

Estudo de caso

# Refrigeração com gelo em cubos maximiza economia dos custos de operação



A Howden instalou uma fábrica de gelo em cubos de 10 MW(R) a 30 kg/segundo, utilizando placas gelificadoras e conjuntos de compressores de parafusos helicoidais para a refrigeração de amônia, em Mponeng. O uso da tecnologia de gelo em cubos, ao invés do gelo por vácuo ou dos resfriadores convencionais de água, trouxe taxas significativamente reduzidas de fluxo de água, e economias consideráveis no consumo de energia para bombeamento da água de retorno.



# Howden foi convidada a investigar e projetar um sistema eficiente de refrigeração que reduzisse os custos de bombeamento da água de retorno utilizando a tecnologia de resfriamento por gelo em cubos.



O custo da energia elétrica para a indústria, tal como a de mineração, vem crescendo constantemente nos últimos anos. Este custo atingiu agora um ponto onde o a refrigeração de minas profundas pode ameaçar a sua viabilidade econômica. À medida que as escavações na mina atingem profundidades cada vez maiores, que a temperatura aumenta e as condições de trabalho se tornam menos sustentáveis, novas e inovadoras tecnologias de resfriamento se fazem necessárias

## O desafio

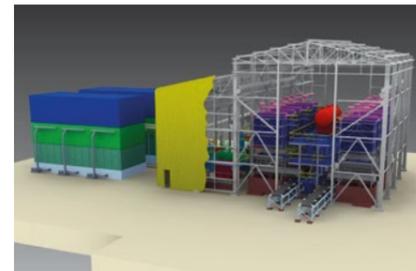
Mponeng é uma das minas mais profundas da África do Sul, com temperaturas atingindo até 54,5°C a 3,5 km abaixo da superfície. Para que os mineiros sejam capazes de trabalhar em temperaturas aceitáveis, o ar ambiente tem de ser refrigerado até a temperatura de 28°C.

Até agora, o ar condicionado e/ou a água tinham sido usados, mas a Mina de Mponeng atingiu agora o ponto onde a utilização de gelo em cubos é a melhor opção para a operação da mineração em grandes profundidades. Há inúmeras razões para se usar os sistemas de refrigeração com gelo, uma das diversas técnicas disponíveis para se refrigerar minas profundas, devido às economias no bombeamento de água mas, até agora, estas não eram financeiramente justificáveis.

No entanto, uma vez que a mina se encontra de 1.500 a 2.000 metros de profundidade, o equilíbrio pende para utilização do gelo, uma vez que a capacidade para se instalar mais equipamentos para troca de calor se torna limitada, e os custos de bombeamento de água se tornam muito elevados. A refrigeração com gelo apresenta mais eficiência energética do que os sistemas baseados em água, com cada 1 kg/s de gelo proporcionando uma refrigeração equivalente de 5 l/s de água refrigerada, proporcionando economias de aproximadamente 75% a 80% nos custos de bombeamento.

A AngloGold Ashanti planejava aprofundar a sua Mina de Mponeng para manter os níveis de produção, e estender a vida da mina, uma vez que a produção nas atuais profundidades começava a decair. A mina possui atualmente uma capacidade instalada de refrigeração de mais de 100 MW (R). O aprofundamento da mina, requeria um aumento de 40 MW(R) na capacidade de refrigeração. Com resfriadores de água convencionais e fábricas de gelo à vácuo, isto iria implicar altos custos de bombeamento para a água de retorno.

A fase 1 do projeto de aprofundamento, a uma profundidade de 3,8km, começou em 2009. A área de Projetos da Howden foi convidada a investigar e projetar um sistema eficiente de refrigeração que reduzisse os custos de bombeamento da água de retorno pela utilização da tecnologia de resfriamento por gelo. A Howden posteriormente recebeu um pedido para fornecer 10MW (R) para uma fábrica de gelo para a Fase 1, baseada nos últimos requisitos com capacidade nominal de resfriamento de 40 MW(R). De acordo com a especificação técnica da AngloGold Ashanti, fomos capazes de fazer o projeto, o fornecimento, a instalação e a partida como parte do projeto 'turnkey' para a produção de gelo em cubos.



## A solução

Após uma investigação completa, a Howden estabeleceu que utilizar a tecnologia de gelo sólido trará enormes economias de consumo de energia e custos no bombeamento de sua água de retorno.

### As vantagens do gelo, e sua eficiência energética

Produzir o gelo na superfície, em máquinas de gelo, enviando para um tanque dentro da mina, e fazendo então circular a água derretida e fria por meio de refrigeradores de ar é mais eficiente em termos de energia do que um sistema convencional de refrigeração da água, porque a capacidade de calor latente de um quilograma de gelo significa que este pode absorver muito mais calor do que um quilograma de água fria. Isto permite economias significativas nos custos operacionais. Uma vez que o gelo tenha derretido, a água ainda tem de ser bombeada de volta à superfície, mas as quantidades são muito menores, e os custos de bombeamento são reduzidos a menos de um quarto dos custos de um sistema de refrigeração de água. Em geral, a razão da taxa de vazão de massa para o gelo sólido, quando comparado com a água seria de 1:5.

A proporção da água que se transforma em gelo também é importante. O gelo por vácuo apenas atinge frações de massa de gelo de 60%, enquanto que o gelo em cubos encontra-se na faixa de 93% a 98%, dependendo da qualidade da água. Uma fração mais baixa de massa do gelo significa que mais gelo precisa ser enviado para o subterrâneo para atingir o mesmo ciclo de resfriamento, aumentando assim a quantidade e os custos de bombeamento da água de retorno.

Em geral, a razão entre o fluxo de massa para o gelo em cubos, comparado ao gelo à vácuo, seria de 1:1,35.

Embora as fábricas de gelo sejam ligeiramente mais caras na disponibilização de capital do que as fábricas de refrigeração convencionais, o investimento inicial é compensado pelos custos operacionais mais baixos, em particular os custos de bombeamento reduzidos pelos volumes menores de água e um resfriamento mais eficiente.

### C.O.P. (Coeficiente de Performance)

Ao avaliar um sistema de resfriamento, o C.O.P. do ciclo de resfriamento completo deverá ser considerado. Por exemplo, quando uma fábrica de gelo a vácuo é comparada a uma fábrica de gelo sólido, em termos apenas da produção de gelo, o C.O.P. da fábrica de gelo a vácuo será maior do que aquele da fábrica de gelo sólido. No entanto, o gelo a vácuo possui uma fração de massa de gelo (F.M.G.) de 60% comparada ao gelo sólido, de 93% a 98%. Isto significa que a água extra do gelo de vácuo precisa ser bombeada de volta à superfície, e para profundidades maiores do que 1.000m a 1.500m, isto influencia a comparação do coeficiente de performance a favor do gelo sólido. O efeito Joule-Thompson (Autocompressão) da perda de energia a 9,79 kJ/kg para cada 1.000m também deve ser levado em consideração ao avaliar o coeficiente de desempenho global da capacidade de resfriamento no tanque para o derretimento de gelo.



## Dados técnicos: Para fábrica de gelo em cubos

A energia de resfriamento do gelo em cubos envolve três fases distintas.

### Fase 1

Calor Específico da Fase Sólida, tal como o gelo sólido passa de -2.0°C a 0°C. Este valor é geralmente desprezado.

### Fase 2

Calor Latente de Fusão (quando derrete o gelo sólido).

### Fase 3

Calor Específico da Fase Líquida, quando o líquido muda de 0°C para 25°C.

O fluxo de massa do gelo é calculado utilizando-se a seguinte fórmula:

$$M_{\text{GELO}} = \frac{Q_{\text{GELO}}}{\text{IMF} \times h_i + C_p \times \Delta T} \quad (\text{Reescrito de: } Q_{\text{GELO}} = M_{\text{GELO}} \times \text{IMF} \times h_i + M_{\text{GELO}} \times C_p \times \Delta T)$$

**Q<sub>GEL</sub>** Ciclo de trabalho para o gelo refrigerado (12525 kW no ponto acima da superfície, conforme especificado pela mina)

**IMF** Fração de Massa (93%)

**h<sub>i</sub>** Calor Latente do Gelo Sólido em Derretimento (334 kJ/kg)

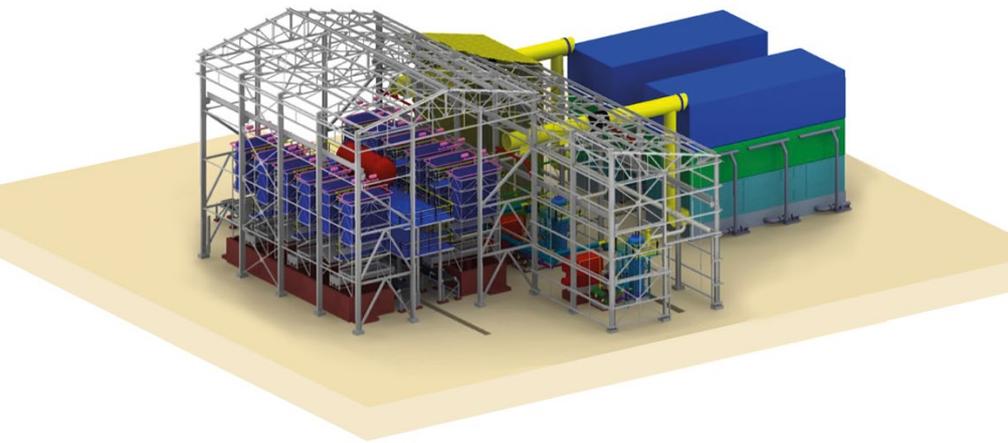
**C<sub>p</sub>** Capacidade de Calor Específico da Água (4.187 kJ/kg°C)

**ΔT** Diferencial de Temperatura – Temperatura da Água de Retorno (25 – 0°C)

$$M_{\text{GELO}} = \frac{12525}{0.93 \times 334 + 4.187 \times (25-0)} = 30.16 \text{ kg/sec Gelo Sólido (Razão 1:1)}$$

$$M_{\text{GELO}} = \frac{12525}{0.60 \times 334 + 4.187 \times (25-0)} = 41.06 \text{ kg/sec Gelo a Vácuo (Razão 1:1,35)}$$

$$M_{\text{ÁGUA}} = \frac{12525}{0 \times 334 + 4.187 \times (25-0)} = 157.44 \text{ kg/sec Água Gelada (Razão 1:5,22)}$$



Para mais informações, entre em contato com:

**Howden**

Avenida Osvaldo Berto, 475 Distrito Industrial Alfredo Relá – Itatiba – SP

**Tel:** +55 11 4487 6250

**Email:** hsa@howden.com

Para vendas e suporte, entre em contato com: +55 11 4487 6201

## Os benefícios

Comparação de Custos de Bombeamento da Água de Retorno em Operação: Gelo sólido VS gelo a vácuo VS água resfriada. No estudo de caso para os sistemas de refrigeração em Mponeng, os seguintes valores foram usados:

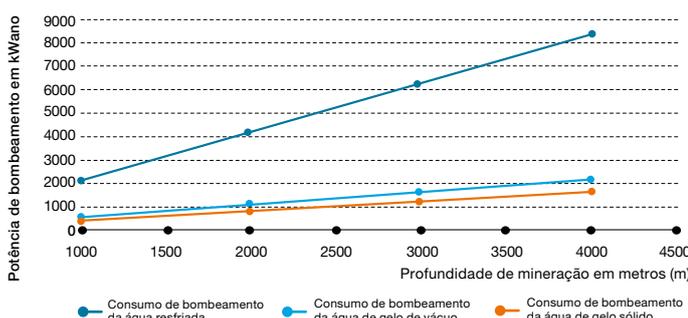
<b>Profundidade média de mineração em Mponeng</b>	4000 m (futura)
<b>Temperatura da água de retorno</b>	25°C
<b>Coefficiente de autocompressão</b>	9.79 kJ/kg per 1000m
<b>Ciclo de resfriamento de superfície necessário</b>	12525 kWR
<b>Eficiência típica da bomba</b>	75%
<b>Custo médio da energia</b>	0,075 USD / kWhr (ou 657 USD / kW por ano)

Balanco Energético		Gelo enrijecido	Gelo de vácuo	Água
Temperatura da fonte de água resfriada	°C	-	-	6
Fração da massa de gelo	%	0.93	0.60	-
Fluxo de massa do fluido (fluxo de massa do gelo ou da água resfriada)	Kg/s	30.16	41.06	157.44
Perdas calculadas de autocompressão	kW	1181	1608	6165
Ciclo de trabalho calculado para o resfriamento em u/g	kW	11344	10917	6360
<b>Requisitos de alimentação da bomba de água de retorno</b>				
Requisitos totais de alimentação absorvidos pelo bombeamento	kWE	1608	2190	8397
<b>Comparações de custo</b>				
Custo operacional anual da bomba de água de retorno	USD/yr	\$1 056 781	\$1 438 584	\$5 516 775

## Os benefícios: do gelo comparado à água refrigerada

Os sistemas de gelo, comparados às plantas convencionais de resfriamento de água, proporcionam economias de 6.788 KWE (ou US\$ 4,46 Milhões) por ano no consumo de energia de bombeamento. A perda de resfriamento percentual devido aos efeitos de autocompressão encontra-se acima para os sistemas de água do que para os sistemas de gelo sólido (50% da carga de resfriamento a 4.000m). Isto demonstra claramente que, se o resfriamento disponível na parte inferior da mina for usado como critério, os sistemas de gelo são economicamente atraentes para minas quentes e não profundas, assim como para minas profundas.

## Potência de bombeamento da água de retorno



## Os benefícios: do gelo em cubos quando comparado ao gelo a vácuo

Os sistemas de gelo em cubos, comparados às usinas de gelo a vácuo, proporcionam economias de 581 kW (ou US\$ 0,38 Milhões) por ano no consumo de energia de bombeamento. Isto representa uma economia total, ao longo de 20 anos, de US\$ 7.6 Milhões. O resfriamento percentual, devido aos efeitos de autocompressão é de 13% para o gelo a vácuo, comparado a 9% para o gelo em cubos.

## Perdas percentuais pela autocompressão

