

# The effects of buildability factors on formwork labor productivity of grade beams

## Efectos de los factores de edificabilidad sobre la productividad laboral de moldajes de vigas en fundaciones

Abdulaziz M. Jarkas\*<sup>1</sup>

\* Mazaya Real Estate Development Co., KSCC. STATE OF KUWAIT

Fecha de recepción: 12/ 02/ 2010  
Fecha de aceptación: 01/ 06/ 2010  
PAG. 241 - 266

### Abstract

Buildability is one of the most important factors affecting labor productivity. Nonetheless, an extensive search of the literature revealed a dearth of research into its effects on in situ reinforced concrete construction, especially at the formwork trade level. Despite the importance of this trade to in situ reinforced concrete material, the influence of buildability factors on formwork labor productivity of major structural elements are yet to be quantified in measurable terms. Grade beams are important structural elements which are primarily used to provide one, or a combination, of the following functions: (1) tie the building foundations to provide the required lateral stiffness at the sub-structural levels; (2) reduce the unsupported free length of columns below grade level; and (3) limit excessive differential settlements of isolated foundations. Therefore, the objective of this research is to investigate and quantify the effects and relative influence of the following buildability factors on formwork labor efficiency of this activity: (a) variability of beam sizes; (b) beam sizes; and (c) number of joints formed at beams intersections. To achieve this objective, a large volume of productivity data was collected and analyzed using the multiple regression method. As a result, the effects and relative influence of the buildability factors investigated are determined. Apart from the variability of beam sizes, the findings show significant effects of these factors on formwork labor productivity, which can be used to provide designers feedback on how well their designs consider the requirements of buildability principles, and the consequences of their decisions on labor efficiency. On the other hand, the depicted patterns may provide guidance to construction managers for effective activity planning and efficient labor utilization.

Keywords: Concreto, morfología de agregados, análisis de imágenes, resistencia a la compresión, trabajabilidad

### Resumen

La edificabilidad es uno de los factores principales que afecta la productividad laboral. Sin embargo, una extensa revisión de la literatura reveló la ausencia de investigación sobre sus efectos en obras de construcción de concreto reforzado, especialmente a nivel del oficio del trabajo de moldeado. A pesar de la importancia de este oficio para el concreto reforzado en obras, la influencia de los factores de edificabilidad sobre la productividad del oficio del moldeado sobre elementos estructurales mayores, aún está por ser cuantificada en términos medibles. Las vigas en fundaciones son elementos estructurales importantes, usados para proporcionar una, o una combinación de las siguientes funciones: (1) amarrar los cimientos de la edificación y proporcionar la rigidez lateral en los niveles sub-estructurales; (2) reducir la longitud libre de las columnas sin soporte, bajo el nivel de la rasante; (3) limitar el excesivo diferencial de asentamientos en los cimientos aislados. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar y cuantificar los efectos e influencia relativa de los siguientes factores de edificabilidad, sobre la eficiencia del trabajo de moldeado de esta actividad: (a) la variabilidad del tamaño de las vigas, (b) tamaño de las vigas, (c) cantidad de juntas resultantes de las intersecciones de las vigas. Con el fin de lograr este objetivo, un gran volumen de datos sobre la productividad ha sido recopilado usando un método de regresión múltiple. Como resultado, se determinaron los efectos e influencia relativa de los factores de edificabilidad investigados. A parte de la variabilidad de tamaño de las vigas, los descubrimientos indican significativos efectos de estos factores sobre la productividad del trabajo de moldeado, la que puede ser empleada para entregar un comentario a los diseñadores sobre cuán bien sus diseños consideran las necesidades de los principios de edificabilidad, y las consecuencias de sus decisiones sobre la eficiencia laboral. Por otro lado, los patrones descritos pueden servir como guía a los administradores de la construcción para una efectiva planificación de actividades y utilización laboral eficiente.

Palabras Clave: Edificabilidad, constructabilidad, moldeado, vigas rasantes, productividad laboral

## 1. Introducción

La construcción es la industria más grande y desafiante del mundo (Tucker, 1986). En 1997,

## 1. Introduction

Construction is the world's largest and most challenging industry (Tucker, 1986). In 1997,

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: jarkas@mazayarealestate.com



la industria de la construcción en USA constituyó un 10% del Producto Interno Bruto (PIB) y empleó más de 10 millones de trabajadores, haciendo de esta industria la más grande en el país (Allmon et al., 2000). Por otra parte, Horner et al. (1989) establecieron que un aumento del 10% en la productividad laboral, generaría un ahorro anual cercano a mil millones de Libras Esterlinas (£) a la economía británica; una conclusión similar tuvo eco en Stoekel y Quirke (1992).

Son muchos los factores que afectan la productividad laboral, pero la edificabilidad se encuentra entre los más importantes (Adams, 1989; Horner et al., 1989). La edificabilidad, como lo define la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA) es “el grado al cual el diseño de una edificación facilita el manejo de la construcción, sujeto a los requerimientos generales para una construcción finalizada” (CIRIA, 1983).

La simplificación del diseño se logra a través de la implementación de los siguientes tres principios de edificabilidad: (a) racionalización, (b) estandarización y (c) repetición de elementos (Dong, 1996). Racionalización del diseño se define como “la minimización del número de materiales, tamaño, componentes o sub-elementos”, considerando que la estandarización es “un diseño filosófico que requiere que el producto diseñado sea fabricado a partir de esos materiales, componentes y sub-elementos que resultan luego que se ha efectuado la racionalización” (Moore, 1996b). El principio de repetición del diseño involucra el trazado repetitivo de la nave, la malla de piso, las dimensiones de los elementos y la altura de la planta.

La influencia de la edificabilidad en el proceso de construcción ha sido objeto de numerosas investigaciones previas (Lam y Wong, 2009; Saghatforoush et al., 2009; Lam et al., 2007; Trigunaryah, 2007, 2004; Pulaski y Horman, 2005; Poh y Chen, 1998; Fischer y Tatum, 1997; Hyde, 1996; Moore, 1996a; Moore, 1996b; Alshawi y Underwood, 1996; Griffith, 1987; O'Connor et al., 1987) por nombrar algunas. Sin embargo, una investigación acuciosa de la literatura reveló la ausencia de análisis sobre la influencia de la edificabilidad en la productividad laboral de un oficio integral, en obras con material de concreto reforzado, principalmente el moldeado. Además la mayoría de los estudios previos sobre edificabilidad fueron heurísticos en principios, de naturaleza genérica y cualitativa; algunos fueron incluso rudimentarios, basados en anecdóticas percepciones, intuiciones y sentido común.

the US construction industry accounted for 10% of Gross Domestic Product (GDP) and employed over 10 Million, making the industry the largest in the country (Allmon et al., 2000). On the other hand, Horner et al. (1989) indicated that a 10% increase in construction labor productivity would yield annual savings of about £1 Billion to the British economy; a similar conclusion was echoed by Stoekel and Quirke (1992).

Several factors affect labor productivity, but buildability is among the most important (Adams, 1989; Horner et al., 1989). Buildability, as defined by the Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), is “the extent to which the design of a building facilitates ease of construction, subject to the overall requirements for the completed building” (CIRIA, 1983).

Design simplification is achieved through the implementation of the following three buildability principles: (a) rationalization; (b) standardization; and (c) repetition of elements (Dong, 1996). Design rationalization is defined as “the minimization of the number of materials, sizes, components or sub-assemblies”, whereas standardization is “a design philosophy requiring the designed product to be produced from those materials, components and sub-assemblies remaining after design rationalization has taken place” (Moore, 1996b). The design repetition principle involves repeating bay layout, floor grids, dimensions of elements, and storey height.

The influence of buildability on the construction process has been the subject of numerous previous investigations (Lam and Wong, 2009; Saghatforoush et al., 2009; Lam et al., 2007; Trigunaryah, 2007, 2004; Pulaski and Horman, 2005; Poh and Chen, 1998; Fischer and Tatum, 1997; Hyde, 1996; Moore, 1996a; Moore, 1996b; Alshawi and Underwood, 1996; Griffith, 1987; O'Connor et al., 1987) to name a few. However, a thorough examination of the literature revealed a dearth of research into the influence of buildability on the labor productivity of an integral trade of the in situ reinforced concrete material; namely, formwork. Furthermore, most of the previous buildability studies were heuristic in principles, generic and qualitative in nature; few were even rudimentary, based upon anecdotal perceptions, insights and common sense.

En Estados Unidos, como es en el caso de la mayoría de los países, el costo del oficio de moldeado varía en un rango, que va desde un tercio a dos tercios del costo general de la estructura de concreto reforzado (Hurd, 2005; Illingworth, 2000), del cual, el costo de mano de obra comprende aproximadamente un treinta por ciento (McTague y Jergeas, 2002). Sin embargo, la influencia de la edificabilidad sobre este oficio, especialmente a niveles de actividad, aún debe ser determinada y cuantificada.

Las vigas en fundaciones son uno de los elementos más importantes en las obras de construcción de concreto reforzado. Fundamentalmente tales elementos son empleados para cumplir con una o bien una combinación de las siguientes funciones estructurales: (1) amarrar los cimientos de la edificación y proporcionar la rigidez lateral en los niveles sub-estructurales; (2) reducir la longitud libre de las columnas sin soporte, bajo el nivel de la rasante y minimizar el efecto pandeo; (3) limitar el excesivo diferencial de grietas en los cimientos aislados. Además, las vigas en fundaciones pueden ser empleadas para proporcionar apoyo a los muros de albañilería. El moldeado de vigas en fundaciones es una operación de trabajo intenso, que está asociada con la dificultad adicional de realizar la actividad bajo el nivel de la rasante. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar los efectos e influencia relativa de los siguientes factores de edificabilidad en la productividad del trabajo de moldeado: (a) la variabilidad del tamaño de las vigas, (b) tamaño de las vigas, (c) cantidad de juntas resultantes de las intersecciones de las vigas. En consecuencia, la productividad laboral, costo de la mano de obra y los beneficios de la aplicación de principios de edificabilidad, pueden ser calculados para varios niveles, ya sean de confiabilidad o precisión razonable.

Para comprender la previa investigación realizada y el progreso efectuado en el área de la edificabilidad, este artículo comienza con una revisión de la literatura relevante sobre temas relacionados a este estudio, introduce brevemente una visión general sobre el oficio del moldeado, presenta los métodos y análisis de la investigación, ofrece una discusión sobre los resultados obtenidos, y concluye con una recomendación dirigida a incentivar futuras investigaciones sobre los efectos de la edificabilidad sobre otros elementos y oficios en las obras de estructuras de concreto reforzado.

In the United States, as the case with most countries, the cost of formwork trade ranges from one-third to two-thirds of the overall cost of the reinforced concrete frame (Hurd, 2005; Illingworth, 2000), of which, the cost of labors comprises approximately thirty percent (McTague and Jergeas, 2002). Nevertheless, the influence of buildability on this trade, especially at the activity levels, is yet to be determined and quantified.

Grade beams are one of the important elements of in situ reinforced concrete construction. Primarily, such elements are used to serve one, or a combination, of the following structural functions: (1) tie building foundations to provide the required lateral stiffness at the sub-structural levels; (2) reduce the unsupported free length of columns, below grade level, to minimize the effect of buckling; and (3) limit excessive differential settlements of isolated foundations. In addition, grade beams may be used to provide support to masonry walls. Formwork of grade beams is a labor intensive operation, which is associated with added difficulty due to performing the activity below the grade level. Therefore, the objective of this research is to investigate the effects and relative influence of the following buildability factors on their formwork labor productivity: (a) variability of beam sizes; (b) size of beams; and (c) number of joints formed as a result of beams intersections. Consequently, labor productivity, thus labor cost and benefits related to the application of buildability principles, can be estimated for the various levels both, reliably and with reasonable accuracy.

To develop an understanding of the previous research that had been conducted and the progress developed in the area of buildability, this paper starts with a relevant literature review of topics related to this study, briefly introduces an overview of the formwork trade, presents the research method and analysis, provides a discussion of the results obtained, and concludes with a recommendation geared towards encouraging further investigations into the effects of buildability on other elements and trades of in situ reinforced concrete structures.

## 2. Revision de literatura

El Departamento de Comercio de Estados Unidos define productividad como “Dólares generados por insumo de trabajo persona-hora” (Adrian, 1987). Handa y Abdalla (1998) definieron la productividad como “la relación entre la producción de bienes y/o servicios y el insumo de recursos básicos; por ejemplo, mano de obra, capital, tecnología, materiales y energía”. Arditi y Mochtar (2000) refirieron la productividad como “la relación entre los insumos totales expresados en Dólares Americanos y la producción expresada también en Dólares Americanos, mientras que Horner y Duff (2001) expresaron que la productividad es “volumen producido por insumo unitario”

En vista de la discusión anterior, es obvio que el consenso general para definir productividad es la relación entre el insumo y la producción. Entonces la productividad de la edificabilidad puede ser considerada como una medida de productos obtenidos de la combinación de insumos. En esta lógica, surgen dos medidas para la productividad en la construcción: (a) factor total de la productividad, donde los productos e insumos son considerados, y (b) factor parcial de la productividad, a menudo referido como factor único de productividad, donde se consideran los productos e insumos únicos o seleccionados (Rakhra, 1991, Talhouni, 1990).

Las ventajas del factor único de productividad, por ejemplo productividad laboral, son muchas. Al enfocarse en un factor seleccionado, el proceso de medición resulta más fácil y más controlable. Como resultado, se puede recopilar datos confiables y precisos. La compleja naturaleza del proceso de construcción y la interacción de sus actividades, convierten a la medición de productividad laboral en una opción popular, especialmente para los investigadores, puesto que los eficientes sistemas de control monitorean cada insumo en forma separada. Además, puesto que la construcción es una industria de trabajo intensivo, se puede discutir que la mano de obra es el único recurso productivo, así la productividad depende principalmente del esfuerzo y desempeño humano.

La palabra edificabilidad aparece como recién llegada al idioma, a fines de la década de los 70s (Cheetham y Lewis, 2001). Un intento temprano para dirigirse a la edificabilidad puede dar crédito a Sir Harold Emmerson (1962), cuando sugirió una nueva forma de relación entre los diseñadores y los constructores. El punto de preocupación fue la falta de cohesión entre los diseñadores y constructores, y la inestabilidad de ambas partes para entender el proceso de construcción a través de la perspectiva del otro.

## 2. Literature review

The US Department of Commerce defines productivity as “Dollars of output per person-hour of labor input” (Adrian, 1987). Handa and Abdalla (1998) defined productivity as “the ratio of outputs of goods and/or services to inputs of basic resources, e.g., labor, capital, technology, materials and energy”. Arditi and Mochtar (2000) referred to productivity as “the ratio between total outputs expressed in Dollars and total inputs expressed in Dollars as well”, whereas Horner and Duff (2001), expressed productivity as “how much is produced per unit input”.

In view of the preceding discussion, it is obvious that the general consensus to define productivity is the ratio of output to input. Thus, construction productivity can be regarded as a measure of outputs which are obtained by a combination of inputs. In view of this, two measures of construction productivity emerge: (a) total factor productivity, where outputs and all inputs are considered; and (b) partial factor productivity, often referred to as single factor productivity, where outputs and single or selected inputs are considered (Rakhra, 1991, Talhouni, 1990).

The advantages of the single factor productivity, e.g., labor productivity, are many. By focusing on a selected factor, the measurement process becomes easier and more controllable. As a result, reliable and accurate data can be collected. The complex nature of the construction process and the interaction of its activities, make the labor productivity measure the popular option, especially for researchers, since effective control systems monitor each input separately. In addition, since construction is a labor intensive industry, it may be argued that man-power is the only productive resource, thus construction productivity is mainly dependent upon human effort and performance.

The word buildability, appears to have first entered the language in the late 1970s (Cheetham and Lewis, 2001). An early attempt to address buildability can be credited to Sir Harold Emmerson (1962), when a new form of relationship between designers and constructors was suggested. The point of concern was the lack of cohesion between designers and constructors and the inability of both parties to see the whole construction process through each other's eyes.



En un informe preliminar, “Edificabilidad: una evaluación”, publicado en 1983 por la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA), tentativamente se definió edificabilidad, y tal vez sea la definición más ampliamente aceptada: “el grado al cual el diseño de una edificación facilita el manejo de la construcción, sujeto a los requerimientos generales para una construcción finalizada” (CIRIA, 1983).

Basados en esta definición, se pueden inferir dos implicaciones. Primero, edificabilidad puede ser categorizada en una escala que varía desde buena a mala; en segundo lugar: cada edificación posee requerimientos generales que pueden entrar en conflicto con el concepto de edificabilidad, por consiguiente exige la aceptación de menos que buena edificabilidad.

En Europa la expresión “Edificabilidad” es la terminología adoptada para la influencia del diseño sobre un proceso constructivo. Por otro lado, el término “Constructibilidad” es ampliamente empleado y bien acogido en Norteamérica. La comisión técnica en Constructibilidad del Instituto de la Industria de la Construcción (CII) define constructibilidad como “el uso óptimo del conocimiento en construcción y de la experiencia de planificación, diseño, aprovisionamiento, y operación en terreno para alcanzar los objetivos generales del proyecto” (CII, 1986). Aunque ambas expresiones apuntan a temas similares, el término constructibilidad cubre un rango más amplio de disciplinas incluyendo planificación conceptual, diseño, aprovisionamiento y construcción.

Una de las barreras, y tal vez la más importante, para la implementación del concepto edificabilidad, sea la medición de sus beneficios para la industria de la construcción; esta industria aún no posee las metodologías para representar los requerimientos para análisis y medición de la edificabilidad (Song y Chua, 2006). El primer intento para medir la influencia del diseño sobre la edificabilidad fue emprendido por la Estación de Investigación de Edificaciones (BRS, 1970). La operación de grúas en varias obras de construcción, fue examinada y se concluyó que “si el trazado de la obra, o el tipo de construcción utilizada hace la operación de la grúa más difícil, entonces todo el proceso constructivo será más complicado y menos económico”. Sin embargo, tal intento falló en cuantificar el nivel de dificultad asociado con el trazado de la obra o el tipo de construcción.

In an exploratory report, “Buildability: an assessment”, published in 1983 by the Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), buildability was tentatively defined, and perhaps it is the most widely accepted definition, as: “the extent to which the design of a building facilitates ease of construction, subject to the overall requirements for the completed building” (CIRIA, 1983).

Based on this definition, two implications may be inferred. First, buildability can be categorized in a scale ranging from good to bad; and second, each building has overall requirements which may conflict with the buildability concept, thus necessitate the acceptance of less than good buildability.

Throughout Europe, the expression “Buildability” is the adopted terminology for the influence of design on the construction process. On the other hand, the term “Constructability” is widely used and favored in North America. The constructability task force of the Construction Industry Institute (CII) defines constructability as “the optimum use of construction knowledge and experience in planning, design, procurement, and field operations to achieve overall project objectives” (CII, 1986). Although both expressions target similar issues, the term constructability covers wider range of disciplines including conceptual planning, design, procurement and construction.

One of the barriers, and perhaps the most important, to the implementation of the buildability concept, is the difficulty in measuring its benefits to the construction industry; the industry still lacks methodologies to represent the requirements for buildability analysis and measurement (Song and Chua, 2006). The first attempt to measure the influence of design on buildability was undertaken by the Building Research Station (BRS, 1970). The operation of cranes on various construction sites was examined, and was concluded that “if the site layout, or the type of construction utilized make the crane operation difficult, then the whole construction process would be difficult and uneconomical”. However, such an attempt failed to quantify the difficulty level associated with the site layout or type of construction.

Otro intento realizado por la Institución Real de Peritos Colegiados (RICS) fue una comparación entre operaciones de construcción entre el Reino Unido y USA, con énfasis en el diseño y procedimientos contractuales. Concluyeron que “el diseño no puede ser separado de la construcción sin sufrir serias multas por demoras y costos” (RICS, 1979). Una vez más, la magnitud de las multas por demoras y costo no fueron determinadas.

El programa de investigación de la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA), identificó una restricción para alcanzar una buena edificabilidad, estableciendo que “el logro de una buena edificabilidad depende de que ambos, diseñadores y constructores, sean capaces de entender el proceso de construcción completo a través de la perspectiva del otro (CIRIA, 1983). Una vez identificada esta limitación, no se proporcionó una recomendación sobre cómo evaluar el logro de una buena edificabilidad.

En un esfuerzo por facilitar la implementación del concepto Constructibilidad en la industria de la construcción, el Instituto de la Industria de la Construcción (CII, 1993) ha desarrollado 17 conceptos de Constructibilidad, que están agrupados bajo las tres fases principales en un proyecto de construcción: (a) planificación conceptual, (b) diseño y aprovisionamiento, (c) operaciones en terreno. Mientras este esfuerzo, es por cierto, un paso en la dirección correcta, los beneficios de aplicar los conceptos relacionados a cada fase del ciclo de vida del proyecto, aún no son determinados en términos tangibles.

O'Connor et al. (1987) y Alshawi y Underwood (1996) discutieron los efectos negativos de la variabilidad de tamaños de los elementos, sobre la complejidad de los procesos de construcción. Sin embargo su trabajo fue limitado a una guía general, sin ninguna cuantificación de los impactos de esos factores en la productividad de la construcción. Más aún, Fischer y Tatum (1997) identificaron variables críticas de diseño que son importantes para la edificabilidad de estructuras. Tales variables incluyeron dimensiones y detalles de los elementos, por ejemplo, ancho, longitud, profundidad y tipo. Aunque los efectos de tales variables sobre la productividad de la construcción, no fueron medidos.

En un esfuerzo por medir la edificabilidad de los diseños, el Sistema de Evaluación de Diseño Construible (BDAS), fue establecido por la Cámara de Desarrollo para la Industria de la Construcción de Singapur (CIDB, 1995). El objetivo principal del sistema BDAS es evaluar la influencia del diseño sobre la productividad de la construcción.

Another attempt by the Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) was a comparison between construction operations of the UK and the US, with emphasis on design and contractual procedures. They concluded that “design cannot be divorced from construction without major time and cost penalties” (RICS, 1979). Once again, the magnitude of such time and cost penalties was not determined.

The Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) program of research, identified a constraint for achieving good buildability by stating that “the achievement of good buildability depends on both designers and builders being able to see the whole construction process through each other’s eyes” (CIRIA, 1983). Having identified this constraint however, no suggestion on how to assess the achievement of good buildability was provided.

In an effort to facilitate the implementation of the constructability concept in the construction industry, the Construction Industry Institute (CII, 1993) has developed 17 constructability concepts, which are grouped under the three main phases of the construction project: (a) conceptual planning; (b) design and procurement; and (c) field operations. While such an effort is most certainly a step in the right direction, the benefits of applying the related concepts to each phase of the project’s life cycle are yet to be determined in tangible terms.

O'Connor et al. (1987) and Alshawi and Underwood (1996) discussed the negative effect of the variability of element sizes on the complexity of the construction process. However, their work was limited to general guidelines without any quantification of the impacts of such factors on construction productivity. Furthermore, Fischer and Tatum (1997) identified critical design variables which are important for the buildability of structures. Such variables included dimensions and details of elements, e.g., width, length, depth, and type. Yet, the effects of such variables on construction productivity were not measured.

In an effort to measure the buildability of designs, the “Buildable Design Appraisal System” (BDAS), was established by the Construction Industry Development Board of Singapore (CIDB, 1995). The primary objective of the BDAS is to assess the influence of design on construction productivity.

El sistema BDAS presenta un método numérico sistemático para evaluar los efectos del diseño y productividad en obra, por medio del cálculo del “Puntaje edificable” del diseño, tomando en consideración el nivel de simplicidad, estandarización, y el alcance de elementos únicos integrados, es decir, combinando componentes relacionados en un único elemento. Se adjudican índices para cada tipo de sistemas arquitecturales y estructurales, basados en el nivel de dificultad de la operación de construcción. Los diseños con altos puntajes edificables sugieren un empleo más eficiente de la mano de obra, por consiguiente mayor productividad laboral.

Sin embargo un defecto serio de este sistema de valoración proviene de la poca profundidad con la que se evaluó la edificabilidad. Los puntajes edificables son adjudicados en base al tipo estructural general y al método de construcción. Tal enfoque es demasiado general por naturaleza, donde los impactos de los factores de edificabilidad requieren un análisis mucho más profundo para establecer y cuantificar sus efectos sobre la productividad laboral.

Aunque el sistema BDAS es la única herramienta disponible a la fecha, para la evaluación cuantitativa del diseño, la confiabilidad científica de la metodología empleada para desarrollar el sistema de puntajes edificables es cuestionada. Los puntajes edificables fueron obtenidos por datos suministrados por agencias de gobierno, consultores privados, y fabricantes de productos basados en previas experiencias y opiniones personales y grupales (Dong, 1996). Mientas tales enfoques pueden ser considerados como una buena práctica y con sentido común, los métodos científicos requieren de hechos para ser establecidos y apoyados por una investigación, medición y análisis rigurosos. Más aún, Poh y Chen (1998), en un estudio empírico a 37 edificaciones terminadas, determinaron patrones inconsistentes entre los puntajes edificables, productividad laboral, y costos de producción, entonces concluyeron que “mientras que un diseño con alto puntaje edificable conducirá a un uso más eficiente de la mano de obra, la relación entre el puntaje edificable y el costo de la construcción es menos clara”.

Por otra parte, en defensa de la implementación de los principios de edificabilidad, la CIRIA (1999), estableció que la aplicación de los conceptos de racionalización y estandarización provee eficiencia en obra, predictibilidad, y mejor valorización del dinero. Sin embargo, ninguna instrucción fue sugerida sobre cómo evaluar o cuantificar tales beneficios en términos tangibles.

The BDAS presents a systematic numerical method to appraise the effects of design on site efficiency and productivity by means of calculating the “Buildable Score” of the design taking into consideration the level of simplicity, standardization, and the extent of the single integrated elements, i.e., combining related components into a single element. Indices are awarded for each type of architectural and structural systems based on the level of difficulty of the construction operation. Designs with high buildable scores suggest more efficient use of labor, hence higher labor productivity.

A major shortcoming of this appraisal system however stems from the lack of depth in which buildability was assessed. Buildable scores are awarded based on the overall structural type and construction method. Such an approach is too general in nature where the impacts of buildability factors require investigations in far greater depth to establish and quantify their effects on labor productivity.

Although the BDAS is the only available quantitative design appraisal tool to date, the scientific reliability of the methodology employed in developing the system's buildable scores is questioned. Buildable scores were obtained from inputs provided by government agencies, private consultants, and product manufacturers based upon previous personal and group experience and judgment (Dong, 1996). While such an approach can be regarded as good practice and common sense, the scientific method requires facts to be established and supported by rigorous research, measurement, and analysis. Moreover, Poh and Chen (1998), in an empirical study of 37 completed buildings, determined inconsistent patterns among buildable scores, labor productivity, and construction cost, thus went on to conclude that “while a design with a high buildable score will result in more efficient labor usage, the relationship between the buildable score and construction cost is less distinct”.

In advocating for the implementation of buildability principles, CIRIA (1999) on the other hand, stated that the application of the rationalization and standardization concepts provides site efficiency, predictability, and better value for money. However, no direction was suggested on how to assess or quantify such benefits in tangible terms.

A pesar que se ha desarrollado el trabajo de origen, a parte del sistema BDAS, en ninguno de los ejemplos mencionados, existió alguna cifra cuantificada o citada, menos aún una sugerencia sobre cómo evaluar el impacto de la edificabilidad en actividades de construcción. Además, la investigación anterior no brindó una guía específica sobre cómo medir la edificabilidad de un diseño. En uno de los pocos libros dedicados a la edificabilidad, Ferguson (1989) muestra la ausencia de factores que deben ser considerados para hacer un diseño construible y entrega muchos ejemplos de problemas de edificabilidad, con sugerencias para mejorarla. Mientras tales sugerencias permiten la clasificación de los temas de edificabilidad de acuerdo a sus niveles de detalles, no relaciona los temas de edificabilidad a decisiones específicas de diseño.

El dilema básico, sostiene el investigador, puede ser atribuido a la metodología empleada por la investigación previa relacionada, donde el efecto de la edificabilidad fue investigado en forma genérica, pasando por alto el aspecto importante del problema actual. Una solución práctica al problema, sugiere el investigador, especialmente en proyectos de construcción con concreto reforzado, donde el proceso de construcción de tales estructuras está compuesto de varios oficios y actividades, puede ser logrado a través de (a) investigación y determinación de los efectos e influencia relativa de los factores de edificabilidad a niveles de actividad o componentes, es decir: cimientos, vigas rasantes, columnas, muros, vigas y pisos que soportan y constituyen la estructura de la construcción, que son comunes en cada actividad, con el fin que, por un lado, los impactos de la edificabilidad de tales oficios y actividades pueden estar fácilmente disponibles para que los diseñadores entreguen guías específicas a un proceso de toma de decisiones en particular; y por otro lado, los efectos colectivos sobre el fenómeno general de edificabilidad bien puedan ser apoyados, establecidos, y comprendidos en forma global, en consecuencia, puedan ser implementados con mucha facilidad; y (b) cuantificación de tales efectos en términos medibles, con el fin que los efectos tangibles de los principios de edificabilidad puedan ser ejecutados y formalizados.

### 3. Vision general de moldeado

El moldeado es empleado para dar forma al concreto. Incluye el material mismo en contacto con el concreto y todas las necesarias estructuras de soporte asociadas.

Even though seminal work has been developed, apart from the BDAS, in none of the mentioned examples, were there any quantified or quoted figures, or even a suggestion on how to assess the buildability impact on construction activities. In addition, previous research has not provided “specific” guidance on how to measure the buildability of a design. In one of the few text books entirely devoted to buildability, Ferguson (1989) shows the breadth of factors which must be considered to make a design buildable and provides many examples of buildability problems and suggestions for improvements. While such suggestions allow the classification of buildability issues according to their level of details, they do not link buildability issues to “specific” design decisions.

The basic dilemma, the researcher argues, may be attributed to the methodology employed by most related previous research, where the effect of buildability was investigated on a generic basis, which has overlooked the important aspect of the current problem. A practical solution to the problem, the researcher suggests, especially in reinforced concrete construction projects, where the construction process of such structures are composed of various trades and activities, may be achieved through: (a) investigating and determining the effects and relative influence of buildability factors at the activity or component levels, i.e., foundations, grade beams, columns, walls, beams and slabs, which support and make up the building frame, and are common to each activity, so that the impacts of buildability on such trades and activities can be readily available to designers to provide specific guidance to a particular design decision on the one hand, and the collective effects upon the overall phenomenon of buildability on a global basis may be well supported, established, and understood, hence can be implemented with sufficient ease, on the other; and (b) quantifying such effects in measurable terms so that the tangible benefits of buildability principles may be realized and formalized.

### 3. Formwork trade overview

Formwork is used to obtain a shape in concrete. It includes the actual material in contact with concrete and all the necessary associated supporting structures.



El moldeado es retirado en un proceso llamado desmoldado o desmontaje.

El moldeado es caro. Por lo tanto, debe ser manipulado con mucho cuidado y reutilizado tantas veces como sea posible. Además, la estandarización de las dimensiones, racionalizaciones de los esquemas de diseño y repetición de los tamaños de los elementos, a través del proyecto, son esenciales para asegurar una utilización eficiente y económica de los materiales de moldeado.

Los tipos de moldeado son agrupados según su aplicación, de acuerdo a (Ricouard, 1982): (1) moldeado vertical, donde la presión lateral del concreto es el factor regulador. Ejemplos de este tipo incluyen columnas y muros; (2) moldeado horizontal, donde el peso del concreto es el factor determinante. Las estructuras de pisos en suspensión, tableros y voladizos son excelentes ejemplos.

Una amplia variedad de materiales son empleados en el moldeado, por ejemplo, maderos, tablero duro, acero, aluminio, fibra de vidrio reforzada (GRP) y una combinación de los mismos. Sin embargo el material común es el madero, también conocido como moldeado "tradicional" (Brett, 1988). El madero, aventaja a los otros materiales, especialmente en edificaciones de poca o mediana altura, porque puede ser fácilmente cortado, manipulado y ensamblado en obra, sin embargo puede no ser la opción más económica si se requiere una terminación de alta calidad y el proceso requiere un alto grado de repeticiones, donde las ventajas del metal y plástico prevalecen (Peurifoy et al., 2006). El madero es empleado como soporte en forma de intradós así como larguero en formas murales. La madera enchapada se usa principalmente para los paneles. Tanto el moldeado tradicional como el patentado usan madera enchapada, que es lejos el material más común para forrar y para intradós.

En vista de la discusión anterior, se puede concluir que cada tipo de material previamente presentado está asociado con su propio nivel de dificultad de tareas, en consecuencia también puede ser un factor influyente en la edificabilidad sobre la productividad laboral en la operación del moldeado. Sin embargo, puesto que las vigas rasantes son elementos que no están sujetos a repetición dentro de la obra de construcción, tampoco requieren una calidad de terminación muy alta, dentro de las obras monitoreadas, por lo que el moldeado "tradicional" fue el tipo más empleado para esta actividad.

Formwork is removed in a process called striking or stripping.

Formwork is expensive. Therefore, it should be carefully handled and reused as many times as possible. In addition, standardization of dimensions, rationalization of design schemes, and repetition of element sizes throughout the project are essential to ensure efficient and cost-effective utilization of formwork materials.

Formwork types are grouped according to their application as follows (Ricouard, 1982): (1) vertical formwork, where the concrete lateral pressure is the governing factor. Examples of this type involve columns and walls; and (2) horizontal formwork, where the weight of concrete is the governing factor. Suspended slabs, decks, and cantilever structures are prime examples of this type.

A wide variety of materials is used for formwork, e.g., timber, hardboard, steel, aluminum, glass fiber reinforced plastic (GRP), and a combination thereof. The most common material however is timber, also known as "traditional" formwork (Brett, 1988). Timber has the advantage over all other materials, especially in low to medium-rise buildings, because it can be easily cut, handled, and assembled on site, however, may not be the most economical option if a high finishing quality is required and a high degree of repetition is involved, where the advantages of the metal and plastic types prevail (Peurifoy et al., 2006). Timber is used as bearers in soffit forms as well as waling in wall forms. Plywood is mainly used for panels. Both traditional and proprietary formwork use plywood, which is by far, the most common sheathing and soffit material used.

In view of the preceding discussion, it may be concluded that each type of the previously presented materials is associated with its own task-level difficulty, hence can also be an influential buildability factor on the labor productivity of the formwork operation. However, Since Grade Beams are elements which are neither subject to repetition within the construction site, nor require high finishing quality, in all sites monitored, the "traditional" formwork, was the type used for this activity.



El moldeado de vigas rasantes incluyó láminas verticales de enchapado apoyadas por sub-bases, que son soportadas por largueros de madera en ambas partes, superior y posterior, y atadas con mediana profundidad por amarras de metal “sobre puestas”. Si la profundidad de las vigas rasantes es mayor a 1000mm, generalmente se agrega un larguero mediano, para mejorar la rigidez de las formas. Los largueros son soportados por péndolas a lo largo del vano de las vigas. Las péndolas diagonales luego son soportadas por tablas de madera, que se clavan en forma segura al revestimiento de hormigón, bajo las vigas.

Las principales tareas de la operación de moldeado de vigas en obras, incluye (a) disposición, (b) nivelación, identificar ubicación de los diferentes tamaños de vigas, medición, y ubicación de las intersecciones de las vigas, (c) corte, dejar en lugar y asegurar las caras en posición y (d) aplomar, atar y apuntalar las caras en su lugar.

Basados en la discusión previa, se puede suponer que los siguientes factores de edificabilidad impactan el nivel de dificultad de la tarea de moldeado de vigas rasantes, así como la productividad laboral de la operación: (1) variabilidad de tamaño de las vigas, (2) tamaño de las vigas, (3) número de juntas resultantes de las intersecciones de las vigas dentro de toda la actividad, y por la viga individual resultante.

#### 4. Método de investigación y análisis

Los datos sobre la productividad laboral de esta actividad fueron recopilados en ambos niveles, macro y micro. La observación a nivel macro incluyó el monitoreo de la actividad general dentro del proyecto, es decir, moldeado de todas las vigas a piso indicadas en los planos pertinentes, donde fueron registrados los insumos de trabajo asociados con la finalización de la actividad general, por lo tanto se logró realizar un índice individual de productividad laboral, que es, el área total de moldeado armado para todas las vigas a piso, por el total de horas-hombre productivas empleadas para completar la actividad. Los insumos de trabajo recopilados en este nivel incluyeron tanto “tiempo contributivo”, es decir tiempo empleado en la disposición, preparación de áreas de trabajo, transporte y distribución de los moldes en la obra, lectura de planos, identificación de ubicaciones de vigas de distinto tamaño, medición y corte, así como tiempo de moldeado “directo” o “efectivo” empleado en ensamblaje de caras, ubicación en las posiciones, fijación,

Grade beams formwork observed comprised plywood vertical sheets supported by timber vertical studs, which are supported by timber stringers at both, top and bottom parts, and tied around mid depth by a “leave-in” metal tie. If the depth of the grade beam is larger than 1000 mm, usually a middle stringer is added to enhance the stiffness of the forms. The stringers are supported by diagonal braces along the span of the beam. Diagonal braces are further supported by timber boards, which are securely nailed into the concrete blinding underneath the beam.

The major tasks of grade beams formwork operation on sites include: (a) setting-out; (b) leveling, identifying locations of the different beam sizes, measuring, and locating beams intersections; (c) cutting, placing, and securing sides in positions; and (d) plumbing, tying, and bracing sides in place.

Based on the previous discussion, it can be hypothesized that the following buildability factors impact the task level difficulty of grade beams formwork, thus the labor productivity of the operation: (1) variability of beam sizes; (2) size of beams; and (3) number of joints formed due to beams intersections within the overall activity, and along the single beam formed.

#### 4. Research method and analysis

The labor productivity data of this activity were collected at both levels; macro, and micro. Macro-level observation involved monitoring the overall activity within the project, i.e., forming all ground beams shown on the relevant drawings, where the total productive labor inputs associated with completing the overall activity was recorded, therefore, a single labor productivity index was achieved, that is, the total area of formwork erected for all ground beams per total productive man-hours used to complete the activity. The labor inputs collected at this level included both; “contributory” time, i.e., time spent in setting-out, preparing work areas, transporting and distributing forms within the jobsite, reading plans, identifying the different beam size locations, measuring, and cutting, as well as “direct” or “effective” forming time used in sides assembling, placing in positions, securing,

aplomar, atar y apuntalar en su lugar (Jarkas, 2005; Chan y Kumaraswamy, 1995; Salim y Bernold, 1994). La observación a nivel micro, por otra parte, se enfocó en la observación “directa” de los elementos seleccionados dentro de la actividad, por lo tanto, el tiempo “contributivo” tuvo una influencia insignificante en este nivel de observación, donde sólo los insumos de trabajo productivo de moldeado “directo” o “efectivo” fueron usados para cuantificar la productividad laboral en las vigas observadas (Jarkas, 2005).

Las ventajas del monitoreo de una actividad a nivel micro son dobles: (1) los resultados obtenidos ayudarían a obtener patrones de referencias cruzadas, a partir del análisis de la observación a nivel macro, que luego pueden proporcionar una mejor comprensión del fenómeno general y de los descubrimientos de los factores explorados que afectan la actividad; y (2) los impactos de otros factores, no relacionados con la edificabilidad, por ejemplo: complejidad de la comunicación, problemas secuenciales, trazado de la obra y proporción del trabajo subcontratado, son minimizados en este nivel de observación sobre la productividad laboral.

Puesto que un sinnúmero de factores, ajenos a la edificabilidad, influyen la productividad laboral en obras, los que pueden enmascarar o incluso ensombrecer los efectos de la edificabilidad en la operación de moldeado, el enfoque estuvo en la selección de proyectos de construcción que compartieran características comunes, tales como: modalidad de contratos de aprovisionamiento, ubicaciones geográficas, y en mayor grado, métodos de construcción, incluso diferidos en tipos y magnitudes, para que los impactos de los factores de edificabilidad explorada pudieran ser desentrañables; obras similares, que compartieran un gran número de características similares de factores de edificabilidad, especialmente en este nivel de actividad, por consiguiente su influencia no podría ser revelada con seguridad.

Por otra parte, las diferencias de los procedimientos de administración aplicado entre los varios tipos y magnitudes de las obras monitoreadas, a nivel proyecto, tienen un efecto menor en el nivel de la observación de la actividad, mientras que los posibles impactos de otros factores que intervienen, tales como: tamaño y composición de la cuadrilla, habilidades de la mano de obra, motivación y supervisión de la calidad pueden ser moderados, recopilando un volumen mayor de datos de productividad laboral (Jarkas, 2005). En consecuencia, las obras observadas incluyeron edificaciones residenciales y oficinas, centros comerciales,

plumbing, tying, and bracing in place (Jarkas, 2005; Chan and Kumaraswamy, 1995; Salim and Bernold, 1994). Micro-level observation on the other hand, focused on the “direct” observation of selected elements within the activity, therefore, the “contributory” time had negligible influence at this level of observation, where only the “direct” or “effective” productive forming labor inputs were used to quantify the labor productivity of beams observed (Jarkas, 2005).

The advantages of monitoring an activity at the micro-level are twofold: (1) the results obtained would assist in cross-referencing patterns obtained from the macro-level observation analysis, which can further provide better understanding of the overall phenomena and findings of the explored factors affecting the activity; and (2) the impacts of other, non-buildability factors, e.g., communication complexity, sequencing problems, site lay-out, and proportion of work subcontracted, on labor productivity are minimized at this level of observation.

Since numerous factors, other than buildability, influence labor productivity on sites, which may mask or even overshadow the effect of buildability on the forming operation, the focus was on selecting construction projects which shared common features such as, contract procurement method, geographical locations, and to a large extent, construction methods, yet differed in types and magnitudes, so that the impacts of the explored buildability factors could be unraveled; similar sites, largely share similar characteristics of buildability factors, especially at the activity level, thus their influence may not be best revealed.

On the other hand, the differences in management procedures applied among the various types and magnitudes of sites monitored, at the project level, have little effect at the activity level of observation, whereas, the possible impacts of other interfering factors such as, crew size and composition, skill of labors, motivation, and supervision quality can be moderated by collecting a large volume of labor productivity data (Jarkas, 2005). Consequently, sites observed included residential and office buildings, commercial centers,



instalaciones industriales, que variaron desde USD 0.80 millones a USD 3.50 millones de costo de construcción, de 1 a 8 pisos de altura y en áreas de superficie de 300 m<sup>2</sup> a 4000 m<sup>2</sup>.

En un esfuerzo por minimizar la influencia negativa de las interrupciones o trastornos de la productividad laboral, las principales demoras durante el proceso de moldeado, por ejemplo, escasez de material, falta de disponibilidad de herramientas, accidentes e inclemencias del tiempo fueron registradas y descartadas, donde sólo los datos de productividad laboral fueron usados para cuantificar los índices de productividad laboral.

Los datos de productividad laboral de la actividad de moldeado, que fueron parte de un proyecto de investigación mayor, fueron recopilados de 30 obras de construcción distintas ubicadas en el Estado de Kuwait, donde el concreto reforzado es el tipo de material que prevalece en las obras de construcción. Además de los principales proyectos seleccionados para observación, se obtuvo datos adicionales y relevantes de otras obras, para complementar el volumen los datos de productividad. La duración de la recopilación de datos tomó un lapso de diecinueve meses, en los cuales, fueron registrados un total de 54 y 334 puntos de referencia de productividad laboral a niveles macro y micro, respectivamente. Un volumen tan elevado hizo posible obtener resultados validos, confiables y estadísticamente robustos.

Los insumos de trabajo a nivel macro y micro, para las correspondientes vigas rasantes observadas, fueron recopilados usando técnicas de observación intermitentes y directas, respectivamente (Jarkas, 2005; Williamson, 1999; Munshi, 1992; Noor, 1992). Formularios específicamente diseñados para recopilar datos, fueron usados en todas las obras monitoreadas para registrar sistemáticamente y coherentemente los parámetros esenciales de productividad de los insumos de trabajo y para registrar las principales demoras presentadas en la operación de moldeado. La técnica de observación intermitente involucró la recopilación de datos de mano de obra a nivel macro, sobre la finalización de la actividad, aunque realizando visitas ocasionales a la obra durante el proceso, con el fin de asegurar que los formularios de recopilación de datos fueran llenados regularmente, y para evaluar el progreso físico de las actividades bajo observación. El método de observación directa, por otra parte, se enfocó en elementos pre-seleccionados, que fueron generalmente finalizados dentro del mismo día, o durante el progreso de la actividad. Por lo tanto, los insumos de trabajo a nivel macro-micro fueron recopilados diariamente.

and industrial facilities, which ranged from US\$ Million 0.80 to 3.50 in construction cost, 1 to 8 floors in height, and 300 m<sup>2</sup> to 4000 m<sup>2</sup> in “foot-print” areas.

In an effort to minimize the negative influence of interruptions and disruptions on labor productivity, major encountered delays during the forming process, e.g., material shortage, unavailability of tools, accidents, and inclement weather, were recorded and discounted, where only productive labor inputs were used to quantify the labor productivity indices.

The formwork labor productivity data of this activity, which were part of a larger research project, were collected from thirty different construction sites located in the State of Kuwait, where in situ reinforced concrete material is the prevailing type of construction. In addition to the main projects selected for observation, relevant data were further collected from several other sites to supplement the volume of productivity data. The data collection duration spanned a period of nineteen months, in which, a total of 54 and 334 labor productivity data points, i.e., indices, were determined at the macro and micro-levels, respectively. Such a large volume of data made it possible to achieve valid, reliable, and robust statistical results.

Macro and micro-level labor inputs for the corresponding grade beams observed were collected using the intermittent and direct observation techniques, respectively (Jarkas, 2005; Williamson, 1999; Munshi, 1992; Noor, 1992). Specifically designed data collection forms were used in all sites monitored to systematically and consistently record the essential productivity parameters of labor inputs, and to record the major delays encountered in the forming operation. The intermittent observation technique involved collecting macro-level labor inputs upon the completion of the activity, yet conducting occasional site visits during the process to ensure that data collection forms are filled out regularly, and assess the physical progress of activities under observation. The direct observation method on the other hand, focused on pre-selected elements, which were usually completed within the same day, or during the progress of the activity. Therefore, micro-level labor inputs were collected on daily basis.

Los datos recopilados a nivel macro fueron verificados tanto por los superintendentes como por los capataces, mientras que los datos a nivel micro fueron verificados por diferentes miembros de la cuadrilla, quienes también estaban involucrados en la operación de moldeado de las vigas seleccionadas, en cuanto a comprobación y precisión. Además, las vigas monitoreadas fueron sometidas a inspección visual y marcadas en los planos pertinentes para obtener resultados de medidas.

Los factores de edificabilidad explorados, que son comunes a la actividad de moldeado de las vigas rasantes, como se mencionó anteriormente, incluyeron: (1) variabilidad de los tamaños de las vigas, (2) tamaño de las vigas, (3) el número de juntas resultante de las intersecciones de las vigas. Comúnmente las vigas rasantes varían en tamaños dentro de la actividad, según los vanos y cargas de resistencia. Por lo tanto, el factor de variabilidad de tamaño fue representado por el número total de distintos tamaños encontrados dentro del proyecto observado, mientras que el factor tamaño de la viga fue determinado por el área física emplazada para el moldeado de las vigas.

El resultado total de moldeado de las vigas rasantes, corresponde a la suma total de las áreas de moldeado de vigas individuales, contenidas dentro de la actividad. Puesto que las vigas rasantes son fijadas directamente en la rasante, sólo las caras laterales de las vigas fueron empleadas para cuantificar los resultados del moldeado. El área del "postigo" de una viga rasante individual fue, por lo tanto, cuantificado como se muestra en la Ecuación 1.

$$[\text{Profundidad de la viga/Depth of beam side (m)} * 2] * \text{Luz de la viga/Total span of beam (m)} \quad (1)$$

El factor de intersección de las vigas fue indicado por el número total de juntas resultantes en el vano, como se grafica en la Figura 1.

The data collected at the macro-level were cross-checked by both; superintendents and foremen, whereas micro-level data were double-checked by different crew members, who were also involved in the forming operation of selected beams, for verification and accuracy. In addition, beams monitored were visually inspected and marked on related drawings for output measurements.

The buildability factors explored, which are common to grade beams formwork activity, as previously stated, included: (1) the variability of beam sizes; (2) beam sizes; and (3) the number of joints formed as a result of beams intersections. Commonly, grade beams vary in sizes within the activity in accordance with spans and resisting loads. Therefore, the size variability factor was represented by the total number of the different sizes encountered within the project observed, whereas the beam size factor was determined by the physical erected formwork area of beams.

The total formwork output of grade beams is the total sum of all formwork areas of single beams contained within the activity. Since grade beams are fixed directly on grade, only beam sides were used to quantify the formwork outputs. The "shutter" area of a single grade beam was therefore quantified as shown in Equation 1.

The intersection of beams factor was denoted by the total number of joints formed along the span as depicted in Figure 1.

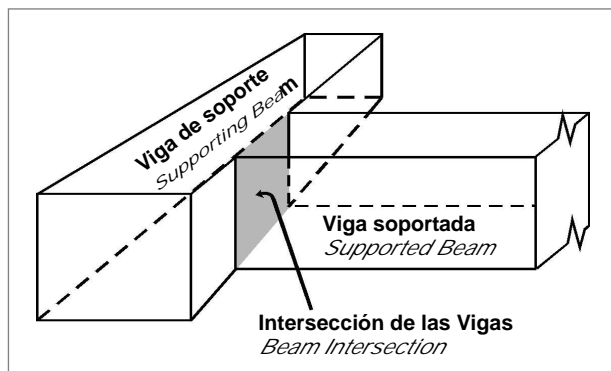


Figura 1. Moldeado de junta de intersección de dos vigas  
Figure 1. Formwork joint at the intersection of two beams

Como se indicó previamente, la observación a nivel micro se enfocó en elementos individuales seleccionados dentro de la actividad en la fase de moldeado. Por lo tanto, el tiempo gastado en la disposición, trabajo de preparación de áreas, transporte, apilamiento y distribución de los moldes dentro de la obra, lectura de planos, identificación de las ubicaciones de las vigas, mediciones y cortes, son de poca influencia en la productividad de la operación, en este nivel de observación. En vista de lo anterior, los factores de edificabilidad explorados a nivel micro, se limitaron al tamaño de las vigas rasantes observadas y al número resultante de juntas de intersección en las vigas monitoreadas.

Los insumos de trabajo recopilados en los niveles macro y micro fueron sometidos a revisión, debido a posibles errores de mediciones o valores extremos, es decir, una observación fuera de lo común que se encuentra fuera del rango de valor de los datos. Por otro lado, los resultados de factores de edificabilidad explorados fueron determinados por los investigadores empleando la técnica “unidad física de medida” (Talhouni, 1990). Los índices de productividad laboral para las vigas observadas fueron cuantificados como se muestra en la Ecuación 2.

As previously indicated, the micro-level observation focused on selected individual elements within the activity at the forming stage. Therefore, time spent in setting-out, preparing work areas, transporting, stacking and distributing forms within the jobsite, reading plans, identifying beam locations, measuring, and cutting, are of little influence on the productivity of the operation at this level of observation. In view of this, buildability factors explored at the micro level were limited to the size of the grade beams observed, and the number of joints formed along beams monitored due to intersections.

The labor inputs collected at the macro and micro-levels were screened for possible measurement errors or outliers, i.e., an unusual observation which lies outside the range of the data values. On the other hand, the outputs of buildability factors explored were determined by the researcher using the “physical unit of measurement” technique (Talhouni, 1990). The labor productivity indices for beams observed were then quantified as shown in Equation 2.

$$Productividad\ Laboral / Labor\ productivity\ (m^2/mh) = \frac{Área\ de\ moldeado\ emplazada / Area\ of\ formwork\ erected\ (m^2)}{Insumo\ de\ trabajo / Labor\ input\ (mh)} \quad (2)$$

Las estadísticas descriptivas de la productividad laboral determinada y los factores de edificabilidad investigados, en ambos niveles, son entregados en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

The descriptive statistics of the labor productivity determined and buildability factors investigated, at both levels, macro and micro, are provided in Tables 1 and 2, respectively.

Tabla 1. Estadísticas Descriptivas a Nivel Macro de Factores de Edificabilidad y Productividad Laboral para el del Moldeado de vigas rasantes  
Table 1. Macro-Level Descriptive Statistics of Buildability Factors and Formwork Labor Productivity of Grade Beams

Factor de Edificabilidad/Buildability Factor	Valor Mínimo/ Minimum Value	Valor Máximo/ Maximum Value	Valor Promedio/ Average Value	Desviación Estándar/ Standard Deviation
Variabilidad de las Vigas/Variability of Beams (VOB)	1.00	4.00	1.59	0.74
Área Total de Postigo/Total Shutter Area (TSA (m <sup>2</sup> ))	11.72	802.00	203.57	175.58
Número total de juntas resultantes/Total Number of Joints Formed (TNOJ)	0.00	51.00	14.78	15.84
Productividad Laboral del Moldeado/Formwork Labor Productivity (m <sup>2</sup> /mh <sup>1</sup> )	Valor Mínimo/ Minimum Value	Valor Máximo/ Maximum Value	Valor Promedio/ Average Value	Desviación Estándar/ Standard Deviation
	2.44	8.10	4.28	1.18

<sup>1</sup> mh indica horas-hombre  
<sup>1</sup> mh denotes man-hour



Tabla 2. Estadísticas Descriptivas a Nivel Micro de Factores de Edificabilidad y Productividad Laboral para el del Moldeado de vigas rasantes

Table 2. Micro-Level Descriptive Statistics of Buildability Factors and Formwork Labor Productivity of Grade Beams

Factor de Edificabilidad/Buildability Factor	Valor Mínimo/ Minimum Value	Valor Máximo/ Maximum Value	Valor Promedio/ Average Value	Desviación Estándar/ Standard Deviation
Área de Postigo/Shutter Area (SA (m <sup>2</sup> ))	0.80	61.32	10.31	10.91
Número de juntas/Number of Joints (NOJ)	0.00	6.00	0.81	1.19
Productividad Laboral del Moldeado/Formwork Labor Productivity (m <sup>2</sup> /mh)	Valor Mínimo/ Minimum Value	Valor Máximo/ Maximum Value	Valor Promedio/ Average Value	Desviación Estándar/ Standard Deviation
	1.37	19.36	6.90	2.94

Los datos analizados fueron ingresados en una hoja de cálculo donde los análisis de regresión fueron desarrollados, a un nivel de importancia de 0.050, usando el software "PHStat", modulo externo de estadísticas para Microsoft® Excel. Los gráficos de probabilidad normal, es decir técnicas gráficas para evaluación de normalidad, donde los ordenados valores resultantes u observaciones son graficados como una función del correspondiente orden normal de la media estadística, comúnmente conocida como el valor "Z" de los datos de productividad laboral, revelaron que los valores pertenecen a poblaciones casi normalmente distribuidas, validando así la confiabilidad de las deducciones estadísticas (Sincich et al., 2002). Un gráfico de muestra para la productividad laboral del moldeado, a nivel micro en las vigas observadas, se muestra en la Figura 2.

The screened data were entered into a spreadsheet where the regression analyses were conducted, at 0.050 significance level, using the "PHStat" software, a statistics add-in for Microsoft® Excel. Normal probability plots, i.e., graphical techniques for normality assessment, where the ordered response values or observations are plotted as a function of the corresponding normal order statistic means, commonly referred to as the "Z" value, of labor productivity data revealed that the values belong to almost normally distributed populations, thus validating the statistical reliability inferences (Sincich et al., 2002). A sample plot of the micro-level formwork labor productivity of beams observed is shown in Figure 2.

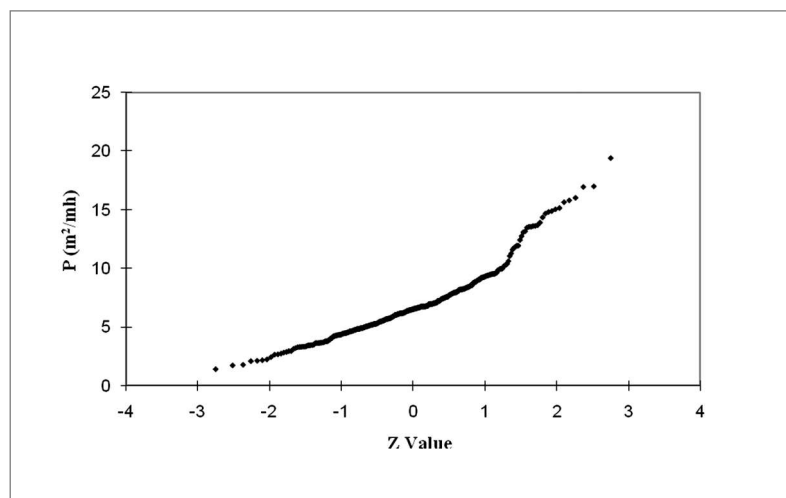


Figure 2. Micro-level labor productivity normal probability plot of ground beams observed  
Figura 2. Gráfico de probabilidad normal de la productividad laboral, a nivel micro, de las vigas a piso observadas

Los efectos y la influencia relativa de los factores de edificabilidad en la productividad laboral fueron analizados empleando el método múltiple de regresión (Gujarati, 1995; Lawrence, 1992; Sanford, 1985; Sincich et al., 2002). Es importante destacar que, puesto que los modelos de regresión incluyen muchas variables dependientes, que tienen diferentes unidades de medición, entonces una comparación directa de varios coeficientes para evaluar su influencia relativa en una variable dependiente, ejemplo: productividad laboral, podría ser espuria. Por lo tanto, antes de poder realizar una investigación significativa de la influencia relativa de variables independientes, esto es factores de edificabilidad, los coeficientes de regresión de las variables independientes deben ser estandarizados (Jaccard y Turrisi, 2003; Kim y Feree, 1981). Los coeficientes de regresión estandarizados son medidos posteriormente en la misma escala, con una media de "0" y una Desviación Estándar de "1", y así son directamente comparables unos con otros, con el mayor coeficiente de valor absoluto que indica la más alta influencia en la variable dependiente.

Un coeficiente de regresión es estandarizado, empleando la siguiente fórmula:

$$b_k^* = b_k \left( \frac{s_k}{s_y} \right) \quad (3)$$

Donde  $b_k^*$  es el coeficiente de regresión estandarizado de la variable independiente  $k^{th}$ ;  $b_k$  es el coeficiente de regresión de la variable independiente  $k^{th}$ ;  $s_k$  es la desviación estándar de la variable independiente  $k^{th}$ ; y  $s_y$  es la desviación estándar de la variable dependiente. Comúnmente los coeficientes de regresión estandarizados son conocidos como pesos beta.

Además para determinar la influencia relativa de tales factores, el factor con mayor influencia fue escogido como factor de referencia, y se le asignó el valor 1.00. Luego la influencia relativa de cada factor fue medida, en relación al factor de referencia, con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Influencia relativa del factor } k^{th}}{\text{Relative influence of the } k^{th} \text{ factor}} = \frac{\text{Valor coeficiente estandarizado del factor } k^{th} / \text{Standardized coefficient value of the } k^{th} \text{ factor}}{\text{Valor coeficiente estandarizado del factor de referencia} / \text{Standardized coefficient value of the reference factor}} \quad (4)$$

The effects and relative influence of buildability factors on labor productivity were analyzed using the multiple regression method (Gujarati, 1995; Lawrence, 1992; Sanford, 1985; Sincich et al., 2002). It is important to note that since the regression models involve several independent variables having different units of measurement, a direct comparison of the size of various coefficients to assess their relative influence on the dependent variable, i.e., labor productivity, could be spurious. Therefore, before a meaningful investigation of the relative influence of the independent variables, i.e., buildability factors, can be conducted, the regression coefficients of the independent variables must be standardized (Jaccard and Turrisi, 2003; Kim and Feree, 1981). The standardized regression coefficients are then measured on the same scale, with a mean of "0" and a standard deviation of "1", and thus are directly comparable to one another with the largest coefficient in absolute value indicating the greatest influence on the dependent variable.

A regression coefficient is standardized using the following formula:

Where  $b_k^*$  is the standardized regression coefficient of the  $k^{th}$  independent variable;  $b_k$  is the regression coefficient of the  $k^{th}$  independent variable;  $s_k$  is the standard deviation of the  $k^{th}$  independent variable; and  $s_y$  is the standard deviation of the dependent variable. Commonly, standardized regression coefficients are referred to as beta weights.

In addition, to determine the relative influence of such factors, the most influential factor was chosen to form the reference factor, and was assigned the value of 1.00. The relative influence of each factor was then measured relative to the reference factor by the following formula:



La confiabilidad de las relaciones de regresión fue determinada realizando pruebas de importancia estadísticas, a un nivel de 5% de importancia. El grado en que los datos no concuerdan con la hipótesis nula, es decir, el coeficiente de regresión de los correspondientes factores de edificabilidad dentro de los modelos de regresión es insignificamente distinto de cero, por lo que su efecto en la productividad laboral es estadísticamente insignificante, determinado por el valor-p obtenido para cada factor investigado. Entre menor es el valor-p del factor correspondiente, mayor es el grado de no concordancia entre los datos y la hipótesis nula, y más importante es el resultado. En general, si el resultado del valor-p del coeficiente de regresión es menor que el nivel de importancia, es decir, el valor-p < 0.050, la hipótesis nula es rechazada a favor de la hipótesis alterna, entonces el impacto del correspondiente factor de edificabilidad explorado sobre la productividad laboral es estadísticamente importante (Sincich et al., 2002).

Además la bondad de ajuste de los modelos de regresión fue evaluada por los coeficientes de correlación y determinación. El coeficiente de correlación mide la resistencia de correlación lineal, entre las variables dependientes e independientes, en el modelo de regresión; mientras el coeficiente de determinación indica el porcentaje de variación en la variable dependiente, lo que puede ser explicado por las variables independientes del modelo. A mayores coeficientes de correlación y determinación en el modelo de regresión, mejor es la bondad de ajuste. Por otra parte, el signo algebraico del coeficiente de regresión, indica la dirección del efecto del correspondiente factor de edificabilidad sobre la productividad laboral, es decir, positivo o negativo.

#### a) Análisis de la observación a nivel macro

Un total de 54 puntos de referencia de productividad laboral fueron recopilados, a nivel macro. La relación entre la productividad laboral y los factores de edificabilidad fue determinada por el modelo de regresión múltiple, mostrado en la Ecuación 5.

$$P (m^2/mh) = b_0 + b_1 VOB + b_2 TSA + b_3 TNJ \quad (5)$$

Donde *VOB* representa el número de diferentes tamaños de vigas de fundación observado dentro de la actividad; *TSA* ( $m^2$ ) es el área total de moldeado de vigas de fundación observadas, calculadas como se muestra en la Ecuación 1; y *TNJ* indica el número total de juntas resultantes de las intersecciones de las vigas rasantes, como se ilustra en la Figura 1.

The reliability of the regression relationships was determined by conducting statistical significance tests at 5% significance level. The extent to which the data disagree with the null hypothesis, i.e., the regression coefficient of the corresponding buildability factor within the regression model is insignificantly different from zero, thus its effect on labor productivity is statistically insignificant, was determined by the p-value obtained for each factor investigated. The smaller the p-value of the corresponding factor, the greater the extent of disagreement between the data and the null hypothesis, and the more significant the result is. In general, if the p-value of the regression coefficient is less than the significance level, i.e., p-value < 0.050, the null hypothesis is rejected in favour of the alternate hypothesis, i.e., the impact of the corresponding buildability factor explored upon labor productivity is statistically significant (Sincich et al., 2002).

Furthermore, the goodness of fit of the regression models was assessed by the correlation and determination coefficients. The correlation coefficient, measures the strength of the linear correlation between the dependent and independent variables in the regression model, whereas the coefficient of determination indicates the percent of variance in the dependent variable which can be explained by the independent variables of the model. The higher the coefficients of correlation and determination in the regression model, the better the goodness of fit. The algebraic sign of the regression coefficient on the other hand, denotes the direction of the corresponding buildability factor's effect on labor productivity, i.e., positive or negative.

#### a) Macro-level observation analysis

A total of 54 labor productivity indices were quantified at the macro level. The relationship between labor productivity and buildability factors was determined by the multiple regression model shown in Equation 5.

Where, *VOB* represents the number of the different sizes of grade beams observed within the activity; *TSA* ( $m^2$ ) is the total formwork area of grade beams observed, determined as shown in Equation 1; and *TNJ* denotes the total number of joints formed in grade beams as a result of intersections, as depicted in Figure 1.



El modelo de regresión general y los coeficientes estadísticos se muestran en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

The overall regression model and coefficients statistics are shown in Tables 3 and 4, respectively.

Tabla 3. Modelo Estadístico de Regresión General para Productividad Laboral, a nivel macro, del moldeado de vigas rasantes  
Table 3. Overall Regression Model Statistics for Macro-Level Formwork Labor Productivity

Correlation Coefficient (R)/Coeficiente de correlación (R)	93.90%
Coefficient of Determination (R <sup>2</sup> )/Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	88.20%
Standard Error/Error estándar	0.418
p-value	0.000
No. of Observations/No. de observaciones	54

Tabla 4. Coeficientes de Regresión Estadísticos para la Productividad Laboral, a nivel macro, del Moldeado de vigas rasantes  
Table 4. Regression Coefficients Statistics for Macro-Level Formwork Labor Productivity of Grade Beams

Coefficient Coeficiente	Value Valor	Standard Error Error Estándar	p-value Valor-p	VIF <sup>1</sup>	Standardized Coefficient Value Valor Coeficiente Estandarizado	Influence Rank Rango de Influencia	Relative Influence Influencia Relativa
VOB	-0.00297	0.0815	0.971	1.10	-0.00186	N/A <sup>2</sup>	N/A
TSA (m <sup>2</sup> )	0.00720	0.000405	0.000	1.53	1.07	1	1.00
TNJ	-0.0203	0.00466	0.000	1.66	-0.273	2	0.26

<sup>1</sup> El factor de variación de inflación determina el nivel de correlación, entre los factores independientes de edificabilidad en el modelo. Un valor VIF mayor que 10 indica una multicolinealidad severa, determinando así los resultados estadísticos.

<sup>1</sup> Variance inflation factor determines the level of correlation among the independent buildability factors in the model. A VIF value greater than 10 indicates severe multicollinearity, thus undermining the statistical results.

<sup>2</sup> El rango de influencia y la influencia relativa solo de factores de edificabilidad estadísticamente importantes, es decir, valor-p < 0.050, fue determinado para productividad laboral.

<sup>2</sup> The influence rank and relative influence of only statistically significant buildability factors, i.e., p-value < 0.050, on labor productivity were determined.

La relación entre productividad laboral del moldeado y los factores relevantes de edificabilidad a nivel macro, fue por lo tanto, cuantificada como se muestra en la Ecuación 6.

The relationship between formwork labor productivity and the relevant buildability factors at the macro-level was therefore quantified as shown in Equation 6.

$$P (m^2/mh) = 3.12 - 0.00297 VOB + 0.00720 TSA - 0.0203 TNJ \quad (6)$$

La Tabla 3 muestra una fuerte correlación y coeficientes de determinación altos entre los factores explorados y la productividad laboral, es decir 93.90% y 88.20%, respectivamente. La Tabla 4 además muestra que, aparte del grado de variabilidad de las vigas rasantes, el tamaño y el número total de juntas resultantes de las intersecciones de estos elementos, son estadísticamente significativas en cuanto a sus efectos sobre productividad laboral, es decir valor- $p < 0.050$ . Además, muestra los valores de rango de influencia e influencia relativa, siendo el factor tamaño más influyente que el número de juntas resultantes sobre la productividad laboral.

b). Análisis de la observación a nivel micro

En este nivel de observación, un total de 334 puntos de referencia de productividad laboral fueron recopilados. La relación entre productividad laboral y factores de edificabilidad fue determinada por un modelo de regresión múltiple como se muestra en la Ecuación 7.

$$P (m^2/mh) = b_0 + b_1 SA + b_2 NJ \quad (7)$$

Donde  $SA (m^2)$  representa el área de moldeado de la viga observada y  $NJ$  expresa el número de juntas resultantes.

El modelo de regresión y los coeficientes estadísticos son mostrados en las Tablas 5 y 6, respectivamente.

Table 3 shows strong correlation and high determination coefficients between the explored factors and labor productivity, i.e., 93.90% and 88.20%, respectively. Table 4 further shows that, apart from the variability of grade beam sizes, the size and total number of joints formed due to intersections of these elements, are statistically significant in their effects on labor productivity, i.e.,  $p\text{-value} < 0.050$ . In addition, the influence rank and relative influence values are shown, with the size factor being more influential than the number of joints formed, on labor productivity.

b). Micro-level observation analysis

At this level of observation, a total of 334 labor productivity indices were determined. The relationship between labor productivity and buildability factors was determined by the multiple regression model shown in Equation 7.

Where,  $SA (m^2)$  represents the formwork area of the observed beam; and  $NJ$  expresses the number of joints formed.

The overall regression model and coefficients statistics are shown in Tables 5 and 6, respectively.

Tabla 5. Modelo estadístico de regresión general para productividad laboral del moldeado de vigas rasantes, a nivel micro  
Table 5. Overall regression model statistics for micro-level formwork labor productivity of grade beams

Correlation Coefficient (R)/Coeficiente de correlación (R)	90.22%
Coefficient of Determination (R <sup>2</sup> )/Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	81.40%
Standard Error/Error estándar	1.27
p-value	0.000
No. of Observations/No. de observaciones	334

Tabla 6. Coeficientes de regresión estadísticos para la productividad laboral del moldeado de vigas rasantes, a nivel micro.  
Table 6. Regression coefficients statistics for micro-level formwork labor productivity of grade beams

Coefficient Coeficiente	Value Valor	Standard Error Error Estándar	p-value Valor-p	VIF	Standardized Coefficient Value Valor Coeficiente Estandarizado	Influence Rank Rango de Influencia	Relative Influence Influencia Relativa
SA (m <sup>2</sup> )	0.244	0.00642	0.000	1.01	0.908	1	1.00
NJ	-0.242	0.0586	0.000		-0.0987	2	0.11

La relación entre la productividad laboral del moldeado de vigas rasantes a nivel micro y los factores relevantes de edificabilidad, fueron cuantificados por el modelo de regresión múltiple mostrado en la Ecuación 8.

$$P (m^2/mh) = 4.58 + 0.244 SA - 0.242 NJ \quad (8)$$

En concordancia con los resultados obtenidos a partir del análisis de observación a nivel macro, la Tabla 5 muestra una fuerte correlación y coeficientes de determinación altos entre los factores de edificabilidad y la productividad laboral del moldeado, es decir 90.22% y 81.40%, respectivamente. Además la Tabla 6 muestra que ambos factores se mantienen estadísticamente importantes con relación a sus efectos, es decir valor-p < 0.050, siendo el factor tamaño el más influyente en su impacto que el número de juntas resultantes sobre la productividad laboral.

## 5. Discusión de resultados

A parte de la variabilidad de tamaño de las vigas rasantes, los efectos investigados de los factores de edificabilidad sobre la productividad laboral del moldeado son muy importantes. Aunque el autor no podría identificar investigaciones cuantitativas previas, con las cuales comparar los descubrimientos de este estudio, por una parte los resultados obtenidos se correlacionan con el concepto de edificabilidad, y por otro lado caen dentro de los principios de racionalización y estandarización recomendados en investigaciones previas (CIRIA, 1999; Fischer y Tatum, 1997; Dong, 1996).

The relationship between micro-level formwork labor productivity of grade beams and the relevant buildability factors was quantified by the multiple regression model shown in Equation 8.

Consistent with the results obtained from the macro-level observation analysis, Table 5 shows strong correlation and high determination coefficients between the buildability factors and formwork labor productivity, i.e., 90.22% and 81.40%, respectively. Furthermore, Table 6 shows that both factors remain statistically significant in their effects, i.e., p-value < 0.050, with the size factor being more influential in its impact than the number of joints formed on labor productivity.

## 5. Discussion of results

Apart from the variability of grade beam sizes, the effects of the investigated buildability factors on formwork labor productivity are significant. Although the author could not identify previous quantitative research, with which to compare the findings of this investigation, the results obtained correlate with the buildability concept on the one hand, and fall within the design rationalization and standardization principles advocated for in previous studies (CIRIA, 1999; Fischer and Tatum, 1997; Dong, 1996), on the other.

O'Connor et al. (1987) y Alshawi y Underwood (1996) discutieron el efecto negativo de la variabilidad de tamaños sobre la complejidad del proceso de construcción. Sin embargo su trabajo se limitó a guías generales, sin cuantificar la influencia de tales factores en la productividad de la construcción. Los resultados obtenidos por esta investigación muestran que, aunque su impacto no es estadísticamente importante, la variabilidad del tamaño de las vigas rasantes dentro de la actividad presenta un efecto negativo sobre la productividad laboral del moldeado. En la medida que aumenta el nivel de variabilidad de tamaños, un insumo contributivo adicional se dirige a la disposición, lectura de planos, e identificación de las ubicaciones de los diferentes tamaños de vigas. Manteniendo todos los factores constantes, para cada viga rasante adicional ingresada, se detecta una pérdida promedio de  $0.00297 \text{ m}^2/\text{hh}$ . en productividad laboral. Este patrón concuerda con los principios de racionalización y estandarización.

El resultado de la implementación del principio de racionalización, aunque pueda arrojar mayores elementos en tamaño, también demostró ser positiva en su efecto sobre productividad laboral. Este estudio ha cuantificado una relación importante entre productividad laboral y el área total de moldeado observada. Manteniendo todos los factores constantes, un aumento unitario del área de moldeado es asociado con un aumento de  $0.00720 \text{ m}^2/\text{hh}$ , y  $0.244 \text{ m}^2/\text{hh}$ . en niveles macro y micro de productividad laboral, respectivamente.

Este descubrimiento puede ser atribuible a las siguientes razones: (a) un tiempo contributivo inicial es necesario para que los miembros de la cuadrilla preparen las áreas de trabajo y materiales de moldeado, antes de comenzar el trabajo directo o efectivo. Por lo tanto, si es una actividad del tipo pequeña escala, una mayor parte del insumo de trabajo total se dirige al tiempo contributivo más que al trabajo efectivo; (b) el investigador observó durante la fase de recopilación de datos que, para aproximadamente vanos de bigas iguales, toma casi el mismo tiempo de trabajo moldear, por ejemplo, una viga rasante de  $300 \times 600 \text{ mm}$  que una de  $400 \times 700 \text{ mm}$  en sección corte transversal; (c) cuando los miembros de la cuadrilla se enfrentan a actividades a gran escala, se observa una mejor preparación, preparación y control en las faenas; (d) y en actividades a gran escala monitoreadas, los miembros de la cuadrilla tienen a trabajar más eficientemente y toman menos acostumbrados descansos. En vista de la discusión previa, este efecto puede ser considerado como "economía de escala".

O'Connor et al. (1987) and Alshawi and Underwood (1996) discussed the negative effect of the variability of element sizes on the complexity of the construction process. Nevertheless, their work was limited to general guidelines without any quantification of the influence of such factors on construction productivity. The results obtained by this investigation show that, although its impact is not statistically significant, the variability of grade beam sizes within the activity does exhibit a negative effect on formwork labor productivity. As the level of variability of sizes increases, additional contributory input is directed towards setting-out, reading plans, and identifying the locations of the different beam sizes. Holding all other factors constant, for each additional grade beam size introduced, an average loss of  $0.00297 \text{ m}^2/\text{mh}$  in labor productivity is realized. This pattern agrees with the design rationalization and standardization principles.

The result of implementing the rationalization principle, although may yield larger elements in size, proved to be also positive in its effect on labor productivity. This study has quantified a significant relationship between labor productivity and the total area of formwork observed. Holding all other factors constant, a unit increase in formwork area is associated with  $0.00720 \text{ m}^2/\text{mh}$ , and  $0.244 \text{ m}^2/\text{mh}$  increase in macro, and micro-level labor productivity, respectively.

This finding may be attributed to the following reasons: (a) an initial contributory time is required by crew members to prepare work areas and formwork materials prior to commencing the direct or effective work. Therefore, if an activity is of a small-scale type, a major portion of the total input is directed toward contributory rather than effective work; (b) the researcher observed during the data collection phase that, for an approximately equal beam span, it takes approximately the same labor input, for instance, to form a  $300 \times 600 \text{ mm}$  grade beam as for  $400 \times 700 \text{ mm}$  in cross section; (c) when crew members are confronted with large scale activities, better preparation, planning and control was further observed on sites; and (d) in large scale monitored activities, crew members tend to work harder and take less frequent breaks. In view of the preceding discussion, such an effect may be referred to as "economy of scale".



El impacto negativo de las intersecciones sobre productividad laboral de moldeado de vigas rasantes, además corrobora la importancia de aplicar principios de racionalización y estandarización a la fase de diseño de esta actividad. Las intersecciones de vigas rasantes ocurren cuando una viga es enmarcada sobre otra viga. Esta situación es frecuente, no sólo para vigas rasantes, también en vigas en suspensión. Cuando éstas se encuentran, una junta o abertura de la misma dimensión de la viga soportada se forma en la viga soportada, en el lugar de la intersección. Cuando una viga soporta una o varias vigas, especialmente si las vigas rasantes de soporte y soportadas difieren en profundidad, se requiere in esfuerzo laboral adicional para medir, cortar y fijar las caras de las vigas de soporte. Por lo tanto, aplicar principios de racionalización y estandarización a esta actividad, resulta en un ahorro sustancial de factor trabajo, estimulando así la eficiencia de la operación de moldeado. Los resultados obtenidos indican que, manteniendo todos los demás factores de modelos de regresión constantes, en promedio, una pérdida provocada de  $0.0203 \text{ m}^2/\text{hh.}$ , y  $0.242 \text{ m}^2/\text{hh.}$  a niveles macro y micro de productividad laboral, respectivamente, es asociada con cada aumento unitario del número de juntas resultantes de tales intersecciones.

## 6. Conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones

Debido a la importancia del material concreto reforzado en faenas de la industria de la construcción, esta investigación se ha enfocado en el análisis y cuantificación de la influencia de los factores de edificabilidad sobre productividad laboral de uno de sus oficios más importantes e intensos: el moldeado. Puesto que las vigas rasantes están dentro de las principales actividades que se realizan frecuentemente en muchas obras de construcción, mejorar su productividad laboral puede ayudar a reducir el riesgo de exceder los costos laborales y a aumentar la eficiencia de la operación.

Esta investigación ha cuantificado los efectos de la influencia relativa de la variabilidad del tamaño en vigas rasantes, tamaño de las vigas y el número de intersecciones de vigas sobre la productividad laboral del moldeado. Aparte de la variabilidad de tamaño, la que también presenta un impacto negativo sobre la eficiencia de la operación de moldeado, los factores de edificabilidad investigados en ambos niveles, macro y micro, resultan ser importantes en cuanto a sus efectos sobre productividad laboral.

The negative impact of intersections on formwork labor productivity of grade beams further corroborates the importance of applying the rationalization and standardization principles to the design stage of this activity. Intersection of grade beams occurs when a beam frames onto another beam. This situation is frequent, not only in grade beams, but also in suspended beams. When encountered, a joint or opening having the same dimension of the supported beam is formed in the supporting beam at the location of the intersection. When a beam is supporting one or several beams, especially if the supporting and supported grade beams differ in depth, additional labor input is required for measurement, cutting, and fixing supporting beam sides. Therefore, applying the rationalization and standardization principles to this activity, results in a substantial saving in labor input, thus enhancing the efficiency of the forming operation. The results obtained indicate that; holding all other factors in the regression models constant, on average, an incurred loss of  $0.0203 \text{ m}^2/\text{mh}$ , and  $0.242 \text{ m}^2/\text{mh}$  in macro and micro-level labor productivity, respectively, is associated with each unit increase in the number of joints formed as a result of such intersections.

## 6. Conclusions and a recommendation for further research

Due to the importance of in situ reinforced concrete material to the construction industry, this research focused on investigating and quantifying the influence of buildability factors on the labor productivity of one of its labor intensive major trades; formwork. Since grade beams are among the major activities which are frequently encountered on many construction sites, improving its labor productivity can help reducing the risk of labor costs overrun and increases the efficiency of the operation.

This research has quantified the effects and relative influence of the variability of grade beam sizes, beam sizes, and number of beams intersections on formwork labor productivity. Apart from the variability of sizes, which also exhibits a negative impact on the efficiency of the forming operation, the investigated buildability factors at both levels, macro and micro, are found to be significant in their effects on labor productivity.

Los resultados obtenidos, no sólo comprueban la importancia de aplicar principios de “racionalización” y “estandarización”, en particular “modularidad”, a la etapa de diseño de proyectos de construcción, facilitando el proceso de aprendizaje, permitiendo así a los operadores predecir problemas y racionalizar el proceso de solución de dificultades, evitar errores, compartir información, reducir material de desecho, por lo tanto aumenta la eficiencia y optimiza el gasto en la evolución de la edificación; sino que también probar el impacto positivo del concepto “economía de escala”, el que además es incrementado por la aplicación de estos principios sobre la productividad de la operación de moldeado. Además, se puede argumentar que esta contribución positiva mejora la calidad de la construcción, que es pobre en comparación con otras industrias, debido a operadores mal capacitados y a la continua rotación de personal.

A pesar que los principios heurísticos de edificabilidad general están disponibles para los diseñadores, no existen bases de conocimiento que contengan datos específicos y actualizados sobre edificabilidad para determinaciones de diseño (Fischer y Tatum, 1997). En consecuencia, tales principios pueden ser considerados como sugerencias de buenas prácticas y sentido común, a menudo obtenidas empleando “Métodos de Investigación Delphic” (Cheetham y Lewis, 2001). Más aún, la mayor parte de las recomendaciones y sugerencias para mejorar la edificabilidad, argumenta el investigador, carecen de evidencias cuantitativas de respaldo, otorgando muy poca confiabilidad al grado en el que tales recomendaciones influyen la productividad de un proceso de construcción, por una parte; y son relacionadas con escepticismo especialmente por los profesionales del diseño, por otra parte. En cambio, los descubrimientos cuantitativos de este estudio fueron obtenidos a partir de una rigurosa investigación y análisis, por lo que pueden ser empleados como referencias de apoyo para “formalizar” el conocimiento específico de edificabilidad de esta actividad.

Los resultados de esta investigación completan el espacio vacío entre el conocimiento de edificabilidad y la medida de los factores que impactan la operación de moldeado de las vigas rasantes, que pueden ser usados como retroalimentación a los diseñadores sobre cuán bien sus diseños consideran los requerimientos de principios de edificabilidad, y las consecuencias de sus decisiones sobre productividad laboral. Por otra parte, los patrones descritos de los resultados pueden servir como guía a los administradores de construcciones para una planificación efectiva de la actividad y una eficiente utilización de mano de obra.

The results obtained, not only corroborate the importance of applying the “rationalization” and “standardization” principles, in particular, “modularity”, to the design stage of construction projects, through facilitating the process of learning, thus enables the operatives to predict problems and stream-line the problem-solving process, avoid errors, share information, and reduce waste materials, therefore, enhances their efficiency and optimizes the expenditure of the building evolution, but also substantiate the positive impact of the “economy of scale” concept, which is further augmented by the application of these principles, on the productivity of the forming operation. Furthermore, it can be argued that such a positive contribution improve the quality of construction, which is, in comparison with other industries, poor due to low skilled-high turnover operatives.

Notwithstanding that general buildability heuristic principles are available for designers, knowledge bases that support specific and timely buildability input to design decisions do not exist (Fischer and Tatum, 1997). Consequently, such principles may be regarded as exhortations of good practice and common sense, often obtained using “Delphic Research Methods” (Cheetham and Lewis, 2001). Furthermore, most of the existing recommendations and suggestions for buildability improvement, the researcher argues, lack the supporting quantitative evidences, which lend little reliability to the extent to which such recommendations influence the productivity of the construction process on the one hand, and are often associated with scepticism, especially among design practitioners, on the other. Conversely, the quantitative findings of this study are obtained through rigorous research and analysis, thus can be used as supporting references for “formalizing” the specific buildability knowledge of this activity.

The outcomes of this investigation fill a gap in buildability knowledge and measurement of factors impacting grade beams formwork operation, which can be used to provide designers feedback on how well their designs consider the requirements of the buildability principles, and the consequences of their decisions on labor productivity. On the other hand, the depicted patterns of results may provide guidance to construction managers for effective activity planning and efficient labor utilization.



Aunque numerosos descubrimientos han sido extraídos de este estudio, se recomiendan futuras investigaciones en el campo de los factores de edificabilidad de moldeado y en otros oficios en faenas de concreto reforzado, es decir empotramiento de barras de armadura e instalación del concreto, que son comunes a otros elementos estructurales en faenas de construcción de concreto reforzado, como lo son: cimientos, muros, columnas, vigas y pisos. Los descubrimientos de esta investigación, además de la sugerida exploración en otros oficios de elementos estructurales, pueden ser en 'última instancia empleados para desarrollar un "Sistema de Respaldo al Diseño de Edificabilidad" automatizado. Este sistema sería útil para formalizar el conocimiento específico de edificabilidad en construcciones de concreto reforzado, mejorando así la ejecución de los proyectos ante la siempre creciente demanda por servicios más rápidos y a menor costo de infraestructuras construidas.

Although several findings have been drawn from this study, further research into the effects of buildability factors on formwork, and other related trades of in situ reinforced concrete material, i.e., rebar fixing and concreting, labor productivity, which are common to other structural elements of in situ reinforced concrete construction such as, foundations, walls, columns, beams, and slabs, is recommended. The findings of this investigation, in addition to other trades and structural elements recommended for exploration, can ultimately be used to develop an automated "Buildability Design Support System". Such a system would be useful for formalizing the specific buildability knowledge of reinforced concrete construction, hence improving the performance of projects in an ever-increasing demand for faster and lower cost delivery of constructed facilities.

---

## 7. Referencias / References

- Adams S. (1989), Practical Buildability, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Building Design Report.
- Adrian J. (1987), Construction Productivity Improvement, Elsevier Science Publishing Co.
- Allmon E., Hass C.T., Borcherding J.D., Goodrum P.M. (2000), US Construction Labour Productivity Trends, 1970 – 1998. ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 126(2), 97-104.
- Alshawi M., Underwood J. (1996), Improving the Constructability of Design Solutions through an Integrated System. Journal of Engineering, Construction and Architectural Management, 3(1&2), 47-67.
- Arditi D., Mochtar K. (2000), Trends in Productivity Improvement in the US Construction Industry, Construction Management and Economics, 18, 15-27.
- Brett P. (1988), Formwork and Concrete Practice, Heinemann Professional Publishing Ltd., London.
- Building Research Station, BRS (1970), The use of Cranes on Low-Rise, High Density Industrialised Housing, Current Paper 25/70, Watford, UK.
- Chan D.W.M., Kumaraswamy M.M. (1995), A Study of the Factors Affecting Construction Durations in Hong Kong, Construction Management and Economics, 13, 319-333.
- Cheetham D.W., Lewis J. (2001), Productivity, Buildability, and Constructability: is Work Study the Missing Link? Association of Researchers in Construction Management, 17th Annual Conference, University of Salford, 1(5-7), 271-279.
- Construction Industry Development Board, CIDB (1995), Buildable Design Appraisal System, 3rd Edition, Singapore.
- Construction Industry Institute, CII (1986), Constructability: A primer, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- Construction Industry Institute, CII (1993), Constructability Implementation Guide, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- Construction Industry Research and Information Association, CIRIA (1983), Buildability: An Assessment. CIRIA Publications, Special Report No. 26.
- Construction Industry Research and Information Association, CIRIA (1999), Standardisation and Pre-assembly: Adding Value to Construction Projects, CIRIA Report No. 176.
- Dong C.J. (1996), Effects of Design on Buildability, M.Eng. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- Emmerson H. (1962), Survey of Problems before the Construction Industries, A Report Prepared for the Ministry of Works, HMSO, London, UK.
- Ferguson I. (1989), Buildability in Practice, Mitchell's Professional Library, London.
- Fischer M., Tatum C.B. (1997), Characteristics of Design-Relevant Constructability Knowledge, ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 123(3), 253-260.



- Griffith A. (1987), An Investigation into Factors Influencing Buildability and Levels of Productivity for Application to Selecting Alternative Design Solutions – A Preliminary Report, *Managing Construction Worldwide*, Chartered Institute of Building, CIOB, 2, 646-657.
- Gujarati D.N. (1995), *Basic Econometrics*, McGraw-Hill, New York.
- Handa V.K., Abdalla O. (1998), Forecasting Productivity by Work Sampling, *Construction Management and Economics*, 7, 19-28.
- Horner R.M.W., Duff R. (2001), *More for Less, A contractor's guide to improving productivity in construction*, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, London.
- Horner R.M.W., Talhouni B.T., Thomas H.R. (1989), Preliminary Results of Major Labour Productivity Monitoring Programme, *Proceedings of the 3rd Yugoslavian Symposium on Construction Management*, Cavtat 18-28.
- Hurd M. K. (2005), *Formwork for Concrete*, 7th Edition, SP-4, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- Hyde R. (1996), Buildability as a Design Concept for Architects: A case study of Laboratory Buildings, *Journal of Engineering, Construction and Architectural Management*, 3(1&2), 45-56.
- Illingworth J.R. (2000), *Construction Methods and Planning*, 2nd Edition, E & FN Spon, London.
- Jaccard J., Turrisi R. (2003), *Interaction Effects in Multiple Regression*, 2nd Edition, Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, A Sage University paper, Vol. 72, Sage Publications.
- Jarkas A.M. (2005), An Investigation into the Influence of Buildability Factors on Productivity of in situ Reinforced Concrete Construction, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK.
- Kim J., Feree G. (1981), Standardisation in Causal Analysis, *Sociological Methods and Research*, 10(2), 187-210.
- Lam P., Chan A, Wong F.K., Wong F.W. (2007), Constructability Rankings of Construction Systems Based on the Analytical Hierarchy Process, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 13(1), 36-43.
- Lam P., Wong F.W. (2009), Improving Building Project Performance: How Buildability Benchmarking can help. *Construction Management and Economics*, 27(1), 41-52.
- Lawrence C.H. (1992), *Regression with Graphics*, Brooks/Cole.
- McTague B., Jergeas G. (2002), *Productivity Improvements on Alberta Major Construction Projects*, Construction Productivity Improvement Report/Project Evaluation Tool, Alberta Economic Development, Canada.
- Moore D. (1996a), Buildability Assessment and the Development of an Automated Design Aid for Managing the Transfer of Construction Process Knowledge, *Journal of Engineering, Construction and Architectural Management*, 3(1&2), 29-46.
- Moore D. (1996b), Buildability, Prefabrication, Rationalisation and Passive Buildings in the UK, *Association of Researchers in Construction Management*, 12th Annual Conference and Annual General Meeting, Conference Proceedings, Sheffield Hallam University, 1, 93-100.
- Munshi A.H. (1992), Influence of Wall Panel Characteristic on the Productivity of Brick Layers, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK.
- Noor I. (1992), A Study of the Variability of Labour Productivity in Building Trades, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK.
- O'Connor J.T., Rusch S.E., Schulz M.J. (1987), Constructability Concepts for Engineering and Procurement, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 113(2), 235-248.
- Peurifoy R. L., Schexnayder C. J., Shapira A. (2006), *Construction Planning, Equipment, and Methods*, 7th Edition, McGraw-Hill, Boston, USA.
- Poh P., Chen J. (1998), The Singapore Buildable Design Appraisal System: a Preliminary Review of the Relationship between Buildability, Site Productivity and Cost, *Construction Management and Economics*, 16(6), 681-692.
- Pulaski M.H., Horman M.J. (2005), Organizing Constructability Knowledge for Design, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 131(8), 911-919.
- Rakhra A.S. (1991), Construction Productivity: Concept, Measurement and Trends, *Organisation and Management in Construction*, Proceedings of the 4th Yugoslavian Symposium on Construction Management, Dubrovnik, 487-497.
- Ricouard M.J. (1982), *Formwork for Concrete Construction*, The Macmillan Press Ltd., London, UK.
- Royal Institution of Chartered Surveyors, RICS (1979), *UK and US Construction Industries: A Comparison of Design and Contract Procedures*, Department of Construction Management, University of Reading, UK: 50-58, 86-92.
- Saghatforoush E., Hasim S., Jaafar M., Abdul Kadir M. (2009), Constructability Implementation among Malaysian Building Contractors. *European Journal of Scientific Research*, 29(4), 518-532.
- Salim M., Bernold L. (1994), Effects of Design-Integrated Process Planning on Productivity in Rebar Placement, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 720-737.
- Sanford W. (1985), *Applied Linear Regression*, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- Sincich T., Levine D.M., Stephan D. (2002), *Practical Statistics by Example using Microsoft® Excel and Minitab®*, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

- Song Y., Chua D. (2006), Modeling of Functional Construction Requirements for Constructability Analysis, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 132(12), 1314-1326.
- Stoeckel A., Quirke D. (1992), *Services: Setting the Agenda for Reform*, Industries Research Program, Department of Industry, Technology and Commerce, London, UK.
- Talhouni B.T. (1990), *Measurement and Analysis of Construction Labour Productivity*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK.
- Trigunaryah B. (2004), Constructability Practices among Construction Contractors in Indonesia, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 130(5), 656-669.
- Trigunaryah B. (2007), Project Designers' Role in Improving Constructability of Indonesian Construction Projects, *Construction Management and Economics*, 25(2), 207-215.
- Tucker R.L. (1986), Management of Construction Productivity, *ASCE Journal of Management in Engineering*, 2(3), 148-156.
- Williamson M.T. (1999), *Buildability – The Effect of Design Complexity on Construction Productivity*, M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Dundee, Dundee, UK.

