

Construction labor-productivity assessment using six-sigma tools: a case of study

Evaluación de la productividad de la mano de obra en construcción usando herramientas six-sigma: un caso de estudio

HÉCTOR HERNÁNDEZ

Magíster en Construcción, Escuela de Obras Civiles y Construcción. Ingeniero Constructor, Escuela de Obras Civiles y Construcción. Universidad Central de Chile. hhernandezl@ucentral.cl

GERALD OLIVERES

Ingeniero Constructor, Escuela de Obras Civiles y Construcción. Universidad Central de Chile. gerald.olivares@alumnos.ucentral.cl

- ◊ The concreting crew productivity in the concreting of beams and slabs of a residential building was investigated.
- ◊ 44 observations grouped in 11 samples were evaluated using Six-Sigma tools.
- ◊ The average productivity was 1.47 m³/mh and the work pace was 662.6 m² per week.
- ◊ The observed productivities responded to the natural variability of the process.
- ◊ A requirement higher than 3 σ level is somewhat difficult to fulfill in the construction sector.

In the construction sector labor-productivity growth just 1% on average the last two decades, which is very low compared to the 2,8% for the global economy or the 3,6% for the manufacturing sector. This shows that every year significant amounts of money and resources, both human and material, are lost due to inefficient processes in our industry. This issue gets worse due to the majority of construction companies do not have formal measuring systems a site level, what is necessary for the determination of productivity indicators. So the lack of measurement is the main problem involved in productivity improvement. In this scenario, a site labor-productivity case study is analyzed with the purpose of showing some productivity data and disclose some issues that occur when an incipient labor-productivity measurement processing based on Six-Sigma tools is implemented. The research is based on the cycle of beam and slab concreting work at three levels of a residential building superstructure. The measurements were performed for approximately four weeks, where 44 pours of pumped concrete were measured. The tools of the six-sigma approach provided a statistical structure that allowed to evaluate the concreting crew productivity in the case study. The results showed a work pace of 662.6 m² of concrete floor per week on average and, an averaged labor-productivity of 1.47 m³/mh with changes that responded to the natural process variability. Moreover, the process capability showed that concreting crew productivity variation did not meet the specification established for a typical 3 σ level, evidencing that a requirement above of 3 σ level is something difficult to fulfill in the construction sector since craft processes are in essence difficult to repeat with accuracy in a labor-intensive context.

Construction; Concreting; Labor-productivity; Six-Sigma

- ◊ Se investigó la productividad de la mano de obra en el hormigonado de vigas y losas de un edificio residencial.
- ◊ 44 observaciones agrupadas en 11 muestras fueron evaluadas a usando herramientas Six-Sigma.
- ◊ La productividad media resultó 1,47 m³/HH y el ritmo de trabajo fue de 662,6 m² por semana.
- ◊ Las productividades observadas respondieron a la variabilidad natural del proceso.
- ◊ Un requerimiento superior a 3 σ es difícil de cumplir en el sector de la construcción.

En el sector de la construcción, la productividad laboral creció sólo un 1% en promedio en las últimas dos décadas, lo que es muy bajo en comparación con el 2,8% de la economía mundial o el 3,6% del sector manufacturero. Esto demuestra que cada año se pierden importantes cantidades de dinero y recursos, tanto humanos como materiales, debido a procesos ineficientes en nuestra industria. Este problema se agrava debido a que la mayoría de las empresas constructoras no cuentan con sistemas formales de medición a nivel de obra, lo que es necesario para la determinación de los indicadores de productividad. Por lo tanto, la falta de medición es el principal problema implicado en la mejora de la productividad. En este escenario, un caso de estudio de productividad laboral en obra es analizado con el propósito de mostrar algunos datos de productividad y, revelar algunos problemas que ocurren cuando se implementa un proceso de medición de productividad laboral incipiente basado en herramientas Six-Sigma. La investigación se centró en el ciclo de hormigonado de vigas y losas en tres niveles de la superestructura de un edificio residencial. Las mediciones se realizaron durante aproximadamente cuatro semanas, donde se midieron 44 vertidos de hormigón bombeado. Las herramientas del enfoque six-sigma proporcionaron una estructura estadística que permitió evaluar la productividad del equipo de hormigonado en el caso de estudio. Los resultados mostraron un ritmo de trabajo de 662,6 m² de forjados de hormigón por semana en promedio y, una productividad laboral promedio de 1,47 m³/HH con cambios que respondieron a la variabilidad natural del proceso. Además, la capacidad del proceso mostró que la variación de la productividad del equipo de hormigonado no cumplía con la especificación establecida para un nivel típico de 3 σ , evidenciando que un requerimiento superior a 3 σ es algo difícil de cumplir en el sector de la construcción ya que los procesos artesanales son, en esencia, difíciles de repetir con precisión en contextos de uso de mano de obra intensivo.

Construcción; Hormigonado; Productividad de la Mano de Obra; Six-Sigma

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el crecimiento de la productividad laboral en el sector de la construcción promedió solo 1% anual en las últimas dos décadas. Indicador muy bajo en comparación con el 2,8% para la economía global o para el 3,4% del sector manufacturero [1].

Esto evidencia que cada año se pierden importantes sumas de dinero y recursos, tanto humanos como materiales, debido a los procesos ineficientes en nuestra Industria. Esto abre desafíos que deben ser asumidos por la industria de la construcción desde que no ha sido capaz de terminar los grandes proyectos en el tiempo, dentro de lo presupuestado o conforme a las especificaciones [2].

Para responder a este desafío es menester implementar adecuadamente aquellas buenas prácticas que han permitido al sector manufacturero aumentar en competitividad. Una de estas buenas prácticas es la medición y el control de sus procesos productivos a partir de los sistemas de mejora continuo de los procesos.

La medición y determinación de indicadores que permitan evidenciar cambios favorables en los procesos productivos son la regla en el sector manufacturero. Por tanto, algunas empresas de la industria de la construcción han optado por monitorizar el desempeño de sus procesos internos y externos con el ánimo de mejorar su competitividad a partir del aprendizaje del sector manufacturero, examinado la eficacia y la aplicabilidad de los instrumentos de medición y seguimiento que han derivado de la filosofía Six-sigma [3] [4].

Dado que no se puede mejorar aquello que no se puede medir, la medición de las variables que afectan la productividad debe ser la norma o premisa en los sistemas de mejora de los procesos. Haciendo necesarios la obtención de datos *in situ* sobre la producción y los recursos consumidos por los procesos constructivos (materiales, humanos, maquinarias, otros) que permitan evaluar los cambios en productividad y que sirvan de referencia para la industria de la construcción [5].

Los proyectos de construcción difieren de muchas maneras (diseño, ubicación, tamaño, etc.) y son muchos los factores que afectan la productividad del trabajo. Por lo tanto, resulta evidente que la productividad de la mano de obra en la industria de la construcción no es una tarea simple de mensurar, lo que es agravado debido a que la mayoría de las empresas constructoras no presentan procedimientos formales que permitan la medición de las variables que la afectan [6].

Así, la carencia de sistemas de medición formal es uno de los problemas más importantes implicado en la mejora de la productividad [5]. En este contexto, se muestra ventajoso estudiar la productividad de la mano de obra en los proyectos de construcción, mostrando datos de producción y productividad laboral, además de revelar algunos problemas a nivel de sitio que ocurren cuando se implementan procesos incipientes en la medición del trabajo.

En la industria de la construcción es conocido que el hormigonado es una de las partidas críticas en la materialización de la mayoría de los proyectos constructivos, pues los elementos estructurales de hormigón (cimientos, vigas, pilares, losas, muros, otros) son ítems importantes del presupuesto y de los programas de obra [7] [8].

Así, desde que resulta útil estudiar la productividad de la mano de obra en las partidas de hormigonado, el presente trabajo estudia el ciclo de hormigonado de vigas y losas en tres niveles de la superestructura de un edificio residencial en Santiago de Chile.

Lo anterior a partir del análisis de las mediciones de producción, de ritmo de trabajo y de productividad del equipo de hormigoneros; teniendo presente la clasificación del trabajo productivo, contributivo esencial e ineficaz [9].

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y VARIABLES DE ESTUDIO

Se buscó un edificio diseñado en hormigón armado que estuviera en etapa de construcción de supraestructura (obra gruesa), que estuviera sujeto a restricciones de operación en áreas urbanas, que su administración permitiera el acceso de una persona para tomar mediciones en la partida de hormigonado de vigas y losas que definirán el avance por piso y cuyo avance constructivo evitara sesgos por falta de experiencia en el equipo de trabajo.

De este modo, se seleccionó un edificio residencial de 12 plantas sobre rasante y una subterránea, con una superficie promedio de 852m² por planta, ubicado dentro del área metropolitana de Santiago de Chile.

Las mediciones se realizaron durante un periodo aproximado de 4 semanas, abarcando los pisos 6° al 8°. de la supraestructura de la edificación. El trabajo de medición debió ser coordinado con el equipo gestor del proyecto conforme a la programación del hormigonado de losas. Dividiendo la producción, en general, en 4 áreas por planta.

Esto se aprecia en la Fig. 1., donde cada color corresponde a un día programado de trabajo, es decir, a un ciclo de hormigonado (lote de producción) de losas y vigas del edificio. Los cortes corresponden a una aproximación y no reflejan con exactitud las juntas de hormigonado realizadas en obra.

Conforme a esto, se puede establecer una muestra de 11 ciclos de hormigonado (lotes de producción) para las losas y vigas entre los pisos 6° al 8°. Cada lote de producción de hormigonado incluye 4 observaciones, que correspondieron al vaciado de los camiones de hormigón en los frentes de trabajo (ver tabla 1). Esto derivó en la medición de 44 vertidos de hormigón bombeado durante el periodo de estudio, donde las mediciones cubrieron desde el inicio de la descarga del primer camión mezclador hasta la finalización de la unidad de producción previstas para la jornada de trabajo (lote de hormigón).



Figura. 1. Distribución del hormigonado de las losas y vigas para el piso 6.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 MEDICIÓN DEL TRABAJO Y PRODUCTIVIDAD

El trabajo se puede clasificar y distribuir conforme a las mediciones que se hagan de él en tres claros grupos: a) trabajo productivo o efectivo, b) trabajo contributorio esencial y c) trabajo ineficiente o no productivo [5][9].

El trabajo productivo aporta de manera directa a la producción, es decir, es aquel que refleja la producción (por ejemplo, verter hormigón). El trabajo contributorio no aporta directamente a la producción, pero es esencial para que exista producción (por ejemplo, recibir instrucciones). El trabajo ineficiente corresponde a aquel que no aporta valor o es innecesario, es decir, incluye no hacer nada o hacer algo que no sea importante para terminar el producto final [4].

La productividad puede ser definida como la maximización de la producción mientras se optimiza la utilización de los recursos, por tanto, suele ser representada por la Ecuación 1 [10]:

$$Productividad = \frac{Cantidad\ Producida}{Recursos\ empleados} \quad (1)$$

Donde la cantidad producida corresponde a la producción de obra, la que puede ser medida en unidades de físicas (m^2 , m^3 , m, litros, docenas, etc.) o unidades monetarias (euros, dólares, etc.), al igual que los recursos empleados, los que corresponden a los factores productivos de a) mano de obra, b) materiales y, c) equipamiento o maquinaria [6].

Por tanto, la productividad puede presentar distintas unidades, o bien, ser adimensional si las unidades de medida para la producción y los recursos empleados son iguales.

Por otro lado, considerando los diferentes tipos de recursos empleados en los procesos constructivos, es posible hablar de

las siguientes productividades: a) productividad de los materiales, b) productividad de la mano de obra y, c) productividad del equipamiento o maquinaria.

Siendo la productividad de la mano de obra un factor clave, pues corresponde al recurso productivo que en general fija los ritmos de trabajo en la construcción y es el recurso del cual dependen en gran medida la productividad de los otros insumos productivos (materiales y equipamiento o maquinaria) [10]. Para el contexto de esta investigación, la productividad del equipo de hormigonado será medida como la relación entre la producción del hormigón en m^3 y el recurso empleado en horas hombre (HH).

3.2 VARIABILIDAD ESPERADA EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La mayor utilización de recursos (mano de obra, materiales y equipamiento o maquinaria) está vinculado al aumento de los costos de construcción y, por tanto, a la falta de productividad dado que la producción esperada es fija (el proyecto).

Existen numerosos métodos de estimación que permiten medir la variabilidad en los costes de un proyecto. Sin embargo, estas estimaciones suelen tratarse como un valor determinístico basado en la experiencia y con frecuencia suelen calcularse como un porcentaje adicional sobre los presupuestos. Siendo una práctica el añadir un 10% de contingencia al costo estimado del proyecto, aunque sea algo difícil de justificar por el estimador [11].

Por otro lado, un estudio ha mostrado que la razón entre los costes finales del proyecto y los costes estimados del proyecto es sustancialmente más alta de lo que ha sido estimado inicialmente, donde aproximadamente el 40% los proyectos estudiados experimentaron más de un 10% de variación [12].

3.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS DE LA FILOSOFÍA SIX-SIGMA

Six-Sigma es una metodología basada en estadísticas que proporciona un marco estructurado para organizar e implementar iniciativas estratégicas de mejora de procesos para lograr reducciones en la variabilidad de los procesos [4].

El marco estructurado pero flexible de Six-sigma proporciona un procedimiento sólido para la recopilación de información sobre la secuencia de los procesos de construcción, permitiendo mejoras en los procesos y en la calidad [3].

Las herramientas estadísticas de Six-Sigma permiten interpretar las mediciones de una variable de interés en un proceso como lo es la productividad conforme a parámetros definidos por: a) la variabilidad que experimentan las

mediciones acordes a una distribución normal (las observaciones deben someterse a un Test de Normalidad) y, b) por la variabilidad permitida para dichas mediciones (tolerancias y nivel sigma).

En el primer caso se definen los diagramas de control de mediciones para los promedios y los rangos de cada muestra o lote de producción (ver Ecuación 3 y Ecuación 4, para el caso de estudio) y, en el segundo caso, los límites de especificación que permiten determinar la capacidad del proceso y los parámetros estadísticas para el nivel sigma (Ver Ecuación 5).

Los límites de control en los diagramas de control de mediciones (UCL y LCL) se determinan conforme a las ecuaciones (2), (3), (4) y (5); y la capacidad del proceso se determina conforme a las ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10).

Ecuaciones diagrama de control de mediciones de promedios [13]:

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (2)$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (3)$$

Ecuaciones confección diagrama de control de rangos [13]:

$$UCL = D_4 \bar{R} \quad (4)$$

$$LCL = D_3 \bar{R} \quad (5)$$

Donde UCL es el límite de control superior para el promedio de las muestras, o bien, para los rangos de las muestras.

LCL es límite de control inferior para el promedio de las muestras, o bien, para los rangos de las muestras.

Estos límites permiten monitorizar la variabilidad del proceso por, sobre y bajo la tendencia central para los promedios y para los rangos de las muestras; donde $\bar{\bar{x}}$ es la tendencia central para los promedio y; \bar{R} corresponde al promedio de las medias de las muestras y es la tendencia central para los

rangos y corresponde al promedio de los rangos de las muestras. A_2 , D_3 y D_4 corresponden a factores estadísticos que dependen del nivel de análisis sigma y del número de observaciones por muestra. Si alguna medición en los diagramas de control de mediciones, ya sea para promedios o rangos, sobrepasa los límites de control superior o inferior respectivos; entonces, esta medida (rango o promedio de la muestra) no responderá a la variabilidad natural del proceso y será necesario estudiar la causa de dicha variación.

Ecuaciones para determinar la capacidad del proceso [13]:

$$Cpk = \min(Cpu, Cpl) \quad (6) \quad Cpu = \frac{(USL - \mu)}{3\sigma} \quad (7) \quad Cpl = \frac{(\mu - LSL)}{3\sigma} \quad (8)$$

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}} \quad (9) \quad \hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (10)$$

Donde Cpk es la razón de capacidad del proceso que permite establecer la habilidad de un proceso para cumplir o exceder el límite de especificación superior (USL) o el límite de especificación inferior (LSL). Correspondiendo al valor mínimo entre Cpu (capacidad del proceso por el lado superior) y Cpl (Capacidad del proceso por el lado inferior). Por otro lado, μ es la media del proceso y σ la desviación estándar del proceso, los que se estiman a partir de $\bar{\bar{x}}$, \bar{R} y el factor estadístico d_2 , que depende del nivel sigma y del número de observaciones por muestra, $\hat{\mu}$ y $\hat{\sigma}$ corresponden a las estimaciones de μ y σ respectivamente.

Cpk será el menor valor entre Cpu y Cpl debido a que será más crítico el lado de la distribución de las mediciones (por arriba o por abajo en conformidad a σ) cuando el límite de la especificación k respectivo (USL o LSL) esté más cercano a la media del proceso μ (observe las ecuaciones 7 y 8). Si Cpu y

Cpl son iguales, entonces, las mediciones se muestran centradas en la distribución y no existe un lado más crítico.

En este caso la capacidad:

$$Cpk = Cp = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (11)$$

La razón de que sea usado 6σ es que la mayor parte de las mediciones del proceso (99,74%) caen dentro de ± 3 desviaciones estándar, lo cual da un total de 6 desviaciones en la distribución normal. Esto corresponde a un análisis 3σ y permite un nivel de defecto o incumplimiento de 0,26% o 2600 ppm (0,13% por lado). En el caso de un análisis 6σ la evaluación es más exigente y las mediciones debieran caer dentro de ± 6 desviaciones estándar, es decir, el nivel de defectos permitidos es de aproximadamente 3,4 ppm [13]. Este trabajo presenta un análisis de control 3σ para productividad.

Existen tres posibles rangos de valores que pueden tomar el indicador C_p : igual a 1, menor a 1 o mayor a 1. Un valor igual a 1 significa que la variabilidad del proceso se ajusta a las especificaciones, un valor menor a 1 significa que la variabilidad del proceso está fuera del rango de especificación y, un valor mayor a 1 significa que la variabilidad del proceso excede la capacidad mínima especificada [13].

En este último caso, para el rango entre $\pm 3\sigma$, se interpreta que el 99,74% de la producción caerá entre los límites de especificación. Es decir, menos del 0,26% (100% - 99,74%) de la producción no cumplirá con las especificaciones, en otras palabras, menos de 2600 ppm de incumplimiento.

Consecuentemente, C_{pk} (mínimo entre C_{pu} y C_{pl}) presenta una interpretación análoga, pero considerando la fracción defectuosa por lado, es decir, 0,13%. Por ejemplo, sea $C_{pk} = C_{pl} = 1,25$, implica que $C_{pl} \leq C_{pu}$ y que se está ocupando un 80% ($1,25^{-1}$) de la banda de tolerancia por el lado inferior de la distribución de mediciones, por lo cual, la proporción de incumplimiento definida para ese lado será menor a 0,13%.

Para el presente caso de estudio se considerará en los análisis la determinación de C_{pl} . Esto, basado en el hecho que mayores productividades serán preferidas y no conllevan inconvenientes más allá de la variabilidad que presenten por el lado superior.

4. MEDICIONES Y RESULTADOS

En la estimación de la productividad de la mano de obra, y conforme al apartado 2, las mediciones se iniciaron desde el inicio de la descarga del primer camión hormigonera hasta la finalización de la unidad de producción (afinado del hormigón), donde el principal recurso estudiado fue el equipo o cuadrilla de hormigonado.

Se lograron medir cuarenta y cuatro vertidos de hormigón bombeado (observaciones, ver Tabla 1) que promediaron 7,3m³ de hormigón por camión, con un tiempo medio de descarga de 13,7 minutos por camión.

Las mediciones se realizaron durante aproximadamente 4 semanas (3,86 semanas), lo que arrojó una producción media de 662,6 m² de losas de hormigón por semana y una producción media de 232,5 m² por muestra o lote de producción. En la medición del trabajo, el trabajo productivo en el equipo de hormigonado correspondió a la proporción del tiempo destinado al vertido del hormigón, al tiempo destinado al vibrado del hormigón y al tiempo destinado al nivelado de la losa.

El trabajo contributorio esencial correspondió a la proporción de tiempo destinado a dar o recibir instrucciones, estudiar especificaciones, movilizar y preparar materiales o equipamiento y, a la limpieza o preparación del frente de trabajo para iniciar una nueva vaciada.

El trabajo ineficiente correspondió a la proporción de tiempo de ocio inexplicable o no observable, al traslado de trabajadores con manos vacías, el rehacer trabajos, el fumar,

a la espera por instrucciones, a la espera de actividades previas y a la espera de los camiones, de materiales o de equipamiento necesarios. Los resultados para los 11 ciclos de trabajo observado fueron en promedio 57%, 18% y 25% para el trabajo productivo, contributorio y no productivo respectivamente. Los que presentaron una desviación estándar de 11%, 7% y 5% respectivamente.

La Fig. 2 muestra el Test de Normalidad de Anderson-Darling para las mediciones de las productividades del equipo de hormigonado. Desde que el valor p en el Test de Normalidad es igual a 0,3965 y es superior a 0,20; entonces, se puede concluir que los datos proceden de una distribución normal. Esta condición de entrada permitió analizar las productividades utilizando las herramientas de control de estadístico derivadas de la filosofía Six-sigma.

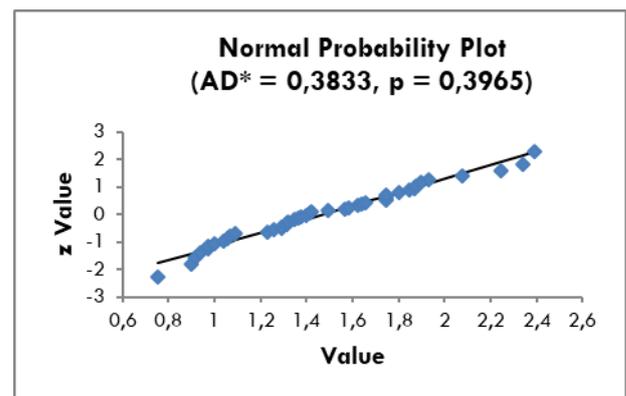


Figura 2. Resultado del Test de Normalidad de Anderson-Darling.

Lotes	Muestras por lote (m ³ /HH)			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1,00	1,87	1,80	2,39
2	2,24	1,75	1,66	2,08
3	1,85	1,62	1,74	1,37
4	1,32	1,75	1,90	1,75
5	0,97	1,23	1,93	0,75
6	1,58	1,29	1,26	1,42
7	1,57	1,87	1,37	2,34
8	1,29	0,94	0,92	1,06
9	1,64	1,32	1,49	1,40
10	1,09	1,04	1,07	0,90
11	1,35	1,32	0,97	1,42

Tabla 1. Muestras para cada lote de producción

Conforme a la metodología descrita en el apartado 2, las 11 muestras (lotes de producción que se listan en la Tabla 1), compuestas por 4 observaciones (vertidos de cada camión de hormigonado), presentaron una productividad media de 1,47m³/HH.

Este parámetro define la tendencia central en diagrama de control de mediciones de los promedios, a partir de él se evidencian los cambios que experimentan las medias de la productividades de los lotes de producción en torno a la tendencia central, la que se muestra como Avg=1,47 en la Fig. 3.

Por otro lado, la Fig. 4 muestra la variabilidad que experimentan las productividades del equipo de hormigonado conforme a las mediciones de los rangos en

cada muestra o lote de producción. En el diagrama de control de rangos (Fig. 4), la tendencia central se muestra como $Avg=0,62 \text{ m}^3/\text{HH}$.

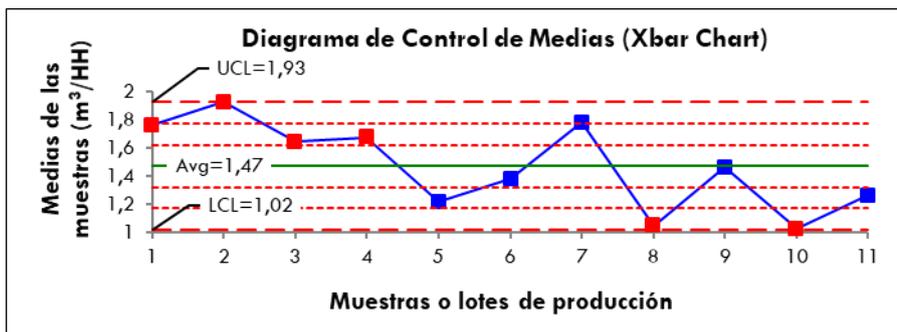


Figura 3: Cambios en los valores medios de la productividad del equipo de hormigonado.

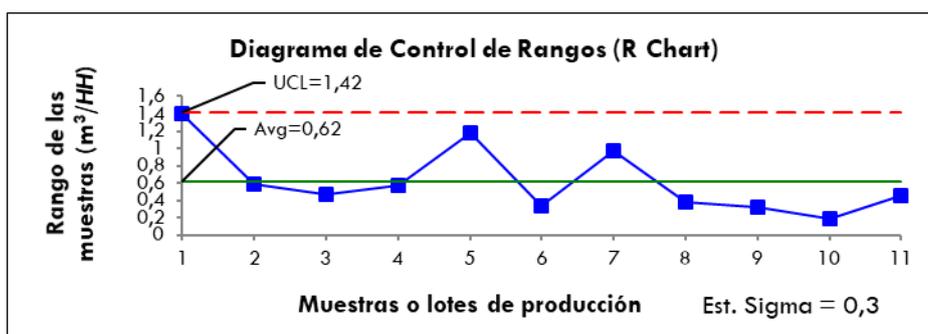


Figura 4: Cambios en la variabilidad de la productividad del equipo de hormigonado (rangos).

Los límites de control superior e inferior (ULC y LCL) en cada gráfica de control de mediciones (Fig. 3 y Fig. 4) se determinaron conforme a las ecuaciones (2) (3) (4) y (5),

donde los factores A_2 , D_3 y D_4 , para un nivel 3σ y cuatro observaciones por muestra, corresponden a 0,73; 0 y 2,28 respectivamente.

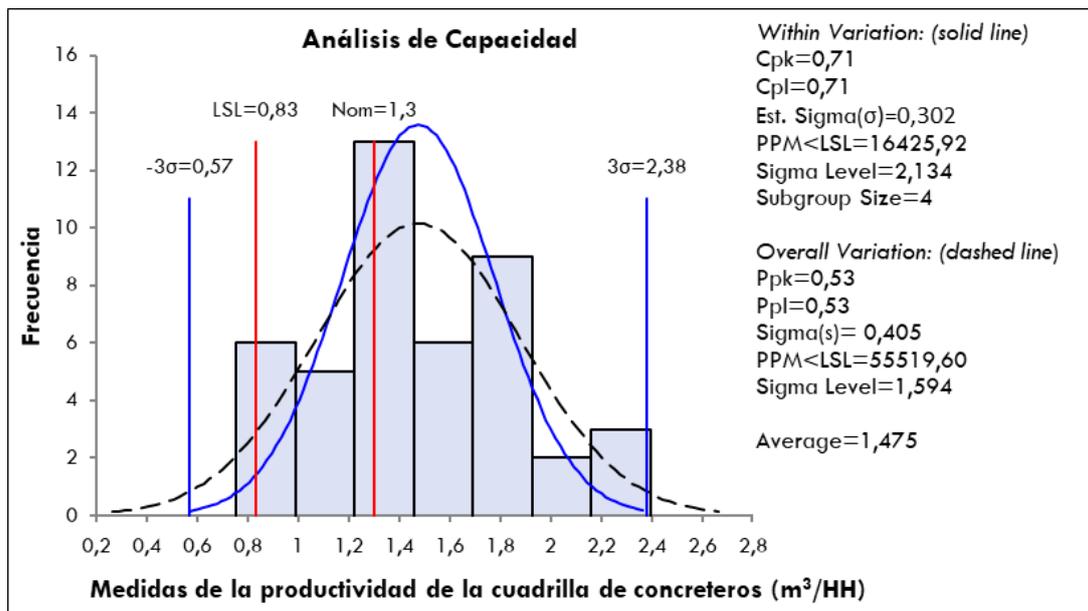


Figura 5: Análisis de la Capacidad del proceso para responder a la productividad esperada de la cuadrilla de hormigoneros en el proceso de hormigonado.

Para el cálculo de la capacidad del proceso se estimó la media y desviación del proceso conforme a las ecuaciones (9) y (10) donde \bar{x} es igual a $1,47 \text{ m}^3/\text{HH}$, \bar{R} es igual a $0,62 \text{ m}^3/\text{HH}$ y D_2 es, para un nivel 3σ y 4 observaciones por lote, igual a 2,059. Resultando una media estimada igual a $1,47 \text{ m}^3/\text{HH}$

y una desviación estándar estimada igual a $0,302 \text{ m}^3/\text{HH}$. Por otro lado, para calcular la capacidad del proceso C_{pk} fue necesario establecer una especificación. Esto no fue fácil de establecer debido a que la empresa constructora no realizaba mediciones de productividad que permitieran

definir parámetros basados en su experiencia. Para responder a este problema se tomó de referencia la variabilidad que presentan los proyectos de construcción en el apartado 3.2.

Así, si se asume que el 40% de todos los proyectos de construcción experimentan más del 10% de variabilidad, medida por la relación entre los costos finales del proyecto y los costos estimados del proyecto. Entonces, para una unidad de producción la productividad cambia en aproximadamente 10% ya que, conforme a la ecuación (1), la productividad global baja a $1/[1+0,1] = 0,909$. Además, si se asume que la variabilidad de los proyectos de construcción distribuye normal conforme al Teorema del Límite Central, entonces, LSL se podría especificar como 0,636 suponiendo LSL sobre $z=-1$ en la distribución normal estandarizada. Entonces, cuando $P(z < -0,25) = 40\%$ y $X_i = 0,909$ (caída productividad global) resulta la distribución igual a $N(1; 0,364)$.

Consecuentemente, si LSL es 0,636 cuando 1 representa la productividad esperada de la mano de obra en el hormigonado, que en el sector chileno ronda los $1,3 \text{ m}^3/\text{HH}$ [8] (inferior a $1,47 \text{ m}^3/\text{HH}$ que se obtuvo), LSL será igual a $0,83 \text{ m}^3/\text{HH}$. En tal caso, aplicando la ecuación (8), Cpl resulta igual a 0,71 para un nivel de control 3σ (ver Fig. 5). Por otro lado, basándose en un procedimiento análogo, y para un nivel de control 2σ , el indicador Cpl aumenta a aproximadamente 1,06.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En las Fig.3 y Fig.4 se aprecia que la productividad de la mano de obra en el hormigonado de vigas y losas estuvo bajo control estadístico (todos los puntos se ubicaron entre los límites de control superior e inferior). En otras palabras, las productividades del equipo de hormigonado respondieron a la variabilidad natural del proceso constructivo. Cabe destacar que hubo razones claras que explicaron cuando la productividad del equipo de hormigonado fue mayor a lo esperado (véanse las primeras cuatro muestras en la Fig.3), o bien, cuándo la productividad fue menor a lo esperado (véanse las muestras 8 y 10 en la Fig.3). En la primera situación, existió una buena planificación del trabajo y el proveedor no falló en la entrega del hormigón (entregas conforme a programación) y; en la segunda situación, existió una proporción mayor de trabajo ineficiente o no productivo, donde la espera por los camiones de hormigón y la falta de planificación, que derivó en tiempos de espera debidos a la falta de las condiciones para producir, se vieron acentuadas.

Basado en la experiencia chilena, donde el ritmo de avance podría definirse como 2,5 plantas por mes para una superficie media de 1.000m^2 [8], la producción semanal debería ser del orden de 625m^2 . Esto denota que la producción media en el caso de estudio, igual a $662,6 \text{ m}^2$ por semana, es mayor al esperado en la Industria Chilena.

Los niveles de actividad sectorial en Chile muestran para la obra gruesa que el 60% de las actividades generan valor; es decir, responden a trabajo productivo, que el 20% representan actividades de soporte y, que el 20% responde

a trabajo que no agrega valor o corresponde a detenciones autorizadas. Estos indicadores cambian a 54%, 18% y 28% respectivamente, cuando se trata de actividades a nivel global de los proyectos de edificación en altura [8]. Esto evidencia que la distribución del trabajo observado en el equipo de hormigonado se ajusta a parámetros esperados.

En torno a la productividad de la mano de obra, se aprecia que la productividad media del equipo de hormigonado ($1,47 \text{ m}^3/\text{HH}$) es mayor a la esperada en la industria chilena, la cual ronda los $1,3 \text{ m}^3/\text{HH}$. Sin embargo, bajo los mejores contextos de productividad (muestras 2 y 7 en Fig.3), se evidencia la posibilidad de plantear metas de productividad mayores al proceso de hormigonado de losas y vigas, pues en el mejor de los casos esta se acercó a $2 \text{ m}^3/\text{HH}$. Sumado a lo anterior, existen experiencias internacionales que han podido llegar a una productividad media de $2,2 \text{ m}^3/\text{HH}$ en el hormigonado de losas y vigas con hormigón bombeado [9].

La capacidad del proceso resultó igual a $Cpl = 0,71$ para un nivel de control 3σ (Fig. 5), apreciándose que las productividades de los equipos hormigoneros no cumplen con la banda de tolerancia especificada, sobrepasándola en aproximadamente un 41% por la parte inferior. Esto evidencia que la productividad de los mismos debe disminuir en variabilidad. Es decir, si la organización del proyecto persigue como meta el 99,74% de nivel cumplimiento (la mitad de 0,26% por el lado inferior), entonces, el proceso constructivo necesariamente debe mejorar.

Por otro lado, si el nivel de análisis fuera menos exigente (mayor proporción de fracción defectuosa permitida), para el caso igual a 2σ , se aprecia que la variabilidad de la productividad de los hormigoneros cumpliría con la especificación mínimamente (Cpk cercano a 1), ocupando aproximadamente el 95% de la banda de tolerancia. Esto plantea que sería más apropiado trabajar con un nivel de control estadístico 2σ , siendo conscientes de que los procesos productivos en la industria de la construcción presentan mayor variabilidad [14]. Esto es debido a la naturaleza artesanal de sus procesos que en esencia son difíciles de repetir con precisión [14]. Consecuentemente, si alcanzar un nivel de control 3σ es complejo, lo será aún más un nivel de control 6σ .

6. CONCLUSIONES

Las herramientas del enfoque Six-sigma proporcionaron una estructura estadística que permitió evaluar la productividad del equipo de hormigonado en el proyecto de estudio. Así, a partir de la interpretación de los diagramas de control de mediciones, se concluye que los cambios que experimentan las mediciones de la productividad de la cuadrilla de hormigoneros respondieron a la variabilidad natural del proceso constructivo.

Donde a las mediciones extremas (productividades cercanas a los límites de control) se les pudo asignar causas relativas a la planeación del trabajo o al cumplimiento del proveedor de hormigón. Si ambas situaciones fueron favorables, la productividad de la mano de obra superó la media de las mediciones, acercándose a los $2\text{m}^3/\text{HH}$ en el mejor de los

casos. Si ambas situaciones fueron negativas, entonces, el trabajo ineficiente aumentó considerablemente y la productividad bajo a aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{HH}$ en el peor de los casos.

Por otro lado, en la medición de la capacidad del proceso, se pudo apreciar cómo la variabilidad en la productividad del equipo de hormigonado no se ajustó a la especificación establecida para un nivel de exigencia típico de 3σ . En este caso, se sobrepasó en aproximadamente 41% la banda de tolerancia. Sin embargo, cuando la exigencia de incumplimiento bajó a un nivel de control 2σ , la variabilidad del proceso se ajustó a la especificación mínimamente (C_{pk} cercano a 1), ocupando aproximadamente el 95% de la banda de tolerancia. Esto plantea que un nivel exigencia sobre 3σ , es algo difícil de conseguir cuando se evidencia la naturaleza artesanal de los procesos constructivos y el uso intensivo de mano de obra.

Para el caso de estudio fue difícil establecer un límite de especificación inferior para la productividad de los hormigoneros. Esto, debido a la carencia de propios indicadores de productividad de la mano de obra que pudiesen servir de benchmarking y, debido a la poca información disponible en la industria chilena. La productividad del equipo de hormigonado y el ritmo producción se mostraron por sobre el promedio para la industria chilena en edificación. Sin embargo, dadas las mejores mediciones obtenidas en productividad, sumado a los antecedentes internacionales que muestran rendimientos mayores para la misma actividad ($2,2 \text{ m}^3/\text{HH}$), se plantea como meta para la empresa mejorar su proceso constructivo. Finalmente, cabe destacar que el personal de la obra confundía el concepto de productividad – Ecuación (1) – con el de ritmo de trabajo o producción, sin tener claro que este último forma parte de la productividad, pero que no define cómo son utilizados los recursos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Institute, M. G. (2017). Reinventing Construction: A route to higher productivity. McKinsey & Company : McKinsey Global Institute .
- [2] McKinsey & Company. (2015). The construction productivity imperative. Retrieved from McKinsey & Company Capital Projects & Infrastructure: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/the-construction-productivity-imperative>
- [3] Stewart, R. A., & Spencer, C. A. (2006). Six-Sigma as a strategy for process improvement on construction projects: a case study. *Construction Management and Economics*, 24, 339-348.
- [4] Borse, G. U., & Attarde, P. M. (2016). Application of Six Sigma Technique for Commercial Construction - Project - A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 03 Issue 06, pag. 2323 - 2328.
- [5] Shinde, V. J., & Hedao, M. N. (2017). Productivity Improvement in Construction Industry. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, Vol.4 Issue 12.
- [6] Naoum, S. G. (2016). Factors influencing labor productivity on construction sites. A state-of-the-art literature. *Management, International Journal of Productivity and performance*, Vol. 65 Iss 3pp.
- [7] Takim, R., Akintoye, A. and Kelly, J. (2003) Performance measurement systems in construction, In: Greenwood, D. (Ed.) 19th Annual ARCOM conference, Vol. 1, ARCOM, University of Brighton, pp. 423-431.
- [8] Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT. (2013). Análisis de la Productividad en Obras de Edificación en Chile. Santiago, Chile: Cámara Chilena de la Construcción.
- [9] Chan, D. W., & Kumaraswamy, M. M. (1995). A study of the factors affecting construction durations in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 13:4, 319-333.
- [10] Serpell, A., "Administración de Operaciones de Construcción", ALFAOMEGA Grupo Editor, México, 2002.
- [11] Baccarini, D. (2004). Accuracy in estimating project cost construction contingency - a statistical analysis. *Proceedings of the Construction and Building Research Conference of RICS*, 7-8.
- [12] Ibbs, W. (2012). Construction Change: Likelihood, Severity, and Impact on Productivity. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, Vol. 4 Issue 3.
- [13] Reid, R., & Sanders, N. R. (2011). *Operations Management An Integrated Approach*. United States : John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Ibáñez C., M. (2009). 4 Sigma, Capacidad de Procesos Artesanales: Estadística le dobla la mano a la práctica. *Revista BIT*, Vol. 29, 14-16.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.