

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

Autor : Derly Vizcarra Arias
Superintendente de Perforación y Voladura - Minera Las Bambas.

Coautor: Carlos Mattmet Lizares
Ingeniero de Diseño de Perforación y Voladura - Minera Las Bambas

Ubicación

La Unidad Minera Las Bambas se ubica entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, y el distrito de Progreso, provincia de Grau, en la Región Apurímac, a una altitud que varía entre los 3.800 y 4.600 m.s.n.m., aproximadamente a 75 km al suroeste de la ciudad de Cusco.

Actualmente, llevamos a cabo actividades mineras de explotación del yacimiento Ferrobamba y, posteriormente, realizaremos actividades de extracción de minerales de los yacimientos Chalcobamba y Sulfobamba. La planta concentradora de Las Bambas tiene una capacidad instalada de 145.000 toneladas por día (t/d), y genera concentrado de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) como producto.

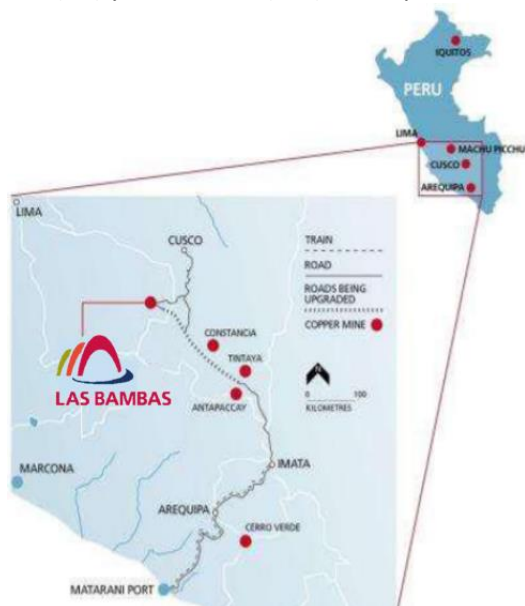


Figura 1: Ubicación de Minera Las Bambas

Además, el transporte de material concentrado se realiza en contenedores cerrados, desde Las Bambas hasta el Puerto de Matarani (750km).

Situación

Las vibraciones generadas por las voladuras pueden alterar la matriz del macizo rocoso a corta y larga distancia desde el punto de disparo.

Se puede presentar un desplazamiento de roca no controlado sino se tiene un buen control de las zonas de falla, cuñas y zonas alteradas.

En las Fases 3 y 5 del tajo Ferrobamba se tienen zonas alteradas, fallas y planos estructurales desfavorables.

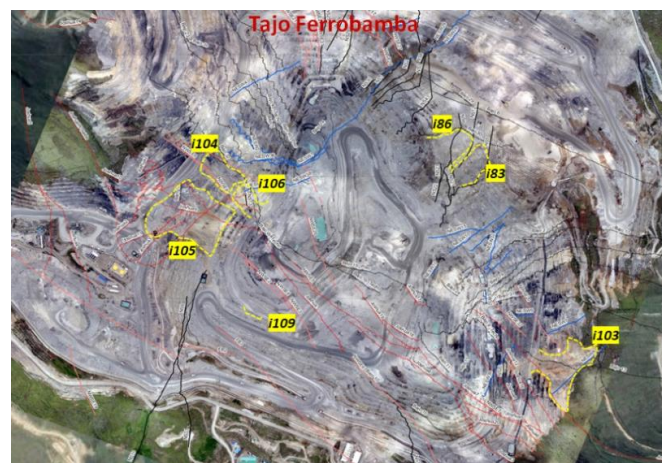


Figura 2: Muestra las zonas alteradas y planos estructurales del Tajo Ferrobamba.

Objetivo

Reducir el impacto por voladura hacia los taludes aplicando metodologías técnicas que permita reducir

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

las vibraciones e incrementar las frecuencias durante el proceso de voladura.



Figura 3: Deslizamiento 104 Fase 3

Solución del problema planteado

El impacto de las voladuras hacia los taludes está definido por los parámetros de diseño de voladura en mallas de contorno y de producción. Por lo tanto, para lograr el objetivo de disminuir el impacto producido por la voladura, se plantea realizar una metodología de estudios técnicos de 6 etapas (figura 4), utilizando desde la información geomecánica, estudios de vibraciones en campo cercano y lejano para establecer los criterios de daño por litología, tipo de explosivo determinada por la cantidad de energía a desarrollar, modelamiento de vibraciones pre-voladura, estudios de onda elemental para determinar los tiempos óptimos de retardo entre taladros y filas que reduzcan las vibraciones e incrementen las frecuencias hasta la conciliación geotécnica.

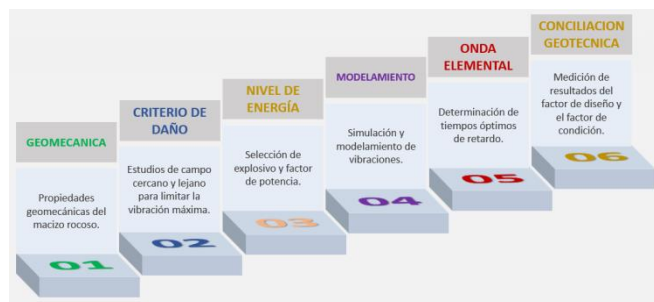


Figura 4: Metodología para el estudio de control de daño

En seguida se desarrolla cada elemento de la metodología

1. Macizo rocoso

La caracterización geomecánica del macizo está dada por variadas fuentes, dentro de las cuales se puede destacar las siguientes.

Conocimiento geotécnico; la precisión en la determinación de propiedades elásticas, de resistencias estructurales y especialmente condiciones hidrogeológicas definirán el grado de estabilidad que el macizo rocoso tendrá, cuando sean sometidos a eventos de presión provenientes de voladuras.

Tipo de Roca	Abrev.	Codigo U.T.	Densidad (g/cm ³)	RMR (%)		Enc. Modulo de Young (GPa) Macizo rocoso		Módulo de Poisson	E. Modulo de Young (GPa) Roca Intacta		v _p : Velocidad de Onda P (m/s)	
				Min	Max	Min	Max		Mean	Min	Max	Min
Skarn	SK	40	3.750	43.07	78.65	6.71	57.70	0.18	31.61	103.83	3287	5883
Mirmol	MBL	47	2.871	42.55	73.99	6.51	47.88	0.27	32.12	98.82	3789	6558
Mármol con Calcocilicatos	MBC	48	2.827	45.58	74.56	7.75	49.12	0.32	35.35	99.58	4258	7100
Endo Skarn	ENDO	50	2.870	43.31	75.29	6.80	50.58	0.27	32.86	100.48	3782	6634
Contacto Brecha	BX	62	2.588	22.94	52.84	1.11	5.68	0.25	17.91	21.85	2882	3124
Monzonita Biotita	MZB	76	2.636	38.59	70.47	5.49	40.94	0.28	29.41	92.80	3777	6755
Monzonita Hornblenda	MZH	77	2.636	37.92	70.7	4.96	41.40	0.19	27.96	93.45	3469	6238
Monzonita Mafica	MM	78	2.636	38.27	70.55	4.54	41.10	0.32	28.64	93.24	3803	7111
Monzonita Cuarzifera	MZQ	79	2.636	41.27	71.75	6.05	43.50	0.21	30.92	95.34	3634	6381
Monzonita Biotitica Fino	MBF	86	2.636	40.42	70.28	5.76	40.56	0.19	30.15	92.80	3543	6270

Cuadro 1: Parámetros geotécnicos bajo Ferrobamba

Condiciones estructurales; La presencia de estructuras semi paralelas a la orientación del talud, calidad de sellado las cuales al estar abiertas o con sellos de alta solubilidad permiten la filtración de las aguas lluvias.

Deterioro de propiedades geotécnicas; el tiempo es un factor relevante en el posible deterioro de las propiedades cohesivas de la roca, especialmente si viene acompañada con agentes meteorizantes como es el agua proveniente de lluvias.

2. Criterio de daño

Estudio de Campo cercano y lejano:

Los valores de las constantes k y α son determinadas in-situ mediante la implementación de un programa de monitoreo de Pruebas Especiales (los valores son característicos de cada tipo de macizo o UGT).

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

- Se realizó 2 estaciones o arreglos de geófonos triaxiales y múltiples taladros para definir estos parámetros.

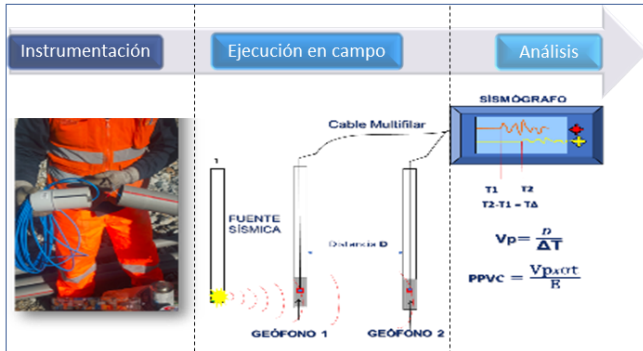


Figura 5: Pasos para monitoreo de prueba especial

Luego se determina la velocidad de propagación de onda (V_p).

En seguida se determina el criterio de daño escalando las propiedades elásticas (módulo de Young y resistencia a la tracción) al macizo rocoso y utilizando también V_p obtenida para la UG Caliza Marga.

$$PPV_{cmr} = \frac{(\sigma_t * e^{\frac{RMR-100}{27}} * V_p(Cross-hole))}{E * e^{\frac{RMR-100}{36}}}$$

En donde:

σ_t = Resistencia Traccional de roca intacta.

E_i = Modulo de deformación de roca intacta.

RMR = Clasificación de macizo rocoso Bieniawski 1989.

Donde se obtiene un valor de PPV crítico y se clasifica en el siguiente cuadro.

Lito	UCS (Mpa)	Em (Gpa)	Tx (Mpa)	E (I) (Gpa)	VP (I) (m/s)	PPVc (I) (mm/s)
Skam	111.9	21.9	12.8	44.8	5 052	1 442
Marmol	97.5	16.5	6.6	41.0	4 867	786
Marmol con Calcosilicatos	113.1	20.1	7.6	45.1	5 066	853
Endo Skam	189.6	18.6	12.6	63.4	5 830	1 155
Contacto Brecha	46.4	5.0	3.9	25.2	3 976	610
Monzonita Biotitica	208.0	10.1	13.0	67.3	5 979	1 157
Monzonita Hortblendica	171.2	8.5	11.1	59.3	5 670	1 065
Monzonita Mafica	190.1	6.8	13.2	63.5	5 834	1 209
Monzonita Cuarzifera	191.0	13.0	12.5	63.7	5 842	1 149
Monzonita Biotitica Fina	198.7	10.7	11.8	65.4	5 905	1 062

Cuadro 2: Criterio de daño PPVc

3. Nivel de energía

Propiedad importante de los explosivos ya que define su sensibilidad, su velocidad de detonación y diámetro crítico, a continuación, se muestra su impacto directo en los peak de vibraciones.

En la ecuación de campo cercano H&P (Holmberg&Persson) relacionamos la velocidad pico partícula (PPV) en función al diámetro de carga y la densidad del explosivo, esto al hacer constante la distancia al punto de monitoreo, es decir:

$$PPV = k * \left[\left(\frac{\gamma}{R_0} \right) \left\{ \arctan \left(\frac{H + X_S - X_0}{R_0} \right) + \arctan \left(\frac{X_0 - X_S}{R_0} \right) \right\} \right]^\alpha$$

$$PPV = k * (\gamma)^\alpha * \left(\frac{Constante}{R_0} \right)^\alpha$$

$$PPV \sim (\gamma)^\alpha$$

$$PPV \sim (\phi^2)^\alpha * (\delta)^\alpha$$

- Bajar un 20% la densidad del explosivo en un mismo diámetro, la vibración (PPV) a igual distancia se reduce en un 20%.
- Bajar un 20% el diámetro y utilizar el mismo explosivo la vibración (PPV) a igual distancia se reduce en un 36%.

A continuación, un ejemplo de monitoreo de dos taladros aislados con la misma configuración de carga explosiva, el primero cargado con ANFO (0.8 g/cc) y el segundo taladro con explosivo de menor velocidad de detonación y menor presión de detonación, la variación de densidades es de 25% y en el registro real de vibraciones presenta una reducción del 34.4% como se muestra:

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

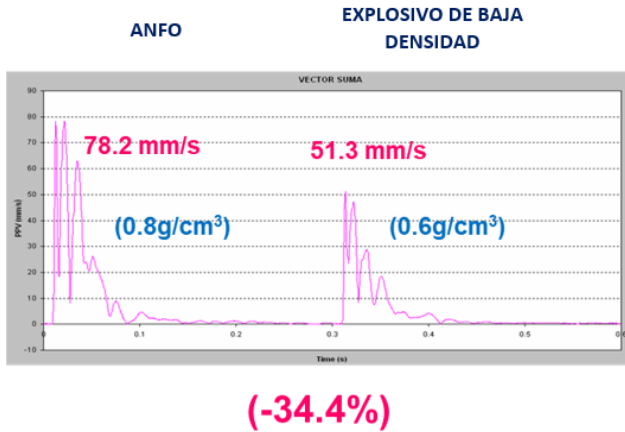


Figura 6: Registro de vibraciones comparativo

En base a lo demostrado, aplicar una densidad baja de explosivo en los taladros de control es fundamental en la reducción directamente proporcional de vibraciones.

Por lo tanto, los explosivos de baja densidad reducen el nivel de vibraciones y distribuyen la energía en mayor longitud de columna explosiva, mejorando la estabilidad de taludes y la fragmentación en este sector.

La presión de detonación permite contrastar la capacidad de fragmentar la roca debido a la onda producida por el proceso de detonación.

Su valor es calculado en función a la densidad y la velocidad de detonación según:

$$P_d = 0.25 \rho \times VOD^2 \times 10^{-3}$$

Al poseer valores bajos de densidad, la VOD y la presión de detonación serán menores, por lo tanto, menor el potencial de generar fracturas en el macizo rocoso.

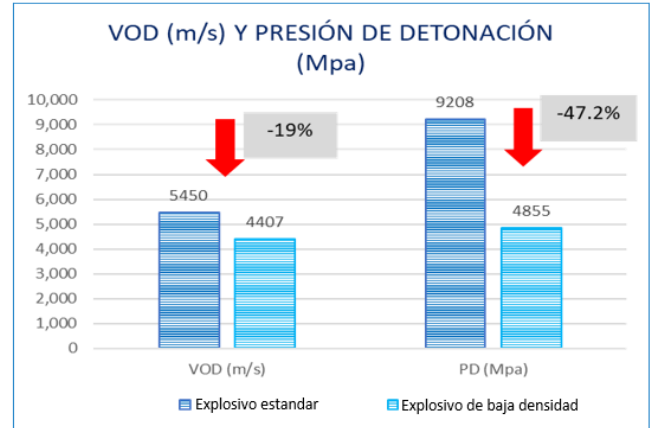


Figura 7: Comparación de presión y velocidades de detonación de los explosivos de baja densidad

4. Modelamiento

La distribución de la carga explosiva en los diseños de perforación propuesta, son simulados recopilando toda la información obtenida para lograr una distribución energética que permita un mejor resultado en función a los objetivos de equilibrar el control de taludes obteniendo también una buena

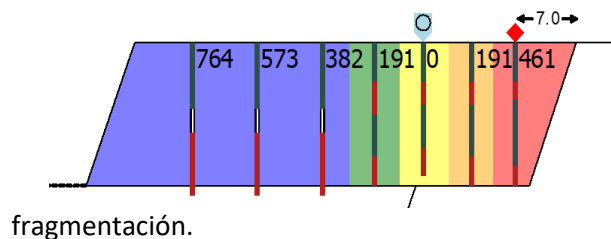


Figura 8: Detalle de diseño propuesto

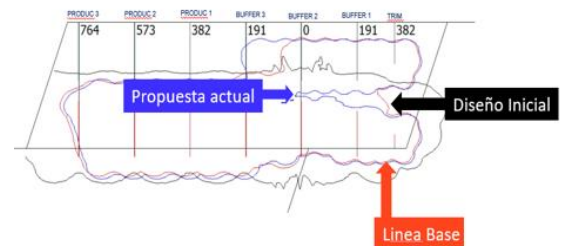


Figura 9: Comparación de contornos de vibración

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

En comparación de la distribución energética con los contornos de vibraciones se obtiene una reducción de vibraciones como se muestra en el cuadro siguiente.

Diseño del talud	Explosivo estandar	Explosivo de baja densidad
Cresta	100%	70.40%
Berma	100%	55.50%
Toe	100%	70.40%

Cuadro 3: Comparación de reducción de vibraciones

5. Onda elemental

Mediante la metodología de modelamiento de onda elemental se determina el tiempo de acoplamiento de retardo entre taladros y filas, para el diseño de las voladuras.

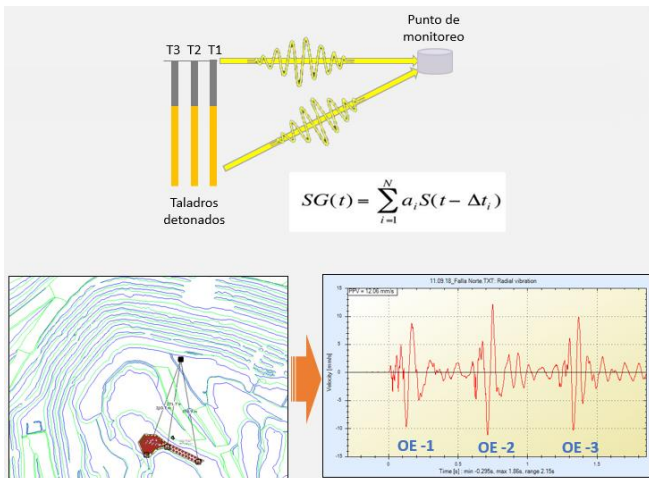


Figura 9: Modelamiento de tiempos de retardo mediante el estudio de onda elemental

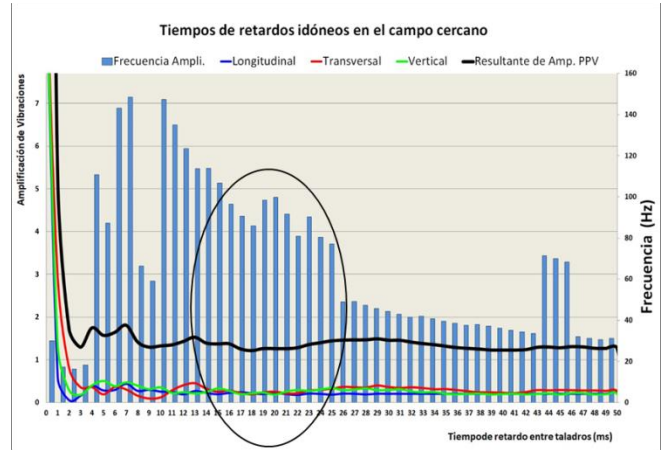


Figura 9: Amplificador de vibraciones-tiempo de acoplamiento

Por acoplamiento de tiempos se determina el rango de tiempos de 15 ms a 28 ms se obtiene la menor amplificación de vibraciones, recomendando 21 ms entre taladro y 210 ms entre filas.

Caso de estudio

Para el siguiente caso de estudio se realizó una voladura con diferentes tiempos de retardo (21 – 28 ms) entre taladros para determinar el tiempo óptimo.

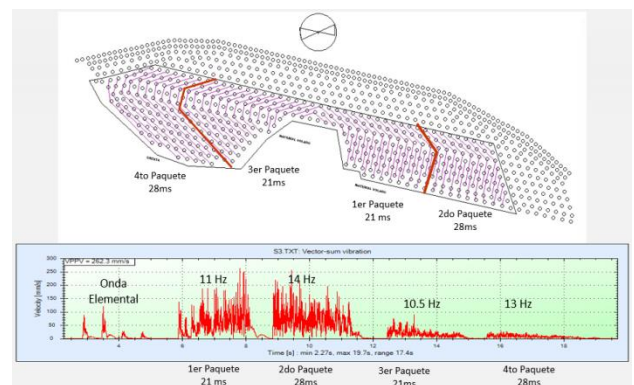


Figura 10: Secuencia de la voladura por tipo de retardo

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

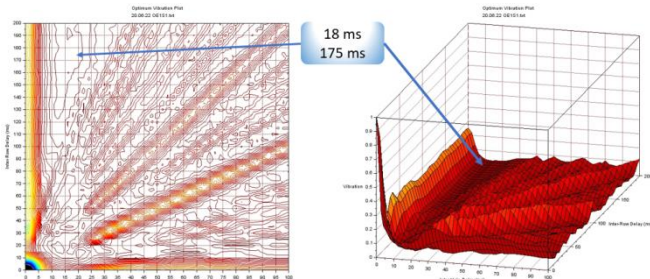


Figura 11: Análisis de tiempo óptimo de retardo entre taladros y entre filas

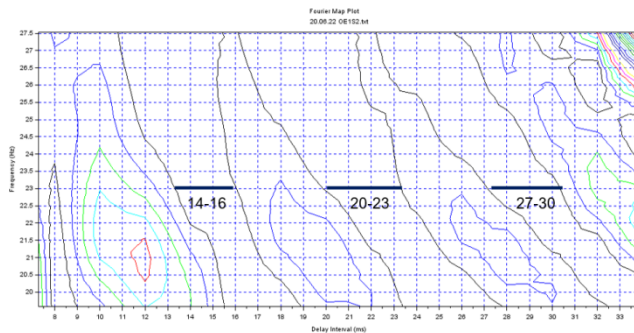


Figura 12: Análisis de tiempo óptimo de retardo por tramos

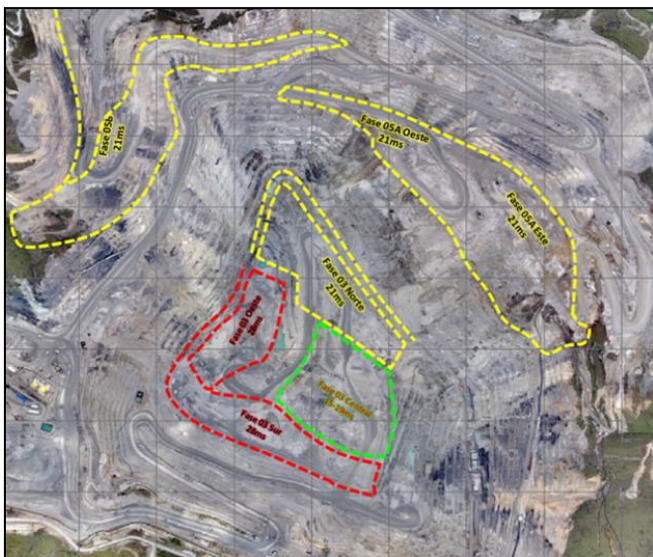


Figura 13: Modelamiento de tiempos de retardos óptimos para el tajo Ferrobamba

A raíz del estudio de onda elemental se pudo modelar el tajo Ferrobamba con los tiempos óptimos de retardo por zona y por fase.

6. Conciliación geotécnica de taludes

Esta técnica se realiza para determinar el nivel de coincidencia entre el diseño de taludes planificado y el realmente obtenido.

Resumen de Perdida de Cresta			CB			
Nivel	Proyectos	N° Banco	2020	2021	Δ	%Δ
3975 - 3960	Remediación Nv.3975 - 3960	B1	5.18	2.93	-2.25	-43%
	Remediación Nv.3975 - 3960	B2	5.18	1.97	-3.21	-62%
3960 - 3945	Remediación Nv.3960 - 3945	B1	8.57	1.30	-7.27	-85%
	Remediación Nv.3960 - 3945	B2	8.57	0.69	-7.88	-92%
3945 - 3930	Remediación Nv.3945 - 3930	B1	4.03	1.38	-2.65	-66%
	Remediación Nv.3945 - 3930	B2	4.03	0.43	-3.60	-89%
3930 - 3915	Remediación Nv.3930 - 3915	B1	16.05	0.61	-15.44	-96%
3915 - 3900	Remediación Nv.3915 - 3900	B1	4.80	2.73	-2.07	-43%
3900 - 3885	Remediación Nv.3900 - 3885	B2	5.41			
Promedio:			6.87	1.51	Promedio %ΔCB	-72%

Cuadro 4: Resumen de conciliación de resultados de Cresta 2020-2021

Resumen de Extensión de Toes			TB			
Nivel	Proyectos	N° Banco	2020	2021	ΔTB	%TB
3975 - 3960	Remediación Nv.3975 - 3960	B1	4.87	1.84	-3.03	-62%
	Remediación Nv.3975 - 3960	B2	4.87	4.02	-0.85	-17%
3960 - 3945	Remediación Nv.3960 - 3945	B1	2.49	2.17	-0.32	-13%
	Remediación Nv.3960 - 3945	B2	2.49	3.71	1.22	49%
3945 - 3930	Remediación Nv.3945 - 3930	B1	4.94	1.75	-3.19	-65%
	Remediación Nv.3945 - 3930	B2	4.94	1.14	-3.80	-77%
3930 - 3915	Remediación Nv.3930 - 3915	B1	4.80	1.45	-3.35	-70%
3915 - 3900	Remediación Nv.3915 - 3900	B1	10.13	2.78	-7.35	-73%
3900 - 3885	Remediación Nv.3900 - 3885	B2	2.71			
Promedio:			4.69	2.36	Promedio %ΔTB	-41%

Cuadro 5: Resumen de conciliación de resultados de toe 2020-2021

Los valores obtenidos en los factores de diseño en cresta y toe se observan mejores resultados para el 2021.

	2020	2021	Δ%	
CB	6.87	1.51	-72%	(-) Reducción perdida de cresta
TB	4.69	2.36	-41%	(-) Reducción extensión de toe
BFA	0.45	0.55	24%	(+) Incremento del BFA

Cuadro 6: Resumen de conciliación de talud

Optimización de Tiempos de Retardo Mediante Estudios de Onda Elemental en Minera Las Bambas

Los resultados reales de la conciliación de diseño, según lo indicado por el área de geotecnia de Las Bambas indican que se redujo el daño en cresta en un -72% y en el toe 24%.

Conclusiones

- El monitoreo de la onda por detonación de taladro individual permitió la simulación de las voladuras de acuerdo al criterio de daño.
- Se definió una relación óptima entre secuencia de salida y tiempo de retardo entre taladros y filas con el fin de reducir el daño hacia los taludes.
- Se pudo asociar los criterios de diseño de los proyectos de voladura con el fin de incrementar el nivel de las frecuencias.
- Entre el 2020 y 2021 se pudo reducir la pérdida de cresta en un 72% y la presencia de toe se redujo en un 41%.
- El impacto por vibraciones hacia los taludes aplicando la metodología técnica de control de paredes, explosivo de baja densidad y modelamiento de tiempos de retardo por estudio de onda elemental, validado por la conciliación por parte del área de geotecnia cumple el objetivo planteado.
- Es importante continuar con la actualización de estudios de onda elemental por cada nuevo banco, esto debido al cambio de las propiedades geomecánicas a medida que se profundizan las fases.