

## 6. CONCLUSIONES

- A partir de la revisión bibliográfica, pudo concluirse que el uso de la normatividad internacional (basadas en muchas observaciones), es el estándar de trabajo para la evaluación de los efectos de las vibraciones causadas por actividad humana sobre las estructuras.
- Se observó además que las normas internacionales de manejo de vibraciones han venido desarrollándose lentamente: en un principio las normas únicamente tenían en cuenta la velocidad (vertical o resultante), después se incluyó la frecuencia de las solicitaciones. Se pudo observar que la tendencia es incluir la duración de las vibraciones en el análisis, concepto aún no implementado en las normas pero conceptualizado por la *ISO*.
- En general, el uso de las computadoras ha cambiado y revolucionado todas las áreas donde se trabaja con datos, esto también ha sucedido en el campo de las vibraciones. Los métodos anteriormente utilizados para la determinación de las frecuencias y velocidades de partícula, los cuales estaban basados en la aplicación de reglas empíricas por tanteo en la información, han sido reemplazados por métodos más sofisticados y precisos. Sin embargo, estos nuevos métodos, y en especial el análisis de Fourier, han sido utilizados sin tener en cuenta sus limitaciones, lo cual es posible que haya llevado a interpretaciones erróneas.
- Para la aplicación de algunas normas es necesario calcular o estimar la frecuencia asociada a la velocidad máxima (por componente o resultante), la cual se puede obtener mediante el análisis de Fourier, cruces por ceros o espectro de respuesta, aunque con estos tres métodos se obtienen resultados diferentes. Como la mayoría de las normas establecen valores máximos aceptables para frecuencias asociadas al máximo de vibración, se decidió usar un método más objetivo para este fin, para lo cual se utilizó la frecuencia instantánea, que está basada en las relaciones de tiempo–frecuencia.
- Durante las mediciones se obtuvieron 504 registros de vibraciones producidas por voladuras de la mina La Calera, en tres estaciones de monitoreo ubicadas en las poblaciones de Mulaló y San Marcos. Todos los registros fueron utilizados para evaluar la relación entre frecuencia instantánea, cruces por cero y análisis de Fourier.
- Se analizaron tres métodos para el cálculo de las frecuencias: 1) cruce por ceros (implementado con el método de la bisección), 2) análisis de Fourier y 3) frecuencia instantánea. Se observó que cruce por ceros y frecuencia instantánea arrojan resultados similares entre ellos, mientras que el análisis de Fourier arroja resultados diferentes

a lo obtenido para frecuencia instantánea y cruces por cero.

- Para el caso específico de la iglesia de Mulaló (la edificación más antigua y susceptible de la región) se verificaron las normas internacionales de control de vibraciones. Para esto se encontraron o calcularon los valores representativos de velocidad y frecuencia máximas admitidas por las normas, teniendo en cuenta las condiciones más parecidas (tipo de edificación, suelo, etc.) o las más desfavorables de la norma. Los valores de velocidad resultante máxima y frecuencia asociada de los registros fueron comparados con los de las normas, encontrándose que ninguna voladura registrada superó los valores representativos; es decir, para este caso concreto los datos demuestran que Cementos del Valle cumplió las recomendaciones de las normas.
- Se describieron las relaciones empíricas (estado de la técnica) desarrolladas para explosiones y aplicadas a vibraciones producidas por voladuras. De estas, se utilizó la que relaciona la velocidad resultante con los parámetros de diseño de las voladuras (carga  $W$  y distancia  $R$ ) por que es la que esta relacionada con el impacto ambiental. Por medio de un análisis de regresión se estimaron los parámetros  $K$  y  $\alpha$  de la ecuación  $\dot{u} = K(R/\sqrt[3]{W})^\alpha$  en escala logarítmica, ecuación que es usada para la predicción de la velocidad resultante máxima.  
Para Mulaló se obtuvieron los valores  $K = 104$  y  $\alpha = -1.40$ , con  $R^2$  de 0.26; para San Marcos se obtuvieron  $K = 20$  y  $\alpha = -0.97$ , con  $R^2$  de 0.04. Sin embargo, dada la inhabilidad del método de mínimos cuadrados para “eliminar” *outliers* (datos extremos) las rectas no muestran la tendencia real de los datos, por lo cual se plantearon dos rectas basándose en la física del fenómeno y en la tendencia de los datos; de acuerdo con esto se obtuvo para Mulaló los valores de  $K = 251190$  y  $\alpha = -3.06$ , y para San Marcos valores de  $K = 1000000$  y  $\alpha = -3.06$ . Se pudo observar una diferencia en el valor  $K$  entre San Marcos y Mulaló, que posiblemente es debida a cambios en la impedancia de los suelos en cada una de las poblaciones (posiblemente mayor en Mulaló que en San Marcos) o a problemas con los datos.
- Finalmente se discutió que las principales causas de la dispersión de los datos respecto a la relación empírica puede ser debida a la poca cobertura en ordenes de magnitud de la variable distancia escalada, pero principalmente al uso de la carga total ya que no se contaba con información detallada respecto a la carga detonada por unidad de tiempo, que es el valor que debiera ser utilizado en esta relación. ■