrias internacionales de la construcción. Estos programas son considerados útiles y efectivos ya que aumentan la productividad, elevando la satisfacción de los trabajadores, incrementando la calidad de la construcción, disminuyendo los plazos del proyecto y bajando los costos totales de producción. Además de los beneficios generales de los sistemas de incentivos, muchos empleadores de la construcción en la Franja de Gaza no aplican estos programas en su administración y no siempre otorgan un incentivo atractivo a la fuerza laboral o a otros empleados. Kazaz y Ulubeyli (2007) obtuvieron un resultado similar, mientras discutían los factores económicos y socio-psicológicos que afectan la productividad de la mano de obra.

El factor “Condiciones de Trabajo” fue calificado como tercero, con un valor de IIR de 0,817, mientras que fue calificado en el lugar 28° entre los 83 factores. Las condiciones de trabajo en la obra de construcción pueden ser muy arduas comparadas con las de otras industrias, y pueden afectar la motivación y la productividad del trabajador. Estos problemas, como la congestión, cambios, dificultades de acceso a la obra o condiciones climáticas pueden influir en la productividad de la construcción. El resultado obtenido en este aspecto coincide con el resultado presentado por Rojas y Aramvareekul (2003). La tarea de aplicar esfuerzos y soluciones prácticas, para minimizar los efectos negativos de esas condiciones en la productividad de la construcción, debiera ser considerada como una prioridad. El factor “Lealtad del Trabajador” fue calificado como el cuarto entre los factores del grupo mano de obra. Los descubrimientos anteriores sugieren que el compromiso y lealtad del trabajador mejoran la productividad laboral y el desempeño financiero a nivel de empresa, destacando un canal desatendido hasta el momento para mejorar el desempeño de la firma. El factor “Disponibilidad de Mano de Obra” fue calificado en quinto lugar entre los factores del grupo mano de obra con un valor de índice de importancia relativa de 0,808 y calificado en el lugar 32° entre todos los factores de optimización de productividad.

Con un índice de importancia relativa de 0,796, el factor “Seguridad” ocupó el 6° lugar y fue calificado en lugar 34° entre los 83 factores. La seguridad siempre ha sido una prioridad en cualquier obra de la construcción, debido a la naturaleza peligrosa de los trabajos de construcción que los hace proclives a numerosos accidentes. Las lesiones en el trabajo pueden dañar la reputación de una empresa, disminuir la productividad y generar altos costos.



Unsafe working conditions are always due to a lack of both safety equipments and commitment by workers to safety rules. A manager interviewed for the present study stated that construction workers in Gaza Strip 'never care' about safety regulations. Another manager expressed the view that local workers are especially unlikely to take the required safety measures, even if management insists that they do so which in turn contribute to decrease the construction productivity in multiple projects.

Material group

Material group includes nine productivity improvement factors. Table 9 shows the respondents' opinions about the productivity improvement factors related to material.

Las condiciones inseguras de trabajo siempre se deben a la falta de equipos de seguridad o al poco compromiso de los trabajadores en seguir las normas de seguridad. Un jefe de obra entrevistado para este estudio indicó que los trabajadores de la construcción en la Franja de Gaza "no siguen" las normas de seguridad. Otro jefe de obra expresó su visión sobre la baja probabilidad que los trabajadores locales tomen medidas de seguridad, aún cuando la gerencia insiste en que lo hagan, esto a su vez contribuye a disminuir la productividad de la construcción en múltiples proyectos.

Grupo Materiales

El grupo materiales incluye nueve factores de optimización de productividad. La tabla 9 muestra las opiniones de los encuestados sobre los factores de optimización de productividad relacionados con los materiales.

Table 9. *RII and Ranks for improvement factors related to materials (group 3)*

Tabla 9. IIR y Clasificaciones para los factores relacionados con el grupo materiales (grupo 3)

Material Factors/ Factores Materiales	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Delivery on time/ Entrega a tiempo	0.949	1	3
Material Availability/ Disponibilidad del material	0.94	2	6
Material Cost/ Costo del material	0.861	3	15
Procurement/ Abastecimiento	0.819	4	27
Accessories availability/ Disponibilidad de accesorios	0.741	5	46
Storage/ Almacenaje	0.648	6	68
New Products/ Nuevos productos	0.606	7	73
Prefabrication/ Pre-fabricación	0.588	8	75
Transportation/ Transporte	0.563	9	78

"Delivery on Time" factor was ranked first with a relative index of 0.949 and the same factor was ranked third among eighty three factors. The prompt procurement of material could benefit project productivity by allowing work to start and finish on schedule. Frequently in construction projects, the start of a successor activity is dependent on the finish of a predecessor activity. Thus, if the material procurement is not timely, the wait time could cause subsequent activities in the construction project to be delayed. The chain reaction would eventually extend the project completion. In addition, the late arrival of material with the corresponding wait time would reduce the productivity of workers. Rojas and Aramvarekul (2003) revealed that problems with material had been cited as a major cause of productivity loss.

With a relative index of 0.940, the survey respondents ranked "Material Availability" factor as the second factor influencing productivity of construction projects, whereas the same factor was ranked sixth among the eighty three factors.

El factor "Entrega a Tiempo" fue calificado como el primero con un índice de importancia relativa de 0,949 y el mismo factor ocupó el tercer lugar entre los ochenta y tres factores. El pronto abastecimiento del material podría beneficiar la productividad del proyecto permitiendo comenzar y finalizar el trabajo según el programa. Frecuentemente en los proyectos de construcción, el comienzo de una actividad consecutiva depende del término de la actividad que la antecede. Por lo tanto si el abastecimiento del material no es oportuno, el tiempo de espera podría provocar demoras en la actividad posterior de aquel proyecto de construcción. La reacción en cadena eventualmente demoraría la ejecución del proyecto. Además, la llegada demorada del material, junto con el correspondiente tiempo de espera, reduciría la productividad de los trabajadores. Rojas y Aramvarekul (2003) revelaron que los problemas con los materiales han sido citados como la principal causa de pérdida de productividad.

Con un índice de importancia relativa de 0,940, los encuestados calificaron el factor "Disponibilidad de Material" como el segundo factor que influencia la productividad de proyectos de construcción, mientras que el mismo factor ocupó el sexto lugar entre los ochenta y tres factores.

With effective pre-planning, the availability of materials should be checked before workers are assigned to an area so workers do not start any activity until the materials are available. Care in this respect should improve worker motivation and productivity and help promote a high level of accomplishment. "Material Cost" factor was ranked third with a relative index of 0.861 and was ranked 15th among the overall 83 improvement factors. In fact, the material cost affects the availability of such materials in the local market. It comes true that when a construction material is nearly expensive, it becomes difficult to procure such material rapidly by the contractor. Some agent suppliers or manufacturers ask the interested contractor for a period of time in order to arrange these materials. Others claim advanced cash payment from the contractor prior to the delivery of such material. As a result, it becomes urgent to place a scheduled purchasing request in advanced, thus helping the contractor to obtain the required material on time which in turn keep construction site proceeding productively.

Con una pre-planificación eficiente, la disponibilidad de materiales debiera ser revisada antes que los trabajadores sean asignados a un área, con el fin de que los trabajadores no comiencen una actividad hasta que los materiales se encuentren disponibles. Cuidar este tema debiera mejorar la motivación y productividad del trabajador, así como ayudar a promover un alto nivel de logros. El factor "Costo del Material" fue calificado como el tercero, con un índice de importancia relativa de 0,861 y ocupó el lugar 15° entre los 83 factores generales de optimización. De hecho, el costo del material afecta la disponibilidad de estos materiales en el mercado local. Es cierto que cuando un material de construcción es bastante caro, el contratista tiene dificultades para abastecer este material en forma rápida. Algunos distribuidores o productores solicitan al contratista interesado un período de tiempo para proveer estos insumos. Otros solicitan al contratista el pago en efectivo, antes de la entrega del material. Como resultado, se hace imperativo colocar las órdenes de compra por adelantado, de manera tal que el contratista obtenga el material requerido a tiempo, lo cual permite que la construcción en obra se mantenga productiva.

Management group

Management group includes fifteen productivity improvement factors. Table 10 illustrates the results of the productivity improvement factors related to management issues.

Grupo administración

El grupo administración incluye quince factores de optimización de productividad. La Tabla 10 ilustra los resultados de los factores de optimización de productividad relacionados con temas de administración.

Table 10. RII and Ranks for improvement factors related to management (group 4)

Tabla 10. IIR y Clasificaciones de los factores de optimización de productividad relacionados con la administración (grupo 4)

Management Factors Factores de administración	RII IIR	Ranks within group Calificación dentro del grupo	Ranks among all groups Calificación entre todos los grupos
Field Management/ Administración en obra	0.945	1	4
Office Management/ Administración en oficina	0.941	2	5
Planning/ Planificación	0.927	3	7
Scheduling/ Programación	0.889	4	9
Coordination within Company/ Coordinación dentro de la empresa	0.861	5	15
Resource Allocation/ Asignación de recursos	0.858	6	17
Coordination with subcontractors/ Coordinación con sub-contratistas	0.852	7	20
Estimating/ Estimación	0.826	8	24
Cost Control/ Control de costos	0.81	9	31
Coordination with designer & client/ Coordinación con el diseñador & cliente	0.796	10	34
Safety Management/ Administración de Seguridad	0.792	11	37
Quality Management/ Administración de calidad	0.708	12	56
Coordination with Local Authorities/ Coordinación con Autoridades Locales	0.69	13	61
Marketing/ Marketing	0.676	14	65
Coordination with research organizations/ Coordinación con organizaciones de investigación	0.62	15	72



With a relative index of 0.945, the survey respondents ranked „Field Management“ factor as the first factor influencing productivity of construction projects, whereas the same factor was ranked fourth among the eighty three factors. Timely inspection is of great importance to ensure effective operation, material quality, and timely progress of the project schedule. Subsequent activities on a construction schedule may not start until the required inspection is completed on preceding tasks. Waiting for instructions on how to perform the work may slow down the construction progress. Mojahed and Aghazadeh (2007) proved similar result while conducting survey study among the construction contractors in the deep south USA. „Office Management“ factor was ranked second with a relative index of 0.941, while was ranked fifth among the overall improvements factors. During the preparation phase for a construction project, office management play a significant role in planning, scheduling, resource allocation, and preparing purchasing requests etc.

The survey respondents' ranked „Planning“ factor as third one with a relative index of 0.927 whereas „Planning“ factor was ranked seventh among the 83 improvement factors. Results indicated that „Planning“ contributed as a primary factor sustaining productivity. Effective planning of construction projects requires understanding of details, construction methods, and resource requirements. The relationship between construction activities and resources is intrinsic to the construction process. Workforce productivity is negatively affected when a project schedule changes as a result of fragmentation of work activities, reassignment of crew members, and -out of sequence- work. Proper planning of all phases and components of work is necessary to ensure productivity. Veiseth et al. (2003) highlighted the significant role of planning in enhancing construction productivity. With a relative index of 0.861 „Coordination within Company“ factor was ranked fifth whereas the same factor was ranked 15th among the 83 improvement factors. Poor communication among different entities and individuals in a construction project may negatively affect productivity of a job. Prompt communication to make instructions and other information available is critical for on time and proper performance of work. Poor communication leads to a decline in work productivity and very likely to defective products in the long run.

Regulation group

Regulation group include three factors. Table 11 illustrates the respondents results of the productivity improvement factors related to regulation applications.

Con un índice de importancia relativa de 0,945, los encuestados calificaron el factor “Administración en Obra” como el primero en influenciar la productividad de los proyectos de construcción, mientras el mismo factor ocupó el cuarto lugar entre los ochenta y tres factores. Las inspecciones a tiempo son de gran importancia para asegurar una operación eficiente, la calidad del material y el desarrollo oportuno de la planificación del proyecto. Las actividades consecutivas en una planificación de una construcción pueden detenerse hasta que la inspección a las tareas que las anteceden haya sido realizada. Esperar las instrucciones sobre cómo ejecutar un trabajo puede demorar el curso de la construcción. Mojahed y Aghazadeh (2007) demostraron un resultado similar, cuando realizaban una encuesta tipo estudio, entre contratistas de la construcción en el extremo sur de Norteamérica. El factor “Administración en Oficina” fue calificado como segundo, con un índice de importancia relativa de 0,941, mientras el mismo factor fue calificado en quinto lugar entre los factores de optimización generales. Durante la fase de preparación de un proyecto de construcción, la administración en oficina ocupa un papel importante en la planificación, coordinación, asignación de recursos, preparación de órdenes de compra, etc.

Los encuestados calificaron el factor “Planificación” como el tercero, con un índice de importancia relativa de 0,927, mientras que el mismo factor “Planificación” ocupó el lugar séptimo entre los 83 factores de optimización. Los resultados indican que la “Planificación” contribuye como factor fundamental en sustentar a la productividad. La planificación eficiente de proyectos de construcción requiere de comprender los detalles, métodos constructivos y requerimientos de recursos. La relación entre las actividades constructivas y los recursos es intrínseca al proceso de construcción. La productividad de la fuerza de trabajo se ve negativamente afectada cuando varía la programación de un proyecto, como resultado de la fragmentación de trabajos, reasignación de miembros de las cuadrillas y desarrollo de trabajos fuera de secuencia. La adecuada planificación, de todas las fases y componentes del trabajo, es necesaria para asegurar la productividad. Veiseth et. al., (2003) insistieron en la importancia del papel de la planificación, para mejorar la productividad de la construcción. Con un índice de importancia relativa de 0,861 el factor “Coordinación dentro de la Empresa” fue calificado como quinto, mientras el mismo fue calificado como 15° entre los 83 factores de optimización. Comunicaciones deficientes entre distintas entidades e individuos de un proyecto de construcción pueden afectar negativamente la productividad de un trabajo. La comunicación oportuna, para entregar instrucciones y otra información disponible, es crucial para el adecuado desarrollo de un trabajo dentro de sus plazos. La mala comunicación lleva a una baja de la productividad en el trabajo y posiblemente a la producción de elementos defectuosos a la larga.

Grupo Normativas

El grupo normativas incluye tres factores. La Tabla 11 ilustra los resultados de los encuestados sobre los factores de optimización de la productividad, relacionados con aplicaciones de las normativas.



Table 11. RII and Ranks for improvement factors related to regulation (group 5)

Tabla 11. IIR y Calificaciones para los factores de optimización relacionados con las normativas (grupo 5)

Regulation Factors/ Factores Normativas	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Health regulation/ Normativa sanitaria	0.735	1	48
Environmental/ Medioambiental	0.662	2	67
Local Codes/ Códigos locales	0.644	3	69
Taxes/ Impuestos	0.58	4	76

With a relative index of 0.735, the respondents ranked „Health Regulation“ factor as the first factor influencing construction productivity, whereas the same factor was ranked 48th among the overall eighty three factors. Previous ranks put the “Health Regulation” factor as a mediator one in improving productivity. Construction projects can be complex and involve many different trades and occupations. Frequently they also involve high-risk activities. The work is more likely to be done safely and to time if those doing the work have suitable management arrangements in place. The Regulations are aimed at protecting the health, safety and welfare of everyone who carries out construction work. They also give protection to other people who may be affected by the work. Such regulations contribute to enhance satisfactory feeling for labor which in turn reflects a considerable increase in their performance.

“Environmental Regulation” factor was ranked second, and was ranked 67th among the overall 83 improvement factors. Results reflect relatively minor role of “Environmental Regulation” factor in improving construction productivity. During construction most projects pose a significant risk to the environment, which must be addressed by developers and contractors. The risk to the environment is particularly high when work is done near coastal areas, streams and creeks, or along a river valley. When construction occurs near built-up areas, poor practices may result in air and noise pollution which may cause annoyance and affect the health of neighbouring communities. Developers and contractors are required to implement sound practices that minimize environmental impacts and eliminate health risks and nuisance to residents near a construction site.

Machinery group

Machinery group include nine factors. It is shown in Table 12 the respondents’ opinions against the productivity improvement factors related to machinery and equipments.

Con un índice de importancia relativa de 0,735, los encuestados calificaron el factor “Normativa Sanitaria” como el primer factor que influye la productividad de la construcción, mientras el mismo factor ocupó el lugar 48° entre los 83 factores generales. Clasificaciones anteriores situaron al factor “Regulación Sanitaria” como un factor intermedio para optimizar la productividad. Los proyectos de construcción pueden ser complejos e involucran a diferentes gremios y ocupaciones. Frecuentemente también incluyen actividades de alto riesgo. Es muy probable que el trabajo se ejecute en forma segura y a tiempo, si los trabajadores cuentan con disposiciones administrativas en su sitio. Las normativas tienen por objeto proteger la salud, seguridad y bienestar de todos quienes desarrollan un trabajo en la construcción. También proporcionan protección a otras personas que pudieran resultar afectadas por el trabajo. Dichas regulaciones contribuyen a mejorar el sentimiento de satisfacción por el trabajo, lo que a su vez refleja un considerable aumento en su desempeño.

El factor “Regulación Ambiental” fue clasificado segundo y ocupó el lugar 67° entre los ochenta y tres factores de optimización. Los resultados reflejan un papel relativamente menor del factor “Normativa Medioambiental” para optimizar la productividad de la construcción. Durante la construcción, la mayoría de los proyectos plantean un riesgo importante al medio ambiente, que debe ser direccionado por los agentes inmobiliarios y contratistas. El riesgo al medioambiente es particularmente alto cuando el trabajo se desarrolla cerca de las zonas costeras, de corrientes y riachuelos, o a lo largo del valle de un río. Cuando la construcción se desarrolla cerca de áreas urbanizadas, las malas prácticas pueden traducirse en contaminación ambiental y acústica, que pueden provocar molestias y afectar la salud de las comunidades aledañas. Los agentes inmobiliarios y contratistas deben implementar prácticas sólidas que minimicen los impactos ambientales y eliminen los riesgos a la salud y las molestias a los residentes vecinos de una obra de construcción.

Grupo Maquinaria

El grupo maquinaria incluye nueve factores. En la Tabla 12 se muestran las opiniones de los encuestados sobre los factores de optimización de la productividad relacionados con maquinaria y equipamiento.



Table 12. *RII and Ranks for improvement factors related to machinery (group 6)***Tabla 12.** *IIR y Calificaciones para los factores de optimización relacionados con la maquinaria (grupo 6)*

<i>Equipments Factors</i> Factor Equipamiento	<i>RII/ IIR</i>	<i>Rank within group/ Calificación dentro del grupo</i>	<i>Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos</i>
<i>Capacity/ Capacidad</i>	0.854	1	18
<i>Suitability for work/ Idoneidad para el trabajo</i>	0.84	2	22
<i>Skilled Operator/ Operador calificado</i>	0.826	3	24
<i>Safety/ Seguridad</i>	0.826	3	24
<i>Replacement/ Reemplazo</i>	0.813	5	29
<i>Maintainability/ Mantenimiento</i>	0.799	6	33
<i>Cost Control/ Control de costos</i>	0.795	7	36
<i>Utilization/ Utilización</i>	0.744	8	45
<i>Simplicity/ Simplicidad</i>	0.575	9	77

With a relative index of 0.854, the respondents ranked “Machine Capacity” factor as the first factor influencing construction productivity, whereas the same factor was ranked 18th among the overall eighty three factors. Results prove the importance of “Machine Capacity” factor among the overall 83 productivity improvement factors in improving construction productivity. Machine capacity describes capabilities of a machine to execute a required volume of work in an hour or a day. As stated by respondents such factor is classified of high importance in achieving better productivity due to the fact that majority of critical construction activities is highly dependent on machine capacity. The more productive machine, the faster project could be implemented.

“Suitability for Work” factor was ranked second among the factors of machinery group whereas the same factor was ranked 22nd among the overall factors in different groups. It’s usually recommended by manufactures that each construction machine is design to suit a specific type of work and if the machine used for different types of work, results of work productivity will not be within the accepted ranges, due to the fact that the machine doesn’t work in optimal work conditions. “Skilled Operator” factor was ranked third whereas the same factor was ranked 24th among the eighty three factors in different groups. In order to achieve required productivity of a machine, two factors should be considered; first is the machine itself and second is the operator. Machine operator should have the required skills in order to deal with such machine. Operator should be familiar with construction machine; know its capabilities, satisfy manufactures guides and conditions, keep maintenance programs for the machine.

Con un índice de importancia relativa de 0,854, los encuestados calificaron el factor “Capacidad de la Maquinaria” como el primer factor que influencia la productividad en la construcción, mientras el mismo factor ocupó el lugar 18° entre los 83 factores generales. Los resultados demuestran la importancia del factor “Capacidad de la Maquinaria” entre los 83 factores de optimización de la productividad de la construcción. Capacidad de la maquinaria describe las habilidades de un equipo para ejecutar el volumen requerido de trabajo por hora o día. Tal como indicaron los encuestados, este factor es calificado como de gran importancia para alcanzar una mayor productividad, debido a que la mayor parte de las actividades críticas en la construcción dependen directamente de la capacidad de la maquinaria. Entre más productiva sea la maquinaria, el proyecto será implementado con mayor rapidez.

El factor “Idoneidad para el Trabajo” fue calificado como el segundo dentro del grupo de las maquinarias, mientras que el mismo factor ocupó el lugar 22° entre los factores generales de los diferentes grupos. Los fabricantes generalmente indican que cada equipo de construcción es diseñado para cumplir un tipo específico de trabajo. Si el equipo es utilizado para distintos tipos de trabajo, los resultados de la productividad estarán fuera de los márgenes aceptados, debido a que el equipo no se encuentra operando en las condiciones óptimas y normales. El factor “Operador Calificado” fue clasificado como tercero, mientras el mismo factor ocupó el lugar 24° entre los ochenta y tres factores de los distintos grupos. Para alcanzar la productividad requerida de una maquinaria, se deben considerar dos factores: el primero es la maquinaria misma y el segundo es el operador. El operador de la maquinaria debiera tener las habilidades necesarias para trabajar con el equipo. El operador debiera estar familiarizado con la maquinaria de construcción, conocer sus capacidades, cumplir con las instrucciones y condiciones provistas por el fabricante y llevar a cabo las mantenciones del equipo.

Contract conditions group

Contract conditions group include nine factors. Table 13 shows the respondents' opinions against the productivity improvement factors related to contract conditions.

Grupo condiciones contractuales

El grupo condiciones contractuales incluye nueve factores. La Tabla 13 muestra las respuestas de los encuestados sobre los factores de optimización de la productividad relacionados con las condiciones contractuales.

Table 13. Improvement factors related to contract condition (group 7)
Tabla 13. Factores de optimización relacionados con las condiciones contractuales (grupo 7)

Contracting Factors Factores Contractuales	RII IIR	Rank within group Calificación dentro del grupo	Rank among all groups Calificación entre todos los grupos
Payment arrangement/ Disposición de Pagos	0.872	1	13
Incentive/Disincentive Clauses/ Clausulas de Incentivo/impedimento	0.763	2	41
Risk Distribution among Parties/ Distribución del Riesgo entre las Partes	0.749	3	44
Selecting Subcontractors/ Selección de Sub-contratistas	0.731	4	50
Selecting General Contractor/ Selección del Contratista General	0.694	5	60
Insurance/ Seguros	0.689	6	62
Dispute Resolution Methods/ Métodos de Resolución de Controversias	0.689	6	62
Selecting Designer/ Selección del Diseñador	0.621	8	70
Bonding/ Obligaciones	0.603	9	74

"Payments Arrangement" factor was ranked first whereas the same factor was ranked 13th among the eighty three factors in different groups. The amount of the advance payment is commonly somewhere between 10% and 20% of contract price. Where an advance payment is made equal to, say 10% of the contract price, it is quite common for the contract to state that the regular interim payments which are made as the contract progresses will be reduced by 10% until the advance payment has been recovered in full from those deductions. In such a case it is only reasonable for the guarantee of the advance payment to reduce by the same amount. The progress payment, in which contractors are paid at intervals based on work performed and incorporating agreed variation orders, is designed to ensure smooth and rapid currency circulation and to develop higher quality construction through closer relations between the employer and the contractor. Prompt payment is vital to the stability and efficiency of the construction industry.

El factor "Disposición de Pagos" fue calificado como el primero, mientras el mismo factor ocupó el lugar 13° entre los ochenta y tres factores en diferentes grupos. El monto del pago anticipado, generalmente corresponde entre el 10% y el 20% del valor del contrato. Cuando un pago anticipado asciende a digamos el 10% del precio del contrato, es muy común que el contratista establezca pagos parciales en forma regular, que son efectuados a medida que avanza el contrato y serán rebajados de a 10%, hasta que el pago anticipado haya sido recuperado totalmente de esas deducciones. En tal caso, es razonable para la garantía del pago anticipado, rebajar la misma cantidad. El pago progresivo, en el cual se le paga al contratista en intervalos contra trabajos realizados e incluyendo las acordadas órdenes de cambios, se diseña para asegurar una circulación de dinero fluida y rápida, con el fin de obtener una construcción de alta calidad, por medio de una relación estrecha entre el empleado y el contratista. El pago oportuno es vital para la estabilidad y eficiencia de la industria de la construcción.

Information technology group

Information technology group include eight factors. Table 14 shows the respondents' opinions about the applications of information technology in construction industry and its effect on productivity.

Grupo tecnologías de la información

El grupo tecnologías de la información incluye ocho factores. La Tabla 14 muestra las respuestas de los encuestados sobre la aplicación de las tecnologías de la información en la industria de la construcción y su efecto sobre la productividad.

Table 14. *RII and Ranks for information technology (group 8)*
Tabla 14. *IIR y Calificaciones para las tecnologías de la información (grupo 8)*

<i>Information Technology Factors</i> Factores Tecnología de la Información	<i>RII</i> IIR	<i>Rank within group</i> Calificación dentro del grupo	<i>Rank among all groups</i> Calificación entre todos los grupos
<i>Scheduling and planning/</i> Programación y planificación	0.785	1	39
<i>Word Log</i>	0.74	2	47
<i>Accounting/</i> Contabilidad	0.721	3	54
<i>Design and Cad applications/</i> Diseño y aplicaciones Cad	0.721	4	54
<i>Estimating and costing/</i> Estimaciones y costos	0.694	5	59
<i>Risks analysis/</i> Análisis de riesgos	0.551	6	80
<i>Internet and electronic mail/</i> Internet y correo electrónico	0.507	7	82
<i>Fields communications/</i> Comunicaciones en terreno	0.47	8	83

With a relative index of 0.785, the „Scheduling and Planning“ factor was ranked first among the factors of information technology group, whereas the same factor was ranked 39th among the overall eighty three factors. Previous ranks ensure high importance of “Scheduling and Planning” factor at the level of its group whereas reflect medial importance when comparing with overall 83 factors. The study revealed that majority of participants use computerized scheduling and prepare time schedules for their projects using different versions of the Microsoft Office Project program. A precedence diagrams, network formats and different reports might not be very common with small and medium sized firms. Working with different alternatives, and hence achieving better decisions-making, was the main advantage of using computers in scheduling. “Word Log” factor was ranked second with a relative index of 0.74 whereas the same factor was ranked 47th among the eighty three factors in different groups. This proves high importance of “Word Log” factor at the level of its group whereas reflect medial importance when comparing with overall 83 factors. It’s predictable that the use of word processing applications is considered of high significance comparing with other computer functions, as most of the contractors report purchasing the computers mainly for using word log.

With a relative index of 0.721, the “Accounting” factor was ranked third, whereas the same factor was ranked 54th among the overall factors. Usage of computerized accounting functions in construction firms became very common when compared with other functions that the computer systems may be used for. In the field of accounting the most often use software programs are locally designed to meet the necessary requirements of the contractors business like accounts receivable, accounts payable, accounts of taxes, salaries sheet and producing balance sheets and income statements.

Con un índice de importancia relativa de 0,785 el factor “Programación y Planificación” fue calificado como el primero dentro del grupo de factores de tecnologías de la información, mientras el mismo factor ocupó el lugar 39° entre los ochenta y tres factores generales. Clasificaciones anteriores otorgan gran importancia al factor “Programación y Planificación” a nivel de su grupo, mientras reflejan la importancia intermedia comparado con los 83 factores generales. El estudio reveló que la mayoría de los participantes emplea una programación computarizada y preparan planificaciones de plazos para sus proyectos, usando diferentes versiones del programa Microsoft Office Project. Diagramas anteriores, formatos de redes y diferentes informes pueden no ser comunes en empresas pequeñas y medianas. Trabajar con distintas alternativas, y así mejorar la toma de decisiones, fue la principal ventaja de emplear computadores para la programación. El factor “Word Log” fue calificado como el segundo con un índice de importancia relativa de 0,74 mientras el mismo factor ocupó el lugar 47° entre los ochenta y tres factores de distintos grupos. Esto demuestra la gran importancia del factor “Word Log” a nivel de su grupo, mientras refleja una importancia intermedia al compararlo con los 83 factores generales. Es predecible que el uso de las aplicaciones de procesamiento Word sean consideradas de gran importancia, en comparación con otras funciones computarizadas, puesto que la mayoría de los contratistas declara que adquieren computadores principalmente para utilizar Word Log.

Con un índice de importancia relativa de 0,721, el factor “Contabilidad” fue calificado como tercero, mientras el mismo factor ocupó el lugar 54° entre los factores generales. El empleo de funciones contables computarizadas en las empresas constructoras se ha hecho bastante común, en comparación con otras funciones que ofrecen los sistemas computacionales. En el campo de la contabilidad, los programas computacionales más empleados son diseñados en forma local, con el fin de cumplir con los requerimientos necesarios para el negocio de los contratistas, tales como cuentas por cobrar, cuentas por pagar, impuestos, planillas de salarios y la elaboración de planillas de balances y declaraciones de ingresos.

The use of accounting software contributed in keeping accurate records that could be used as basic information in similar future projects. Previous result is similar to result obtained by Shash and AL-Amir (1996) while highlighting IT applications in construction firms in Saudi Arabia.

El uso de programas de contabilidad contribuye a mantener registros precisos que pueden ser empleados como información base en futuros proyectos similares. El resultado anterior es similar al obtenido por Shash y AL-Amir (1996) quienes destacan el uso de las tecnologías de la información en Arabia Saudita.

Engineering group

Engineering group include three factors. Table 15 shows the respondents' opinions against the productivity improvement factors included in engineering group

Grupo Ingeniería

El grupo ingeniería incluye tres factores. La Tabla 15 muestra las opiniones de los encuestados sobre los factores de optimización de la productividad incluidos en el grupo ingeniería.

Table 15. RII and Ranks for engineering group (group 9)
Tabla 15. IIR y Calificaciones para el grupo ingeniería (grupo 9)

Engineering Factors/ Factores Ingeniería	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Specifications/ Especificaciones	0.79	1	38
Value Engineering/ Ingeniería de Valor	0.785	2	39
Design Standards/ Estándares de Diseño	0.726	3	51

With a relative index of 0.790, the „Specification“ factor was ranked first, whereas the same factor was ranked 38th among the overall eighty three factors. Results ensure high significance of “Specification” factor at the level of its group whereas reflect medial importance when ranking among 83 factors. Drawings and specification alteration during execution could take place in many projects implemented in the Gaza Strip. Changes of specifications and drawings require additional time for adjustments of resources and manpower in order to deal with such changes. Labor morale is also affected by extensive numbers of changes. This result is supported by Thomas (1999), who stated there is a 30 % loss of efficiency when work changes are being performed. Other researchers indicated also that poor drawings were considered to be another cause for low productivity (Makulsawatudom and Emsley, 2001). A delay may be caused in the construction process when a drawing is incomplete or not available. Incomplete drawings cause waiting time by requiring clarifications and writing requests for information. Generally, the quality of drawings is poor when insufficient time is spent before the bidding process to develop the design. This happens when the designer is not adequately paid or allowed time to complete the design because the owner rushes the bidding process.

Con un índice de importancia relativa de 0,790, el factor “Especificaciones” fue calificado como primero, mientras el mismo factor ocupó el lugar 38° entre los ochenta y tres factores generales. Los resultados demuestran la alta importancia del factor “Especificaciones” a nivel de su grupo, mientras reflejan una importancia intermedia cuando es comparado con los ochenta y tres factores. Las modificaciones de planos y especificaciones durante la ejecución de un proyecto pueden ocurrir frecuentemente en la Franja de Gaza. Los cambios de especificaciones y planes requieren de tiempo adicional para el ajuste de recursos y fuerza laboral, con el fin de cumplir con dichos cambios. La motivación laboral también se ve afectada por una cantidad excesiva de cambios. Este resultado es respaldado por Thomas (1999), quien indicó que existe un 30% de pérdida de eficiencia cuando se realizan cambios en el trabajo. Otros investigadores también indicaron que el mal diseño de los planos era considerado como otra causa de baja productividad (Makulsawatudom y Emsley, 2001). Se puede originar una demora en el proceso de construcción cuando un plano está incompleto o no está disponible. Los planos incompletos generan tiempos de espera, al requerir aclaraciones y solicitudes de información por escrito. Generalmente la calidad de los planos es baja cuando se dedica poco tiempo al proceso de diseño antes de la licitación. Esto ocurre cuando el diseñador es mal pagado o se le da poco tiempo para completar el diseño, debido a que el mandante apura el proceso de licitación.

“Value Engineering” factor was ranked second with a relative index of 0.785 whereas the same factor was ranked 39th among the eighty three factors in different groups.

El factor “Ingeniería de Valor” fue calificado como segundo con un índice de importancia relativa de 0,785, mientras que el mismo factor ocupó el lugar 39° entre los ochenta y tres factores de distintos grupos.

Previous ranks ensure high significance of “Value Engineering” factor at the level of its group whereas reflect medial importance in improving productivity when comparing with overall 83 factors. Value engineering is a technique for reducing cost and improving productivity. Value engineering is a systematic functional analysis leading to actions or recommendations to improve the value of systems, equipment, facilities, services, and supplies. Its objectives are to improve quality and to reduce cost.

Labor productivity improvement techniques group

This group includes three factors. Table 16 shows the respondents’ ranks against the labor productivity improvement techniques.

Table 16. RII and Ranks for labor productivity improvement techniques (group 10)

Tabla 16. IIR y Calificaciones para técnicas de optimización de productividad laboral (grupo 10)

Labor Productivity Improvement Techniques/ Técnicas de Optimización de Productividad Laboral	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Goal Setting/ Establecer Objetivos	0.863	1	14
Time Study/ Estudio de Tiempo	0.836	2	23
Quality Circles/ Círculos de Calidad	0.621	3	70

With a relative index of 0.863, the respondents ranked „Goal Setting” factor as the first factor affecting construction productivity, whereas the same factor was ranked 14th among the overall eighty three factors. Results prove high importance of “Goal Setting” factor in enhancing construction productivity. A successful program begins with a carefully established goal. Goals should be set at a high but attainable level because low ones lead to low performance. In the construction industry, the best way to set goals is for management to agree on attainable targets, based on the best historical performance for both quality and productivity. “Quality Circles” factor was ranked third with a relative index of 0.621 whereas the factor was ranked 70th among the overall factors in different groups. A similar factor named as “Sharing problems and their results” was investigated by Kazaz and Ulubeyli (2007) in Turkey. Similarly to the case of Gaza Strip, the researchers revealed backward rank of such factor in enhancing productivity.

External circumstances group

External circumstances group includes two factors. Table 17 shows the respondents’ opinions against both economical and political situation in the Gaza Strip.

Clasificaciones anteriores demuestran la importancia del factor “Ingeniería de Valor” a nivel de su grupo, mientras que reflejan una importancia intermedia en la optimización de la productividad, en comparación con los 83 factores generales. La ingeniería de valor es una técnica para reducir costos y aumentar la productividad. La ingeniería de valor es un análisis funcional y sistemático que conlleva a acciones o recomendaciones para incrementar el valor de los sistemas, equipamiento, instalaciones, servicios y proveedores. Sus objetivos son elevar la calidad y reducir costos.

Grupo técnicas de optimización de la productividad laboral

Este grupo incluye tres factores. La Tabla 16 muestra las calificaciones de los encuestados, en relación al grupo técnicas de optimización de la productividad laboral.

Con un índice de importancia relativa de 0,863, los encuestados calificaron el factor “Establecimiento de Objetivos” como el primer factor que afecta la productividad en la construcción, mientras el mismo factor ocupó el lugar 14° entre los ochenta y tres factores generales. Los resultados demuestran la gran importancia del factor “Establecimiento de Objetivos” para mejorar la productividad de la construcción. Un programa exitoso comienza con un objetivo cuidadosamente determinado. Los objetivos deben ser fijados a un nivel alto pero alcanzable, ya que los niveles menores llevan a un bajo desempeño. En la industria de la construcción la mejor manera de establecer objetivos es que la gerencia defina las metas alcanzables, basándose en los mejores desempeños históricos en cuanto a calidad y productividad. El factor “Círculos de Calidad” fue calificado como tercero, con un índice de importancia relativa de 0,621, mientras que el mismo factor ocupó el lugar 70° entre los factores generales de los distintos grupos. Un factor similar, llamado “Compartiendo problemas y sus resultados” fue investigado por Kazaz y Ulubeyli (2007) en Turquía. En forma similar al caso de la Franja de Gaza, los investigadores revelaron una clasificación sencilla para este factor en la optimización de la productividad.

Grupo circunstancias externas

El grupo circunstancias externas incluye dos factores. La Tabla 17 muestra las opiniones de los encuestados sobre ambas, situación económica y política en la Franja de Gaza.

Table 17. *RII and Ranks for impact of external circumstances (group 11)*
Tabla 17. *IIR y Calificaciones para el impacto de las circunstancias externas (grupo 11)*

External Circumstances/ Circunstancias Externas	RII/ IIR	Rank within group/ Calificación dentro del grupo	Rank among all groups/ Calificación entre todos los grupos
Closure & Economical difficulties/ Cierre & Dificultades Económicas	0.977	1	1
Political situation/ Situación Política	0.968	2	2

With a relative index of 0.977, the respondents ranked „Closure and Economical difficulties“ factor as the first factor affecting construction productivity and the same factor was also ranked 1st among the overall eighty three factors. “Political situation” factor was ranked second among both the “External Circumstances” group and the overall factors affecting construction productivity. In fact the economical and the political factors are connected together considerably so it will be difficult to deal separately with each factor. According to the World Bank (2008), Palestinians are currently experiencing the worst economic depression in modern history. The opprobrious imposition of international sanctions has had a devastating impact on an already severely comprised economy given its extreme dependence on external sources of finance.

Summary of groups ranking

Table 18 shows a summary of ranking the eleven productivity improvement groups. Ranking was based on relative index values. RII of each group equal to the average of relative indices values related to the group’s factors. The most important groups will be discussed below.

Con un índice de importancia relativa de 0,977, los encuestados calificaron el factor “Cierre y Dificultades Económicas” como el primer factor que afecta la productividad de la construcción, mientras el mismo factor ocupó el primer lugar entre los ochenta y tres factores generales. El factor “Situación Política” fue calificado como segundo entre las “Circunstancias Externas” y los factores generales que afectan la productividad en la construcción. En realidad los factores políticos y económicos están conectados de manera considerable, por lo que sería difícil tratarlos en forma separada. Según el Banco Mundial (2008), actualmente los palestinos enfrentan la peor depresión económica de la historia moderna. La oprobiosa imposición de sanciones internacionales ha tenido un impacto devastador en una economía severamente comprometida, dada su extrema dependencia de fuentes de financiamiento externas.

Resumen de grupos de calificaciones

La Tabla 18 muestra un resumen de calificaciones de once grupos de optimización de la productividad. La calificación está basada en valores de índices de importancia relativa. El IIR de cada grupo es igual al promedio de valores de índice de importancia relativa relacionado con los factores de los grupos. Los grupos más importantes serán discutidos a continuación.

Table 18. *Ranking of all productivity improvement groups*
Tabla 18. *Calificación de todos los grupos de optimización de productividad*

Group/ Grupo	RII/ IIR	Rank/ Calificación
External Circumstances/ Circunstancias Externas	0.972	1
Contractor Characteristics/ Características del Contratista	0.812	2
Management/ Administración	0.812	2
Equipment/ Equipos	0.786	4
Labor Productivity Improvement Techniques/ Técnicas de Optimización de Productividad Laboral	0.773	5
Engineering/ Ingeniería	0.767	6
Material	0.747	7
Labor/ Mano de Obra	0.74	8
Contracting/ Contratos	0.712	9
Regulations/ Regulaciones	0.655	10
Information Technology Applications/ Aplicación de Tecnologías de la Información	0.649	11
ALL Groups/ TODOS los Grupos	0.757	



It is shown that the “External Circumstances” group was ranked in the first position among the eleventh groups. That means that the “External Circumstances” group has the highest effect among other groups in improving construction productivity. All development projects have been stopped as the United Nations development stopped all its construction contracts for the infrastructure in the Gaza Strip. Such as rehabilitation of street, water and sewage facilities, with an estimated cost of 60 million US\$, and the UNRWA stopped its program for creating job opportunities at an estimated cost of 93 million US\$ from which more than 16,000 people were supposed to benefit. These exceptional conditions reflect the impact of unstable political and economical situation on local construction industry. Accordingly construction productivity decreased to the lowest level due to suspension of all construction projects.

“Contractor Characteristics” group was ranked in the second position among the eleventh groups. Contractor characteristics group include many facets of contractor’s capabilities such as contractor’s previous experience, its financial capability, reputation, company policy and other factors. In dead, these factors are considered as superior factors in improving construction productivity. As mentioned previously a successful implementation of construction projects depend highly on the financial capability of contractors either in delivering material, labors and machinery or submitting required guarantees and insurances. The solvent contractor can facilitate all these requirements which in turn help maintaining productive as well as profitable projects. On the other hand the experienced contractor has the required knowledge to deal with construction projects in away which bring benefits as well as productive implementation to the contractor. The previous construction experience is considered a major tool which enables any contractor to plan properly, implement successfully and achieve optimal productivity levels in construction projects.

“Management” group was also ranked secondly among the eleventh groups with a relative index of 0.812. Construction management aims to provide professional service that applies effective economical management techniques to the design, planning, procurement, and construction of any project lifecycle. The Project management constitutes important parts of construction firm, as it organizes, plans, schedules, and controls the fieldwork and is responsible for getting the project completed successfully as well as productively. While project implementation is influenced by a variety of factors, in most cases, successful project management will handle the project in the most proper fashion. “Equipment” group was ranked in the fourth position among the eleventh groups with a relative index of 0.786. The selection of the appropriate type and size of construction equipment often affects the required amount of time and effort and thus the job-site productivity of any construction project.

Se observa que el grupo “Circunstancias Externas” fue calificado en el primer lugar entre los once grupos. Esto significa que el grupo “Circunstancias Externas” tiene el mayor efecto entre otros grupos de optimización de la productividad en la construcción. Todos los proyectos en desarrollo fueron detenidos, ya que Naciones Unidas cesó todos sus contratos de construcción de infraestructura en la Franja de Gaza, tales como restauración de calles, instalación de aguas y desagües, cuyo costo estimado asciende a 60 millones de dólares. La UNRWA detuvo su programa de creación de oportunidades de empleos, cuyo costo estimado es de 93 millones de dólares, y del cual se beneficiarían más de 16.000 personas. Estas condiciones especiales reflejan el impacto de una inestable situación política y económica en la industria de la construcción local. En consecuencia la productividad de la construcción disminuyó a su nivel más bajo, debido al cierre de todos los proyectos de construcción.

El grupo “Características del Contratista” fue calificado como el segundo entre los once grupos. El grupo características del contratista incluye muchas facetas sobre las habilidades del contratista, tales como su experiencia previa, capacidad financiera, reputación, políticas de la empresa, entre otros factores. Por cierto dichos factores son considerados como cruciales en la optimización de la productividad de la construcción. Como se mencionara anteriormente una implementación exitosa de proyectos de construcción depende directamente de la solvencia financiera de los contratistas, ya sea en el abastecimiento de material, mano de obra, maquinaria o para presentar las garantías y seguros necesarios. Un contratista solvente puede cumplir con todos estos requerimientos que, a su vez, ayudarán a mantener proyectos productivos y rentables. Por otra parte, el contratista experimentado posee el conocimiento requerido para lidiar con proyectos de construcción, de manera de proporcionar beneficios y también una implementación productiva para el contratista. La experiencia previa en construcción es considerada como una herramienta vital, que permite a cualquier contratista planificar adecuadamente, implementar en forma exitosa y alcanzar niveles óptimos de productividad en proyectos de construcción.

El grupo “Administración” fue calificado como segundo entre los once grupos con un índice de importancia relativa de 0,812. El objetivo de la administración de la construcción es entregar un servicio profesional que aplique técnicas de administración económica y efectiva para diseñar, planificar, abastecer y construir el ciclo de vida de cualquier proyecto. La administración de proyectos constituye un papel importante en una firma constructora, puesto que organiza, planifica, programa y controla la obra en terreno; también es responsable del término exitoso y productivo del proyecto. Mientras la implementación del proyecto es influenciada por un sinnúmero de factores, en la mayoría de los casos, la administración exitosa del proyecto lo manejará de la forma más adecuada. El grupo “Equipamiento” fue calificado en cuarto lugar entre los once grupos con un índice de importancia relativa de 0,786. La selección del tipo y tamaño adecuado del equipo de construcción, a menudo afecta la cantidad de tiempo y esfuerzos requeridos y, por ende, la productividad de la obra en terreno de cualquier proyecto de construcción.

It is therefore important for site managers and construction planners to be familiar with characteristics of different types of equipments commonly used in construction. In order to increase job-site productivity, it is beneficial to select equipment with proper characteristics and a size most suitable for the work conditions at a construction site. While the standard production rate of a piece of equipment is based on «standard» or ideal conditions, equipment productivities at job sites are influenced by actual work conditions and a variety of inefficiencies and work stoppages. As one example, various factor adjustments can be used to account in an approximate fashion for actual site conditions.

Comparison of productivity problems with other countries

Several researchers have carried out investigations into productivity problems in different countries, all of which have used different factors. Away from political and economical factors, five crucial factors have been selected and compared with results obtained by other authors; ranking of these factors is shown in Table 19. The results have shown that lack of material is the most crucial productivity problems internationally, as the factor was ranked first in every country surveyed. Considering differences between countries, it is fair to say that both developed and developing countries have fewer problems in field management than Gaza Strip. Meanwhile, all experience the impact of planning factor at about the same level. Scheduling factor was considered a significant factor in all countries whereas respondents in both UK and Indonesia indicated higher level of importance for this factor. The significant role of construction equipments in both USA and Iran was more effective in enhancing construction productivity compared with other surveyed countries.

Por lo tanto es importante para los jefes de obras y planificadores en construcción estar familiarizados con las características de los distintos tipos de equipos generalmente empleados en la construcción. Con el fin de aumentar la productividad de la obra, es ventajoso seleccionar el equipo con las características adecuadas y el tamaño acorde para las condiciones de trabajo en terreno. Mientras la tasa de producción de una maquinaria es calculada bajo condiciones estándares o ideales, las productividades del equipo en las obras en terreno están influenciadas por condiciones reales de trabajo y por una variedad de incompetencias y detenciones del trabajo. Como ejemplo, varios factores de ajuste pueden ser empleados para contabilizar, en forma aproximada, las condiciones reales en obra.

Comparación de problemas de productividad con otros países

Muchos investigadores han realizado estudios sobre problemas de productividad en diferentes países, empleando distintos ajustes. Aparte de los factores políticos y económicos, cinco factores claves fueron seleccionados y comparados con resultados obtenidos por otros autores. Las calificaciones de estos factores son presentadas por la Tabla 19. Los resultados demostraron que la falta de material es el problema de productividad más importante a nivel mundial, puesto que fue calificado en primer lugar en cada país encuestado. Considerando las diferencias entre países, es justo decir que tanto países desarrollados como países en vías de desarrollo tienen menos problemas de administración en obra que la Franja de Gaza. Sin embargo todos experimentan el impacto del factor planificación al mismo nivel. El factor programación fue considerado en todos los países como un factor relevante, mientras que los encuestados, tanto en el Reino Unido como en Indonesia, otorgaron un mayor nivel de importancia a este factor. El importante rol de la maquinaria de construcción, tanto en Norteamérica como en Irán, es más preponderante en la optimización de la productividad de la construcción, en comparación con otros países encuestados.

Table 19. Comparison of productivity problems with other countries

Tabla 19. Comparación de problemas de productividad entre países

Factors affecting productivity/ Factores que afectan la productividad	Indonesia	Iran/ Irán	Nigeria	Gaza Strip/ Franja de Gaza	UK	USA
	Rank/ Calificación	Rank/ Calificación	Rank/ Calificación	Rank/ Calificación	Rank/ Calificación	Rank/ Calificación
Lack of material/ Falta de material	1	1	1	1	1	1
Planning/ Planificación	2	4	2	5	3	3
Scheduling/ Programación	3	5	6	7	2	5
Field Management/ Administración en obra	6	N/A	4	2	4	4
Equipment/ Equipamiento	5	2	3	-	5	2

(Cited in Makulsawatudom and Emsley 2001)

(Citado por Makulsawatudom y Emsley 2001)

5. Conclusion

The main objective of this study was to study the impact of significant factors on construction productivity in the Gaza Strip as well as to suggest practical recommendations that might help achieving productive implementation in the sector of construction industry. For enhancing productivity in local construction industry, a list of multiple productivity improvement factors was collected from the review of literature and formed a primary productivity evaluation questionnaire. Eighty-three productivity improvement factors were considered in the final questionnaire and categorized into eleven groups.

“Closure and Economical difficulties” factor was ranked firstly whereas „Political Situation” factor was ranked secondly among the overall eighty three factors. Both factors were listed under the external circumstances group. The reason behind this fact is attributed to the continuous closure imposed on the Gaza Strip in addition to the unstable political situation. The results have shown that the „Delivery on Time” factor was ranked thirdly whereas „Material Availability” factor was ranked sixth among the overall eighty three factors. Both factors were listed under the material group. The scheduled delivery of material is a major component in enhancing project productivity as it allows all construction activities to be completed within time. Management group included four potentials for productivity improvement, namely, „Field Management” factor which was ranked fourth among the overall factors; „Office Management” factor which was ranked fifth among the eighty three productivity improvement factors; „Planning” factor which was ranked seventh and finally „Scheduling” factor which was ranked ninth. Effective management tools such as proper planning and scheduling, successful field management, and suitable utilization of resources should definitely increase construction productivity.

Among the eleven groups, “External Circumstances” group, represented by the economical and political factors, was ranked in the first position. Construction projects in Gaza Strip are still suffering from continuous closure and material shortage. On the other hand, the unstable political atmosphere affects badly the construction industry in Gaza Strip. “Management” group was ranked secondly among the eleventh groups. Management activities have the highest effect in enhancing construction productivity. Management is responsible for getting successful implementation as well as productive work. On the other hand, “Contractor Characteristics” group was also ranked by respondent in the second position among the eleventh groups. Contractor characteristics group, represented by contractor’s capabilities, previous experience, its financial capability, reputation, company policy and others has a superior role in improving construction productivity.

5. Conclusión

El objetivo principal de este estudio fue investigar el impacto de factores relevantes en la productividad de la construcción en la Franja de Gaza, y también sugerir recomendaciones prácticas que puedan ayudar a alcanzar una implementación productiva en el sector de la industria de la construcción. Para aumentar la productividad en la industria de la construcción local, se recopiló una lista de múltiples factores de optimización de productividad, a partir de la revisión de literatura, y se elaboró un cuestionario principal de evaluación de productividad. Ochenta y tres factores de optimización de productividad fueron considerados por el cuestionario final, clasificándolos en once grupos.

El factor “Cierre y Dificultades Económicas” fue calificado en primer lugar, mientras que el factor “Situación Política” ocupó el segundo lugar entre los ochenta y tres factores generales. Ambos factores fueron listados en el grupo “circunstancias externas”. La razón tras este factor es atribuible a los continuos cierres impuestos en la Franja de Gaza, además de la inestable situación política. Los resultados demostraron que el factor “Entrega a Tiempo” fue calificado en tercer lugar mientras que el factor “Disponibilidad de Material” ocupó el sexto lugar entre los ochenta y tres factores generales. Ambos factores fueron listados bajo el grupo materiales. La entrega programada de material es un componente principal en la optimización de la productividad del proyecto, puesto que permite el desarrollo de las actividades de construcción dentro del plazo. El grupo Administración principalmente incluyó cuatro potenciales de optimización de productividad: el factor “Administración en Obra” fue calificado en cuarto lugar entre todos los factores. El factor “Administración en Oficina” fue calificado en quinto lugar dentro de los factores de optimización de productividad. El factor “Planificación” fue calificado en séptimo lugar y finalmente el factor “Programación” fue calificado en noveno lugar. Herramientas eficientes de administración, tales como planificación y programación adecuada, administración exitosa en obra, y utilización apropiada de recursos, definitivamente debieran aumentar la productividad en la construcción.

Entre los once grupos, el grupo “Circunstancias Externas”, representado por los factores políticos y económicos, fue calificado en primer lugar. Los proyectos de construcción en la Franja de Gaza aún sufren de continuos cierres y escasez de material. Por otra parte, la inestable atmósfera política afecta negativamente la industria de la construcción en la Franja de Gaza. El grupo “Administración” fue calificado en segundo lugar entre los once grupos. Las actividades administrativas tienen el más alto efecto en la optimización de la productividad de la construcción. La administración es responsable de implementar exitosamente el trabajo en forma productiva. Por otra parte, el grupo “Características del Contratista” también fue calificado por los encuestados, en segundo lugar entre los once grupos”. El grupo características del contratista, representado por las habilidades del contratista, experiencia previa, solvencia económica, reputación, políticas de la empresa y otros, juega un papel preponderante en la optimización de la productividad de la construcción.

When comparing findings mentioned previously with results obtained in different countries, it was found that lack of material is the most crucial productivity problems internationally, as the factor was ranked first in every country surveyed (USA, Indonesia, Iran, Nigeria, UK and Gaza Strip). Both of planning and scheduling factors were considered significant factors affecting construction productivity in those countries whereas respondents in both UK and Indonesia indicated higher level of importance for scheduling factor. Respondents in both USA and Iran highlighted an increased role of construction equipments in improving construction productivity compared with other countries like UK, Indonesia and Gaza Strip.

Identifying major problems affecting construction productivity by all participants should definitely help to facilitate proper solutions as well as determine potentials for productivity improvement. The industry needs to collaborate more with universities and research institutions in order to plan an effective strategy through which construction industry could be enhanced. Large organizations and industry leaders need to participate in the process of building an innovation strategy. To be successful this would include participation from clients, owners and users. Measurements of construction productivity need to be developed that are recognized by all participants are essential for the long-term success of any improvement action plan. Without such measures, the continued support for research and innovation strategies cannot be justified. The Palestinian authorities, namely the Ministry of Public Works and Housing, the Engineering Syndicate, the Palestinian Contractors Union and the other concerned authorities are recommended to promote, preach, and encourage contractors to develop their standards and organizational working system. On the other hand, these authorities are required to establish necessary rules and regulations that assist at improving local contractors capabilities which in turn reflect higher rates of productivity in local construction sector.

It is imperative to bring attention to the fact that very little has been done on contractor prequalification and other areas related to contracting. The Palestinian Contractors Union and other construction organizations are required to establish new mechanism through which construction firms could be prequalified honestly based on technical as well as financial considerations. Accordingly unqualified contractors could be eliminated or drawn back to lower classifications, thus help minimizing the bad effects of intensive competition among contractors, keep only qualified construction firms in the circle of competition and establish for a balanced local construction market. Consequently, construction productivity could be enhanced. Labor Ministry, clients, construction organizations and other related authorities should promote to highlight the significant role of safety and quality in enhancing construction productivity.

Al comparar los resultados anteriormente mencionados con los resultados obtenidos de diferentes países, se descubrió que la falta de material es el mayor problema de productividad a nivel internacional, puesto que este factor fue calificado en primer lugar por cada uno de los países encuestado (USA, Indonesia, Irán, Nigeria, Reino Unido y la Franja de Gaza). Ambos factores, planificación y programación, fueron considerados factores relevantes que afectan la productividad de la construcción en aquellos países. Al mismo tiempo los encuestados en el Reino Unido e Indonesia asignaron un mayor nivel de importancia al factor programación. Ambos encuestados en Norteamérica e Irán destacaron el papel fundamental de la maquinaria de la construcción para mejorar la productividad, en comparación con otros países como Reino Unido, Indonesia y la Franja de Gaza.

La identificación de los principales problemas que afectan la productividad en la construcción, definitivamente debiera contribuir para facilitar soluciones adecuadas, así como determinar los potenciales de optimización de productividad. La industria necesita colaborar activamente con universidades y centros de investigación, con el fin de planificar una estrategia efectiva para optimizar la industria de la construcción. Es necesario que grandes organizaciones y líderes de la industria participen en el proceso de elaboración de una estrategia innovadora. Para alcanzar el éxito, ésta debiera incluir la participación de clientes, propietarios y usuarios. Se necesita desarrollar medidas de productividad en construcción, que sean ampliamente reconocidas por todos los participantes; esto es esencial para el éxito a largo plazo de cualquier plan de acción. Sin estas medidas, no se justifica el continuo apoyo a estrategias de investigación e innovación. Se recomienda a las autoridades palestinas, principalmente al Ministerio de Obras Públicas y Vivienda, Sindicato de Ingenieros, Sindicato de Contratistas Palestinos y otras autoridades involucradas, que promuevan, divulguen e incentiven a los contratistas a desarrollar estándares y un sistema de trabajo organizacional. Por otra parte, se requiere que estas autoridades establezcan normas y regulaciones necesarias para ayudar a mejorar las habilidades de los contratistas locales, que a su vez reflejarán tasas de productividad más altas en el sector local de la construcción.

Es imperativo atraer la atención a que se ha hecho muy poco para pre-calificar al contratista o en otras áreas relacionadas con la construcción. El Sindicato Palestino de Contratistas y otras organizaciones de la construcción requieren establecer nuevos mecanismos, a través de los cuales, las empresas constructoras puedan ser seriamente calificadas basándose en consideraciones técnicas y financieras. Por lo anterior, los contratistas no calificados podrían ser eliminados o bajados a clasificaciones menores, ayudando así a minimizar la intensa competencia entre contratistas, a mantener sólo empresas calificadas dentro del círculo de competencia y establecer un mercado balanceado de la construcción local. En consecuencia la productividad de la construcción podría ser mejorada. El Ministerio del Trabajo, clientes, organizaciones de la construcción y otras autoridades involucradas, debieran promover a difundir el papel relevante que juegan la seguridad y calidad en mejorar la productividad de la construcción.



This could be done together with legislating effective acts and practical procedures in order to keep safe working conditions in construction projects. In this regard, the role of Labor Ministry should be vital. On the other hand, Labor Ministry and other authorities are required to take the lead in activating the Palestinian labor law and ensuring balanced contract agreements between labor and construction firms. This will definitely enhance fairness feeling among construction labor as well as increase labor satisfaction and loyalty to their construction companies. Accordingly construction labor could be motivated and do their best for implementing productive job.

It is also required to increase government spending in research development field for construction sector. Investment in construction process issues is at present essentially non-existent. Industry needs to take the lead in diffusing existing and new findings to all, through a designated information network including information on best practices, new technologies and materials, and training opportunities to facilitate technology transfer. At the end, the governmental role in continuous evaluating as well as applying strategies and action plans to enhance construction sector is essential. Clients and construction organizations should identify, analyze and evaluate all risks that anticipated taking place during the construction phase. An advanced payment should be paid to contractors equal to the cost of all material supposed to be used in the construction process. This should be done together with issuing a bank guarantee from the contractor side to cover this value. This simply if done will enable the contractor to procure the required material in advanced and consequently, secure continuous implementation which in turn reflect higher rates of productivity and enhanced progress. Construction organizations are recommended to adopt professional productivity measurement techniques such as benchmarking. These techniques help to evaluate project performance, make it possible for management to assess where they are in the job and increases their ability to plan current as well as future work.

Construction organizations are recommended to have a monitoring role on labor agreements. Labor union representatives should go and monitor what is said and what is written down and agreed to. These agreements should be valid for a period of time and must be understood by all parties. Such agreements create a balanced relationship between contractor and labor and enhance labor loyalty to the construction firm thus helping reduce inherent conflicts between labor and contractor and sustain construction labor productivity. Construction organizations, consultants, clients and labor union in the Gaza Strip are required to highlight the significant role of safety in construction projects and enforce local construction firms to follow up safety regulations.

Esto se podría hacer por medio de actas legislativas eficientes y procedimientos prácticos que ayuden a mantener condiciones seguras de trabajo en los proyectos de construcción. En este aspecto, la labor del Ministerio del trabajo es fundamental. Por otra parte, se requiere que el Ministerio del Trabajo y otras autoridades tomen la iniciativa en reactivar la ley del trabajo en Palestina y aseguren contratos equilibrados entre la mano de obra y las empresas constructoras. Eso definitivamente aumentará el sentimiento de justicia por parte de la mano de obra y también aumentará la satisfacción y lealtad con sus empresas constructoras. En consecuencia la mano de obra estaría motivada y haría su mejor esfuerzo para implementar un trabajo productivo.

También es necesario incrementar el gasto gubernamental en el campo de la investigación para el sector de la construcción. En la actualidad los temas de inversión en el proceso constructivo son inexistentes. La industria necesita tomar la iniciativa en la difusión de nuevos y existentes descubrimientos, a través de una red de información determinada, incluyendo información sobre las mejores prácticas, nuevas tecnologías y materiales, además de oportunidades de entrenamiento que faciliten la transferencia de tecnologías. Finalmente el papel del gobierno es esencial para la continua evaluación, aplicación de estrategias y planes de acción que ayuden a mejorar el sector de la construcción. Los clientes y organizaciones de la construcción debieran identificar, analizar y evaluar todos los riesgos antes de que ocurran durante la fase constructiva. Un pago anticipado se debiera efectuar a los contratistas, por un valor igual al costo de materiales que se emplearán en el proceso constructivo. Este se debiera efectuar junto con la emisión de una garantía bancaria por parte del contratista para cubrir este valor. Esta simple acción permitiría al contratista abastecer el material necesario por anticipado y, en consecuencia, asegurar la implementación continua, que a su vez reflejaría tasas mayores de productividad y un avance optimizado. Se recomienda que las organizaciones de construcción adopten técnicas profesionales de medición de productividad como puntos de referencia. Estas técnicas ayudan a evaluar el rendimiento del proyecto, hacen posible que la administración evalúe los avances del trabajo y aumenta su capacidad para planificar los trabajos actuales y futuros.

Se recomienda a las organizaciones de la construcción cumplir con un papel controlador sobre los acuerdos laborales. Los representantes de los sindicatos de trabajadores debieran controlar los acuerdos escritos y verbales. Estos acuerdos debieran ser validos por un período de tiempo y debieran ser reconocidos por todas las partes. Estos acuerdos crean una relación balanceada entre el contratista y la fuerza laboral y aumentan la lealtad hacia la empresa constructora, ayudando así a reducir conflictos inherentes entre los trabajadores y el contratista; y sustentan la productividad laboral en la construcción. Se requiere que las organizaciones de la construcción, consultores, clientes y sindicatos de trabajadores en la Franja de Gaza destaquen el rol preponderante de la seguridad en proyectos de construcción y hagan cumplir las normas de seguridad a las empresas constructoras locales.

Accordingly it's required from local contractors to include safety rules in the daily and weekly plans, and then the number of safety violations would certainly be reduced which in turn decrease disruption at working site and increase productivity.

Material shortage was found a considerable problem affecting productivity in the local construction industry. Local contractors are advised to place material purchasing orders in advanced, approve alternative materials and have provisional stocks of basic materials like cement and steel; this could be used in a case of emergency circumstances like continuous closure. Contractors should be required to submit a material supply schedule together with project time schedule, thus enforce contractors to arrange construction material on time. Local contractors are advised to use productive machine and eliminate old or unsuitable one. It's imperative to consider the fact that every construction activity requires a certain type of machines, so it will not be productive to use replacement. It is essential for each contracting company to adopt motivational system through which labor could be encouraged to increase construction productivity. Indeed, local contractors have a limited experience in such field, therefore, they are required to check different motivational approaches in other countries and use suitable programs. It is essential for local contracting firms to ensure that adequate procedures and qualified personnel are assigned every step in the construction process. This can be done by interviews and by having qualified personnel conducting audits to ensure things are working well. Personnel selection methods must be based on the needs of the job.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank DAAD in Germany for supporting this research.

7. References/Referencias

- Abdul Kadir M.R., W.P. Lee, M.S. Jaafar, S.M. Sapuan, A.A.A. Ali (2005)**, Factors affecting construction labour productivity for Malaysian residential projects, *Structural Survey*, Volume 23, Issue 1, pp. 42 – 54.
- Adrian J. (2003)**, Benchmarking and risk analysis: Key to increase construction productivity“ *Construction Accounting Taxation*.
- Arditi D. and Mochtar K. (2000)**, Trends in productivity improvement in the US construction industry“ *Construction Management & Economics* 18, 15-28.
- Arditi D. and Mochtar K. (1996)**, Productivity improvement in the Indonesian construction industry“ *Construction Management and Economics* 14, 13-24.
- Creative research systems (2009)**, Surveyssystem.co/sample-size-formula.
- DeVilbiss C.E. and Gilbert D.C. (2005)**, Resolve conflict to improve productivity, *Leadership and Management in Engineering*, ASCE, October issue, 87-91.
- Enshassi A., Mohammed S., Mayer P.E. and Abed K. (2007)**, Benchmarking masonry labor productivity“ *International Journal of Productivity and Performance Management* Vol. 56, No 3and 4.
- Eriksson P.E. and Westerberg M. (2011)**, effects of cooperative procurement procedures on construction project performance: A conceptual framework, *International Journal of Project Management*, Vol. 29, pp. 197-208.
- Janssen J., McLoughlin S. (2008)**, *New Zealand's Productivity Performance“*, New Zealand Treasury, Wellington 6015, New Zealand

De acuerdo a lo anterior, se requiere que los contratistas locales incluyan normas de seguridad en su planificación diaria y semanal, con lo que las infracciones a la seguridad se reducirían considerablemente, y a su vez disminuirían las interrupciones al trabajo en obra, aumentando la productividad.

La escasez de material es considerada un problema importante que afecta la productividad en la industria de la construcción local. Se aconseja a los contratistas locales colocar sus ordenes de compra con anticipación, aprobar materiales alternativos y mantener stocks provisionales de materiales básicos, tales como cemento y acero que pudieran ser empleados en casos de emergencia, como por ejemplo durante los continuos cierres. Se debiera pedir a los contratistas que entreguen un programa de abastecimiento de materiales junto con la programación total del proyecto, para así obligar a los contratistas a suministrar el material de construcción a tiempo. Se sugiere que los contratistas locales empleen maquinaria productiva y eliminen las antiguas o en mal estado. Es imperativo considerar el hecho que cada actividad en la construcción requiere de un determinado tipo de maquinaria, por lo tanto no será productivo reemplazar equipos. Es esencial que cada empresa constructora adopte un sistema motivacional, a través del cual se pudiera estimular a los trabajadores para aumentar la productividad en la construcción. Por cierto, los contratistas locales poseen limitada experiencia en este tema, por lo tanto se requiere que revisen distintos enfoques motivacionales en otros países y empleen programas adecuados. Es necesario que las empresas constructoras locales aseguren que los procedimientos adecuados y personal calificado sean asignados en cada paso del proceso constructivo. Esto puede ser realizado a través de entrevistas y contando con personal calificado que realice auditorias para asegurar que las cosas funcionan bien. Los métodos de selección de personal deberán estar basados en las necesidades del trabajo.

6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al DAAD de Alemania por el apoyo a esta investigación.

- Flanagan R., Cattell K. and Jewell C. (2005)**, Moving from construction productivity to construction competitiveness: Measuring value not output" University of Reading, <http://n.1asphost.com>.
- Gisha, Legal Center for Freedom of Movement (2007)**, "Commercial closure: Deleting Gaza's economy from the map" www.gisha.org
- Hanna A., Taylor C. and Sullivan K. (2005)**, "Impact of extended overtime on construction labor productivity" *Journal of Construction Engineering and Management* June 2005.
- Haskell P. (2004)**, "Construction industry productivity: Its history and future direction" White paper. www.thehaskellco.com, Haskell America's design-build leader.
- Herbsman Z. and Ellis R. (1990)**, "Research of factors influencing construction productivity" *Construction Management and Economics*, vol. 32, issue 8, pp.49-61.
- Chio V. (2000)**, "Development of construction work methods and detailed production planning for on-site productivity planning" CVG Construction Engineers, Lima, Peru
- Kazaz A. and Ulubeyli S. (2007)**, "Drivers of productivity among construction workers: A study in a developing country" *Building and Environment* 42 (2007) 2132–2140.
- Kim G., An S., Cho H., Seo D. and Kang K. (2005)**, "Improved productivity using a modified table formwork system for high-rise building in Korea" *Building and Environment* 40 (2005) 1472–1478.
- Lbbs W. (2005)**, "Impact of change's timing on labor productivity" *Journal of Construction Engineering and Management* November 2005.
- Lee H., Yu J. and Kim S. (2004)**, "Impact of labor factors on workflow" *Journal of Construction Engineering and Management* Vol. 130, No. 6, December 1, 2004.
- Makulsawudom A. and Emsley M.W. (2001)**, "Factors affecting the productivity of the construction industry in Thailand: The project managers' perception", ARCOM Seventeenth Annual Conference 2001, September 5-7, University of Salford, Vol. 1, 280-291.
- Mojahed S. and Aghazadeh F. (2007)**, "Major factors influencing productivity of water and wastewater treatment plant construction: Evidence from the deep south USA" *International Journal of Project Management* 2007.
- Moselhi O., Assem I. and El-Rayes K. (2005)**, "Change orders impact on labor productivity" *Journal of Construction Engineering and Management* March 2005.
- Naoum S.G. (1998)**, "Dissertation writing for construction students", Oxford Butterworth.
- Navon R. and Goldschmidt E. (2003)**, "Can labor inputs be measured and controlled Automatically" *Journal of Construction Engineering and Management* Vol. 129, No. 4 August 1, 2003.
- Odeh Abdalla and Battaineh Hussien T. (2002)**, "Causes of construction delay: traditional contracts" *International Journal of Project Management*, Vol. 20, No.1, pp. 67-73.
- Palestinian Bureau of Statistics (PBS) (2007)**, PBS Index, Gaza
- Productivity Commission of the Australian Government (2005)**, "Productivity Primer" <http://www.pc.gov.au/commission/index.html>
- Rojas E. and Aramvareekul P. (2003)**, "Labor productivity drivers and opportunities in the construction industry" *Journal of Management in Engineering* Vol. 19, No. 2, April 1, 2003.
- Roy S. (2006)**, "The Gaza Economy" Palestine Center Information, Brief No. 143.
- Ruddock L. and Ruddock S. (2009)**, Reassessing productivity in the construction sector to reflect hidden innovation and the knowledge economy, *Construction Management and Economics*, 27, 871-879.
- Shash A.A. and AL-Amir M. (1997)**, "Information technology in contractors firms in Saudi Arabia" *Construction Management and Economics* (1997) 15, 187-200.
- Tran V. (2011)**, 'Labour productivity in the New Zealand construction industry: A thorough investigation', *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 11 (1) 41-60
- Thomas H., Horman M., Minchin E. and Chen D. (2003)**, "Improving labor flow reliability for better productivity as lean construction principle" *Journal of Construction Engineering and Management* May/June 2003.
- Thomas H. and Horman M. (2006)**, "Fundamental principles of workforce management" *Journal of Construction Engineering and Management* Vol. 132, No. 1, January 1, 2006.
- Thomas H., Horman M., Souza U. and Zavrski I. (2002)**, "Reducing variability to improve performance as a lean construction principle" *Journal of Construction Engineering and Management* / March/April 2002 / 145
- Veiseth M., Rostad C.C. and Andersen B. (2003)**, "Productivity and logistic in the construction industry" Paper presented at NORDNET 2003, Noriega.
- Wanous M., Boussabaine H. and Lewis J. (2003)**, A neural network bid/no bid model: the case for contractors in Syria, *Construction Management and Economics* (October 2003) 21, 737–744
- Williams I. (2005)**, "Productivity in UK engineering construction- a view from the industry" A report prepared for ECITB.
- World Bank (2008)**, West Bank and Gaza: Economic developments and prospects, USA

Hojas de cálculo para el análisis de losas combinadas con pilotes

Spreadsheets for the analysis of piled raft foundations

Luis Ibañez^{1*}, Renato Cunha^{**}

* Universidad Central Marta Abreau de Las Villas. CUBA

** Universidad de Brasilia. UnB. BRASIL

Fecha de Recepción: 12/12/2012
Fecha de Aceptación: 15/05/2013
PAG 207 - 216

Resumen

En el diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes, se determina un gran número de incógnitas de forma tal que se obtenga una cimentación racional y que a su vez cumpla con los requerimientos de proyecto. El empleo de hojas de cálculo, facilita el trabajo del proyectista, al poder predimensionar la cimentación, evaluando la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en el diseño, para finalmente utilizar programas de cómputos para el cálculo definitivo. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos con hojas de cálculo programadas en MathCad y se comparan los valores de la curva estimada carga vs deformación de las hojas de cálculo con resultados de modelos a escala real y otros de la literatura sobre el tema.

Palabras Clave: Pilotes, balsas, modelación numérica, diseño

Abstract

In the design of foundations in piled rafts, a great number of unknown facts are determined in order to obtain a rational foundation, which in turn meets the requirements of the project. The use of spreadsheets facilitates the work for the designer, to estimate the dimensions of foundation, thus evaluating the influence of various parameters involved in the design, so as to finally use computer programs for the final calculation. This paper shows the results obtained from spreadsheets programmed by MathCad and, it compares the values of the estimated curve load v/s deformation of spreadsheets with the results of full scale models and others from literature on the subject.

Keywords: Piled raft, settlement, numerical modeling, design

1. Introducción

Las cimentaciones en balsas combinadas con pilotes constituye un sistema constructivo caracterizado por la acción conjunta de ambos elementos: balsa y pilotes, con la función de transmitir al terreno las cargas de la superestructura que se ha de cimentar. En las últimas décadas son numerosas las investigaciones y desarrollos conceptuales que han conducido a mejorar el conocimiento del comportamiento conjunto de la balsa y pilotes (Poulos 2001; Cunha et al., 2000a; Cunha et al., 2000b; O'Neill et al., 2001, Van Impe W.F. y De Clercq 1994), y que hacen de este sistema constructivo una alternativa de cimentación asociada en general a edificios en altura cimentados sobre suelos granulares y en particular sobre suelos arcillosos en estado normalmente consolidados o sobre consolidados.

Independientemente del tipo de suelo, la aplicación del sistema balsa - pilotes puede ser ventajosa cuando en una cimentación basada sólo en pilotes el número de éstos aumenta y la distancia entre ellos se reduce. En una cimentación profunda convencional, la capacidad portante de los pilotes en el grupo debe ser reducida cuando la distancia entre pilotes disminuye a valores menores de aproximadamente tres o cuatro veces su diámetro. Ello implica un aumento de la longitud de los pilotes y por ende, de los costos de la cimentación.

1. Introduction

Piled raft foundation is a constructive system characterized by the joint action of the following elements: rafts and piles, which purpose is to transfer loads from the superstructure onto the ground where the foundation is to be laid. Over the past decades several investigations and concept developments have been carried out, in order to better understand the joint behavior of rafts and piles (Poulos 2001; Cunha et al., 2000a; Cunha et al., 2000b, O'Neill et al., 2001; Van Impe W.F. y De Clercq 1994), which turns this constructive system into a foundation alternative generally associated to high buildings laid on granular soils and, particularly on clay-strengthened or over-strengthened soils.

Regardless of the type of soil, the application of the raft-piles system could become an advantage, when a foundation is only laid on piles, the number of piles increases and the distance between them decreases. In a deep conventional foundation, the piles' supporting capacity shall be reduced when the distance between piles decreases to values lower than three or four times its diameter approximately. It leads to an increase of piles length and, therefore, it raises the foundation costs.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: ibanez@uclv.edu.cu

El análisis de la interacción entre los tres elementos: balsa, pilotes y suelo, es de primordial importancia para la evaluación de los asentamientos del conjunto, sean uniformes o diferenciales. A su vez, una acertada predicción de los asentamientos es indispensable para verificar que los requerimientos en el estado de servicio se vean cumplidos.

Además de conducir a la reducción de los asentamientos, pueden mencionarse efectos positivos adicionales de la combinación balsa sobre pilotes (BCP) respecto a una balsa de cimentación única:

- Aumento de la capacidad portante de la cimentación
- Reducción de las tensiones transmitidas al suelo a través de la balsa de fundación mediante una adecuada elección del número y disposición de los pilotes.
- Mejora de el comportamiento en servicio mediante la reducción de los asentamientos individuales o diferenciales. En otras palabras, la BCP actúa como un freno de los asentamientos.
- Reducción del riesgo de fallas o fisuras en elementos de la superestructura, en particular las fachadas de los edificios.
- Se asegura la estabilidad de la cimentación completa, ya que la balsa por sí sola no garantiza la estabilidad respecto a las cargas actuantes.

Según la norma DIN 1054 (1994), el proyecto de una BCP se basaba en la idea de absorber la carga total mediante el pilotaje, despreciando la capacidad portante de la balsa de fundación. Es evidente que tener en cuenta esta última colaboración conducirá a proyectos más económicos, posibilitando la disminución del número de pilotes y asegurando al mismo tiempo asentamientos dentro de límites permisibles.

A pesar que el comportamiento de la BCP está siendo seguido e investigado desde hace algunas décadas, el mecanismo de distribución de las cargas exteriores, como asimismo el comportamiento bajo carga asentamiento, no son aún suficientemente discernidos, lo que debe atribuirse a la compleja interacción de sus elementos.

Los factores más importantes que intervienen en el comportamiento carga-asentamiento de una BCP son:

- La interacción entre los pilotes de un grupo
- El efecto recíproco entre los pilotes y la balsa

La Figura 1 representa esquemáticamente la relación carga asentamiento de un pilote individual, de un pilote de un grupo y de una balsa. Las interacciones entre los pilotes de un grupo y de los pilotes con la balsa conducen por una parte a la disminución la rigidez de los pilotes en relación a su comportamiento carga-asentamiento, y por otra parte aumentan su carga portante límite.

The interaction analysis of the three elements: raft, piles and soil is of major importance for the evaluation of the settlements unit, no matter if they are uniform or differential ones. At the same time, an accurate settlement forecast is essential in order to verify that serviceability requirements are duly met.

Besides leading to a settlements reduction, additional positive effects can be mentioned about piled rafts (CPRF) compared to a single foundation raft:

- *Increased supporting capacity of foundation*
- *Reduction of loading strengths transferred into the soil from the foundation raft, by means of a proper selection of piles amount and layout.*
- *Improved service behavior due to the reduction of individual or differential settlements. In other words the CPRF acts by putting the brake on the settlement.*
- *Reduction of failure and cracking risks on the superstructure elements, particularly on buildings front walls.*
- *The stability for the whole foundation unit is secured, as the raft itself does not guarantee the stability in regards to live loads.*

In accordance with regulation DIN 1054 (1994), a CPRF project is based on the idea of absorbing the total load by means of a piles system, by disregarding the supporting capacity from the foundation raft. It is quite evident that taking this proposal into consideration will lead to cost-effective projects, thus reducing the amount of piles and, at the same time, ensuring settlements within allowed limits.

Although the CPRF behavior has been surveyed and researched since decades, the exterior loads distribution mechanisms, as well as the behavior under load settlement, have not been fully distinguished, because of the complex interaction of its elements.

The most important factors affecting the load-settlement behavior in a CPRF are the following:

- *Interaction between a set of piles*
- *The reciprocal effect between piles and rafts*

The Figure 1 depicts the layout for the relationship load-settlement for a single pile, for a set of piles and for a raft. On one hand, the interactions between the set of piles and the piled raft, lead to a reduction of piles stiffness, in regards to their load-settlement behavior. On the other hand, they increase their supporting capacity to its limit.

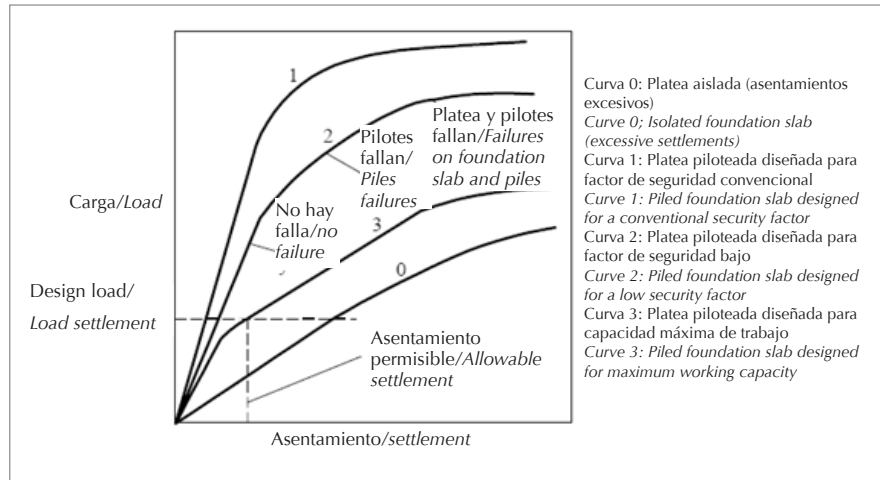


Figura 1. Curvas esquemáticas carga asentamiento (Poulos 2001)

Figure 1. Layout curves for load-settlement (Poulos 2011)

2. Desarrollo

2.1 Métodos de análisis

Varios métodos de análisis para cimentaciones en balsas combinadas con pilotes se han desarrollado (Poulos et al., 1997), entre las que podemos citar:

- Métodos de cálculo simplificado
- Métodos computacionales aproximados
- Métodos computacionales rigurosos

Entre los métodos simplificados, podemos citar los propuestos por Poulos y Davis (1980); Randolph y Wroth (1983); Randolph (1994); Van Impe y De Clerq (1994) y Burland (1995). En todos ellos se realiza una simplificación en la modelación del suelo, y la forma de aplicación de la carga.

A continuación se describe el método de Poulos y Davis (PDR), utilizado en el desarrollo del trabajo. Las hipótesis del mismo se basan en considerar que la capacidad de carga última de la cimentación en su conjunto bajo carga vertical tomo uno de los siguientes valores:

- La suma de la capacidad de carga de la balsa más la capacidad de carga de todos los pilotes o
- La suma de la capacidad de carga del bloque que conforman los pilotes y la balsa, más la porción restante de la balsa

Es importante destacar que la capacidad de carga del pilote aislado se vera afectado por el efecto de pilotes vecinos, lo que se conoce como eficiencia de grupo y puede variar entre $\xi = 0.7$ a 1.

Para estimar el comportamiento de la curva carga deformación en la cimentación balsas combinadas con pilotes, se aplica las expresiones propuestas por Randolph (1994) y se determina la rigidez de la cimentación BCP como:

2. Development

2.1 Analysis Methods

Several analysis methods for combined piled raft foundations have been developed (Poulos et. al., 1997), some of them are mentioned as follows:

- Streamlined calculation methods
- Approximate computer methods
- Accurate computer methods

Among streamlined methods, we are able to mention the ones proposed by Poulos and Davis (1980); Randolph y Wroth (1983); Randolph (1994); Van Impe and De Clerq (1994) and Burland (1995). All of them develop a streamlined soil modeling and a loading application streamline.

The method by Poulos and David (PDR) employed for the development of this study is further described. The hypothesis is based on the consideration that the ultimate foundation loading capacity, under vertical loading, absorbed one of the following values:

- The addition of the raft's loading capacity plus the total piles' loading capacity, or
- The addition of loading capacity of the unit formed by piles and the raft plus the raft remaining portion.

It is worth mentioning that the isolated pile's loading capacity will be affected by the adjacent piles, which is known as unit efficiency, varying from $\xi = 0.7$ to 1.

So as to estimate the load deformation curve behavior on the combined piled raft foundation, the expressions proposed by Randolph (1994) are applied and, the stiffness of the CPR foundation is determined as follows:

$$K_{pg} = \frac{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 \left(\frac{K_r}{K_p} \right)} \quad (1)$$

Donde:

K_{pg} Rigidez de la cimentación balsa pilote

K_p Rigidez del pilote

K_r Rigidez de la balsa

α_{cp} Factor de interacción balsa pilote

Where:

K_{pg} Stiffness of piled raft foundation

K_p Pile stiffness

K_r Raft stiffness

α_{cp} Piled raft interaction factor

La porción de la carga total que toma la losa se expresa como:

The share of total load transferred to the slab is expressed as follows:

$$X = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})} \quad (2)$$

Conociendo estos coeficientes se puede confeccionar la curva estimada carga deformación de la cimentación. Poulos (2001) propone el empleo de hojas de cálculo en MathCad para facilitar los procesos de cálculo y evaluar de manera rápida el efecto del número de pilotes a utilizar en la cimentación.

By obtaining such coefficients, the estimated foundation load deformation curve can be developed. Poulos (2001) proposed the use of MathCad spreadsheets in order to facilitate calculation processes and to rapidly evaluate the effect of piles amount to be used for laying the foundation.

2.2 Empleo de hojas de cálculo

Para la solución del problema, sin la necesidad de utilizar potentes programas de calculo, se procedió a la programación de hojas de calculo en MathCad del procedimiento descrito anteriormente, aprovechando las bondades de las mismas en el diseño de ingeniería.

2.2 Use of Spreadsheets

So as to solve this problem, not needing to employ powerful calculation programs, MathCad spreadsheets were selected for the abovementioned procedure, by taking advantage of their abilities for engineering design.

MathCad es la solución de cálculos de ingeniería que simultáneamente resuelve y documenta los cálculos, a la vez que reduce considerablemente el riesgo de errores costosos. Este programa, permite a los ingenieros diseñar, solucionar y documentar su trabajo, en un formato comprensible, que pueden compartir y reutilizar, lo cual mejora la verificación y validación, la publicación y la colaboración en todo el proceso de desarrollo.

MathCad is the solution for engineering calculations, which simultaneously solves and stores calculations, also considerably reducing the risk of high cost errors. This program allows engineers to design, solve and store their work under an easy-to-understand format, which is shareable and reusable, thus improving cross checking and validation, broadcasting and collaboration during the whole execution process.

MathCad es una herramienta ideal para resolver problemas de ingeniería con un enfoque didáctico. Una ventaja especial de este software es su capacidad de representación algebraica de las ecuaciones involucradas en la solución del problema junto con su evaluación numérica. Esta característica hace a esta herramienta ideal para la solución de problemas de ingeniería que requieren ser presentadas en un reporte o memoria de cálculo, para coadyuvar a la comprensión del problema (MathCad 2011; Galambos 2001). Además ofrece un entorno de "diseño en pizarra" que permite a los ingenieros capturar, aplicar y gestionar fácilmente los requisitos, los datos críticos, los métodos y las suposiciones de los productos para realizar rápidamente los cálculos. Con el uso del MathCad, los conceptos originales, las suposiciones subyacentes, las fórmulas matemáticas, los gráficos ilustrativos, el texto explicativo, las anotaciones, los esbozos y los resultados están claramente visibles en la hoja de trabajo.

MathCad is an ideal tool used to solve engineering problems under a didactic approach. A special advantage of this software is its ability to represent algebraic equations involved in the solution of a problem, together with the corresponding numeric evaluation. This feature turns this software into an ideal tool for engineering problems, which presentation is required as a report or a calculation worksheet, thus helping to understand the problem (MathCad 2011; Galambos 2001). Besides, this tool offers a "board design" environment allowing engineers to capture, apply and easily manage requirements, critical data, methods and products assumptions in order to quickly develop calculations. By using MathCad, original concepts, underlying assumptions, math formulas, explanatory graphs, information texts, remarks, outlines and results are clearly seen on the worksheet.

En el caso que nos ocupa se programaron varias hojas de cálculo que interactúan entre sí permitiendo una interface amable entre el usuario y el computador y la posibilidad de modificar datos de entrada y parámetros de diseño.

Entre las ventajas que se pueden cita con el empleo de las hojas de cálculos esta:

- Permite analizar diferentes variantes, con un ahorro de tiempo y recursos computacionales
- Se pueden analizar suelos estratificados
- Se pueden analizar la variación del modulo general de deformación con la profundidad
- Se puede interactuar con la hoja de cálculo y modificar expresiones, parámetros, etc.

For this case that draws our attention, several spreadsheets were programmed interacting among themselves, so as to allow a friendly interface between the user and the computer, thus offering the possibility of changing entry data and design parameters.

Among the several advantages provided by the use of spreadsheets, we mention that:

- They facilitate the analysis of several variables, saving time and computer resources.
- Stratum soils can be analyzed.
- The variation of the general deformation module and its depth can be analyzed.
- It is possible to interact with the spreadsheet and to modify expressions, parameters, etc.

2.3 Aplicaciones

2.3.1 Validación de las hojas de cálculo

Para la validación de las hojas de cálculo se comparan los resultados obtenidos por Sales (2001). Este autor analiza casos citados en la literatura internacional para cimentaciones balsas combinadas con pilotes apoyadas en 4 y 16 pilotes.

2.3 Applications

2.3.1 Spreadsheet Validation

So as to validate spreadsheets, they are compared with the results obtained by Sales (2001). This author analyzed cases quoted by international literature about combined piled raft foundations supported by 4 and 16 piles.

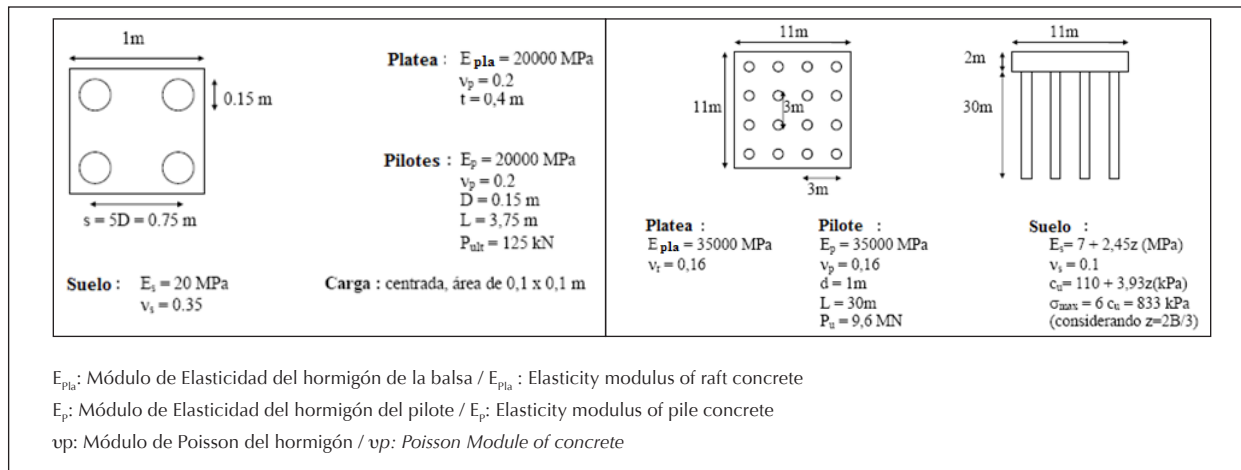


Figura 2. Ejemplos analizados

Figure 2. Analyzed examples

Para el caso de cimentaciones en balsa apoyadas en 4 pilotes (Tabla 1), se comprueba la veracidad de los resultados obtenidos, notándose la mayor diferencia para cargas mayores a 500 kN, valores para los cuales comienza trabajar de forma conjunta la cimentación.

For the case of piled raft foundations supported by 4 piles (Table 1), the soundness of obtained results is proven, thus showing a greater difference for loads higher than 500 kN, where the foundation begins to work under a combined way.

Tabla 1. Comparación entre los métodos para estimar los asentamientos en una balsa sobre 4 pilotes

Table 1. Comparison between methods used to estimate the settlements of a raft supported by 4 piles.

Carga (kN)/ Load (kN)	Asentamientos (mm)/ Settlements (mm)		
	Método Poulos (1980)/ Poulos Method (1980)	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Hojas de Cálculo/ Spreadsheets
0	0	0	0
100	1.16	1.41	1.34
200	2.34	2.83	2.26
300	3.48	4.24	3.40
400	4.64	5.66	5.61
500	5.81	7.09	6.68
550	7.68	7.78	8.57
600	9.55	9.51	11.56
700	13.29	13.25	14.56
800	17.03	16.99	17.55

Para el caso de la balsa sobre 9 y 16 pilotes (Tabla 2 y 3) propuesto por Comité Técnico TC-18 del ISSMGE (Poulos (2001)) los resultados son similares a los obtenidos con el empleo de programas de computo como el GARP6, lo que demuestra la validez de las hojas de cálculo confeccionadas y sus potencialidades.

El empleo de hojas de cálculo permite de una forma rápida contar con herramienta computacional desarrollada aplicando el método de Poulos (1998), sin la necesidad de engorrosos cálculos manuales que requiere dicho método. No debemos olvidar, que las hojas de cálculo, nunca sustituyen la experiencia de los ingenieros y que los resultados que están brindados deben comparados con otros métodos y resultados a escala real.

In the case of rafts supported by 9 and 16 piles (Tables 2 and 3) proposed by the Technical Committee TC-18 of ISSMGE (Poulos (2001)), the results are similar to the ones obtained by the calculation software, GARP6, which proves the soundness of elaborated spreadsheets and their potential.

The use of spreadsheets quickly allows to count with a computer tool developed by applying the Poulos method (1998), disregarding the use of complicated hand-made calculations originally demanded by such method. However, we should not forget that spreadsheets can never replace the engineers' experience and that obtained results shall be compared with some other methods and full scale results.

Tabla 2. Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 9 pilotes
Table 2. Stiffness values obtained by applying different methods. Raft supported by 9 piles

Parámetro/ Parameter	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Software GARP6/ GARP6 Software	MathCad
Kr (kN/m)	26739	27719	26742
Kp (kN/m)	37152	39824	37252
Kpr (kN/m)	70630	79702	70531

Tabla 3. Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 16 pilotes
Table 3. Stiffness values obtained by applying different methods. Raft supported by 16 piles

Parámetro/ Parameter	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Software GARP6/ GARP6 Software	MathCad
Kr (MN/m)	240	310	240
Kp (MN/m)	2190	1901	2174
Kpr (MN/m)	157	157	156

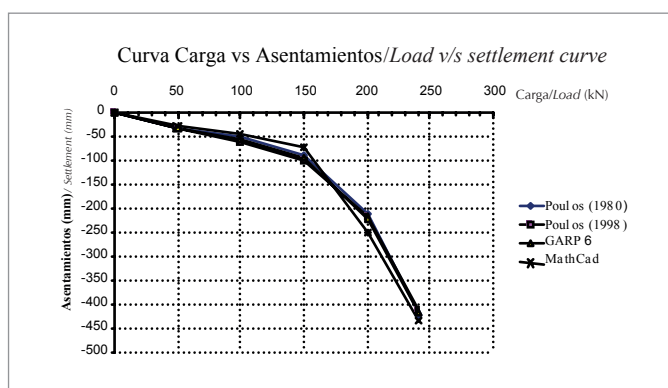


Figura 3. Curva Carga vs asentamiento utilizando varios métodos
Figure 3. Load v/s settlement curve employing several methods

2.3.2 Ensayos de carga reales

Una vez comparados los resultados de las hojas de cálculo con ejemplos de la literatura internacional, se procede a su aplicación en problemas reales de los cuales existe documentación de los ensayos de carga a escala real. Para ello se utilizan los resultados obtenidos por Koizumi y Ito (1967) en una cimentación conformada por una zapata de 2m x 2m, apoyada sobre 9 pilotes de 0.3 m de diámetro, atravesando 2 estratos de suelos. Estos autores determinan el aporte individual y colectivo de la cimentación, los pilotes y la cimentación balsas combinadas con pilotes. En la tabla 4 aparecen los datos utilizados en el análisis.

2.3.2 Actual Load Tests

Once results obtained from spreadsheets were compared to international literature examples, they were applied to actual problems, which are documented by full scale load tests. To do so, the results obtained by Koizumi and Ito (1967) were applied to a 2m x 2m footing foundation, supported by 9 piles of 0.3 m diameter each, which lay across two soil layers. Such authors determined the individual and collective contribution of the foundation, piles and combined piled raft foundation.

Tabla 4. Parámetros de los suelos, balsa y pilotes del ejemplo analizado
Table 4. Parameters for soils, raft and piles of the analyzed example

Suelo/ Soil	Módulo Gral de Deformación/ Overall Deformation Module (MPa)	Coefficiente de Poisson/ Poisson Coefficient	Espesor/ Diámetro/ Thickness/ Diameter (m)
Suelo 1/ Soil 1	12.8	0.4	1.7
Suelo 2/ Soil 2	15.6	0.4	3.8
Balsa/ Raft	30000	0.2	0.7
Pilote/ Pile	200000	0.2	0.3

En la Figura 4 se observan la comparación entre el ensayo real (Koizumi y Ito (1967)) y las hojas de cálculo, lo que reafirman una vez más su validación y posible uso de las mismas para estimar el comportamiento carga deformación de cimentaciones en balsas sobre pilotes

Figure 4 shows the comparison of results between the actual test (Koizumi and Ito (1967)) and the spreadsheets, which prove once again their soundness and their application to estimate the load deformation behavior of piled raft foundations.

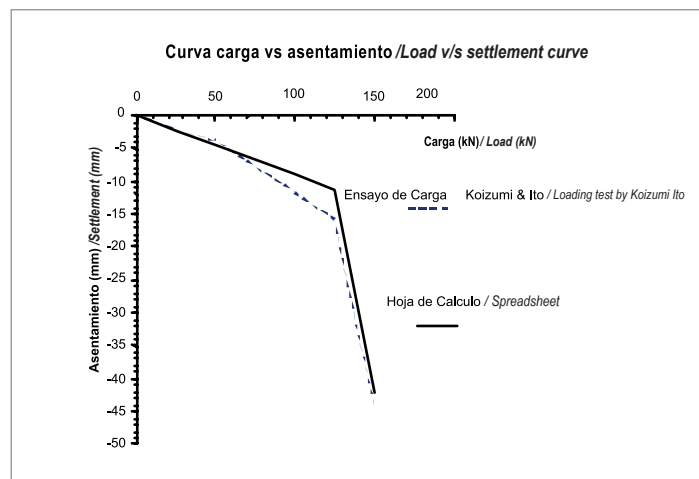


Figura 4. Curva carga asentamiento en el ensayo real Koizumi y Ito (1967) y las hojas de cálculo
Figure 4. Load v/s settlement curve developed by Koizumi and Ito's (1967) actual test and by spreadsheets

Evaluación de la seguridad en el diseño

Una vez validada las hojas de cálculo se procede a evaluar diferentes factores que intervienen en el diseño de cimentaciones de balsas combinadas con pilotes, apoyándonos en las facilidades que brindan los ficheros confeccionados en MathCad.

El primer análisis está relacionado con el efecto de la cantidad de pilotes a utilizar y la seguridad del diseño obtenida, relacionada a su vez con los asentamientos que se estiman ocurran.

Design Safety Evaluation

Once spreadsheets were validated, different factors involved in the foundation design for combined piled raft foundations were evaluated, by employing the abilities provided by card files elaborated by MathCad.

The first analysis is related to the effect of the piles number to be used and the safety of the obtained settlement, which in turn is related to the settlements expected to take place.

Para ello se analiza una balsa piloteada, donde se incrementa el número de pilotes y se determina el factor de seguridad de la cimentación en su conjunto (FS) y los asentamientos estimados. Se parte de una balsa prediseñada de 10m x 8 m (sin pilotes) con FS = 1,5 y asentamientos de 90 mm, y a continuación el efecto de incluir pilotes en la disminución de los asentamientos y aumento del factor de seguridad.

Therefore, a piled raft is analyzed, where the number of piles has been increased and the safety factor is determined for the whole foundation (SF) and the estimated settlements. A pre-designed raft of 10m x 8m (without piles), SF = 1.5 and settlements of 90 mm are considered; then the effect of adding piles for the settlement decrease and the increase of safety factor are taken into account.

$$FS = \frac{P_{\text{última}}}{P_{\text{admisible}}} \quad (3)$$

Donde:

$P_{\text{última}}$: Carga última de la cimentación

$P_{\text{admisible}}$: Carga admisible de la cimentación

Where:

P_{ultimate} : Ultimate foundation load

$P_{\text{allowable}}$: Allowable foundation load

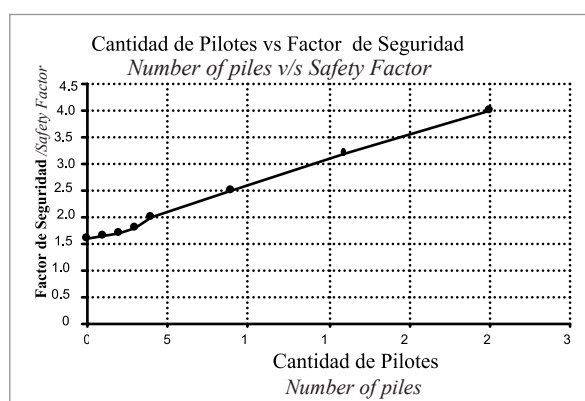


Figura 5. Cantidad de pilotes vs factor de seguridad

Figure 5.

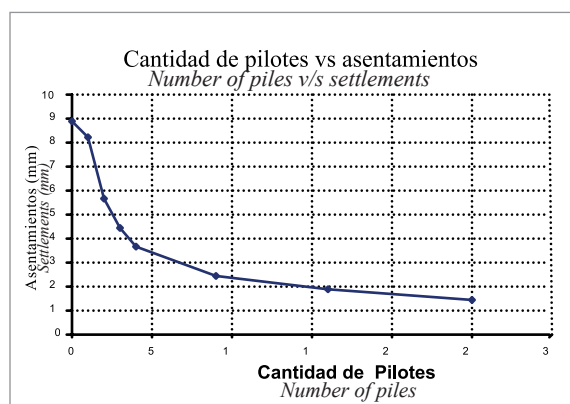


Figura 6. Cantidad de pilotes vs. asentamientos

Figure 6. Number of piles v/s settlements

Como se aprecia de las Figuras 5 y 6, en la medida en que aumenta el número de pilotes (los resultados corresponden a espaciado de 4D), hay un aumento en el factor de seguridad de la cimentación, sin embargo para más de 16 pilotes, los asentamientos estimados se mantienen casi similares, por lo que el incremento de pilotes no disminuye los asentamientos, convirtiendo el diseño en menos racional.

As shown on Figures 5 and 6, there is an increase of security factor as long as the number of piles rises (results correspond to a 4D spacing). However, when using more than 16 piles, the estimated settlements are kept almost equal. Therefore, the increased number of piles does not decrease settlements, thus making this design even less reasonable.

Para valores entre 4 y 16 pilotes (Factor de seguridad FS = 2 a 3), se hace notar el efecto de los mismos como agentes para reducir los asentamientos en la cimentación, lo que justifica el uso de pilotes en BCP, ya que hacen más segura la cimentación, y se alcanzan las deformaciones de proyecto.

Estos resultados son similares a los propuestos por Poulos (2001) en "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001".

2.3.4 Evaluación de la cantidad de pilotes

A continuación se evalúa el efecto de la cantidad de pilotes en el comportamiento de la curva estimada carga deformación. Para este ejemplo numérico se considera una balsa de 8m x 8m y peralte 0.7 metros. Los pilotes son de hormigón armado de 0.5 metros de diámetro y 15 metros de longitud. Tanto para la balsa como para los pilotes se considero hormigón con resistencia a compresión $f'_c = 30$ MPa. Para el suelo de cimentación se consideraron dos estratos de 5 y 10 metros respectivamente, con $E_o = 12.5$ MPa y $E_o = 30$ MPa. Se consideró que los pilotes tienen una capacidad de carga de 1.93 MN.

For values obtained from 4 and 16 piles (Safety Factor, SF = 2 to 3), the effect of piles as settlement reducer agents is noticeable in the foundation, thus justifying the use of piles in a CPRF, in order to make the foundation safer and to achieve the project deformations.

Such results are similar to the ones proposed by Poulos (2001) in "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations, ICGSMM-2001".

2.3.4 Evaluation of Piles Number

The effect of piles number on the behavior of the estimated load deformation curve is evaluated below. For this numerical example a raft of 8m x 8m and 0.7 meters high was considered. Piles are fabricated from reinforced concrete with diameter of 0.5 meters and length of 15 meters. Concrete with compression resistance of $f'_c = 30$ MPa was considered for both raft and piles. For the foundation soil, two layers of 5 and 10 meters were considered $E_o = 12.5$ MPa and $E_o = 30$ MPa, respectively. The estimated loading capacity of piles is 1.93 MN.

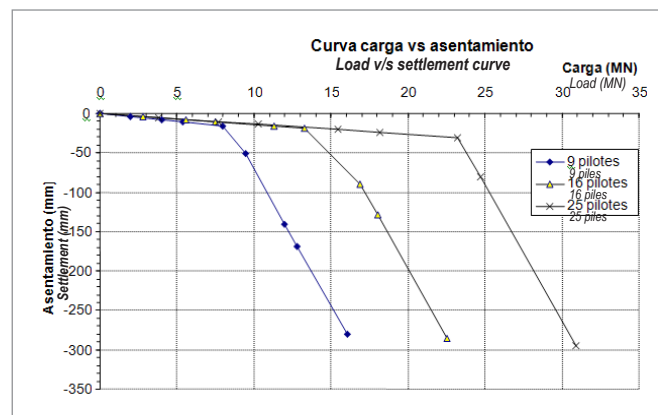


Figura 7. Curva carga asentamiento para diferente número de pilotes

Figure 7. Load v/s Settlement curve for different number of piles

En la Figura 7 se muestran los resultados de la curva carga deformación para diferente número de pilotes. Como se aprecia para bajos valores de carga inferiores a los 8 MN, los asentamientos son similares, por lo que el efecto del número de pilotes es despreciable. En este caso se consideró un factor de seguridad de la cimentación BCP FS = 2. Para 12 MN de carga axial, se aprecia que la cimentación con 9 pilotes, aunque resiste las cargas actuantes (FS = 1.33), las deformaciones son excesivas en el orden de los 150 mm. Sin embargo la cimentación BCP con 16 y 25 pilotes, mantiene valores de seguridad mayores a 2 (FS > 2) y deformaciones del orden de los 40 mm.

Se destaca en este ejemplo que el uso de pilotes se justifica en aquellos casos que se pretenda disminuir los asentamientos de la balsa, pudiendo ocurrir que: (1) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas mayores a 1.5 (FS > 1.5) y no se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 9 pilotes), (2) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas mayores a 1.5 (FS > 1.5) y si se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 16 pilotes, FS = 2), (3) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas muy superiores a 1.5 y si se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 25 pilotes, FS = 2.8)

Figure 7 shows the results of load deformation curve for different number of piles. It is observed that for small loading values lower than 8 MN, the settlements are quite similar, so the effect of piles number is insignificant. In this case a safety factor SF = 2 was considered for the CPR foundation. It is observed that although under 12 MN axial load, the foundation supported by 9 piles stands up against live loads (SF = 1.33) and deformations exceed 150 mm. However, CPR foundation supported by 16 and 25 piles maintains safety values higher than 2 (SF > 2) and deformations of 40mm approximately.

This example highlights the use of piles, which is justified in cases where raft settlements are intended to be reduced. It is possible that: (1) they reach safety values under external loads higher than 1.5 (SF > 1.5) not meeting the ultimate deformation limit (9 piles); (2) safety values under external loads higher than 1.5 (SF > 1.5) are achieved and the ultimate deformation limit is fulfilled (16 piles SF = 2) and; (3) safety values under external loads quite higher than 1.5 (SF > 1.5) are achieved and the ultimate deformation limit is fulfilled (25 piles, SF = 2.8)

Los resultados obtenidos confirman los propuestos por Poulos (2001) en "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001"

3. Conclusiones

Como conclusiones de este trabajo se pueden señalar:

- Se demuestra la validez del empleo de hojas de cálculo confeccionadas en MathCad para el análisis de las cimentaciones BCP
- El empleo de hojas de cálculo facilita el análisis de cimentaciones BCP, al poder evaluar el efecto de diferentes factores, sin la necesidad del empleo de potentes softwares con base en métodos numéricos, ahorrando tiempo y recursos computacionales
- Se evalúa el efecto del empleo de pilotes utilizados en la cimentación BCP, en el factor de seguridad global de la estructura y la curva estimada carga deformación
- A pesar de las ventajas en el empleo de hojas de cálculo para el análisis y diseño en la ingeniería civil, siempre se debe prestar atención a los resultados obtenidos; y ser analizados con la experiencia y capacidad de los ingenieros, a la vez que se complementen con otros métodos y mediciones a escala real.

4. Agradecimientos

A la Universidad de Brasilia, en especial al Programa de Post Graduado en Geotecnia y de manera destacada al profesor Renato P. Cunha. A CAPES por el apoyo financiero para la realización de este trabajo y estancia en la Universidad de Brasilia.

The obtained results do confirm the ones proposed by Poulos (2001) in "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001"

3. Conclusions

The following conclusions are drawn from this study:

- *The ability of spreadsheets elaborated by MathCad for the analysis of CPR foundations analysis is demonstrated.*
- *The use of spreadsheets facilitates the analysis of CPR foundations, allowing the evaluation of different factors effects, not needing powerful softwares based on numerical methods, thus saving time and computer resources.*
- *The effect of piles used for CPR foundations is evaluated on the whole structure safety as well as the estimated loading deformation curve.*
- *Although the advantages of the spreadsheets use for the analysis and design in civil engineering are evident, special attention shall be focused on the obtained results, which shall be analyzed by experienced and skillful engineers. Such results shall be complemented with some other methods and measurements at full scale.*

4. Acknowledgements

Authors express their gratitude to the University of Brasilia, especially to the Post-Graduated Program in Soil Mechanics, and specifically to Professor Renato P. Cunha. Thanks to CAPES for the financial support given to develop this research job and to stay at the University of Brasilia.

5. Referencias/References

- Burland J.B. (1995)**, Piles as Settlement Reducers. Keynote Address, 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy.
- Cunha R.P., Poulos H.G. y Small J. C. (2000b)**, Parametric Analysis of a Piled Raft Case History in UBCCPSala, Sweden. 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, v 2, p 380-387.
- Cunha R.P., Poulos H.G. y Small J.C. (2000a)**, "Class C" Analysis of a Pile Raft Case History in Gothenburg, Sweden. Developments in Geotechnical Engineering, Thailand, v 1, p 271-280.
- Galambos T.V. (2001)**, "Strength of Singly Symmetric I-Shaped Beam-Columns", Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc., 38 (2): 65-77.
- Koizumi Y, Ito K. (1967)**, Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations. Soil Found; 7(3):30-53.
- MathCad (2011)** User Guide. Sitio del software MathCad. <http://www.mathsoft.com>
- Norma DIN 4019 (1987)**, Baugrund, Setzungsrechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung, Beton Kalender, Ernst & Sohn
- Norma DIN 1054 (1994)**, Baugrund: Zulässige Belastung des Baugrundes. Beton Kalender, Ernst & Sohn
- O'Neill M.W., Caputo V., De Cock F., Hartikainen J. y Mets M. (2001)**, Case Histories of Pile-SuBCPorted Rafts. Rep. for ISSMFE Tech. Comm. TC18, Univ. of Houston, Texas.
- Poulos H.G. (2001)**, Methods of analysis of piled raft foundations Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering July 2001
- Poulos H.G. y Davis E.H. (1980)**, Pile Foundation Analysis and Design. Wiley, New York.
- Randolph M.F. (1994)**, Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. S.O.A. Report, 13 ICSMFE, New Delhi, 5: 61-82.
- Randolph M.F. y Wroth C.P. (1983)**, An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique 29, 1983, pag.423-439
- Van Impe W.F. and De Clercq Y.A. (1994)**, a piled raft interaction model. Proc. 5th. Int. Conf. Piling. Deep Found. Bruges, Belgium, June, 1.3.1-1.31.10. A.A. Balkema, Rotterdam



Guide-lines for authors

1. Paper Submission

Articles sent to this journal must be original and neither been published previously nor in the process of publication by another journal. The might be written in either English or Spanish and submitted in electronic version in a word processor format. Articles are sent to the editor Dr. Mauricio Lopez via email to ric@ing.puc.cl (preferred) or in a CD via mail to Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Casilla 306, Correo 222 6904411, Santiago Chile. Submissions must include the full postal and electronic address of all authors. Once the article is received following the guidelines bellow, it will be reviewed by experts in the specific topic. The Editor might require revisions and corrections before making a final decision of acceptance or rejection of the article.

2. Format of papers

The paper must have a maximum extension of 5000 words, in letter-sized paper and doubled-spaced with a left side margin of 3 cm and 2 cm in the other three sides. The font of the text is to be Times New Roman 12. Papers not abiding by the format indicated will be returned without submitting them to the Review Committee.

2.1. First page

The papers are to have a page with the title with the complete name of the author or authors and a complete address for correspondence, telephone, fax and e-mail. The title and identification of the authors must be in Spanish and English.

2.2. Abstract in Spanish, abstract in English and keywords

The abstract in Spanish is not to exceed 250 words and must summarize the key aspects of the paper and describe a synthesis of most important applications and conclusions which the paper furnishes. The abstract in English is to be a correct translation of the summary from Spanish into English. Five keywords are to be included, both in Spanish and in English.

2.3. Content of the paper

The paper must be well construed and structured. The structure of the paper is to include as a minimum the following sections: introduction, discussion and development, and conclusions. The introduction is to clearly establish the purpose of the work. The discussion and development are to include the main results and observations in paper, the methodology used, etc. The conclusions are to be relevant to the readers.

2.4. References

The Harvard system for references is used (www.ing.puc.cl/ric). These are to be complete and correct. In the text, the references are to be cited as follows: González (2001) or (Peralta and Molina, 1999). For more than two authors it is to be indicated as (Martínez et al., 2000). At the end of the paper, the references are to be added in alphabetical order according to the surname of the first author. The references of a same author of a same year are to be differences using 2000a, 2000b, etc. The style of the references must follow one of the following formats:

Loforte, F. (2001) El sistema BOT: el caso portugués, *Revista Ingeniería de Construcción*, 16(2), 76-84.

Serpell, A. (2002) *Administración de Operaciones de Construcción*, Alfaomega, México.

Videla, C., Aguilar, C. (2001) Effects of Mix Design Parameters on Drying Shrinkage of Concrete, 2nd International Conference on Engineering Materials. Volumen II, 99 – 110, San José, California, USA, August.

2.5. Tables and Formulas

Tables and formulas (equations) are to be numbered sequentially in the same order in which they appear in the text, with Arabic numbers and making reference to them as: table 1, table 2..., formula 1, formula 2..., etc., as the case may be. They must be introduced in the text in the same order in which they are referenced. In the case of tables, the title is to be placed on the lower part and must not duplicate the results presented in the graphs. The system of units to be used will be the International (IS).

2.6. Figures

The figures may include graphs, outlines, diagrams and photographs. The figures are to be sent in an as ready condition for the publication, with laser printing quality. If they are photographs, they are to be of high quality. They are to be numbered in a sequential manner, in the same order in which they are referenced in the text as: figure 1, figure 2, etc., and their title must be placed in the lower part. They must be included within the text as they are cited and besides they must be sent on separate sheets of paper and in the diskette, in the original software in which they were created.

3. Print-outs

Each author will receive two copies of the Journal where his/her/their paper was published, apart from a copy of the publication in PDF format.

4. Opinions expressed in the papers

The opinions stated in the papers published in the Journal are of the sole responsibility of the author or authors of the same, and do not necessarily reflect the points of view of the Department of Engineering and Construction Management of the Pontificia Universidad Católica de Chile.

5. Copyright

Submitting a paper to *Revista Ingeniería de Construcción* implies that it represents an original work, not published previously and not considered for publication elsewhere. The authors must transfer the author's copyrights of their papers to the Editorial providing the article is accepted for publication, using a form provided by the Editorial. The copyrights cover the exclusive rights for the reproduction and distribution of the paper, including re-prints, photographic reproductions, microfilms, scanning of documents or any other methods of reproduction of similar nature as well as the translations. Permission to use figures from other source must be obtained by the author prior to submitting the paper.

Indice

PAG. 113-124

Influencia de la adición de un 2% de Carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción

Influence of the addition of 2% calcium carbonate during the manufacturing process of red ceramic brick: drying and firing stage

Dania Betancourt, Yosvany Díaz, Fernando Martirena

PAG. 125-139

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes extradados durante su construcción por voladizos sucesivos

Seismic vulnerability assessment of extradosed bridges during cantilever construction

José Benjumea, Gustavo Chio Cho

PAG. 141-154

Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): hidratación y microestructura

Blended cement containing fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): hydration and paste microstructure

Silvia Izquierdo, Jherson Diaz, Ruby Mejía, Janneth Torres

PAG. 155-171

El estándar ISO14006: Una herramienta que ayuda a mejorar la competitividad de los estudios de arquitectura

The standard ISO14006: A helpful tool to improve the competitiveness of the architecture firms

Beñat Landeta, Germán Arana, Patxi Ruíz de Arbulo, Pablo Díaz de Basurto

PAG. 173-206

Trends in productivity improvement in construction projects in Palestine

Tendencias para optimizar la productividad en los proyectos de construcción en Palestina

Adnan Enshassi, Bernd Kochendoerfer, Karem Abed

PAG. 207-216

Hojas de cálculo para el análisis de losas combinadas con pilotes

Spreadsheets for the analysis of piled raft foundations

Luis Ibañez, Renato Cunha