



Evaluación del impacto ambiental de una partida de construcción antes y después de aplicar herramientas *Lean*

Environmental impact evaluation of a construction site, before and after applying *Lean* tools

Camila Fuenzalida¹, alumna de 5to año
Benjamín Fischer¹, alumno de 5to año
Paz Arroyo¹, profesora asistente
José Luis Salvatierra², investigador

¹Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

²GEPUC

*Autor de correspondencia: parroyo@ing.puc.cl

Camila Fuenzalida¹, 5th year student
Benjamín Fischer¹, 5th year student
Paz Arroyo¹, assistant professor
José Luis Salvatierra², researcher

¹Department of Construction Engineering and Management,
Engineering School, Pontificia Universidad Católica de Chile

²GEPUC

* Corresponding author: parroyo@ing.puc.cl

RESUMEN

La industria de la construcción tiene un rol fundamental en el impacto provocado al medioambiente, tanto durante la construcción como durante la operación. En esta investigación se implementan tres herramientas *Lean*—Diagrama de Ishikawa, 5 porqués y reporte A3—en una obra de construcción en la partida de cerámica de muro y piso. Los objetivos son investigar acerca de la aplicación de estas herramientas, evaluar si mejora la productividad en la ejecución de dicha partida y medir los beneficios medioambientales alcanzados. La metodología de investigación utilizada contempla grabaciones de la ejecución de la partida, mesas de trabajo con trabajadores y administrativos, y capacitaciones en el uso de las herramientas *Lean*. De la investigación se obtuvo que la principal pérdida percibida es el trabajo rehecho y que la causa de este es la falta de control. Además, se determinó que debido a la implementación de herramientas *Lean* se dejaron de emitir 751 kg de CO₂, solo por la disminución en los materiales requeridos de la partida de cerámica de muro y pisos. Esta reducción en el impacto ambiental podría ser aún mayor si se implementaran dichas herramientas en otras partidas de la obra. En conclusión, la implementación de estas herramientas permite la reducción del impacto ambiental, concentrando los esfuerzos de mejora en las pérdidas más importantes.

Palabras clave: Lean construction, productividad, impactos medioambientales, pérdidas.

SUMMARY

The construction industry has an enormous impact on the environment, both during construction and operation. Three *Lean* tools are implemented in this research—Ishikawa Diagram, 5 Whys and A3 reports—in the activity of installation of ceramics in walls and floors in a construction site. The aim is to investigate if the application of these tools allows for improvement in productivity during the execution of this activity and to measure the environmental benefits obtained. The methodology used includes recordings of the execution of the activity, workshops with workers and project managers, and training sessions in the use of *Lean* tools. The results of the research show that the main waste perceived by the participants was the remade work caused by the lack of control. In addition, it was determined that 751 kg of CO₂ were not emitted due to the implementation of these *Lean* tools, because of reducing the amount of material required for the activity. This reduction in environmental impact could be still greater if these tools were implemented in other activities. In conclusion, implementing these 3 tools allowed for reducing the environmental impact, when concentrating improvement efforts in the most important wastes.

Key words: Lean construction, productivity, environmental impact, wastes.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción tiene un alto impacto medioambiental, tanto por la construcción misma de las instalaciones, como por el uso de estas durante su vida útil [1]. *Lean Construction*, o construcción sin pérdidas, es un enfoque para la gestión y producción en el sector de la construcción basado en el sistema de producción de Toyota [2]. Además, tiene por objetivo hacer los procesos más eficientes y diseñar sistemas de producción minimizando las pérdidas de recursos para hacer frente al gran problema de estancamiento y baja productividad en la industria de la construcción.

Lean en la industria de la construcción, así como en otros sectores productivos, promueve un mejoramiento continuo en los procesos a través de una reducción de pérdidas y un aumento en el valor del producto o servicio para el cliente final. Dentro de las pérdidas se puede encontrar todo lo que corresponda a tiempo desaprovechado, procesos innecesarios, recursos mal gastados, entre otras actividades que no agreguen valor al producto final.

El sector de la construcción se caracteriza por una gran

1. INTRODUCTION

The construction industry has an important environmental impact, due to construction of buildings as such, and for the use of them during their life-time [1]. *Lean Construction*, or waste-free construction, is an approach for the management and production in the field of construction based on the production system of Toyota [2]. In addition, it is aimed to make processes and design production systems more efficient by diminishing resource wastes, so tackling the problem of stagnation and low productivity in the construction industry.

Lean in the construction industry, as well as in other productive sectors, promotes a continuous improvement in the processes through waste reduction and an increase in the product or service value for the final client. Several types of wastes exist, for example wastes related to time, unnecessary processes, deficiently spent resources, among others activities that do not add value to the end product or service.

The construction field is characterized by a numerous amount of activities that do not add any value in their

cantidad de actividades que no agregan valor en sus procesos y que llevan a una baja productividad. Por lo tanto, el desarrollo de metodologías de análisis, mejoramiento de procesos y la introducción de nuevas técnicas de producción que contemplen un mejoramiento continuo pueden tener un importante impacto en la productividad y calidad de la construcción. Herramientas propuestas por la comunidad científica *Lean* son el **Diagrama de Ishikawa**, el **análisis de 5 porqués** y el **reporte A3**, que permiten identificar las pérdidas más importantes en una obra de construcción y realizar mejoras para eliminarlas o reducirlas.

El diagrama de Ishikawa es una representación de un análisis causa-efecto que se puede realizar para cualquier tipo de resultado. Este diagrama permite ordenar y clasificar las distintas causas por la que se estaría generando un efecto. Así, se utiliza para reconocer las causas más importantes que lo generan, con el fin de intervenir en ellas y modificar la respuesta que están motivando [3].

El análisis de 5 porqués se realiza para identificar la causa raíz que generó un efecto. Funciona preguntando una primera vez por qué sucedió dicho efecto y, a la respuesta de esa pregunta, preguntar nuevamente por qué sucedió. Se realiza este mismo procedimiento hasta preguntar cinco veces por qué sucedió y al completarlos se encuentra la causa raíz que provocó el efecto inicialmente. Esta causa raíz es la que hay que modificar en caso de querer alterar el efecto que se produce. Por ejemplo, en caso de que el efecto sea un problema cuya repetición no es deseable, la forma de eliminar el problema es actuando sobre la causa raíz para solucionarlo desde su origen y no generar soluciones momentáneas [3].

El reporte A3 es una forma de representar un plan de acción, en el cual se incluyen los objetivos, la metodología, los agentes implicados, entre otros componentes. Se realiza en un formato de papel tamaño A3 para tener un resumen del plan de acción a realizar e ir realizando actualizaciones periódicas a este reporte, de acuerdo al avance y a los resultados obtenidos en el curso de la implementación [3].

Conforme a la utilización de dichas tres herramientas *Lean*, en el presente estudio se explica la metodología y los resultados correspondientes a la investigación «Mejorando la Productividad en Terreno con *Lean* Construction y sus Beneficios Medioambientales Asociados», realizada en el contexto del Grupo Colaborativo GEPUC, «Construyendo Excelencia». El objetivo general de esta investigación es aplicar herramientas *Lean* a una obra de construcción y determinar el cambio en el impacto ambiental que estas permiten debido al cambio en los recursos consumidos. El impacto ambiental se medirá en términos de kilogramos de dióxido de carbono equivalente emitido (kg de CO₂-eq). Es importante notar que las emisiones cuantificadas corresponden únicamente a las emitidas por los materiales utilizados. Un análisis más riguroso podría incorporar las emisiones de los trabajadores por las horas trabajadas [4].

processes leading to a low productivity. Therefore, the development of analysis methodologies, improvement of processes and the introduction of new production techniques that imply continuous improvement, can have an important impact in the productivity and quality of construction. Some of the tools suggested by the *Lean* scientific community are the Ishikawa Diagram, the 5 Whys Analysis and the A3 report, which allow to identify the most important wastes in a construction site and to carry on improvements to eliminate them or to reduce them.

The Ishikawa diagram is a representation of a cause-and-effect analysis that can be applied for any type of effect. This diagram allows to order and to classify the different causes by which an effect would be generated. Thus, it is used to recognize the most important causes creating the effect, in order to take part in them and to modify the response they are creating [3].

The 5 Whys Analysis is intended to identify the root cause generating an effect. It works by asking one first time why this effect occurred and, to the answer of that question, to ask again why it occurred. This same procedure is done until asking five times why it happened and when completing them, the root cause of the effect is found. This root cause is the one that have to be modified if the aim is to alter the arising effect. For example, in case the effect is a problem whose repetition is undesirable, the way to eliminate the problem is acting on the root cause for it to be solved from its origin and do not create temporary solutions [3].

The A3 report is a form to represent an action plan, in which the objectives, the methodology, the implied agents, among other components, are included. It is documented in an A3 format paper to have a summary of the action plan allowing periodic updates to this report, according to the progress and to the results obtained during implementation [3].

According to the use of those three *Lean* tools, the methodology and the results of the research “Improving In-Field Productivity with *Lean* Construction and its Associated Environmental Benefits” are explained in the present research, which was done in the context of the Collaborative Group of GEPUC, called “Building up Excellence”. The research general objective is to apply *Lean* tools to a construction site and to determine the change of the environmental impact due to the change in consumed resources. The environmental impact will be measured in terms of kilograms of equivalent carbon dioxide (kg of CO₂-eq) emitted. It is important to notice that quantified emissions only correspond to the emitted ones by the materials used. A more rigorous analysis could incorporate the emissions from workers during the hours worked [4].

The specific objectives are i) introducing the participants of the investigation in the concepts of *Lean Construction*, ii) identifying more frequent wastes and their causes, iii)

Los objetivos específicos son i) introducir a los participantes de la investigación en conceptos de *Lean Construction*, ii) identificar pérdidas más frecuentes y sus causas, iii) capacitar a los participantes en la aplicación de tres herramientas *Lean* —Diagrama de Ishikawa, análisis de 5 porque's y reporte A3—, iv) generar un registro audiovisual de la ejecución de una partida crítica y v) determinar las emisiones de dióxido de carbono producidas por el uso de los materiales. Es importante notar que las herramientas implementadas en esta partida de construcción podrían ser aplicadas en cualquier otra partida, ya que son utilizadas para mejorar el rendimiento de los trabajadores que ejecutan la actividad. La partida seleccionada en particular no posee ninguna característica especial que permita implementar las herramientas; fue seleccionada por estar siendo ejecutada durante la duración de toda la investigación.

2. METODOLOGÍA

El estudio consistió en la intervención a una obra en particular de una empresa constructora, consistente en la construcción de un Centro de Salud Familiar (CESFAM). En esta obra se seleccionó la partida de instalación de cerámicas en muros y pisos para ser analizada. Los participantes de la investigación fueron siete, entre estos, el administrador de obra y otros involucrados en la ejecución de dicha partida.

2.1. Primera visita a proyecto

Se realizó una primera visita a la obra seleccionada por la empresa constructora. En esta sesión, se llevó a cabo tres etapas. En primer lugar, un **taller de identificación de pérdidas** [5] presentes en la obra seleccionada que consistía en cuatro encuestas. La primera para identificar las principales pérdidas de la obra, la segunda para determinar cuáles eran las causas por las que se generaban las pérdidas, la tercera para hacer un cruce entre cada pérdida y su causa más común, y la cuarta para determinar las 5 pérdidas más frecuentes y asignarles un grado de importancia. Estas cuatro encuestas se completaron para un set de pérdidas tradicionales en la construcción y para un set de pérdidas que tienen relación directa con impactos ambientales y sociales. En segundo lugar, una **capacitación** en la implementación de tres herramientas *Lean*: Diagrama de Ishikawa, análisis de 5 porque's y reporte A3. En tercer lugar, una **grabación** de la ejecución de la partida seleccionada (1 h), en la que se pudieran identificar pérdidas y sus causas.

Los datos recolectados a través de la primera y tercera etapa, junto con información requerida a la empresa respecto a los rendimientos de la partida seleccionada, comenzaron a ser analizados para generar un informe de las pérdidas más frecuentes y sus causas.

training the participants in the application of the three *Lean* tools -Ishikawa Diagram, analysis of the 5 Whys and A3 report-, iv) elaborating an audio-visual record of a construction operation, and v) determining carbon dioxide emissions produced by the use of the materials. It is important to notice that the tools implemented in this construction operation could be applied in any other operation, since they are used to improve workers' performance who executes the activity. The selected operation in particular does not present any special feature that may allow implementation of the tools; it was selected only because it was being executed during the whole research.

2. METHODOLOGY

The study consisted of the intervention to a particular construction site of a Family Health Centre (CESFAM). In this work, the operation of the installation of ceramics on walls and floors was selected for analysis. There were seven participants in the research, the project manager and other individuals involved in the execution of this operation.

2.1. First visit to the project site

A first visit to the construction site selected by the construction company took place. In this session, three stages were carried out. First of all, a **workshop on identification of wastes** [5] present in the selected operation, which consisted on four surveys. The first one for identifying the main wastes in the operation, the second one for determining which were the main causes of wastes; the third one for crossing data between each waste and the most common cause; and the fourth for determining the 5 most frequent wastes and assigning them a relevance score. These four surveys were completed for a set of traditional wastes in the construction site and for a set of wastes directly related to environmental and social impacts. Secondly, a **training** in the implementation of the three *Lean* tools: Ishikawa Diagram, 5 Whys analysis and A3 report. Thirdly, a **recording** of the selected item execution (1 h), where wastes and their causes could be identified

Data collected through the first and third stage, along with the information requested to the company with respect to the selected operation performance, were analyzed to prepare a report of the most frequent wastes and its causes.

2.2. Mesa de trabajo

Se efectuó una mesa de trabajo en la que participaron los administradores de obra de cada una de las empresas. En esta instancia se expusieron los resultados obtenidos de la primera visita y se comenzó con la elaboración de un reporte A3 que resumiera el plan de acción de cada empresa para aplicar las herramientas *Lean* en terreno.

2.3. Segunda visita a proyecto

Una segunda visita fue realizada al proyecto de cada empresa. En esta instancia se grabó durante aproximadamente 1 h la partida seleccionada con el fin de poder identificar las mejoras efectuadas en terreno. Además, se efectuó una segunda encuesta a cada uno de los involucrados en la actividad crítica seleccionada, la que buscaba identificar la percepción de los participantes acerca de las mejoras realizadas y la concientización que el taller había promovido en los involucrados en la partida. Por último, en esta instancia se le solicitó a los administradores que informaran las nuevas mediciones de la productividad alcanzada, luego de aplicar el plan de acción con las herramientas *Lean*, contempladas en la investigación.

2.4. Cuantificación de impactos

En esta etapa se analizó la información recolectada por la segunda encuesta y la segunda grabación en terreno. Con esta información se realizó una cuantificación del impacto ambiental que se provocaba con los rendimientos iniciales en comparación con los rendimientos finales alcanzados. Los resultados obtenidos se utilizaron para cuantificar la masa de CO₂-eq. que se emite con cada uno de los rendimientos.

2.5. Reunión de cierre

En la reunión de cierre se expusieron los resultados obtenidos en la investigación a los administradores de obra y directivos de cada empresa. En esta instancia también se generó una conversación acerca de buenas prácticas de cada una de las empresas, a modo de ejemplo, para que las otras también las implementaran.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos en la Etapa 1 acerca de las encuestas del taller de detección de pérdidas. En segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos en la Etapa 2, relacionada con la cuantificación del impacto ambiental de la ejecución de la partida. Para finalizar, se realiza una interpretación de los resultados obtenidos en las Etapas 1 y 2.

2.2. Work board

A work group with the project managers of each company took place where the results obtained from the first visit were exhibited and an A3 report started to be prepared, which summarized the action plan of each company for applying the *Lean* tools in the job site.

2.3. Second visit to the project site

A second visit took place to the construction site of each company and the selected item was recorded during approximately 1 h in order to identify in-field improvements. In addition, a second survey to the parties involved in the selected critical activity was carried out, which looked for the identification of the participants' perception about the improvements and the awareness obtained from the workshop and its influence over the ones involved in the item. Finally, the project managers were asked to inform about the new output measurements after applying the action plan by using the *Lean* tools included in the research.

2.4. Impact quantification

At this stage, the information collected through the second survey and the second in-field recording were analyzed. With this information a quantification of the environmental impact resulting from the initial output compared with the final one obtained was determined. Final results were used to quantify the mass of equivalent CO₂ emitted by the consumption of resources.

2.5. Closing meeting

In the closing meeting the investigation results were presented to the project managers of each company and a conversation about good practices was held with each of the companies, as an example, so that the other could also implement them.

3. RESULTS AND DISCUSSION

First, the results of Stage 1 regarding the surveys carried out in the workshop about the detection of wastes are presented. Second, the results of Stage 2, related to the quantification of the environmental impact of the item execution are presented. Finally, an interpretation of the obtained results in both Stages is done.

3.1. Resultados etapa 1

De la primera encuesta realizada en el taller, junto con lo capturado en los registros audiovisuales, se determinó que las pérdidas tradicionales más frecuentes son rehacer el trabajo, cometer errores en la ejecución de la partida y tener retraso en las actividades. Para el caso de las pérdidas con relación a impactos sociales y ambientales, se tiene que las más frecuentes son pérdida de materiales no utilizados, deterioro de materiales y arriendo de equipos que no se utilizan.

Con las respuestas de la segunda encuesta que debieron completar los participantes se graficó cada fuente de pérdida y el porcentaje del equipo que la mencionó como frecuente (**Figura 1**). Los resultados mostraron que nadie mencionó “excesiva burocracia” como pérdida, mientras que un 86% de los participantes nombraron la falta de control y falta de mano de obra como fuentes de pérdidas frecuentes en la obra.

De la tercera encuesta se obtuvo que las relaciones pérdidas- causa de las pérdidas más frecuentes son rehacer el trabajo debido a una falta de control, tener un retraso en las actividades debido a una mala planificación, rehacer trabajo debido a que se cuenta con información poco clara y trabajo sin hacer por falta de mano de obra. Con respecto a las pérdidas con impactos sociales y medioambientales, se obtuvo que la pérdida más frecuente era la de materiales y su causa correspondía a la falta de control.

Finalmente, con las respuestas de la última encuesta se obtiene que la pérdida tradicional más importante para la mayoría de los participantes de la investigación es rehacer el trabajo (ver **Figura 2**). Esta pérdida fue clasificada como importante por los 7 participantes y tuvo un puntuación de 3,85 en promedio (donde 0 es no importante y 5 es muy importante). Los resultados de esta misma encuesta para el conjunto de pérdidas que tienen relación directa

3.1. Stage 1 results

From the first survey in the workshop, along with the captured images in the audio-visual recordings, it was determined that the most frequent traditional wastes are the work remake, errors in the execution of the operation and delay in the activities. In the case of wastes in relation to social and environmental impacts, the most frequent wastes are non-used- materials, deterioration of materials and equipment leased not used.

Figure 1 shows the answers of the second survey completed by the participants, each cause of waste and the percentage of the team who referred to it as ‘frequent’. Results shows that nobody mentioned ‘excessive bureaucracy’ as an important cause of waste, whereas 86% of the participants mentioned the lack of control and lack of workforce as main causes of wastes.

The third survey demonstrated that the waste-cause relation of the most frequent wastes are work remake due to a lack of control, delay in the activities due to deficient planning, work remake due to not having clear information and work not carried out due to lack of workforce. Regarding the wastes producing social and environmental impacts, the most frequent was wasting materials caused by lack of control.

Finally, with the answers of the last survey it is obtained that the most important traditional waste for the majority of the participants in the research is the work remake (see **Figure 2**). This waste was classified as relevant by all participants and had an average score of 3.85 (where 0 stands for not relevant and 5 for highly relevant). The results of this survey for the set of wastes having direct relationship with environmental and social impacts showed that the most important and most frequently waste mentioned by the

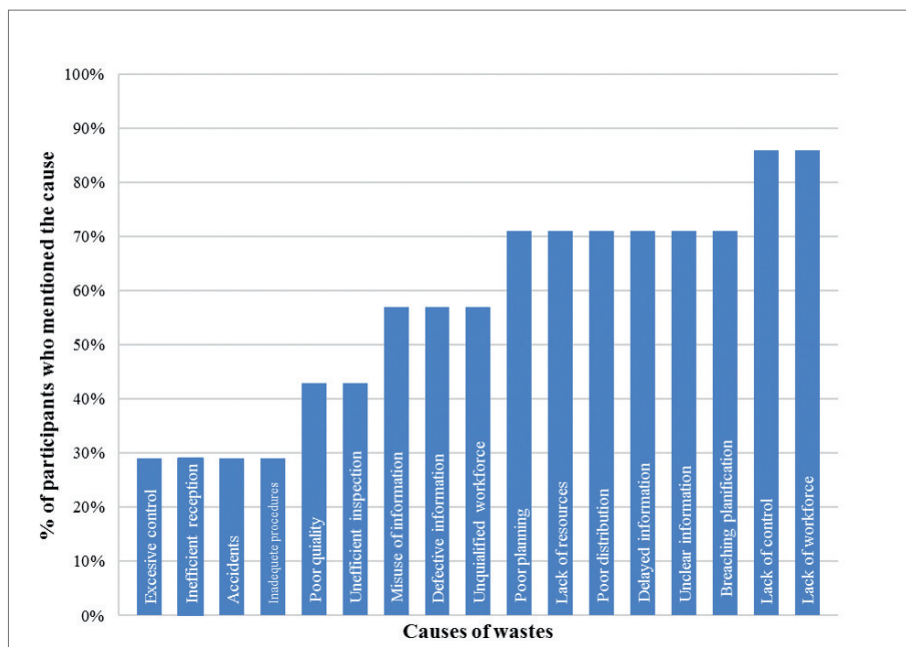


Figura 1. Causas frecuentes de desperdicios identificadas por los participantes.

Figure 1. Causes of frequent wastes identified by the participants.

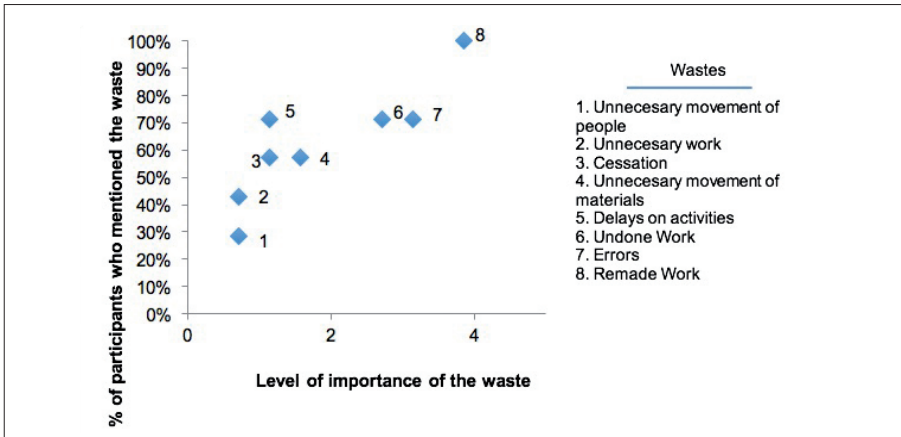


Figura 2. Nivel de importancia de pérdidas.

Figure 2. Relevance level of wastes.

con impactos ambientales y sociales mostraron que la más importante y más nombrada por los participantes es la de materiales, la que refiere al desecho de materiales que no fueron utilizados en la obra. Esta pérdida fue identificada como importante por todos los participantes con una puntuación de 3,14 de un máximo de 5 (ver Figura 3).

Al analizar de manera global los resultados obtenidos en la primera etapa es posible establecer que en la construcción hay múltiples pérdidas presentes que son claramente reconocibles por los involucrados en la partida. Estas pérdidas tienen sus causas, las cuales fundamentalmente se deben a que el trabajo se ejecuta de mala manera porque no se ofrecen las condiciones óptimas. Para que estas causas que generan las pérdidas no se repitan debe haber una buena planificación de la ejecución de la partida, de modo de prever y controlar las pérdidas ocasionadas.

participants is wasting materials not used. This waste was classified as relevant by all the participants getting a score of 3.14 out of a top of 5 (see Figure 3).

When analyzing the results obtained in the first stage it is possible to establish that there are multiple wastes in construction that are clearly recognizable by the parties involved in the operation execution. These wastes have their causes essentially due to executing the work in a wrong way, because the optimal conditions are not present. In order to avoid repeating the causes generating wastes, a good planning of the operation execution is required, so as to anticipate and to control the resulting wastes.

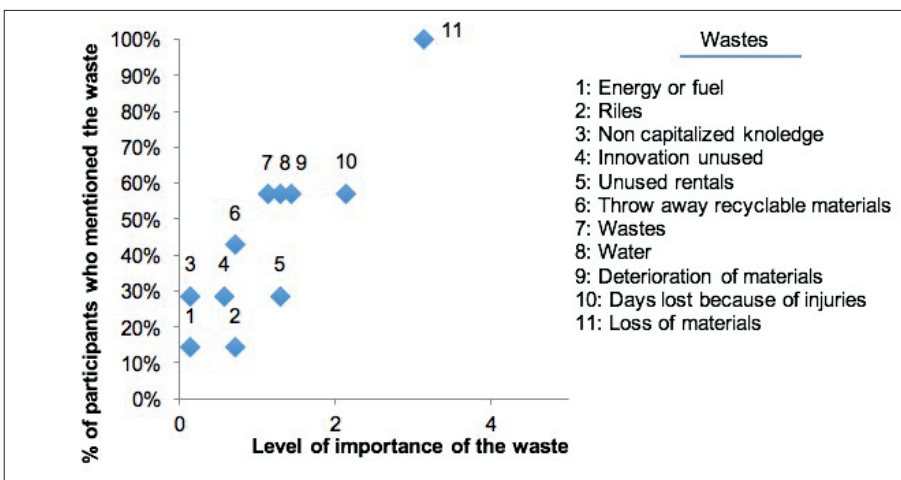


Figura 3. Nivel de importancia de pérdidas medioambientales y sociales.

Figure 3. Relevance level of environmental and social wastes.

3.2. Resultados etapa 2

La Etapa 2 contempla el análisis del impacto medioambiental que genera la instalación de cerámicas en muros y pisos en una obra de construcción. Este impacto se cuantifica calculando las emisiones de dióxido de carbono que se generan por el tipo y cantidad de material que se utiliza en esta partida.

En primer lugar, se muestra el cálculo realizado para el caso de las cerámicas utilizadas en la partida de muro, luego los resultados obtenidos y la interpretación de estos. En segundo lugar, se evidencian los resultados para el caso del adhesivo utilizado en muros. En tercer lugar, se consideran los resultados obtenidos en el uso de cerámica y adhesivo para el piso. Finalmente, se realiza una interpretación general de los resultados. Estos se describen en la **Tabla 1**; es decir, las emisiones por la partida de cerámicas de muro y piso. Para el caso del piso en la semana 5 no hay emisiones, porque la partida ya había finalizado para esa fecha.

Asimismo, para una mejor comprensión de los resultados, el cálculo para obtener las emisiones reales de la semana 1 correspondiente a la partida de cerámica de muros corresponde a: la cantidad de cerámica usada (416 m^2), multiplicado por las emisiones de producir 1 m^2 de cerámica de muros ($15,9 \text{ kg/m}^2$) [6], lo que resulta $6.614,4 \text{ kg}$ de CO_2 -eq. Lo anterior se replica para todos los cálculos de emisiones, donde para las emisiones ideales se ocupó el área geométrica cubierta con la cerámica. Para las emisiones sin intervención se utilizó el área de cerámica que se habría trabajado si se hubiera mantenido por las cinco semanas el rendimiento de la semana 1. Finalmente, para las emisiones con el mejor rendimiento se consideró el área de cerámica que se emplearía trabajando al mejor rendimiento. Por ejemplo, para las emisiones sin intervención se utilizó el rendimiento de la semana 1 que es igual a $0,904$, por lo tanto se dividió el área geométrica ($376,15$) en $0,904$, resultado en $416,1 \text{ m}^2$. Luego, esta área se multiplicó por $15,9 \text{ kg/m}^2$ y así se obtuvieron los 6.615 kg de CO_2 -eq.

3.2. Stage 2 results

Stage 2 includes the analysis of the environmental impact by the ceramic installation in walls and floors in a construction site. This impact is quantified by calculating the emissions of carbon dioxide by the type and amount of material that is used.

First, calculation for ceramics in walls and floor is shown and subsequently the obtained results and the interpretation of them. Second, the results regarding the adhesive used on walls and floor are shown. Third, the obtained results for ceramic and adhesive use are considered. Finally, a general interpretation of the results is performed. These are described in **Table 1**. In regard to the floor during week 5, there were no emissions because that batch was finished by that time.

For a better understanding, the emissions calculation of week 1 corresponding to ceramics of walls is explained: the amount of ceramics (416 m^2), multiplied by the emissions to produce 1 m^2 of wall ceramics (15.9 kg/m^2) [6], which is $6,614.4 \text{ kg}$ of CO_2 are the emissions of using that amount of ceramics. The previous action is replicated for all the emission calculations, where the geometric area covered with ceramics is set as the ideal emission level. For the emissions with no intervention, the area of ceramics that would have been worked on was used, if the output of week one would have been maintained during the five weeks of work. Finally, for the emissions with best performance, the ceramic area used by working with the best week performance was considered. For example, for the emissions with no intervention the output of week 1 was considered, which equals 0.904 , therefore the geometric area (376.15) was divided by 0.904 , resulting in 416.1 m^2 . Then, this area was multiplied by 15.9 kg/m^2 and thus $6,615 \text{ kg}$ of CO_2 -eq were obtained.

The difference between real emissions and what it would be ideally emitted in the case of walls is $1,024 \text{ kg}$ of equivalent CO_2 ; that is, if there were not inefficiencies or wastes in

Table 1. Summary of emissions by ceramics used in walls and floor

	Real emitted during operation execution		Ideal (with optimal performance)		Without intervention (with performance prior to intervention)		Best performance (with the best reached performance)	
	Wall	Floor	Wall	Floor	Wall	Floor	Wall	Floor
Week 1	6,614	5,810	5,980	5,293	6,615	5,810	6,004	5,390
Week 2	1,894	2,188	1,733	2,089	1,917	2,293	1,740	2,127
Week 3	3,192	1,433	3,178	1,407	3,515	1,544	3,190	1,433
Week 4	2,690	875	2,517	881	2,784	967	2,527	897
Week 5	520	0	477	0	528	0	479	0
Total	14,912	10,308	13,887	9,671	15,362	10,616	13,943	9,848

La diferencia entre lo realmente emitido y lo que idealmente se debería emitir en el caso de muros es de 1.024 kg de CO₂-eq, esto es, si en la partida de cerámica de muros no hubieran ineficiencias ni pérdidas. La diferencia entre lo que realmente se emitió y lo que se esperaba que fuera emitido en el caso de muros sin la intervención es de 450 kg de CO₂-eq. Esta diferencia podría ser atribuida a la implementación de herramientas *Lean*, aunque no se puede asegurar con plena certeza debido a que podrían existir otros factores externos a la investigación que no fueron controlados, como por ejemplo si existieron o no cambios de personal. Luego de la aplicación de las herramientas *Lean* contempladas en la investigación, se evidenció un aumento en el rendimiento en el caso de muros en el uso de cerámica, siendo el mejor 0,996 alcanzado en la semana 3. Si este hubiera sido el rendimiento de las cinco semanas se habrían dejado de emitir 969 kg de CO₂-eq. Dicha interpretación de los resultados es replicable tanto para el caso de cerámica utilizada en piso, como en el de adhesivo utilizado en muros y pisos.

A continuación, en la **Tabla 2** se ofrece un detalle de las emisiones por la partida de cerámicas de muro y piso debido al adhesivo utilizado. El rendimiento óptimo corresponde al recomendado por el productor [7], equivalente a 1,6 kg/m² por cada mm de espesor. El espesor promedio utilizado en muros es de 3 mm, por lo tanto el rendimiento óptimo será de 16 kg/m². En el caso de piso se utilizan 5 mm de espesor de adhesivo, por lo que el rendimiento óptimo utilizado es igual a 4,8 kg/m².

Al analizar los resultados obtenidos se puede establecer que las emisiones reales pueden ser reducidas hasta el punto de alcanzar las ideales. Esto significaría que los procesos están rindiendo en su estado más óptimo y que se está ejecutando la partida sin pérdidas e ineficiencias. Sin embargo, todos los procesos tienen actividades que son necesarias, pero que no agregan valor, por lo tanto no es posible reducir en un 100% las pérdidas presentes. Aun así, los resultados obtenidos demuestran que las emisiones

the ceramics installation of walls. The difference between what was really emitted and what was expected without the intervention is 450 kg of equivalent CO₂. This difference could be attributed to the implementation of *Lean* tools, although it is not possible to certainly assure this because some other external factors can exist, which were not controlled, as for example if personnel changes took place or not. After the application of *Lean* tools contemplated in the research, there was an output increase in the use of ceramics in walls, being 0.996 the best score reached in week 3. If it had been the output of the five weeks, then 969 kg of CO₂-eq had been avoided from being produced. Such interpretation of the results is replicable, either for ceramics used in the floor and for the adhesive used in walls and floors.

Table 2 shows the emissions per ceramic installation for walls and floor due to the use of adhesive. The optimal output used is the recommended by the manufacturer [7], equivalent to 1.6 kg/m² by each mm of thickness. Thickness average used in walls is 3 mm, therefore the optimal output will be 16 kg/m². In the case of floors, 5 mm-thick adhesives is used, therefore the optimal output will be 4.8 kg/m² for floors.

When analyzing these results, it can be established that real emissions can be reduced up to the point to reach the ideal ones. This means that processes perform at their optimal level, so the items are being executed without wastes and inefficiencies. Nevertheless, all the processes include some necessary activities, but that do not add any value, therefore it is not possible to reduce current wastes in a 100%. Even so, the obtained results demonstrate that emissions can be reduced significantly with a good implementation of *Lean* tools to the processes.

Still, it is important to emphasize that these tools must be implemented correctly and with the maximum follow-up possible, to promote a culture of continuous improvement throughout the project. As it has been indicated in other research, the *Lean* tools are not self-sustainable without a

Table 2.- Summary of emissions per adhesive used in walls and floor

	Real emitted during the item execution		Ideal (with optimal output)		Without intervention (with the output prior to intervention)		Better yield (with the best reached output)	
	Wall	Floor	Wall	Floor	Wall	Floor	Wall	Floor
Week 1	447	1,271	283	574	447	1,271	343	1,192
Week 2	193	571	94	275	148	609	114	571
Week 3	229	405	172	185	272	410	209	384
Week 4	220	310	136	116	215	256	165	241
Week 5	31	0	25	0	40	0	31	0
Total	1,122	2,558	712	1,151	1,125	2,548	864	2,390

pueden ser reducidas significativamente con una buena implementación de herramientas *Lean* a los procesos.

Aún así, es importante destacar que estas herramientas deben ser implementadas correctamente y con el mayor seguimiento posible, de forma tal de promover una cultura de mejora continua a lo largo del proyecto. Tal como ha sido señalado en otras investigaciones, las herramientas *Lean* no se sustentan por sí solas sin un esfuerzo transversal en cuanto a la cultura y filosofía de las organizaciones. Esto significa que los involucrados en la partida, desde cargos ejecutivos hasta cargos operacionales, deben estar presentes en la intervención y ser parte del proceso de mejora, de manera de que puedan aumentar y maximizar la productividad de las actividades a través de mecanismos que ellos mismos implementen.

4. CONCLUSIONES

La presente investigación evidenció que existe un potencial latente en la implementación de herramientas *Lean* que puedan beneficiar el aumento de productividad en conjunto con la reducción de emisiones de CO₂. En el caso particular estudiado se logró una disminución de 751 kg de CO₂ que se habrían emitido en caso de no haber realizado cambios en la instalación de cerámicas. Considerando lo anterior, se recomienda a las empresas destinar tiempo y recursos para que este tipo de iniciativas sean replicadas internamente en otras partidas y proyectos con el fin de generar una cultura en donde la reducción de pérdidas y la creación de valor sea constante. Si las personas involucradas en esta investigación son capaces de visualizar la usabilidad de este tipo de investigaciones, será posible crear organizaciones en donde la mejora continua sea parte diaria de sus procesos. Lo anterior se suma al beneficio que este tipo de acciones pueda generar en el ecosistema a través de una reducción en los recursos destinados a cada proyecto.

Para lograr generar mejoras se recomienda que las empresas realicen talleres internos basados en los conceptos de pérdida y valor, identificando las pérdidas más comunes y sus fuentes. Luego, a partir de lo hallado, se pueden implementar medidas correctivas para eliminar total o parcialmente dichas pérdidas. Es necesario que las medidas implementadas sean comunicadas a todos los involucrados en la partida para generar una conciencia de mejora continua. Asimismo, será favorable incentivar que en otros proyectos se aplique lo aprendido para generar conocimiento. Finalmente, es primordial que la mejora sea continua, por lo tanto se deben realizar permanentemente análisis acerca de las pérdidas y reducirlas. Para este objetivo, los trabajadores son agentes claves en el buen desarrollo de dichas prácticas, por lo que fomentar con posibles incentivos a las cuadrillas más productivas puede lograr alinear los propósitos de todas las partes involucradas y realizar mejoras aún más importantes.

cross-sectional effort as far as the culture and philosophy of the organizations is concerned. It means that the involved parties in the operation execution, from executive positions to operational positions, must be present in the intervention and be part of the improvement process, so that they can increase and maximize productivity through mechanisms that can be implemented by them.

4. CONCLUSIONS

This research proved that there is a latent potential in the implementation of *Lean* tools, which can benefit the increase of productivity through a reduction of CO₂ emissions. In this particular case study, a decrease of 751 kg of CO₂ was obtained, which would have been emitted if no changes were made in the ceramic installation process. Considering the aforementioned, it is recommended to the companies to devote time and resources for this type of initiatives to implement *Lean* in other construction operations and projects in order to create a culture where waste reduction and the creation of value become a constant. If the practitioners involved in this research are able to visualize the usability of this type of research, it will be possible to create organizations where continuous improvement is a daily routine in their processes. The previous can be added to the benefits that this type of action can create on the environment, through a reduction of resource consumption in each project.

In order to manage the generation of improvements, we recommend to companies to carry out internal workshops based on the concepts of wastes and value, identifying the most common wastes and their causes. Then, considering the findings, corrective measures can be taken to eliminate these wastes, totally or partially. It is necessary to communicate the implemented measures to all the involved parties to create continuous improvement consciousness. Also, it will be positive to foster consciousness in other projects to create knowledge. It is fundamental that the improvement must be continuous; therefore practitioners should permanently analyze wastes to reduce them. For this purpose, workers are key agents in the correct implementation of these *Lean* practices, awarding incentives to the most productive groups can lead to align the interests of all involved parties and accomplish even more important improvements.

El presente estudio ha logrado identificar que *Lean* y sus herramientas asociadas continúan siendo superficialmente usadas por las empresas y que conceptos claves como pérdidas y valor no son parte de un lenguaje común que dé cuenta de organizaciones más eficientes y amigables con el medio ambiente. Se propone que investigaciones futuras estén centradas en la generación de un lenguaje común a nivel de cada organización, que constituya la expresión de una cultura inspirada en el cambio y la mejora continua.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación de las empresas constructoras del grupo colaborativo de GEPUC (www.gepuc.cl) por darnos accesos a sus obras y datos para esta investigación.

The present study has identified that *Lean* tools are still superficially used by construction companies, and that key concepts such waste and value are not part of a common language, preventing companies to being more efficient and friendly with the environment. Future research should be centered in the generation of a common language to help in creating a culture inspired by change and continuous improvement in construction companies.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the construction companies belonging to the collaborative group of GEPUC (www.gepuc.cl), which allowed us access to its works and data for this research.

GLOSARIO

HERRAMIENTAS LEAN: son herramientas formuladas por la corriente *Lean*, que se puede aplicar a la industria de la construcción para gestionar la productividad.

DIAGRAMA DE ISHIKAWA: es una herramienta *Lean* que se usa para identificar las causas que puede tener un efecto.

ANÁLISIS DE 5 PORQUE'S: es una herramienta *Lean* que se utiliza para encontrar la causa raíz de un determinado efecto.

REPORTE A3: Es una herramienta *Lean*, la cual permite resumir un plan de acción a seguir en un formato de papel tamaño a3.

PARTIDAS: se le denomina partida a cada una de las distintas actividades que se realizan en una obra de construcción. Por ejemplo, la partida de cerámica hace referencia a la ejecución de la instalación de las cerámicas respectivas en una obra.

GLOSSARY

LEAN TOOLS: tools formulated by the *Lean* current that can be applied to construction industry to manage productivity.

ISHIKAWA DIAGRAM: it is a *Lean* tool used to identify causes that can have an effect.

5 WHYS ANALYSES: it is a *Lean* tool used to find the root cause of a certain effect.

A3REPORTS: it is a *Lean* tool, which allows summarizing an action plan to follow in a format of A3 paper.

ITEMS: each one of the different activities executed in a construction site. For example, the ceramics item makes reference to the execution of the installation of the respective ceramic in a work.

PRINCIPIO CIENTÍFICO

La cuantificación del impacto medioambiental, que se genera al ejecutar la partida de cerámica de muro y piso en una obra de construcción, se realiza considerando la cantidad del material usado y las emisiones de dióxido de carbono que eso significa. La cantidad de material utilizado fue medido en la obra en una etapa previa y otra posterior a la intervención; por lo que se obtiene el rendimiento para las dos etapas. Las emisiones de dióxido de carbono se obtienen de declaraciones ambientales de producto realizadas por productores de materiales similares al utilizado. Por lo tanto, al conocer la cantidad de material, se puede obtener el dióxido de carbono que se emitió por el uso de este.

SCIENTIFIC PRINCIPLE

This research quantifies the environmental impact generated when executing the item ceramics of wall and floor in a construction site, taking into account the amount of material used and the carbon dioxide emissions due to the material fabrication. The amount of material used was measured in the work before and after an intervention using *Lean* tools, so the gap between the two stages is obtained. Carbon dioxide emissions are obtained from environmental product declarations by manufacturers of similar materials. Therefore, when knowing the amount of material, the amount of carbon dioxide emitted by the use of this material can be obtained.

REFERENCES

1. NATIONAL INSULATORS. *Bekron* [on line] [ref.5 of July 2016]. Available on the Web: <http://www.aislantesnacionales.cl/pdfs/bekron.pdf>
2. ALARCÓN, Luis Fernando. *Identification and Reduction of Losses in the Construction Industry: Tools and Procedures*. Santiago: Lom editions, 2001.
3. CHOU, J. and YEH, K. "Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction". *Journal of Cleaner Production* (Impact Factor:3.84).2015, N°.101, p.137-147.
4. HANG, T. and DOMFELD, D. "Energy Used per Worker-Hour: Evaluating Contribution of Labor to Manufacturing Energy Use". *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, June 11th-13th, 2007*.
5. LIKER, Jeffrey. *Toyota Way: Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: MacGraw-Hill, 2004. 330 p. ISBN: 978-0071392310
6. KOSKELA, L. "Application of the New Production Philosophy to Construction". *Technical report*. 1992, N°. 72, 75 p.
7. SERANIT. *Environmental Product Declaration: for Wall Tiles in accordance with EN15804 and ISO14025* [on line], 2015 [ref. de 5 of July, 2016]. Available on the Web: <http://gryphon.environdec.com/data/files/6/11005/epd676en%20v1.1.pdf>

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Camila
Fuenzalida

Benjamín
Fischer

Paz
Arroyo

Jose Luis
Salvatierra