

Análisis de Correlaciones de Duraciones de Actividades en Proyectos de Túneles

Correlation Analysis of Activity Durations in Tunneling Projects

Sebastián Avendaño-Pavez¹; Edgardo González-Lizama²

¹Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas / Departamento de Ingeniería Civil, Santiago - Chile, sebastian.avendano@ing.uchile.cl

²Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas / Departamento de Ingeniería Civil, Santiago - Chile, edggonza@ing.uchile.cl

DOI: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1644>

Resumen

En el rubro de la ingeniería civil y la construcción resulta de interés estudiar la correlación entre las duraciones de las distintas actividades, a fin de contar con información que permita optimizar los rendimientos de los ciclos de trabajo, lo mismo que mejorar las estimaciones de las duraciones de actividades para futuras obras. La información de duraciones de actividades proviene de ciclos de trabajo de la ejecución de túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago. Con las correlaciones obtenidas, un primer objetivo es proponer la aplicación de un estadístico de prueba para determinar su nivel de confianza. Un segundo objetivo es plantear una formulación que emplee estas correlaciones para estimar la duración de una actividad a partir de la duración de una actividad anterior. Los resultados del primer objetivo permiten realizar análisis comparativos según tipo de suelo, paso de excavación y turno, considerando un nivel de confianza del 80%. Se observa que correlaciones negativas se pueden asociar a una mayor eficiencia del proceso constructivo. Los resultados del segundo objetivo se reflejan mediante un

ejemplo de aplicación de la formulación propuesta en base a la distribución normal bivariada.

Palabras clave	<i>Correlación, Estimación de Duración de Actividades, Distribución Bivariada, Túneles.</i>
-----------------------	---

Abstract

In the area of Civil Engineering and Construction it is relevant to study the correlation between durations of different activities, in order to acquire information that allows optimizing performance of work cycles, as well as improving estimates of activity durations in future works. The data analyzed in this paper comes from activity cycles of tunneling works in Line 6 of Metro de Santiago. Once the correlations were obtained, one first goal was to propose the application of a statistical hypothesis test to determinate their level of confidence. A second goal was to present a formulation that employs these correlations to estimate the duration of an activity from a previous activity duration. The results from the first objective allow to perform comparative analysis depending on soil type, excavation pace and work shift, applying a level of confidence of 80%. It is observed that negative correlations can be associated to a better efficiency of the constructive process. The results from the second objective are validated through the application of the suggested formulation based on a bivariate normal distribution.

Keywords:	<i>Correlation, Activities Duration Estimate, Bivariate Distribution, Tunnels.</i>
------------------	--

Introducción

En el rubro de la ingeniería y la construcción de obras civiles, la estimación de la duración de las actividades es una de las tareas de planificación más relevantes. En el caso de actividades que conforman ciclos de trabajo, que comparten elementos comunes como trabajadores, recursos y espacio de trabajo, resulta de interés estudiar la correlación entre las duraciones de las distintas actividades. Esto permite contar con información para mejorar los rendimientos de los ciclos de trabajo, lo mismo que mejorar las estimaciones de las duraciones de actividades

para futuras obras. Las correlaciones entre las duraciones de distintas actividades se pueden obtener a partir de una encuesta dirigida para el efecto a un panel de expertos (Cho, 2006). Es mejor si se obtienen a partir de un levantamiento de datos de una obra real, dado que otorgarán mejores resultados durante el análisis.

El presente trabajo constituye un aporte en el estudio del mejoramiento de los tiempos de construcción, ya que, al establecer relaciones entre las duraciones de las actividades, ayuda a tomar decisiones sobre en cuáles de ellas se debe invertir mayor tiempo para reducir tiempos de ejecución en las demás y así, finalmente, optimizar los tiempos del ciclo total. Esto, eventualmente, puede traducirse en una mayor economía para proyectos de túneles, o aún más, para proyectos de construcción consistentes en ciclos repetitivos, como las obras viales o ferroviarias.

Un primer objetivo es proponer la aplicación de un estadístico de prueba para determinar el nivel de confianza de las correlaciones. El estadístico de prueba permitirá discernir si una correlación entre duraciones de actividades se considera significativa en el sentido de establecer una relación entre ellas, y descartar los resultados que puedan provenir del ruido de las mediciones.

Un segundo objetivo es plantear una formulación para estimar la duración de una actividad a partir de la duración de una actividad anterior del mismo ciclo de trabajo, empleando los coeficientes de correlación obtenidos. En el capítulo “metodología” se describe el procedimiento que se sigue para conseguir esto, habiéndose revisado, previamente, las descripciones del proceso de estimación de actividades que define la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Project Management Institute, 2017). Finalmente, se presenta un ejemplo de aplicación práctico para resolver un problema que podría ocurrir en una faena de construcción.

Descripción del Sitio

Para el desarrollo analítico del presente trabajo, se cuenta con un registro de duración de 7 actividades de 147 ciclos de trabajo de la ejecución de sostenimientos

de una parcialidad de los túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago, los que representan una longitud de aproximadamente 200 m de avance a través de gravas y suelos finos, en pasos de excavación de 1 m y 1,5 m, tanto en turnos de día como de noche.

Las actividades que conforman el ciclo de trabajo son excavación, perfilado, topografía, aplicación de hormigón proyectado para el sello de la excavación, instalación de malla, instalación de marco y aplicación de hormigón proyectado para completar el sostenimiento. En la tabla se presenta el resumen de los ciclos de datos considerados.

Tabla 1

Distribución de ciclos de trabajo según tipo de suelo, paso de excavación y turno.

Suelo	Paso	Turno	
		Día	Noche
Gravas	1 m	18	19
	1,5 m	13	11
Finos	1 m	13	7
	1,5 m	27	39

Cabe destacar que el registro de datos de ciclos utilizado es discontinuo, debido a que en algunos ciclos no se levantó la duración de todas las actividades, lo que impidió hacer uso de las duraciones del resto de las actividades. Sin embargo, en los ciclos con información completa no se eliminó ningún dato, por más que algunas duraciones de actividades de algunos ciclos parecieran fuera de rango.

Metodología

Criterio de correlación entre duraciones de actividades.- En primer lugar, se calculan los coeficientes de correlación entre las duraciones de los distintos pares actividades según tipo de suelo, paso de excavación y turno. Anderson (2003) indica que el estimador de máxima verosimilitud del coeficiente de correlación de Pearson está dado por:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

donde X e Y son vectores de n muestras cada uno; \bar{X} e \bar{Y} son sus medias aritméticas; X_t e Y_t son sus elementos individuales; y r es el estimador de máxima verosimilitud para el coeficiente de correlación de Pearson.

Obtenidos los valores de correlaciones, se debe discernir si son lo suficientemente significativos para poder afirmar que las duraciones de dos actividades están correlacionadas. Una buena opción es utilizar el estadístico de prueba propuesta en el libro de Triola (2009):

$$t_r = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (2)$$

donde r se obtiene de la ecuación (1), n es la cantidad de muestras en los vectores en que se evalúa la correlación, y t_r es el estadístico requerido para la prueba de hipótesis y decidir si las variables están correlacionadas o no.

El estadístico de prueba de la ecuación (2) proviene de una prueba de hipótesis que utiliza la t de Student. Se interpreta como el intento de demostrar que la correlación de la muestra se aleja lo suficientemente de la correlación supuesta, es decir, correlación nula o igual a cero. Al calcular este valor, se debe comparar con el valor crítico que corresponda al nivel de confianza seleccionado. Se considera un nivel de confianza del 80% para confirmar la correlación de las duraciones de dos actividades. La función "distr.t.2c", del software Excel, ayuda a evaluar los valores de t obtenidos para obtener directamente los porcentajes de confianza de cada

valor. A partir de esto, se deben evaluar todos los pares posibles de cada turno, tipo de suelo y distancia de avance.

Estimación de la duración de una actividad a partir de la duración de una actividad anterior.- Se utiliza una formulación basada en el trabajo de Ferrada (2019), relativo al análisis de desviaciones en la estimación de la duración de actividades en proyectos de ingeniería civil, que queda definida según la siguiente expresión:

$$d \geq d_m + s \cdot t \quad (3)$$

donde d es la duración estimada de la actividad; d_m es la media del total de muestras de duraciones; s es la desviación estándar de las muestras; y t es el coeficiente estadístico proveniente de la distribución t de Student. Cabe destacar que Ferrada (2019), utilizando niveles de confianza de 80 % a 90 % para procesar registros de duración de actividades de la construcción de túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago, obtiene variabilidades similares a las que el juicio de expertos da para este tipo de obras, según encuestas del trabajo de Rodríguez (2016).

Considerando la ecuación (3), se propone una formulación para estimar la duración de una actividad a partir de la duración de una actividad anterior del mismo ciclo de trabajo, empleando los coeficientes de correlación obtenidos. Para esto, se propone utilizar la siguiente ecuación para estimar actividades:

$$d_{2|1} = \mu_{2|1} + t \cdot \sigma_{2|1} \quad (4)$$

$$\mu_{2|1} = \mu_2 + \rho \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{2|1}^2 = \sigma_2^2 (1 - \rho^2) \quad (6)$$

donde $d_{2|1}$ es la duración estimada de una actividad 2 dado que se sabe cuánto duró la actividad 1; $\mu_{2|1}$ es la media condicional, $\sigma_{2|1}$ es la raíz cuadrada de la varianza condicional; y t es el valor correspondiente al estadístico t de Student.

La definición de $\mu_{2|1}$ y $\sigma_{2|1}$ provienen del trabajo de Tong (1990), donde estudia la distribución normal bivariada. Los estimadores para μ y σ son los usuales y su definición se puede encontrar en el libro de Anderson (2003). Por último, el estimador de ρ fue definido en la ecuación (1). La proposición de la ecuación (4) fue realizada posterior a la revisión, también, de las obras de Montgomery D. & Runger G (2003); y Melchers R & Beck A. (2018), sobre distribución normal bivariada.

Las condiciones para utilizar la t de Student son que no se conozca la varianza poblacional y que la distribución sea significativamente normal, ya sea mediante una prueba de normalidad, o que la cantidad de datos considerados sea mayor que 30. Por su parte, Ferrada (2019) demuestra, mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (KS) que las duraciones de las actividades de construcción de túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago siguen una distribución aproximadamente normal. Por lo tanto, en este trabajo también se asumirá que las duraciones de las actividades siguen una distribución aproximadamente normal. Sin perjuicio de lo anterior, existen otros tipos de pruebas de normalidad como la de Saphiro-Wilk (SW), de Lilliefors (LF) y de Anderson-Darling (AD), entre otros (Razali & Wah, 2011); que también podrían utilizarse para probar la normalidad de las muestras.

Consideraciones Teóricas.- En primer lugar, en este trabajo se ha optado por asumir que las duraciones de las actividades poseen una función de densidad de probabilidad que se ajusta aproximadamente a una distribución normal. Este tipo de distribución facilita el uso del estadístico t de Student y además, ha sido ampliamente utilizada en el pasado para estimar duraciones de actividades en proyectos de construcción.

En este trabajo se ha optado por utilizar la t de Student dado que es una distribución que permite estimar un parámetro poblacional. Sin embargo, la t de Student se define que como una distribución que modela promedios de muestras, por lo que, en este caso particular, para proceder con el estudio, se postula utilizar muestras de tamaño $N=1$, donde su promedio será igual al único valor que contengan. Esto

implica que la definición clásica de la t de Student: $\mu = \bar{x} + \frac{t \cdot \hat{s}}{\sqrt{N}}$ (Dowdy et al., 2004; Hutchinson, 1993; Meyer, 1986; Spiegel & Stephens, 2009; Triola, 2009) se expresa, para efectos de este trabajo, tal como indica la ecuación (3); ya que el término \sqrt{N} , en este caso particular, es equivalente a 1.

En cuanto a los grados de libertad, es importante notar que en este trabajo se trabaja con $\nu = n - 1$, donde ν significa grados de libertad y n es la cantidad de muestras; pero cada una de estas muestras es de tamaño $N = 1$. Los grados de libertad entonces corresponderán al valor que resulta de restar una unidad al número de duraciones de actividades, número que depende directamente de la cantidad de ciclos que se posean del turno, paso y tipo de suelo elegido para el análisis.

Resultados

Utilizando la fórmula (1) se obtienen las correlaciones entre las actividades, que consisten en valores entre -1 y 1 que indican en qué grado están correlacionadas las duraciones de ambas actividades. Estas correlaciones se transforman a valores equivalentes de la distribución t de Student, utilizando la ecuación (2). Éstos a su vez, se convierten a niveles de confianza de las correlaciones, tal como se explicó en el apartado de metodología. Los valores obtenidos se muestran presentados en la Tabla 2, expresados en porcentajes.

Tabla 2

Niveles de confianza equivalentes a los valores t de Student de las correlaciones entre las duraciones de actividades.

Actividades		Grava paso 1m		Grava paso 1,5 m		Finos paso 1m		Finos paso 1,5 m	
		Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
		Excavación	y	99,99	93,36	80,68	10,81	30,23	89,02
Perfilado		%	%	%	%	%	%	%	%
Excavación	y	99,93	65,75	25,26	21,89	58,00	5,10%	22,09	10,01
Topografía		%	%	%	%	%	%	%	%
Excavación	y	96,28	99,95	38,73	39,84	13,37	18,28	40,97	47,17
Sello		%	%	%	%	%	%	%	%
Excavación	y	69,65	68,99	19,89	84,35	7,84%	99,75	37,80	5,15%
Malla		%	%	%	%	%	%	%	%
Excavación	y	39,43	30,04	54,77	78,21	17,80	49,89	61,10	58,85
Marco		%	%	%	%	%	%	%	%
Excavación y HP		96,05	32,76	62,36	71,95	13,83	71,66	45,08	50,27
		%	%	%	%	%	%	%	%
Perfilado	y	99,99	99,85	87,78	64,29	33,83	1,16%	92,05	83,87
Topografía		%	%	%	%	%	%	%	%
Perfilado y Sello		99,99	51,62	98,26	73,40	54,64	61,26	13,66	48,34
		%	%	%	%	%	%	%	%
Perfilado y Malla		79,42	76,34	92,21	94,92	47,37	95,40	43,00	33,75
		%	%	%	%	%	%	%	%
Perfilado	y	88,09	83,55	86,69	20,46	0,95%	13,83	59,04	55,15
Marco		%	%	%	%	%	%	%	%
Perfilado y HP		73,76	91,13	36,83	68,93	4,74%	95,97	73,05	72,88
		%	%	%	%	%	%	%	%

Topografía	y	97,02		51,38	36,67	61,67	85,74	55,43	99,98
Sello		%	4,42%	%	%	%	%	%	%
Topografía	y	88,98	29,76	99,49	12,52	90,08	31,89	87,98	99,98
Malla		%	%	%	%	%	%	%	%
Topografía	y	85,21	64,60	86,87	81,99	21,96	87,50		91,49
Marco		%	%	%	%	%	%	0,64%	%
Topografía y HP		45,23	35,88	95,02	34,96	94,27	20,34	61,39	49,95
		%	%	%	%	%	%	%	%
Sello y Malla		99,18	92,88	43,53	32,74	84,64	27,29	33,18	99,95
		%	%	%	%	%	%	%	%
Sello y Marcos		78,84	34,12	86,22	49,68		97,81		80,71
		%	%	%	%	2,19%	%	1,88%	%
Sello y HP		54,72	63,60	48,14	48,69	81,50		49,46	90,11
		%	%	%	%	%	6,56%	%	%
Malla y Marco		33,44	99,60	99,48	64,19	66,71	27,53	61,87	83,62
		%	%	%	%	%	%	%	%
Malla y HP		40,48	59,72	85,89	55,90	98,85	85,31	11,16	78,81
		%	%	%	%	%	%	%	%
Marco y HP		75,76	83,27	80,41	99,15	19,95	39,60	32,15	22,13
		%	%	%	%	%	%	%	%

Nota. Las correlaciones positivas se presentan en letra normal, mientras que las negativas, en letra cursiva. Se destacan con gris las correlaciones con niveles de confianza superiores a 80%. (El gris claro destaca correlaciones positivas y el gris oscuro, las negativas.)

Para la mejor comprensión de la Tabla 2, cabe destacar que existe un valor crítico por cada columna, el que queda dado por el número de muestras indicado en la Tabla 1 para cada tipo de suelo, paso de excavación y turno.

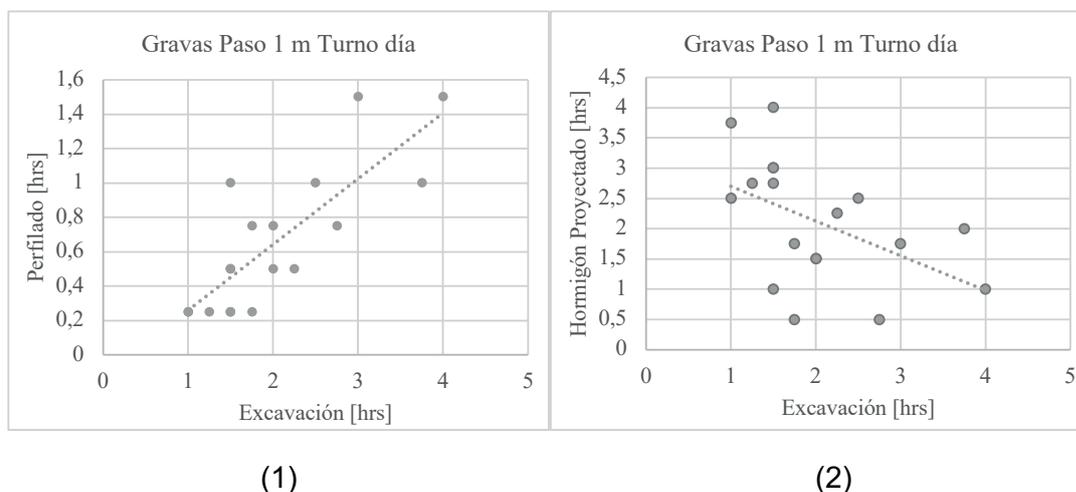
Discusión

Sentido del signo de las correlaciones.- Al considerar las duraciones de dos actividades, se ubican los puntos (x_i, y_i) en un eje coordenado, donde x_i e y_i representan las duraciones de dos actividades distintas de un mismo ciclo de trabajo i . Los gráficos de la

Figura 1, elaborados de esta manera, permiten observar que los puntos se alinean según pendientes positivas o negativas, las que representan correlaciones positivas o negativas, respectivamente.

Figura 1

Gráficos de dispersión de duraciones de actividades en horas. (1) Perfilado versus Excavación. (2) Hormigón Projectado versus Excavación.



Como se desprende de los gráficos, las correlaciones positivas entre las duraciones de dos actividades indican que mientras mayor tiempo vaya tomando la ejecución de la primera actividad, mayor tiempo irá tomando la ejecución de la segunda actividad. Por el contrario, las correlaciones negativas indican que mientras mayor tiempo vaya tomando la ejecución de la primera actividad, menor tiempo irá tomando la ejecución de la segunda actividad.

Las correlaciones positivas están asociadas a los recursos y medio ambiente que comparten las actividades analizadas (Cho, 2006). Así, por ejemplo, las tres primeras actividades del ciclo, que consisten en distintas etapas y/o formas de excavación, generalmente resultan con correlaciones positivas, dado que comparten la misma condición de trabajo, que es el suelo.

De modo general, se puede indicar que correlaciones positivas con un alto nivel de confianza son motivo de precaución, puesto que indican que invertir tiempo en una determinada actividad, no necesariamente redundará en ahorrar tiempo en las actividades siguientes.

Por su parte, correlaciones negativas con un alto nivel de confianza son virtuosas, puesto que indican que invertir tiempo en una determinada actividad, redundará en ahorrar tiempo en las actividades siguientes.

Eiris Pereira & Flood (2017) indican que para repeticiones de actividades iguales es probable que la correlación negativa ocurra en sistemas que, por ejemplo, incluyen información de feedback tales como la optimización del proceso de trabajo en tiempo real a través de “lecciones aprendidas”.

Análisis de Niveles de Confianza según tipo de suelo, según turno y según paso.- Antes de analizar los niveles de confianza, resulta interesante observar qué sucede con los promedios y las desviaciones de los tiempos de ciclo. Cabe destacar sí, que si bien cada una de las actividades que se han considerado en el presente trabajo forman parte de un ciclo, sólo se tienen registrados los tiempos de cada actividad y no del ciclo propiamente tal, lo que indica básicamente que no se tienen registrados los tiempos muertos o imprevistos entre actividades dentro de un ciclo. Sin embargo, para efectos de algunas conclusiones del trabajo, se puede considerar como una buena aproximación del tiempo de ciclo la suma de los tiempos de las actividades consideradas. En la siguiente tabla se presenta el promedio de los tiempos de ciclo calculados según lo indicado, incluyendo las desviaciones.

Tabla 3

Promedios y desviaciones de tiempos de ciclo.

	Turno Día		Turno Noche	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
Gravas paso 1 m	8,92	2,41	8,91	2,01
Gravas paso 1,5 m	10,00	2,03	10,50	2,35
Finos paso 1 m	9,94	1,30	10,04	3,09
Finos paso 1,5 m	10,36	1,59	10,18	2,13

A continuación, considerando la Tabla 3, se analizan los niveles de confianza de correlaciones de actividades, presentados en la Tabla 2, tanto en gravas como en finos según paso y según turno. Se realizan 2 tipos de análisis:

- Análisis 1: La diferencia que se produce entre el turno de día y el turno de noche, sea con paso de 1 m o de 1,5 m.
- Análisis 2: Las ventajas y desventajas de pasar a excavar con un paso de 1 m a 1,5 m, sea en turno de día o en turno de noche.

Analizar las diferencias al variar el tipo de suelo no tiene objeto puesto que no es una variable que pueda ser decidida o modificada durante la construcción.

En los análisis consecutivos, al aludir a cada tipo de suelo, cuando sean con respecto a gravas se referirá a las primeras cuatro columnas de la Tabla 2, mientras que cuando sea con respecto a finos, se referirá a las últimas 4 columnas de la misma tabla.

Gravas, Análisis 1.- Para ambos pasos, los turnos de noche significan principalmente romper con varias correlaciones positivas con altos niveles de confianza que se observan en los turnos de día. También, se rompen varias correlaciones negativas con alto nivel de confianza. Este nivel de información no permite concluir respecto de los tiempos de ciclo, lo que es consistente con la información de la Tabla 3, donde los tiempos de ciclo entre los turnos de día y noche para excavación en gravas no presentan diferencias significativas, siendo iguales o menores a 5%. Lo mismo sucede con las desviaciones, cuyas diferencias son del orden del 20%.

Gravas, Análisis 2.- A diferencia del Análisis 1, donde el construir de día y de noche es consustancial a la ejecución de túneles, la determinación del paso de la excavación atiende a una decisión del contratista basada no sólo en las condiciones geotécnicas, sino que también, en consideraciones de efectividad y eficiencia. La información de la Tabla 3 demuestra que el aumento del paso de excavación en gravas de 1 m a 1,5 m es efectivo en términos de rendimiento (avance/tiempo), aunque no se cuenta con la información de los recursos gastados como para saber si fue eficiente también. Sin embargo, para efectos del trabajo, basta con notar que el aumento de paso fue efectivo.

El mejor rendimiento de excavar con un paso de 1,5 m respecto de un paso de 1 m se manifiesta nítidamente en el turno de día, donde se aprecia que aparecen varias correlaciones negativas con alto nivel de confianza. Lo descrito se debe a que si bien algunas actividades del ciclo aumentan su duración cuando aumenta el paso de la excavación, otras actividades mantienen su duración relativamente invariante (como instalación de malla y de marcos), lo que produce una mayor eficiencia de los recursos y, por tanto, correlaciones negativas (Eiris Pereira & Flood, 2017).

En el caso del turno de noche, no es fácil visualizar argumentos relativos a las correlaciones que permitan explicar el mejor rendimiento por aumentar el paso de la excavación de 1 m a 1,5 m, aunque se puede apelar directamente al hecho de que las correlaciones positivas disminuyen a la mitad.

Finos, Análisis 1.- Para ambos pasos, los turnos de noche significan principalmente agregar varias correlaciones positivas con altos niveles de confianza respecto de las que se observan en los turnos de día. Este nivel de información no permite concluir respecto de los tiempos de ciclo, lo que es consistente con la información de Tabla 3, donde los tiempos de ciclo entre los turnos de día y noche para excavación en finos no presentan diferencias significativas, siendo iguales o menores a 5 %, al igual que en el caso de las gravas. Sin embargo, en el caso de finos, la mayor cantidad de correlaciones positivas en turnos de noche respecto de turnos de día se manifiesta mediante el crecimiento de las desviaciones, siendo un 33% para el paso 1 m, y más del 100 % para el paso 1,5 m.

Finos, Análisis 2.- Al igual que en el caso de las gravas, la información de la Tabla 3 demuestra que el aumento del paso de excavación en finos de 1 m a 1,5 m es efectivo en términos de rendimiento (avance/tiempo).

Nótese sí que, en finos, los tiempos de ciclo son prácticamente los mismos para el paso de excavación de 1 m y de 1,5 m, tanto en turno de día como en turno de noche. Esto indica que el aumento de rendimiento por causa de aumentar el paso de excavación de 1 m a 1,5 m es mucho más efectivo en finos que en gravas.

No obstante lo anterior, en el grupo de Finos de la Tabla 2 no se aprecian correlaciones negativas de alto nivel de confianza en finos con paso 1,5 m tanto en turno de día como de noche. Esto indica que correlaciones negativas de alto nivel de confianza entre tiempos de actividades de un ciclo son suficientes, pero no necesarias, para establecer la posibilidad de estar frente a un ciclo de trabajo que tiende a una mayor efectividad y eficiencia, sea que la base de comparación se funde en el mismo tipo de ciclo o en un ciclo similar.

Análisis de Estimación de Duración de Actividades.- Se plantea el siguiente problema: Se requiere saber cuánto durará la actividad “Perfilado” dado que la actividad anterior “Excavación” demoró hora y media en completarse. Se tiene además que las actividades se desarrollan en suelo de gravas, paso 1 m y turno de

día. Se extraen los siguientes datos del mismo registro de datos utilizados para este trabajo y se utilizan como condición inicial:

Tabla 4

Datos del problema.

Parámetro	Excavación	Perfilado
\bar{X} [hrs]	2,03	0,65
\hat{s} [hrs]	0,87	0,41
Duración / Estimado [hrs]	1,50	?

Además, la correlación entre ambas actividades es $\rho = 0,80$ para condiciones de suelo de gravas, paso 1 m y turno de día. Para utilizar la ecuación (4) se requiere, en primer lugar, calcular los valores $\mu_{2|1}$ y $\sigma_{2|1}$ mediante las ecuaciones (5) **Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** y (6):

$$\mu_{2|1} = 0,65 + 0,80 \left(\frac{0,41}{0,87} \right) (1,50 - 2,03) = 0,45; \quad \sigma_{2|1} = \sqrt{0,41^2(1 - 0,8^2)} = 0,25$$

Se supone un valor de t de Student asociado a un nivel de confianza de 90%, con grados de libertad igual a infinito por simplicidad, ya que la muestra es suficientemente grande, resultando en un valor $t = 1,282$. Por lo tanto, utilizando la ecuación (4):

$$d_{2|1} \geq 0,45 + 1,282 \cdot 0,25 = 0,77$$

Finalmente, se pronostica que la próxima actividad “Perfilado” tendrá una duración de 0,77 horas; con un nivel de confianza de 90%.

Tabla 5

Resultado del problema.

Parámetro	Excavación	Perfilado
\bar{X} [hrs]	2,03	0,65
\hat{s} [hrs]	0,87	0,41
Duración / Estimado [hrs]	1,50	~ 0,77

Verificación de la estimación.- Con el objetivo de comprobar el resultado obtenido, se recopilan los datos de las duraciones de las actividades “Excavación” y “Perfilado”, en suelo de gravas, paso de 1 m y turno de día, las cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Duración en horas de las actividades de Excavación y Perfilado, en suelo de gravas, paso 1 m y turno de día.

Excavación	Perfilado
1,00	0,25
1,00	0,25
1,25	0,25
1,50	0,25
1,50	0,25
1,50	0,50
1,50	0,50
1,50	1,00
1,75	0,75
1,75	0,25
2,00	0,50
2,00	0,75
2,25	0,50
2,50	1,00
2,75	0,75
3,00	1,50
3,75	1,00
4,00	1,50

Se resaltan las duraciones de turnos en que la excavación duró 1,5 horas. El promedio de duración de Perfilado de estos turnos es de 0,5 horas, que se encuentra por debajo de las 0,77 horas estimadas con la formulación propuesta. De esta forma, el estimado se encontraría por el margen conservador.

Por otro lado, se puede observar que las duraciones menores que 0,77 horas son 4 de 5, es decir, el 80% de los casos de las muestras están por debajo del valor estimado. Este porcentaje se puede considerar como un resultado razonable, ya que es similar al porcentaje de confianza propuesto del 90%.

Conclusiones

Conclusiones basadas en los objetivos.- Se estima que los objetivos trazados para el trabajo se han logrado. Analizando las correlaciones entre las duraciones de las distintas actividades de un ciclo de trabajo, en particular, del ciclo de construcción de los túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago, se ha propuesto un estadístico de prueba para determinar el nivel de confianza de las correlaciones, lo que resultó consistente al considerar un nivel de confianza de 80% como límite inferior para establecer la existencia de correlación, fuera positiva o negativa. La consistencia queda dada por los análisis de resultados desarrollados, donde siguiendo las conclusiones de Cho (2006) y de Eiris Pereira & Flood (2017) acerca del significado de las correlaciones positivas y negativas, se arriban a conclusiones que desde la lógica de la construcción de túneles resultan ser válidas.

Como segundo objetivo, basado en el trabajo de Ferrada (2019) y en el uso de la distribución normal bivariada, se ha propuesto una formulación para estimar la duración de una actividad a partir de la duración de una actividad anterior del mismo ciclo de trabajo, empleando los coeficientes de correlación obtenidos entre ellas en ciclos o en proyectos anteriores, lo que resultó consistente al desarrollar un par de ejemplos y contrastar sus resultados con los mismos datos originales con los cuáles se estimaron las correlaciones. La consistencia queda dada al relacionar los niveles de confianza de la estimación con la cercanía de los datos originales.

Propuestas de estudio.- Una propuesta de estudio que se desprende del primer objetivo dice relación con investigar con mayor profundidad acerca de los signos de las correlaciones y sus pendientes asociadas. Los trabajos utilizados como

referencia son relativamente recientes y existe espacio para ahondar en lo expuesto. Por ejemplo, si bien se puede afirmar que correlaciones negativas entre las duraciones de un par de actividades son relativamente virtuosas, lo serán en la medida que la suma de las duraciones de ambas actividades no sea superior a la suma de las duraciones de las mismas actividades en una condición de correlación positiva.

Respecto del segundo objetivo se desprenden dos posibilidades de mayor investigación. La primera se refiere a determinar con mayor precisión la distribución de la duración de las actividades. Si bien en el presente trabajo se asumió una distribución normal, basada en el trabajo de Ferrada (2019), se ha investigado que distribuciones como la Normal-logarítmica o la Gamma podrían representar de manera más apropiada la duración de las actividades de construcción (Mahfouz et al., 2013). La segunda posibilidad de investigación se refiere a determinar una formulación dinámica para la estimación de la duración de las actividades, que vaya actualizando las correlaciones y las estimaciones conforme avanza una obra real, lo que permitiría ir tomando decisiones respecto de dónde disponer los recursos para optimizar la duración del ciclo de trabajo.

Bibliografía

- Anderson, T. W. (2003). An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. In *Technometrics* (3rd ed., Vol. 28, Issue 2). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.2307/1270458>
- Cho, S. (2006). An exploratory project expert system for eliciting correlation coefficient and sequential updating of duration estimation. *Expert Systems with Applications*, 30(4), 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.07.024>
- Dowdy, S., Wearden, S., & Chilko, D. (2004). *Statistics for Research* (Third). John Wiley and Sons, Inc.

Eiris Pereira, R., & Flood, I. (2017). Impact of linear correlation on construction project performance using stochastic linear scheduling. *Visualization in Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-017-0045-2>

Ferrada, R. (2019). *Análisis de Desviaciones en la Estimación de la duración de Actividades en Proyectos de Ingeniería Civil*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Hutchinson, T. P. (1993). *Essentials of Statistical Methods, in 41 Pages*. Rumsby Scientific Publishing.

Mahfouz, W., Youssef, M. A., El-Dash, K. M. M., & Ramadan, O. M. O. (2013). Construction Activities Duration Patterns in the Middle East. *International Journal of Construction Engineering and M Anagement*, 2013(4), 122–135. <https://doi.org/10.5923/j.ijcem.20130204.04>

Melchers, R., & Beck, A. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (R. E. Melchers & A. T. Beck, Eds.). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119266105>

Meyer, P. L. (1986). *Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas*.

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). Applied Statistics and Probability for Engineers. In *European Journal of Engineering Education* (Vol. 19, Issue 3). <https://doi.org/10.1080/03043799408928333>

Project Management Institute. (2017). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía PMBOK)* (Sexta Edic, Vol. 44, Issue 3). Project Manajement Institute.

Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal Of Statistichal Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.

Rodríguez, E. (2016). *Análisis de metodologías de estimación de duración de actividades en proyectos de ingeniería civil*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Spiegel, M. R., & Stephens, L. J. (2009). Estadística. In *Mc Graw Hill* (Cuarta edi).

Tong, Y. L. (1990). *The Multivariate Normal Distribution*. Springer New York.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9655-0>

Triola, M. F. (2009). *Estadística* (10th ed.). Pearson Educación.

Determinación del coeficiente de orientación para elementos de hormigón reforzados con fibras de poliolefina sometidos a fractura en modo mixto.

Determination of the orientation coefficient for concrete elements reinforced with polyolefin fibers subjected to mixed mode fracture.

Wladimir Ramírez¹; Marco Alberti²; Álvaro Picazo³; Jaime Gálvez⁴

¹Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica/Departamento de Ingeniería Civil, Ambato – Ecuador, wj.ramirez@uta.edu.ec

² Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos/Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid – España, marco.garcia@upm.es

³ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Edificación/Departamento de Tecnología de la Edificación, Madrid – España, a.picazo@upm.es

⁴ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos/Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid – España, jaime.galvez@upm.es

DOI: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1800>

Resumen

Durante los últimos 60 años la utilización de hormigones reforzados con fibras (HRF) ha tenido una constante evolución. Esta técnica permite la reducción del armado tradicional mediante barras de acero en el diseño estructural de obras civiles y de edificación. Las fibras empleadas desde el principio del uso de esta técnica han sido las de acero, pero en estos últimos años otras fibras sintéticas se han abierto paso en los HRF. Así las macro fibras de poliolefina han

demostrado cumplir con los requerimientos necesarios para ser consideradas aptas en el diseño estructural. Pero este avance tecnológico de las fibras de poliolefina debe venir apoyado con el conocimiento profundo de sus características y la forma como estas se distribuyen dentro de los elementos estructurales. Por tal motivo, en el presente estudio se analiza la distribución de las fibras a través del coeficiente de orientación para elementos de hormigón reforzados con fibras de poliolefina (HRFP) sometidos a ensayos de fractura a modo mixto, los resultados indican que este tiende a disminuir con relación a un plano vertical.

Palabras clave | *Fractura en Modo Mixto, coeficiente de orientación, hormigón reforzado con fibras, ductilidad.*

Abstract

During the last 60 years the use of concrete reinforced with fibers (HRF) has had a constant evolution. This technique allows the reduction of the traditional reinforcement by means of steel bars in the structural design of civil works and buildings. The fibers used from the beginning of the use of this technique have been those of steel, but in recent years other synthetic fibers have made their way into HRF. Thus, polyolefin macro fibers have been shown to meet the necessary requirements to be considered suitable in structural design. But this technological advance of polyolefin fibers must be supported by a deep knowledge of their characteristics and the way in which they are distributed within the structural elements. For this reason, in the present study the distribution of the fibers is analyzed through the orientation coefficient for concrete elements reinforced with polyolefin fibers (HRFP) subjected to mixed mode fracture tests, the results indicate that this tends to decrease relative to a vertical plane.

Keywords: | *Mixed Mode Fracture, orientation coefficient, fiber-reinforced concrete, ductility*

1. Introducción

El refuerzo mediante barras de acero es la técnica más empleada para mejorar las características resistentes a flexión y tracción del hormigón. La adición de barras de acero complementa el buen comportamiento a compresión del hormigón y dota a esa unión, definida como hormigón armado, de una ductilidad que le habilita para ser empleado en la construcción de estructuras civiles y de edificación. Otra técnica que permite mejorar las cualidades del hormigón es la adición de fibras aleatoriamente dispuestas en su masa, formando el hormigón reforzado con fibras (HRF) (Zheng & Feldman, 1995). Para el empleo de esta técnica, desde mediados del siglo pasado, se han venido empleando fibras de acero que han dado como resultado realizaciones prefabricadas, pavimentos (Serna et al., 2009) (Zollo, 1997), revestimientos de túneles (Ghasemi et al., 2018) (Behfarnia & Behravan, 2014) y pasarelas peatonales (Lopez et al., 2014). En los últimos años el avance de la industria química ha permitido el desarrollo de macro fibras poliméricas, químicamente estables, como elemento de refuerzo en el hormigón. De esta manera se constituye el hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP) que mejora el comportamiento a tracción, flexión capacidad de deformación y tenacidad del hormigón (Alberti et al., 2015) (Zheng & Feldman, 1995) (Christ et al., 2019), dotándole de un carácter dúctil que permite ser empleado en el diseño estructural, a la vez que se elimina algún inconveniente de las fibras de acero (Sorelli et al., n.d.) (Coelho do Amaral Júnior et al., 2017) (Carmona Malatesta & Cabrera Contreras, 2009).

De igual forma las fibras poliméricas aportan beneficios, en relación con las fibras de acero, como pueden ser la reducción de peso de la estructura y la menor afección a la maquinaria empleada para el amasado y puesta en obra (Yin et al., 2015) (Sorensen et al., 2014) (G et al., 2017).

Diversos factores influyen en el comportamiento del HRF: el material, la forma de las fibras, la dosificación y su orientación en el elemento estructural (Martinie

et al., 2015) (Sarmiento et al., n.d.) (Andries et al., 2015) (Yoo et al., 2016) (Marcos García Alberty, 2015) (Aguilar et al., 2021) (Zerbino, n.d.).

En este trabajo se evalúan diferentes tipos de HRFP sometidos a ensayos de flexión en tres puntos modificados para producir fractura por combinación de esfuerzos de corte y tracción (Modo mixto). Se ha empleado un hormigón fluido con una cuantía de fibras de poliolefina de 3, 6 y 10 kg/m³ en probetas prismáticas de 600x150x150 mm³, un hormigón fluido sin fibras como control y un hormigón autocompactante con 10 kg/m³ de fibras de poliolefina con tres tamaños diferentes. Los resultados obtenidos muestran como varía el coeficiente de orientación en la sección transversal de la probeta .

2. Metodología

Se desarrolló una investigación experimental a partir de la elaboración de probetas prismáticas con hormigón fluido y hormigón autocompactante, cuyas dimensiones se indican en la Tabla 1, en la dosificación se usaron diferentes cantidades de fibra de poliolefina entre 3 y 10 Kg/m³ para las probetas de hormigón fluido, mientras que para las probetas de hormigón autocompactante la dosificación se mantuvo constante en 10 Kg/m³. Sobre las probetas se realizaron ensayos de flexión modificados para reproducir la fractura por modo mixto y posteriormente a través de un conteo de fibras se analizó la distribución de estas, para tres planos: el plano de fractura por modo mixto, un plano vertical sobre la entalla de la probeta y un plano vertical de toda la sección que cruza por la entalla.

Tabla 1.

Características de las probetas realizadas en la campaña experimental

Hormigón	Dimensiones (mm)			Número de Probetas	Dosificación (kg/m ³)	Longitud de Fibra(mm)	Denominación
	Longitud	Ancho	Altura				
Fluido	600	150	150	2	-	-	HF0
Fluido	600	150	150	1	3	60	HF3
Fluido	600	150	150	2	6	60	HF6
Fluido	600	150	150	2	10	60	HF10
Autocompactante	340	50	75	3	10	48	WP
Autocompactante	675	50	150	5	10	48	WM
Autocompactante	1350	50	300	4	10	48	WG

2.1 Materiales, dosificación y características

Para la fabricación de las probetas de hormigón fluido y autocompactante se usó cemento tipo EN 197-1 CEM I 52.5 R-SR 5, áridos silíceos formados por gravillas y gravas con tamaños de 4 a 8 mm y 4 a 12 mm. Además, se usó arena con un tamaño entre 0 y 2 mm. El tamaño máximo del agregado fue de 12.7 mm. Como adición se usó filler calizo con densidad 2700 kg/m³ y superficie específica 400-450 m²/kg. El contenido de carbonato de calcio del filler calizo fue mayor del 98% con menos del 0.05 % retenido en el tamiz de 45 um. Para lograr la consistencia adecuada se empleó Sika Viscocrete 5720, un superplastificante a base de polycarboxilatos con un contenido sólido del 36% y 1090 Kg/m³ de densidad. Se usaron fibras rectas de poliolefina con longitudes de 60 y 48 mm para hormigón fluido y autocompactante respectivamente. La dosificación de estos hormigones se muestra en la Tabla 2 y las características de las fibras en la Tabla 3.