



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Castro, D; Mery, J.P; Aravena, R; Sanhueza, C
Técnicas para contener el manto de nieve en la zona de inicio de avalanchas
Revista de la Construcción, vol. 9, núm. 2, diciembre, 2010, pp. 39-52
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619215005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Snowpack retaining
techniques in
the avalanche
starting zones*

Técnicas para contener el manto de nieve en la zona de inicio de avalanchas



Autores

CASTRO, D. Universidad de Cantabria, España
E-mail: daniel.castro@unican.es

JOSÉ-PEDRO MERY, J.-P. Pontificia Universidad Católica de Chile
E-mail: jpmery@uc.cl

ARAVENA, R. Pontificia Universidad Católica de Chile
E-mail: raaraven@uc.cl

SANHUEZA, C. Pontificia Universidad Católica de Chile
E-mail: csanhuep@uc.cl

Fecha de recepción 28/05/2010

Fecha de aceptación 01/12/2010

Resumen

Las avalanchas de nieve son eventos que representan a menudo considerable peligro debido al alto poder destructivo que pueden tener sobre objetivos vulnerables. Es por esta razón que se requieren medidas de control efectivas, que permitan mitigar el riesgo sobre asentamientos humanos, bienes y servicios en laderas montañosas o al pie de sendas de avalanchas. El presente artículo resume los distintos sistemas estructurales y técnicas para contener y

estabilizar el manto en la zona de inicio de avalanchas, utilizados tanto Chile como en el extranjero, los cuales actúan interrumpiendo las presiones ejercidas por la reptación y el deslizamiento del manto de nieve. El nivel de avance e implementación de los sistemas ha sido desarrollado principalmente en países europeos, mientras que en Chile la prevención mediante estructuras modernas de protección se ha iniciado a partir desde la década de los 80.

Palabras clave: Avalanchas, manto de nieve, estabilización, estructuras de protección.

Abstract

Snow avalanches are events often involving serious risk to human beings and goods due to their destructive power. This is why effective control measures are required to mitigate the risk for human settlements, goods and services on mountain slopes or at the foot of avalanche ways. This article summarizes the different structural systems and techniques used nationally and internationally to support and

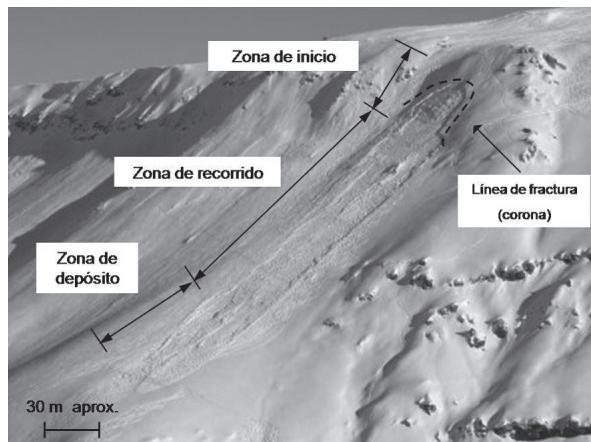
stabilize the snowpack in avalanche starting zones. These measures act by reducing the pressures originated by the creeping and sliding of the snowpack. While the current state of the art and the control systems implementation have been mainly developed in Europe, the prevention measures by modern supporting structures have been carried out in Chile since the 80s.

Key words: Snow avalanches, snowpack, stabilization, supporting structures.

1. Introducción

En todas aquellas regiones montañosas donde existe un clima apropiado para la precipitación y acumulación de nieve durante la época invernal, existirá también un alto riesgo de ocurrencia de avalanchas de nieve, fenómeno que puede desencadenarse ladera abajo por un estrecho corredor o bien abarcando un área más extensa a lo ancho de la pendiente, poniendo en riesgo a personas, bienes y servicios localizados en el recorrido de la masa de nieve. Tal es el caso de pueblos, carreteras, pasos fronterizos, centros de turismo invernal, obras de generación eléctrica, instalaciones mineras, entre otras actividades.

Figura 1 Avalanche de placa suelta en sector Santa Teresa, Centro Invernal Farellones, Chile. Invierno 2009. Una víctima fatal



A efectos de estudiar la mecánica del fenómeno y las medidas de intervención para mitigar sus efectos sobre sectores vulnerables, es que en el desplazamiento de una avalancha se pueden distinguir tres zonas (Figura 1). Las avalanchas se desencadenan por la pérdida de estabilidad del manto nival en la denominada **zona de inicio**, para luego descender a través de la **zona de recorrido** y finalmente detener su energía cinética por fricción en la **zona de depósito**. A lo largo de su recorrido, la masa de nieve experimenta de manera dinámica distintos cambios físicos y mecánicos, haciendo difícil una modelación reológica del fenómeno con exactitud. No obstante, existen diversos modelos basados en la mecánica de materiales, y en particular de fluidos, que logran explicar razonablemente bien la evolución de sus parámetros como altura del flujo, velocidad, densidad,

distancia de recorrido, presión ejercida, entre otros. En cuanto a la zona de inicio, los sistemas de protección están destinados fundamentalmente a estabilizar el manto de nieve por medio de técnicas de contención de solicitudes cuasi estáticas para evitar el inicio del deslizamiento, mientras que en las zonas de recorrido y depósito las medidas están orientadas a desviar, frenar o detener el flujo en movimiento. A menudo se recurre también a técnicas antes de la zona de inicio como es el uso de deflectores y aceleradores del viento, a fin de modificar la acumulación de nieve en la pendiente. Sin embargo, una de las medidas más usadas en la zona de inicio es el desencadenamiento artificial de avalanchas por medio de la sobrepresión ejercida por una explosión, ya sea de explosivos o bien de una mezcla de gases, para iniciar una purga controlada de la sobrecarga de nieve en la ladera. De hecho, esta es una técnica de control iniciada en el siglo pasado con el uso de artillería militar, que perdura hasta el presente con diversas versiones civiles. También se han desarrollado otros sistemas de explosiones controladas mediante explosivos colocados o lanzados manualmente, enviados por cable de remonte mecánico (sistema Catex), colgados (Torre Wyssen), o bien explosiones por gases detonantes como los sistemas Gazex, Avalhex, y últimamente Daisy Bell, colgado desde helicóptero. Usualmente, las técnicas de desencadenamiento artificial se utilizan complementariamente con otras técnicas como las tratadas en la reseña del presente artículo, destinadas a la contención y estabilización del manto de nieve acumulado en la zona de inicio de las avalanchas, cuyos primeros diseños ingenieriles se remontan a unos 60 a 70 años.

1.1 Avalanchas de nieve

El desencadenamiento de las avalanchas se origina con la pérdida de estabilidad del manto de nieve causada ya sea por cambios mecánicos y físicos en la estructura interna e interacción entre los granos de la nieve como por solicitudes externas ejercidas por el paso de algún esquiador, caída de cornisas, ondas explosivas, sismos, entre otras. También está condicionada por las fuerzas de fricción en la interfaz entre el manto nival y el suelo de la ladera donde se apoya o entre las capas del mismo manto. La pérdida de estabilidad por causas internas está estrechamente relacionada con las condiciones atmosféricas externas por cuanto son responsables del metamorfismo de los cristales y granos de la nieve.

En términos generales se podría decir que la evaluación del peligro de avalanchas o estabilidad del manto debería considerar aspectos tales como: la profundidad de la nieve antigua; la presencia de agua en sus granos y

cristales; las características de la superficie de la nieve vieja; la profundidad de la nieve nueva; la densidad de los estratos; la intensidad de la nevada; el asentamiento de los estratos; el viento; la temperatura; la radiación solar; y la orientación geográfica de la ladera; entre otros.

Los granos de nieve juegan un papel relevante en la resistencia mecánica, siendo los menos resistentes al corte aquellos que conforman la **escarcha de profundidad o cubiletes (depth hoar)**, debido a sus uniones frágiles y baja capacidad de reacomodo. Por este motivo, forman mantos cuya densidad podría llegar a disminuir o no cambiar mucho con la profundidad (McClung y Schaefer, 2006). Según la experiencia en la cordillera central de Chile sobre 3.000 msnm, los perfiles de nieve muestran generalmente que las capas formadas por cubiletes son de alta densidad y baja cohesión (resistencia).

Las inclinaciones típicas para el desarrollo de avalanchas suelen variar entre 28° y 50° , que favorecen además el movimiento de la nieve aguas abajo cuando la interfase nieve-terreno se encuentra con agua libre que no aporta resistencia ni fricción. Las avalanchas bajo y sobre este rango de inclinación son de baja ocurrencia.

Las condiciones de inestabilidad pueden originar avalanchas debido a la existencia de esfuerzos internos en el manto, producidos por dos tipos de movimientos de carácter lento denominados **reptación y deslizamiento**. Cada uno alcanza movimientos del orden de mm/día a cm/día, determinando en conjunto el movimiento total del manto aguas abajo. Ambos deben ser considerados para el diseño de cualquier estructura a instalar en la zona de inicio, por cuanto determinan las solicitudes que actúan sobre ellas.

2. Esfuerzos del manto de nieve sobre estructuras

La reptación y el deslizamiento implican en el manto la aparición de esfuerzos paralelos y perpendiculares al terreno (S_N y S_Q en Figura 4), siendo de mayor relevancia los primeros (de corte), ya que en la otra situación tiene lugar un efecto estabilizador que tiende a ser mínimo. Esto sucede en una zona denominada neutral, donde el manto se encuentra sin intervención o sin confinamiento lateral, dando pie a la ausencia de esfuerzos adicionales. En aquella zona se presentan solo los esfuerzos producidos por la reptación natural del manto, sin existir cambios en dichos esfuerzos (FOEN/WSL, 2007).

Ante la presencia de obstáculos o estructuras en laderas montañosas cubiertas de nieve, la configuración de las

Figura 2 Destrucción de campamento industrial por avalancha. Chile central, invierno 2009.
Una víctima fatal



Figura 3 Zona neutral entre la zona de tensión y la zona de compresión (Chaudhary et al., 2002)

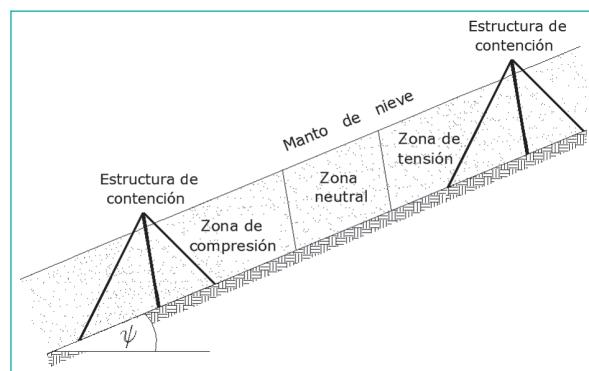
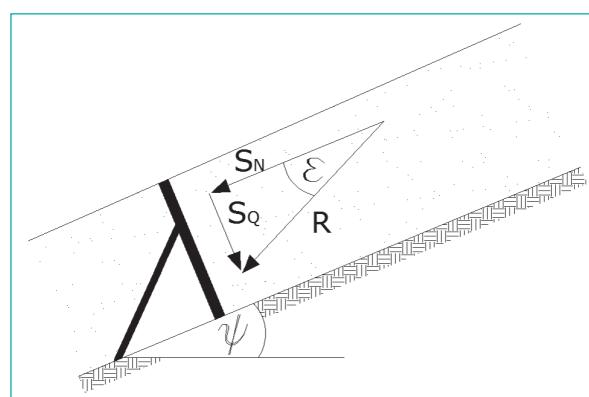


Figura 4 Esfuerzos paralelos y normales a la pendiente, sobre un obstáculo



presiones producidas cambia, pudiendo cuantificarse mediante diversas relaciones matemáticas presentadas por distintos autores, dependiendo del tipo de obstáculo que impide el movimiento natural del manto (estructuras tipo pantallas rígidas o flexibles, postes, árboles, entre otros). La interacción entre el movimiento del manto y la estructura genera esfuerzos de compresión aguas arriba de la estructura en una distancia que la norma suiza (FOEN/WSL, 2007) señala como al menos tres veces la altura del manto de nieve medida verticalmente. Este espacio corresponde a la denominada zona de presión posterior o *back pressure zone*, donde los esfuerzos de corte son disminuidos en desmedro de la aparición de esfuerzos de compresión, desapareciendo de este modo los esfuerzos precursores de avalanchas. Otras apreciaciones indican la aparición de esfuerzos de tensión (aguas abajo de la estructura) y una zona neutral (al centro) cuando existen dos filas consecutivas de estructuras a gran distancia en la línea de la pendiente (Figura 3) (Chaudhary *et al.*, 2002).

Los esfuerzos provocados sobre estructuras producto de la interrupción de la reptación y deslizamiento dependen de las condiciones del manto, la interfase entre la nieve y el terreno, y también la inclinación de la pendiente (ψ). La cuantificación de estos se establece al centro del obstáculo, dispuesto normal al terreno, siendo aplicada de forma paralela al mismo.

Una expresión ampliamente utilizada hasta la fecha en el diseño de estructuras (rígidas) es la recomendada por la norma suiza (FOEN/WSL, 2007) en la ecuación (Ec.1):

$$S_N = \rho \times g \times \frac{H^2}{2} \times K \times N \quad (\text{Ec.1})$$

donde S_N es el esfuerzo paralelo al terreno sobre estructura rígida (kN/m); ρ es la densidad del manto (kg/m^3); g es la aceleración de gravedad (m/s^2); H es la altura de la nieve medida verticalmente (m); y K y N son los factores de reptación y deslizamiento, respectivamente (adimensionales).

El valor del factor de reptación K se obtiene en función de la densidad del manto de nieve y la inclinación de la pendiente del terreno. El valor del factor de deslizamiento N depende de las condiciones de rugosidad del terreno y la exposición solar geográfica de la pendiente. En el caso del cálculo de presiones sobre una estructura flexible (malla de acero), esta se puede estimar mediante la Ec.2:

$$S_N = H_K^2 \times N \times f_c \times f_s \quad (\text{Ec.2})$$

donde H_K^2 es la altura de la estructura medida verticalmente (m); f_c es el factor de altitud (s.n.m. , adimensional) y f_s es el factor reductor de presiones (adimensional).

La ecuación (Ec.2) deriva de (Ec.1), asumiendo ciertas condiciones de densidad, altura del manto de nieve y exposición solar de la pendiente. Además, el factor f_s se asume como 0.8 y representa la amortiguación en cierto grado de las presiones debido a la flexibilidad de la malla.

Además, debe considerarse el aumento de los esfuerzos producidos por los esfuerzos de borde (*end effects*), lo que implica una mayor presión en ambos costados de la estructura. Esto se puede cuantificar mediante la Ec. 3:

$$S_R = f_r \times S_N \quad (\text{Ec.3})$$

donde f_r es el factor de efecto de borde, que depende del factor de deslizamiento N y la distancia lateral entre barreras consecutivas.

3. Estructuras y técnicas para la contención y estabilización del manto de nieve en la zona de inicio

El diseño sistemático de estructuras de contención basado en modelos matemáticos derivados de las características del manto nivooso se remonta a la década del 50 en Europa con los trabajos de Haefeli en 1954, cuyo modelo teórico para estructuras del tipo flexible sigue vigente hasta el día de hoy (Margreth, 1995). Este modelo se incluye como base para el cálculo en las normas suizas (FNP, 1968; OFEFP/FNP, 1990; FOEN/WSL, 2007), cuyas aplicaciones son las más extendidas para el diseño de estructuras de contención en la zona de inicio. En la práctica, la instalación de estructuras de defensa provoca un efecto estabilizador del manto de nieve al redistribuir las fuerzas a lo largo de ella, además de limitar el movimiento de la nieve, retrasarlo y prevenirlo (Ammann y Fohn, 1999). En otras palabras, lo que ocurre en el manto al interrumpir los procesos de reptación y deslizamiento mediante una barrera, es cambiar la naturaleza de sus esfuerzos asociados, los cuales dejan de ser de corte y tensión para ser de compresión, favoreciendo el trabajo de la estructura (Chaudhary *et al.* 2002; Chaudhary y Singh, 2006). Esto se puede apreciar más claramente en el caso de barreras rígidas. Dado que hasta aquí se han mencionado los conceptos de estructuras de tipo rígida y flexible, resulta necesario efectuar una breve clasificación

al respecto. Las estructuras de contención pueden dividirse en: **puentes** o **cercas**, también denominadas *snow bridges*, que corresponden a estructuras rígidas de largueros horizontales apoyadas en montantes verticales; **rastrillos**, también denominadas *snow rakes*, que corresponden a estructuras rígidas de largueros dispuestos verticalmente; y **mallas** o **redes**, también denominadas *snow nets*, que corresponden a mallas de acero colgadas de montantes verticales. Los puentes y los rastrillos son las soluciones estructurales más antiguas establecidas para contener el manto en la zona de inicio. En la actualidad se siguen fabricando y utilizando como alternativa para el sostenimiento, aunque los sistemas flexibles han ido tomando protagonismo por su menor costo y mayor facilidad de montaje. Existen además otro tipo de protecciones activas para impedir el desencadenamiento de avalanchas tales como la intervención de la geometría de la pendiente para aumentar la rugosidad de la ladera.

3.1 Experiencia chilena

Desde hace varias décadas se ha implementado en Chile diversas medidas para contener el manto, principalmente en instalaciones mineras. Se podría decir que solo desde la década de los 80 se ha ido introduciendo sistemas modernos de prevención de avalanchas como aquellas estructuras flexibles de fabricación europea, llegando a incorporarse este tema en la normativa fiscal por primera vez a comienzos del año 2000 (MOP, 2002). La oportuna y sistemática aplicación de medidas de control de avalanchas en el último tiempo, especialmente en la industria minera ha llevado a una considerable reducción de daños y víctimas desde 1990 a la fecha, en comparación con la primera mitad del siglo pasado, según los datos presentados por Ramírez

y Mery (2007). Entre las estructuras implementadas se cuentan las del tipo puentes (rígidas) y mallas (flexibles), cuyas primeras instalaciones corresponderían a elaboraciones nacionales sin mayores estándares de diseño. En la actualidad se ha optado por estructuras flexibles conforme a exigentes estándares europeos. En cuanto a técnicas para estabilizar el manto, también se ha recurrido a ejecución de terrazas. En Chile, los puentes han sido construidos fundamentalmente en madera, acero y rieles de ferrocarriles. En cuanto a las estructuras flexibles, en un principio se componían de mallas de nailon, para luego ser elaboradas en acero galvanizado, tal como se realiza en la actualidad (MOP, 2002).

Puentes (*snow bridges*): estas estructuras (Figuras 5 y 6) se componen de un conjunto de largueros dispuestos horizontalmente, los que unidos a montantes verticales conforman la superficie de contacto con la nieve. Se unen al terreno con soportes, cuyo empotramiento puede efectuarse mediante cimientos de hormigón, micropilotes o anclajes, y placas. La inclinación de la estructura respecto a un plano normal al terreno ha de situarse en torno a una inclinación de 15° aguas abajo. Esta situación genera una mejor redistribución de esfuerzos, siendo más efectivas ante las solicitudes presentes (FOEN/WSL, 2007).

Estructuras flexibles (*snow nets*): estas estructuras (Figuras 7 a 10) corresponden a mallas o redes de acero, que permiten retener el manto nival en la zona de inicio. Se componen de cables, mallas, postes articulados, anclajes y fundación. Presentan menos peso, mayor facilidad de montaje, mejor adaptabilidad a terrenos irregulares (rocosos), menor impacto visual, incluso buena respuesta frente a caídas de rocas de baja energía, respecto de los puentes o cercas.

Figura 5 Conjunto de antiguos puentes metálicos, actualmente operativos. Sewell, Codelco-División El Teniente (Foto: JP Mery)



Figura 6 Disposición en ladera de antiguas cercas de madera, fuera de su vida útil. Sector Lagunitas, Codelco-División Andina (Foto: JP Mery)



El tejido de las mallas suele dar origen a retículas de forma triangular, rómbica, circular, y últimamente otras geometrías como la malla *Omega Net*. La inclinación de la pantalla respecto a un plano normal al terreno, se recomienda que sea de 30° aguas abajo para generar una mejor redistribución de esfuerzos (FOEN/WSL, 2007).

Modificación del terreno por medio de terrazas: consiste en cambios de la pendiente de tal modo de interrumpir los movimientos de reptación y deslizamiento. Esto se logra mediante la ejecución de cortes en el terreno

y relleno del mismo, para ampliar las terrazas más allá de la línea de la pendiente (MOP, 2002). Este método sirve para retener y acumular nieve en un estrato horizontal, de manera de evitar una acumulación en la pendiente que pudiera generar el inicio de la avalancha. Como señalan McClung y Schaefer (2006), la adopción de un control de avalanchas en la zona de inicio mediante terrazas debe considerar algunos requerimientos como: (1) ejecutarlas en pendientes $\leq 35^\circ$; (2) profundidad de la nieve ≤ 1.5 m; (3) bajo o mínimo transporte de nieve por viento; y (4) el ancho de la terraza debe ser al menos 1.5 veces la altura de la nieve.

Figura 7 Principales partes de una estructura flexible.
(Adaptado de MOP, 2002 y FOEN/WSL,
2007 por R. Aravena)

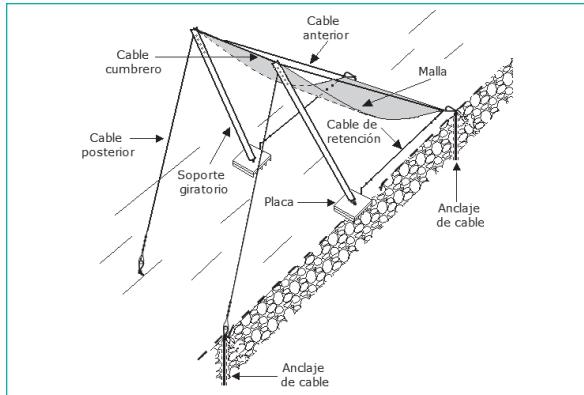


Figura 8 Antigua barrera flexible de acero para la retención de suelo residual y nieve. Sewell, Codelco-División El Teniente (Foto: JP Mery, 2008)



Figura 9 Estructura flexible, polivalente, de alto límite elástico. Proyecto I+D+i AlpS 2002, Geobrugg



Figura 10 Estructura flexible. Minera Los Pelambres.
(Foto: JP Mery, 2009)



Otras soluciones: también se han elaborado estructuras rígidas cuya superficie de contacto con el manto se conforma por largueros dispuestos tanto horizontal (puentes) como verticalmente (rastrillos) (Figura 13). Aquellos han sido materializados por rieles metálicos de vías férreas. Actualmente, la mayoría de ellas presentan colapso generalizado producto de solicitudes de varias temporadas invernales, además de corrosión y falta de mantenimiento, recomendándose el retiro de ellas para evitar acumulaciones peligrosas.

Otro tipo de solución utilizado en el pasado corresponde a los denominados "viñedos", técnica de estabilización

que "amarra" el manto por medio de un arreglo de postes y cables instalados en la senda de avalanchas (Figura 14).

3.2 Experiencia internacional

El grado de avance en cuanto al desarrollo y utilización de estructuras de contención y técnicas de estabilización del manto ha sido considerablemente mayor en localidades europeas y norteamericanas, conforme al interés local y recursos invertidos en el estudio y mitigación del fenómeno de avalanchas. Los

Figura 11 Terrazas, aguas arriba de Sewell.
Codelco-División El Teniente (Foto: JP Mery, 2008)

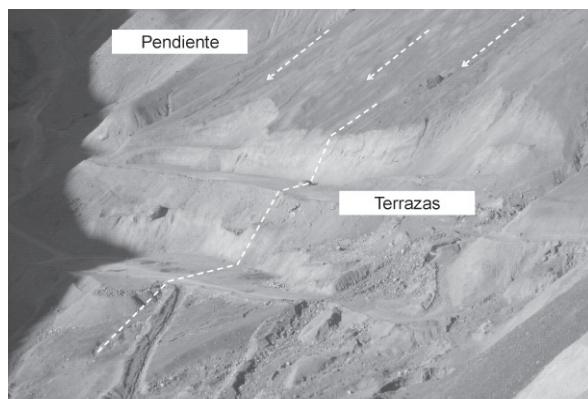


Figura 13 Estructuras metálicas de fabricación local, fuera de su vida útil. Codelco-División El Teniente.
(Foto: JP Mery, 2008)



Figura 12 Serie de terrazas conformadas por bulldozers.
Minera Los Pelambres (Foto: JP Mery, 2009)

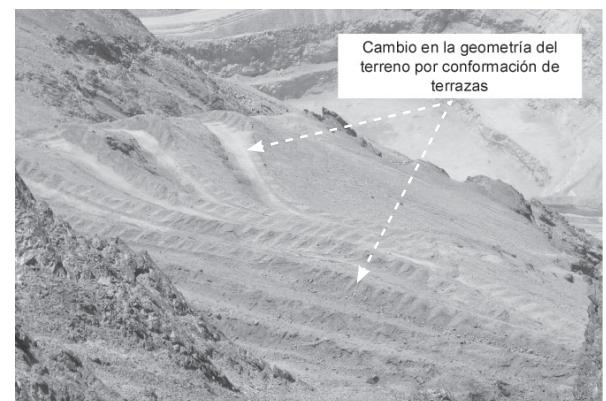


Figura 14 Antigua estabilización de senda "Las Viñas".
Actual División Los Bronces, Anglo American Chile
(Foto: Archivo, Luis Ramírez)



Alpes han sido escenario de diversas e importantes investigaciones para desarrollar fórmulas tendientes a cuantificar las presiones ejercidas sobre las estructuras, y consecuentemente, las recomendaciones para el diseño de estas. La mayor parte de las estructuras han sido diseñadas según normas internacionales como la suiza (FOEN/WSL, 2007) y la francesa NF P 95-304, por lo que en algunos casos debería tenerse la precaución de verificar que su aplicación, basada en las características de mantos nivales de aquellas regiones, pueda extenderse a otras de distintas condiciones climáticas y geográficas. No obstante, a la fecha han sido utilizadas exitosamente en diversas partes del mundo, con ciertos cambios en algunos países.

El desarrollo a nivel internacional presenta innovaciones en una diversidad de estructuras tanto rígidas como flexibles, a las que se suman técnicas que modifican la pendiente del terreno como la ejecución de terrazas y muros (o paredes) y que aumentan la rugosidad de la superficie por medio de la reforestación, pilotes, trípodes y los recientes snowgrippers.

Rastrillos: son parte de las estructuras rígidas tipo puentes, con la diferencia que la superficie de contacto con la nieve se compone de largueros o vigas dispuestas de forma vertical (o perpendicular al terreno). Además de fabricarse en acero, también los hay en base a postes de madera. Esta solución suele ser aplicada complementariamente con otras medidas como por ejemplo la reforestación.

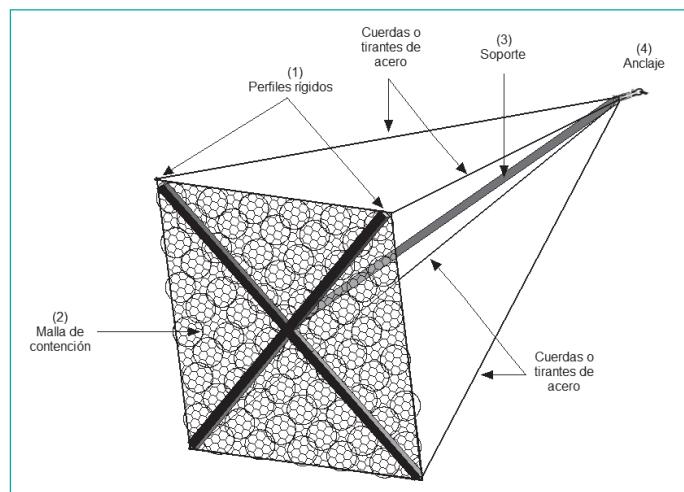
Sistema flexible X-Cross: es un tipo de sistema flexible patentado el año 2000, y que se caracteriza por tener una particular configuración de postes y cables. Consiste en tres postes de acero o de madera impregnada, de los cuales dos se orientan en forma perpendicular al terreno (o con cierto ángulo de inclinación), mientras que el tercero se ubica de manera oblicua entre ellos. Este último poste forma un ángulo de 30° con respecto al terreno. El sistema se mantiene en su posición gracias a los cables que pasan por los extremos de todos los postes, y tiene un único anclaje para aquellos, ubicado en la placa base que sostiene al poste oblicuo (Figura 15). A diferencia de las estructuras flexibles tradicionales, en este tipo de estructuras los cables perimetrales no van anclados al terreno.

Sistemas Ombrello y Vela: son sistemas formados principalmente en acero zincado, semejantes a una pirámide acostada sobre el terreno con su base orientada aguas abajo de la pendiente. Estas estructuras son similares a las mallas, aunque de flexibilidad más limitada. Según sea la empresa fabricante, la estructura puede llamarse *Ombrello* o *Vela*. Se conforman de cuatro partes principales (Figura 16): (1) perfiles de acero; (2) malla de contención; (3) soporte o puntal; y (4) anclaje. Dentro de sus ventajas se encuentra la particularidad de requerir solo un anclaje por unidad estructural. Entre las diferencias más notorias en los diseños de los sistemas *Ombrello* y *Vela* se puede apreciar que los perfiles en cruz del sistema *Vela* (Figura 17) se cruzan entre sí, mientras que en sistema *Ombrello* (Figura 18) los perfiles van articulados en una placa central.

Figura 15 Sistema X-Cross®, CAN



Figura 16 Partes generales del sistema



En general, en estos sistemas la superficie de contacto bordea los 3m x 3m, que se encuentra reforzada por un cable perimetral de acero $\phi 14$ a $\phi 18$. El entramado de la malla principal se compone de cables de acero $\phi 8$ a $\phi 9$, formando anillos de diámetro igual a 350 mm en el caso del sistema Vela, y cuadrados de arista cercana a los 300 mm en el caso del sistema Ombrello. En ambos casos las cuerdas o tirantes de acero pueden tener un diámetro entre $\phi 12$ mm y $\phi 16$ mm. Al conjunto anterior se añade una malla hexagonal para evitar la caída de pequeñas rocas o clastos. Además de servir como protección contra avalanchas, este tipo de sistemas puede tener otras funciones como el sostentamiento de taludes (similar a la Tierra Armada). En estos casos, el sistema de sujeción al terreno pasa de anclaje a una base de hormigón, cuyas dimensiones son 1.50 m x 1.50 m x 0.12 m (Vela), la que proporciona el anclaje al quedar cubierta por la capas del talud de relleno.

Paredes: estas construcciones simples están generalmente conformadas con mampostería del sector lo que permite configurar pequeñas terrazas en el caso de que no sea posible efectuar cortes en el terreno, como sucede en laderas rocosas. Entre la pared construida y el terreno aguas arriba se realiza el relleno que permite establecer el cambio de pendiente que permite reducir el deslizamiento del manto de nieve. Este tipo de solución es efectiva para alturas de nieve menores a 1 m, y son aplicables a pendientes del terreno menores a 40° (MOP, 2002).

Reforestación: esta técnica es altamente durable y consiste en plantar árboles en vastas zonas propensas a

desencadenar avalanchas de nieve. Sin embargo su puesta en marcha tarda algunos años, ya que debe esperarse el crecimiento y maduración adecuada de las especies a fin de que puedan soportar las presiones ejercidas por los estratos de nieve. Este tiempo suele demorar al menos 30 años (MOP, 2002), por lo que la efectividad de esta técnica en ese período depende de la complementación con otras estructuras, entre las que se cuentan los trípodes. En Chile, las zonas propensas a avalanchas y sujetas a algún tipo de medida o control, normalmente se ubican en la alta cordillera (sobre 2.500 m.s.n.m.) donde no existen las condiciones naturales para reforestar.

De acuerdo a Ganju y Dimri (2004), la inhibición de avalanchas en la zona de inicio mediante la reforestación es efectiva ya que: (1) elimina casi por completo el arrastre de la nieve a nivel superficial; (2) la nieve es retenida en las copas de los árboles y se libera gradualmente; y (3) se tiende a producir una distribución uniforme de la temperatura de la nieve, induciendo a una mayor estabilidad de la cubierta.

La cantidad de árboles por hectárea debería estar en torno a no menos de 1.800 unidades, debiendo plantarse alrededor de 2.000 (MOP, 2002) para poder cubrir las pérdidas por inadaptación y muerte de algunas especies. En climas más fríos la reforestación es menos efectiva dado el menor crecimiento de los árboles (Sanderson y Lied, 2008). A esto debe sumarse la elevada altitud geográfica en algunas regiones.

Trípodes: estas estructuras, preferentemente de madera, actúan en conjunto con la técnica de reforestación,

Figura 17 Sistema Vela, MBS-ADIC, France



Figura 18 Sistema Ombrello

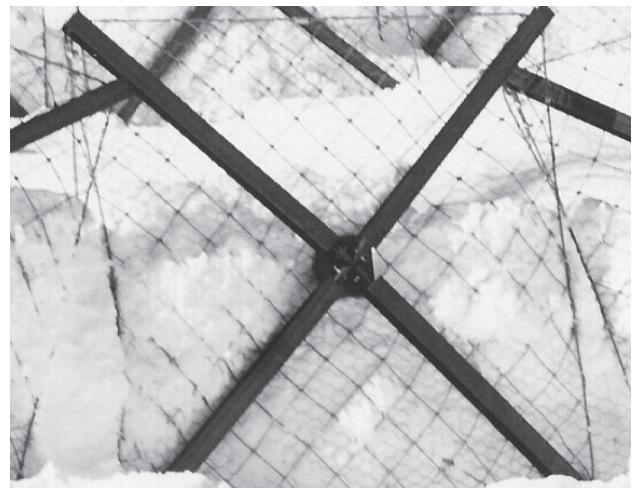


Figura 19 Trípodes como técnica complementaria a la reforestación. Universität für Bodenkultur Wien, I. of M. Risk Engineering, 2008



Figura 20 Conjunto de Snowgrippers. Incofil, Italia



no siendo necesarias una vez que han crecido los árboles. En la práctica esto ocurre cuando estos últimos exceden en promedio la altura de la cubierta de nieve máxima en el sitio (Armanini y Larcher, 2008).

Son diseñadas para una vida útil entre 40 y 50 años, con una altura de 1.5 m y ancho 2 m, y se recomienda que en pendientes fuertes la cantidad bordee las 1.000 unidades por hectárea (University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Institute of Mountain Risk Engineering, 2008).

Pilotes: son postes de madera o metálicos que se hincan o anclan al terreno verticalmente, de manera de proporcionar estabilidad al manto de nieve, evitando su reptación y deslizamiento. El diámetro suele variar entre 10 y 20 cm, con una proporción entre la parte enterrada y sobre el terreno igual a 2:1, recomendándose además su instalación para pendientes menores a 35° y profundidades de nieve máximas de 1 m para terrenos débilmente cohesivos y mínimas de 0.6 m para terrenos densos (MOP, 2002).

Snowgrippers: al igual que las estructuras anteriores, estos dispositivos tienen la función principal de aumentar la rugosidad del terreno y con ello “amarra” el manto, ofreciendo resistencia al movimiento aguas abajo. También aceleran el proceso de compactación de la nieve por efecto de la transmisión de calor debido a que están construidas en aluminio. Su altura varía entre 1 y 1.5 m y tienen un peso máximo de 24 kg. Se fijan al terreno mediante anclajes de los que son fácilmente desmontables en épocas estivales cuando no se necesitan.

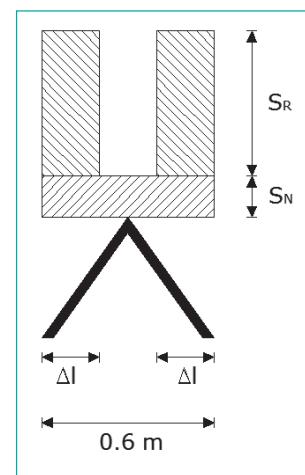


Figura 21 Distribución de presiones sobre un snowgripper (vista en planta). Incofil, Italia

Se suelen instalar en grandes cantidades y son un complemento para sistemas tradicionales de contención de avalanchas en la zona de inicio. En general no están diseñados para resistir y absorber grandes cargas del manto de nieve.

4. Discusión y conclusiones

El presente trabajo ha tenido por objetivo presentar una breve y actualizada reseña sobre las técnicas utilizadas para contener el manto de nieve en la zona de inicio

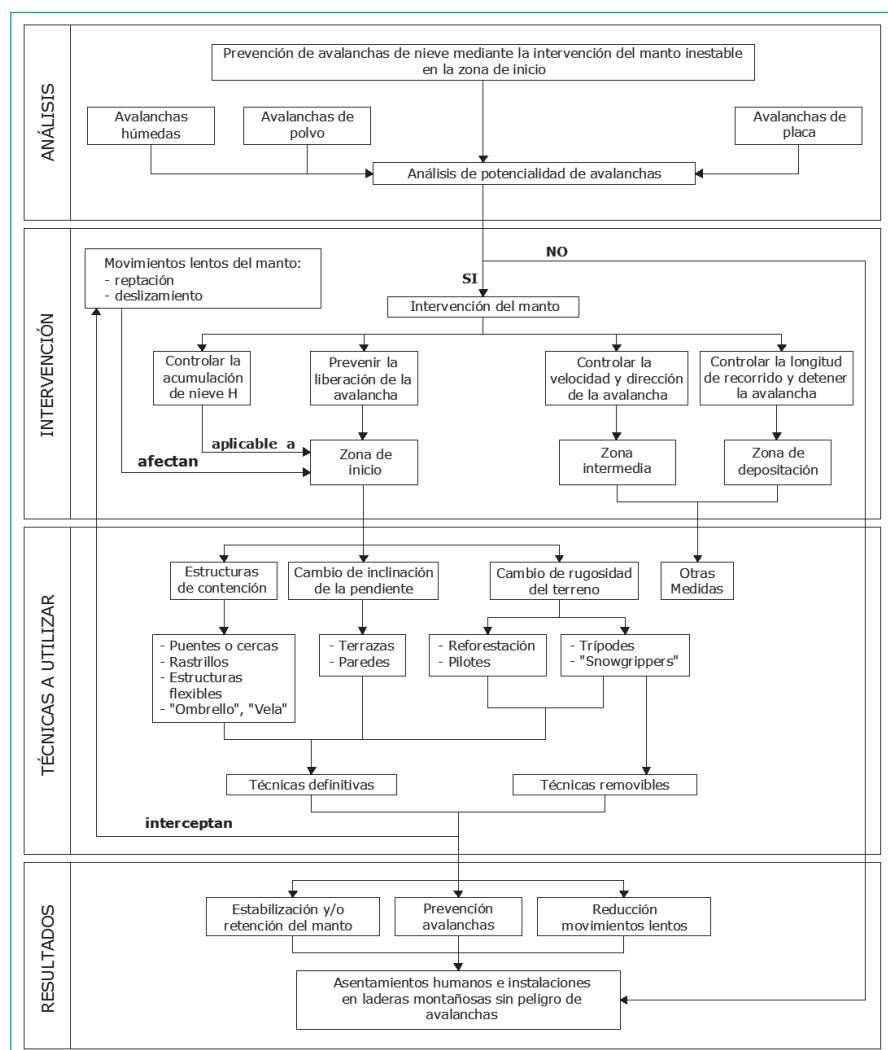
de avalanchas, junto con una síntesis del problema, y los alcances que implica la intervención del manto nival (Figura 22). Muchas de las consideraciones sobre las solicitudes involucradas, criterios de diseño, determinación de la altura de diseño del manto de nieve, análisis de las fundaciones, operaciones de montaje y mantenimiento no han sido tratadas dado la extensión que ello involucra.

Las medidas para controlar avalanchas han de elegirse acorde a cada lugar y circunstancia, debiendo recurrirse

en muchas ocasiones a más de un sistema de control para que actúen complementariamente.

La instalación de estructuras en la zona de inicio para retener el manto de nieve es una medida ampliamente utilizada, especialmente porque no requieren de operaciones especiales ni sistemas electrónicos o mecánicos de activación y son de bajo mantenimiento, a diferencia del uso de explosivos, que requieren de la presencia humana para ser colocados, lanzados, o de complejos sistemas mecánicos que los transporten y operen a distancia.

Figura 22 Prevención de avalanchas en la zona de inicio.
Fuente: elaboración propia, R Aravena



Pese a lo extendido de las medidas para sostener el manto de nieve en la parte alta de la pendiente, tal vez la mejor manera de controlar las avalanchas sea minimizando la acumulación de nieve en las laderas, lo que se logra parcialmente con la gestión del viento en la zona de inicio para controlar la sobrecarga de nieve por transporte eólico o bien con el uso de explosivos o explosiones de gases para generar desencadenamientos artificiales de volúmenes controlados. De esta manera se elimina de raíz el peligro que significa tener energía potencial acumulada sobre objetivos vulnerables. Si bien un buen diseño de las barreras de contención puede sostener el manto para ciertas profundidades previstas, lo que en realidad se está haciendo es acumular nieve durante la temporada de invierno, situación que podría incrementar el riesgo de deslizamientos hacia la primavera, cuando ocurren avalanchas húmedas y de fondo.

La activación artificial de avalanchas, sin embargo, no es recomendable cuando el objeto vulnerable aguas abajo de la senda se vea involucrada la presencia de gran cantidad de personas. Cada vez que sea necesario purgar la ladera generando una avalancha controlada, necesariamente deberá evadirse la instalación afectada, situación que resulta más fácil, por ejemplo, en una carretera, centro de esquí, paso fronterizo o alguna obra civil, que en un poblado, campamento industrial u otra zona donde sea difícil movilizar gran cantidad de personas cada vez que repita esta operación, situación que puede ocurrir en cada nevazón o incluso varias veces durante ella.

Actualmente las normas suizas y francesas llevan la vanguardia en estudios y recomendaciones para el diseño de las estructuras de contención, lo que no libera a cada región, donde ellas se apliquen, de adecuar y calibrar estas recomendaciones acorde a las características locales. En este sentido se sugiere estudiar todas aquellas variables que condicionan la mecánica de la nieve y las solicitudes ejercidas por los estratos de nieve como por ejemplo: los tipos de cristales; su evolución en el tiempo (metamorfismo); la densificación del manto por sobrecarga de estratos nuevos; el tiempo transcurrido; las condiciones meteorológicas; y el comportamiento de los movimientos lentos del manto (reptación y deslizamiento); entre otros.

Entre los parámetros involucrados en las normas suizas de diseño utilizadas para cuantificar las presiones ejercidas, y que a juicio de los autores debería ser materia de investigación y eventual calibración para cada región donde se apliquen, destacan los factores K (reptación) y N (deslizamiento) indicados en la Ec.1, y el factor de altitud f_c indicado en la Ec.2. Esta última variable, por ejemplo, que representa el incremento de presiones en función de la variación de la densidad del manto nival con la altitud geográfica, ha sido estimada para elevaciones entre 1.000 y 3.000 m.s.n.m., situación que puede incrementar las presiones (S_N , Ec.1) hasta en un 30% ($f_c = 1.3$ para 3.000 m.s.n.m.). Este rango en general no es representativo de las condiciones chilenas donde las avalanchas tienen lugar a partir de los 2.500 m.s.n.m., llegando muy por sobre los 3.000 m.s.n.m. para las zonas centro y norte, y una altitud algo más baja para la zona sur del país.

En Chile no existen recomendaciones especiales en la normativa fiscal (MOP, 2002) para el uso de los factores mencionados en las ecuaciones Ec.1 y Ec.2, por lo que la estimación de presiones en los mantos de nieve nacionales queda a criterio del proyectista. Tal es el caso, por ejemplo, de Codelco Chile, División El Teniente, donde el estudio de mitigación de avalanchas del camino Tramo 5 consideró valores sin mayor fundamento para los factores K y N (Ramírez, 2002).

Si bien las estructuras para retener el manto de nieve son de bajo mantenimiento, no debe descuidarse la verificación de su capacidad a lo largo de su vida útil, puesto que si ella se pierde, se podría estar frente a una situación de mayor peligro al tener un volumen almacenado en la ladera, bajo condiciones altamente inestables.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al experto en gestión de nieve y avalanchas, Sr. Luis Ramírez C., Asesor Gerencia S&SO-Op. Invierno, Anglo American Chile, División Los Bronces, por su colaboración en el desarrollo del presente artículo.

6. Bibliografía

1. Ammann, W.J., Föhn, P.B.M. (1999). *Snow Avalanches. Coping study on disaster resilient infrastructure.* IDNDR Programme Forum 1999, United Nations, Geneva, Switzerland.
2. Armanini, A., y Larcher, M. (Eds.). (2008). Detailed performance study of countermeasures in selected test areas (Report N° D2.2). Recuperado de IRASMOIS Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements: http://irasmos.slf.ch/pdf/WP2_D22_20080520.pdf
3. Chaudhary, V., Singh, G., Chaudhary, A., y Singh, G. (2002). Flexible retaining barriers for prevention of avalanches on national highway NH-1A. *Defence Science Journal*, 52(2), 191-200.
4. Chaudhary, V., y Singh, G. (2006). Structural measures for controlling avalanches in formation zone. *Defence Science Journal*, 56(5), 791-799.
5. Federal Office for the Environment / WSL Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF. (2007). *Defense structures in avalanche starting zones.* (Norma suiza para estructuras de soporte). Bern, Suiza: Autores.
6. Ganju, A., y Dimri, A. P. (2004). Prevention and mitigation of avalanche disasters in western himalayan region. *Natural Hazards*, 31(2), 357-371.
7. Institut Fédéral pour l'Étude de la Neige et des Avalanches. (1968). *Ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement* (norma suiza para estructuras de soporte). Davos, Suiza.
8. Margreth, S. (1995). Snow pressure measurements on snow net systems. *Actes de colloque, Chamonix*, 241-248.
9. McClung, D., y Schaerer, P. (2006). *The avalanche handbook* (3^a ed.). Seattle, WA, EE.UU.: Mountaineers Books.
10. MOP, Ministerio de Obras Públicas. (2002). *Manual de carreteras.* (Vol. 3, Cap. 3.900), Chile: Autor.
11. Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage / Institut Fédéral pour l'Étude de la Neige et des Avalanches. (1990). *Directives pour la construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement.* (Norma suiza para estructuras de soporte). Bern, Suiza: Autores.
12. Pedrero V. y Márquez R. (1985). *Control de avalanchas de nieve.* Memoria de título para optar al título de Constructor Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Construcción Civil. Santiago, Chile.
13. Ramírez, L., y Mery, J.P. (2007). Las avalanchas en Chile: efectos y sistemas de control. *Revista de la Construcción*, 6(1), 48-63.
14. Ramírez, R., (2002). *Estudio de sobrecargas de avalanchas y análisis de protecciones para el camino Colón-Sewell, Carretera El Cobre.* Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles. Santiago, Chile.
15. Rheinberger, C., Bründl, M., Rhyner J. (2009). Dealing with the White Death: Avalanche Risk Management for Traffic Routes. *Risk Analysis*, 29(1), 76-94.
16. Sanderson, F., y Lied, K. (Eds.). (2008). Recommendations for future installation and implementation of countermeasures against rapid mass movements (Report N° D2.3). Recuperado de IRASMOIS Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements: http://irasmos.slf.ch/pdf/WP2_D23_20080707.pdf
17. University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Institute of Mountain Risk Engineering. (2008). Catalogue of current structural and non-structural (active/pассив) countermeasures against debris flows, rock avalanches, and snow avalanches. (Reporte N° D2.1). Recuperado de IRASMOIS Integral Risk Management of Extremely: http://irasmos.slf.ch/pdf/WP2_D21_20080502.pdf