

# Oxígeno líquido como explosivo en Chuquicamata. Chile.

POR H. C. SCHULTZ (1) Y F. K. MIDLETON HUNTER (2), CHUQUICAMATA, CHILE.

(Reunión del A. I. M. E. en Nueva York, Feb. 1928)

*Traducido por Juan L. Carrasco C.) (3)*

**C**IERTAS condiciones locales indujeron en gran parte, al uso de explosivos de oxígeno líquido en las grandes voladuras que se hacen en Chuquicamata. La gran variación en la dureza de la roca en esta mina, hace necesario el uso de diferentes tipos de explosivos. Una pólvora negra, relativamente barata, que se fabrica en la vecindad, se usa en material blando y coronamientos donde un desplazamiento rompe suficientemente el terreno. Antes de introducir el L. O. X. una dinamita de amoníaco de 65% de potencia, se usaba exclusivamente en las capas más duras, donde un fuerte efecto quebrantador como también de desplazamiento era necesario para romper el mineral. El L. O. X. desarrollado para cantera en EE. UU. tiene un cartucho de carón casi puro y el explosivo tiene un grado extremadamente alto de deto-

nación, el cual debería por consiguiente encausar el desarrollo completo de su acción demolidora en terreno duro.

Las voladuras individuales en Chuquicamata son grandes, tiros de pólvora negra los cuales desalojan masas de roca de 250 000 toneladas cada una en término medio, y tiros de dinamita que desalojan masas de 80 000 toneladas término medio. Se hizo necesario por consiguiente, tratar de desplazar con L. O. X. la más rápida y costosa dinamita de amonía que se usaba en los tiros pequeños. No se considera práctico tratar de desplazar la pólvora negra barata con L. O. X. desde que estimaciones de costo no demostraron probables economías si esto se hubiera realizado.

Desde que era deseable continuar tiros grandes para operación efectiva, se reconoció que mayores facilidades para almacenar que las existentes serían

(1) Assistant Engineer, Chuquicamata Mine—Chile Exploration Co.

(2) Junior Engineer, Chuquicamata Mine—Chile Exploration Co.

(3) Mechanical Engineer, Chuquicamata—Chile Exploration Co.

necesarias para el oxígeno líquido. Debido a la dificultad de transportar y descargar grandes receptáculos de almacenaje de diseño eficiente, se encontró mejor almacenar y descargar el líquido en el lugar de su fabricación y transportar las cajas impregnadas al lugar de la voladura.

#### PLANTA DE OXÍGENO—LÍQUIDO ACTUAL

Una unidad experimental de capacidad de 75 lts. por hora se levantó a fines del año 1926, para investigar la eficacia del L. O. X. en esta mina, su costo, y el posible rendimiento del almacenaje en grande escala del líquido. Con esta unidad experimental, 200 000 toneladas de mineral se hacen volar cada mes y un total de 1 265 700 toneladas se han volado con L. O. X. hasta Octubre 31 de 1927.

El aire es comprimido a 853 lb. por pulgada cuadrada en una compresora Ingersoll—Rand de tres etapas. El aparato decarbonizador de alta presión y el aparato Claude de sistema de liquidación fueron suministrados por L'Aire Liquide de París.

La hoja del recorrido (Fig. 1) se diferencia de la que indican O'Neil y Van Fleet (1) en dos aspectos. En primer lugar, la decarbonización o estregadura del aire se efectúa después de haber sido comprimido; esto economiza espacio y probablemente algo en el costo inicial de la planta sobre el otro método de estregar a presión atmosférica antes de comprimir. En segundo lugar, el trabajo efectuado por la máquina de expansión en su émbolo, es utilizado para dar movimiento a una compresora conectada directamente, la cual recom-

prime parte del aire del circuito principal que entra al aparato de liquidación a 2 845 lbs. por pulgada cuadrada (para facilitar liquidación mediante su expansión posterior), en lugar de convertir este trabajo en energía eléctrica en un generador o disiparla como calor.

La máquina de expansión ha sido la causante de los mayores atrasos de operación que ninguna otra parte del aparato de liquidación. Necesita cambios frecuentes de las suelas de empaquetadura y continuos ajustes de las válvulas.

La producción de la Planta no es absolutamente la especificada de 75 lts. por hora; ordinariamente es alrededor de 73,5 lts. por hora. Varía dentro de los límites determinados por el funcionamiento perfecto de las máquinas; algún desgaste de las empaquetaduras; obstrucciones en los tubos de cambio de calor; o congelación en el aparato para liquidar, con hielo o carbón de óxido sólido, inmediatamente tienen su efecto en disminuir la producción. La Planta opera 24 horas diarias, incluso los domingos, para mantener las pérdidas debido a almacenaje en un minimum.

#### ALMACENAMIENTO DE OXÍGENO LÍQUIDO

El problema de almacenar en gran escala fué sometido a la Purox Co. de Denver, la cual ha tenido práctica en el diseño de receptáculos pequeños de paredes con vacío. Se tomó en consideración las propiedades aisladoras del vario y de material aislador sólido para receptáculos grandes para almacenar oxígeno líquido. L. E. Bedortha, de la Purox Co calculó que un receptáculo para 1 000 galones requeriría una capa aisladora de 10 pies de espesor (de planchas de corcho, lana mineral o aisladores similares) para igualar el valor aislador de una pulgada de vacío (el vacío correspon-

(1) F. W. O'Neil and Van Fleet: Liquid Oxygen as an Explosive. Trans. (1926) 74 690.

diente a una presión absoluta de 0.0001 mm. de mercurio). Esto significaría un almacenaje molesto con 30 pies de alto y 25 de diámetro. Algunas desventajas de semejante receptáculo son:

1. Soportes adecuados transmitirían calor al receptáculo.
2. La gran cantidad de material aislador tiende a empaquetarse y disminuye sus propiedades aisladoras.
3. Si no se almacena herméticamente absorberá humedad y pierde su rendimiento.
4. Necesitaría cañerías para cargar y descargar aumentando las pérdidas debido a evaporación.

Detalles del diseño de grandes receptáculos con dobles murallas con vacío fueron establecidos por el Sr. Bedortha como sigue.:

1. Es esencial que se use un metal impenetrable a gases (tanto como ello sea posible) y que también no sea debilitado por la temperatura baja del oxígeno líquido.
2. Todas las suturas y juntas deben ser impermeables al vacío.
3. El material para las paredes del espacio para el vacío, debe ser tal, que cuando bien pulidas, deben eliminar calor por radiación.
4. La construcción debe ser tal, que inmediatamente después de terminar de pulir las paredes el receptáculo puede armarse y establecerse el vacío. Así será posible de unir rápidamente los tubos del yugo interior y exterior en una junta impermeable.
5. El diámetro y calibre del yugo del tubo interior debe mantenerse en un *mínimum*, permitiendo suficiente rigidez para soportar el peso y tamaño necesario para acomodar cañerías para cargar y descargar.
6. Es también necesario proveer un medio de espaciar los cascos interior y

exterior lo cual no permitirá el movimiento de un casco con respecto al otro durante el período de transportación y lo cual puede removerse cuando el receptáculo esté en uso.

7. Medios deben proveerse para mantener un vacío correspondiente a una presión absoluta de 0.0001 mn. de mercurio.
8. Medios deben proveerse para evitar perjuicios al receptáculo que pueden originarse por la construcción de los metales a bajas temperaturas.

Se decidió usar tres receptáculos de 1 000 galones cada uno con murallas para vacío, para almacenar la producción de una semana de la planta de 75 litros. Estos receptáculos fueron contruídos por la American Welding Co., bajo la vigilancia de L. E. Bedortha de la Purox Co. quien los probó y los encontró impermeables antes de hacer el embarque. Las paredes a ambos lados del vacío son de 5/8 de pulgada de espesor y son forradas con láminas de cobre y pulidas como un espejo. El espacio del vacío fué llenado con nitrógeno seco para evitar el deslastre del cobre durante el viaje.

Un juego de aparatos para producir el vacío se usa en cada receptáculo. Consiste de una bomba Gaede para difusión del mercurio, conectada al espacio para el vacío mediante una válvula de aire y apoyada por una bomba de aceite Cenco-Hyvac, la cantidad de vacío se lee en un registrador Columbia. La disposición de este aparato, indicado en la Fig. 2, fué ideado por los Srs. Bedortha, y A. M. Rodgers del cuerpo de técnicos de la Mina, colocaron los aparatos sin dificultad y reprodujeron el vacío en los receptáculos a un grado aproximado al del que se calculó cuando se diseñaron. La Fig. 3 indica el vacío medio que se mantiene en los estanques mientras

operan e indica la pérdida de oxígeno líquido en litros por hora correspondiente a varios grados de vacío.

El trabajo de las bombas debe ser constante, por lo menos mientras los estanques contienen oxígeno líquido para mantener el vacío requerido. No se considera propio usar un absorbente de carbón de madera para pequeñas cantidades de gas que pudieran escurrirse en el espacio del vacío, como se hace en receptáculos pequeños, debido a las dificultades de su renovación.

Los tres receptáculos tienen una capacidad total de 10 000 litros y necesitan de una semana para llenarse con oxígeno líquido. Los receptáculos están sentados bajo el nivel del piso de la planta para permitir llenarlos por gravedad mediante la válvula para trasegar.

#### CARGAR Y DESCARGAR

El oxígeno líquido es conducido de la válvula de trasegar a los receptáculos de almacenar por una cañería de cobre de  $5/8$  de pulgada que va dentro de una cañería de 3 pulgadas aislada con fieltro y que lleva una corriente de oxígeno evaporado frío en dirección opuesta.

Las pérdidas por evaporación durante la carga es proporcional al largo de la cañería de carga que va a los diferentes receptáculos. Para el aislamiento que se ha descrito, esta pérdida se va calculando aproximadamente en 0.2 litros por hora por pie lineal de cañería de carga bajo condiciones medias del aislamiento de gas frío.

\* \* \*

Los receptáculos de almacenaje son descargados a una presión de aire de 15 litros por pulgada cuadrada mediante una manguera metálica flexible de  $1\frac{1}{2}$

pulgada cubierta con algodón, a una cañería aislada múltiple y de esta cañería mediante mangueras metálicas flexibles de  $3/4$  de pulgada simultáneamente dentro de cuatro cajas empapadoras. Alrededor de 20 minutos son necesarios para llenar cuatro cajas empapadoras en esta forma, la mitad del tiempo de los cartuchos grandes.

#### MEDICIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LA PLANTA Y PÉRDIDAS DE EVAPORACIÓN

Desde que la producción de la Planta varía un poco continuamente y es necesario saber con exactitud la producción total y las diferentes pérdidas por evaporación, es conveniente llevar registros del vacío en los receptáculos, del nivel del líquido cuando se almacena, de su descenso y del gas que se desprende. El gas se mide en un aspirador bajo dadas condiciones de temperatura y presión y calculado a una pérdida correspondiente de líquido en litros por hora. Habiendo hecho estas diferentes medidas en condiciones variadas, el señor Rodgers, ha podido establecer con exactitud la producción total de la planta, la pérdida en la cañería de carga, la pérdida en el alma, cenamiento y la pérdida debido a enfriamiento cuando ha sido necesario reenfriar un receptáculo. Tomando como base la producción de una semana llenando tres receptáculos, la pérdida en la cañería es en término medio el 5% del líquido fabricado y el total de la pérdida en almacenaje, incluso las pérdidas debido al enfriamiento, es en término medio 22% del líquido fabricado.

#### PLANTA PARA CARTUCHOS

Esta planta es en gran parte una adaptación del trabajo de George B. Holderer, de la Air Reduction Co. El Sr.

Holderer ideó la mezcla que nosotros usamos, la cual consiste de 65% de Bugbird (un carbón grueso granulado que resulta de quemar pulpa de madera mediante un proceso especial) y 35% de negro de humo de Huber. El material grueso de resistencia a los cartuchos grandes y el fino negro de humo determina en gran parte su alta proporción de detonación y lo suple de buenas cualidades absorbentes y retintivas por el oxígeno líquido. La envoltura o material de la bolsa que se usa es tela de algodón N.º 8. Se fabrican dos tamaños de cartuchos: uno de 7 pulgadas de diámetro por 20 pulgadas de largo con un peso de 8 lbs. para cargas en columnas en agujeros de perforaduras de 8 pulgadas y otro de  $5\frac{1}{4}$  pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de largo con un peso de  $3\frac{1}{2}$  lbs. para cargas en agujeros de cámaras de perforadoras de 6 pulgadas.

El carbón se manda de EE. UU. en sacos. Es mezclado, en las proporciones que se indicaron en una máquina mezcladora eléctrica de donde se lleva mediante un conductor de canasto a la tolva de la máquina empaquetadora como se indica en la Fig. 7. La máquina empaquetadora (1) (Fig. 8.) fué diseñada con un peso y capacidad más grande que las en uso en EE. UU. para empaquetar cartuchos más grandes que los usados en cualquiera otra parte. Tanto como 1 000 cartuchos, cada uno con un peso de  $3\frac{1}{2}$  lbs. se han empaquetado en guardias de 8 horas por tres operarios chilenos. Esto incluye mezclar el carbón, pero no incluye el tiempo para coser y cortar las bolsas lo cual es una operación un poco más lenta.

#### IMPREGNACIÓN DE LOS CARTUCHOS

Las cajas impregnadoras son de 36 pulgadas de ancho por 72 pulgadas de largo, por 22 pulgadas de alto, dimensiones interiores. Cada caja tiene capacidad para 50 cartuchos de 7 por 20 pulgadas o 125 de  $5\frac{1}{4}$  por 12 pulgadas. Doce de estas cajas son equivalentes a la capacidad de almacenaje de 10 000 litros. Las cajas impregnadoras son transportadas en dos carros planos de 40 pies los cuales tienen techo de acero para proteger las cajas del sol.

Dos clases de cajas se han construído, algunas con una pulgada de fieltro como aislador y otras con 4 pulgadas de madera de balsa. Las últimas han demostrado ser casi el doble más eficientes para mantener las pérdidas debido a evaporación.

La curva de evaporación (2) indicada en la Fig. 9 demuestra que los cartuchos de  $7 \times 20$  pulgadas de 8 lbs., absorben 3.4 veces su propio peso de oxígeno líquido, pero esto es efectivo solamente cuando el cartucho se mantiene sumergido casi totalmente en el oxígeno líquido durante un período de 40 minutos. En la práctica no ha probado económico el impregnar este cartucho con más de 2,9 veces su peso seco de líquido. Cuando se usa mayor cantidad de líquido el costo del líquido sucio que se desperdicia en las cajas impregnadoras después de sacar los cartuchos, excede la economía que se gana al agregar fuerza explosiva, que se obtiene mediante el uso de esta mayor cantidad de líquido. En la curva 2 Fig. 9, se puede ver que principiando con una relación de 2,9 de oxígeno o carbón es el equivalente de un lapso de tiempo de 15 minutos en el agujero cuando la relación es de 3,4.

De un tiro que se disparó, después de

(1) F. W. O'Neil and H. Van Fleet: Op. cit., 695.

1 hora  $\frac{1}{4}$  de empezar a remover los cartuchos de las cajas impregnadoras con aislamiento de fieltro y con cartuchos de  $5\frac{1}{4} \times 12$  pulgadas, 41.8% de líquido total que se echó a las cajas se empleó ventajosamente en el momento de la explosión; 64.6% fué absorbido en los cartuchos en el momento de removerlos de las cajas, 23% representó pérdidas debido a evaporación durante la impregnación y transporte y 12.4% era líquido sucio que quedó en las cajas después de sacar los cartuchos. Suficiente

líquido sucio se filtra en tela de buque para usar en las válvulas de trasegar de los aparatos del vacío.

El cuadro 1 indica la distribución completa del oxígeno líquido para una voladura en las condiciones mencionadas en porcentaje del líquido fabricado. Pérdidas menores que las indicadas en el cuadro se han obtenido cuando se usan los cartuchos grandes de  $7 \times 20$  pulgadas y de 20 lbs. y las cajas aisladas con madera de balsa.

CUADRO 1.—DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO LÍQUIDO PARA UNA ENVOLTURA

	% de líquido fabricado
<i>Para cubrir pérdidas en cañerías</i> (3.97 L. p. h.) término medio..	5.1
<i>Pérdidas por almacenamiento:</i>	
Almacenamiento mientras se llena (48 hrs. 3.65 L. p. h) ..	4.7
Almacenamiento mientras no se llena (85 hrs. 4.2 L. p. h) usando tres estanques llenos.....	9.5
Enfriando el estanque .....	5.2
Restos que quedan en el fondo (convexo) .....	3.2
Pérdidas totales por almacenaje.....	22.6
Pérdidas de descarga.....	
Pérdidas en las cajas enfriadoras (aisladas con fieltro).....	
Pérdidas durante el enfriamiento de los cartuchos.....	16.7
Pérdidas por evaporación durante la impregnación y trasporte (Aprox. 0 2 hors.) .....	
Pérdidas en los cartuchos durante la carga, pruebas y explosión .....	16.5
Líquido en los cartuchos al tiempo de la explosión (proporción de oxígeno a carbón=1.88) .....	30.2
Líquido en los cartuchos al momento de sacarlos de las cajas impregnadoras.....	46.7
Líquido recuperado para las botellas termos (p' las bombas del vacío) .....	2.0
Líquido que queda en las cajas impregnadoras (Desperdicio)	6.9
<b>TOTAL</b> .....	<b>100.00</b>



MANERA DE HACER LA CARGA

Todo el L. O. X. que se usa actualmente ha reemplazado una dinamita de amonía de 65% de potencia en los hoyos de las perforadoras. Con el uso de L. O. X. no se han hecho cambios en las distancias de los hoyos de las perforadoras o en la cantidad de relleno en esos hoyos los cuales son cargados. Esto es porque nuestros cartuchos grandes y el tiempo medio de explosión—1 hr. la densidad menor del L. O. X. comparada con la dinamita que reemplaza, es poca, y es más que contrarrestada por su velocidad comparado con la dinamita. Pruebas hechas con nuestros cartuchos en el Bureau de Minas de EE. UU. demuestran tener un grado de explosión de 5 200 m. p. s. lo cual es 40% más del de la dinamita que reemplaza apesar de que su efecto impelente no es tan grande.

La ubicación de los hoyos de las perforadoras se hace por los ingenieros de la mina quienes más tarde determinan su colocación exacta y el frente del banco. Con estos datos, planos de los tiros se ejecutan, las cargas de explosivos se calculan en la oficina de Ingenieros, y se dan a los polvoristas. Una cooperación constante entre estos y los ingenieros, el estudio de los resultados de todas las cargas, junto con cualquiera desviación en la hoja de los polvoristas del plan de los ingenieros, mantiene los factores de carga revisados y al día y de acuerdo con las experiencias recogidas en todas las secciones de la Mina. Se han verificado y con buenos resultados que el L. O. X. se puede cargar un 20% más liviano al tiempo de la explosión. que la dinamita de 65% que se use en una lo-

calidad similar. Conociendo de antemano el tiempo aproximado que demoraría cargar y disparar una voladura, el peso del L. O. X. al tiempo de la explosión puede determinarse de las curvas 2 y 3 en la Fig. 9.

No se ha hecho ninguna tentativa todavía de usar L. O. X. para entrazamientos o voladuras de segundo orden desde que para este trabajo, la cantidad de dinamita reemplazada sería pequeña y los gastos de transportación y almacenaje del oxígeno líquido serían altos.

No se ha tratado cargar con L. O. X. hoyos estropeados o torcidos. Tales hoyos forman un porcentaje pequeño de los perforados y son deshechados por los polvoristas después de haberlos inspeccionado con un espejo antes de hacer los cuadros de carga. Estos hoyos se cargan de antemano con dinamita.

Todos los cabos que se usan en los hoyos es alambre enrollado y es colocado antes de que lleguen los trenes con el L. O. X. Los hoyos y las conexiones en la superficie se van tapando poco después de cargar los hoyos con los cartuchos.

La Fig. 12 muestra los cartuchos que llevan en una bandeja dos operarios que van bajando un puente que lleva de las cajas impregnadoras al lugar del tiro. El tiempo medio que demora el tren con L. O. X. de la Planta de Oxígeno a los tiros en diferentes bancos es 20 min.

COSTO

Durante el mes de Octubre de 1927 se fabricaron con un costo que se indica en el cuadro 2, un total de 6579 cartuchos con un peso de  $3\frac{1}{2}$  lbs. total peso seco 23 027 lbs.

CUADRO 2.—COSTO DE CARTUCHOS PARA OCTUBRE DE 1927

	Costo Total	Costo por libra de Cartucho
14 968 lbs. de negro de humo Bugbird .....	\$ 1 600 08	\$ 0.069
8 059 lbs. de gas negro de Huber .....	1 195.15	0.051
2 192 yds. de lona .....	544 08	0.024
Grampas de bronce e hilo .....	85.54	0.004
Labor .....	83 98	0.004
Vigilancia .....	69.08	0.003
Energía y mantenimiento .....	20.85	0.001
	<b>\$ 3 598.76</b>	<b>\$ 0.156</b>

En el mes de Octubre se fabricó 126 000 lbs. de líquido con un costo que se da en el Cuadro 3.

CUADRO 3.—COSTO DEL LÍQUIDO FABRICADO EN OCTUBRE DE 1927

	Costo Total	Costo por libra de líquido
105 526 kw. hr. de energía a \$ 0.00868.....	\$ 915.97	\$ 0.007
Labor, 10 operarios, incluso los operadores de las bombas .....	543.60	0.004
Vigilancia .....	370.00	0.003
Mantenimiento .....	240.00	0.002
Productos químicos.....	94.14	0.001
Miceláneos. (Agua, lubricantes, etc).....	47.13	0.001
Intereses y amortización sobre inversión (10.1 3% anual; \$ 15 450 por año) .....	1 290.00	0.010
	<b>\$ 3 500.84</b>	<b>\$ 0.028</b>
Costo por litro .....		0.0716

El cuadro 4 indica los resultados por un período de cinco meses de Junio a Octubre de 1927 inclusive.



CUADRO 4.—RESULTADOS DURANTE CINCO MESES

Toneladas quebradas .....	937 195
Libras de líquido fabricado .....	494 295
Libras efectivas de líquido al momento de la explosión.....	163 730
Libras de cartuchos secos usados .....	83 830
Libras de L. O. X. efectivas al momento de la explosión.....	247 560
Toneladas quebradas por libra de L. O. X. al momento de la explosión	3.78
Libras fabricadas de líquido por libra de cartucho seco.....	5.9
Libras de dinamita reemplazada para quebrar 937 195 tons... ..	312 000
Una libra de cartucho a 0.156 .....	\$ 0.650
5.9 lbs. fabricadas de líquido a 0.028 por libra.....	0.165
<hr/>	
3.0 libras de L. O. X. efectivas al momento de la explosión.....	\$ 0.321
1.0 libras de L. O. X. efectivas al momento de la explosión.....	\$ 0.107
$\frac{247\ 560}{312\ 000} \times 0.107 =$	$\$ 0.085$ costo de L. O. X. que reemplaza lbs. de dinamita a \$0.16.

CONCLUSIONES

El costo del líquido que se fabrica 5.9 lbs. por libra de cartucho es más elevado que el que se obtiene de la proporción 4.5 donde se hacen cargas diarias con recipientes pequeños, de almace-

naje. Debido a esta alta relación, los costos son más altos que los que se esperaban obtener. No obstante esto, economías efectivas se han hecho usando este explosivo y los resultados de los tiros en la roca más dura de la mina han sido enteramente satisfactorios.