

# **CONTROL DE FILTRACIÓN EN SUELOS CONGELADOS. APLICACIÓN A LA LAGUNA BOECKELLA**

**Tesis de Grado**

**Autor:** Francisco J. Arroyo  
*LMS - FIUBA*

**Tutor:** Alejo O. Sfriso  
*LMS – FIUBA.*

Buenos Aires, Agosto 2012

# **CONTROL DE FILTRACIÓN EN SUELOS CONGELADOS. APLICACIÓN A LA LAGUNA BOECKELLA**

**Tesis de Grado**

Firma del autor:

Autor: Francisco J. Arroyo  
*LMS - FIUBA*

Certificada por:

Tutor: Alejo O. Sfriso  
*LMS - FIUBA.*

Aceptada por:

Buenos Aires, Agosto 2012

# ÍNDICE

<b>Índice</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>6</b>
<b>2 Suelos congelados</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción	8
2.2 Composición y estructura	8
2.3 Clasificación de suelos congelados	9
2.4 Geoformas de suelos congelados	9
2.5 Temperatura en el suelo	12
2.6 Conductividad	14
2.7 Capacidad calorífica	15
2.8 Índices de congelamiento y deshielo	16
2.9 Determinación de existencia y penetración del permafrost	16
2.10 Comportamiento mecánico de suelos congelados	17
2.11 Derretimiento por aplicación de presión	17
2.12 Creep en suelos congelados	18
2.13 Permafrost en lagunas	18
<b>3 Métodos de estabilización de suelos congelados basados en control de temperatura</b>	<b>20</b>
3.1 Introducción	20
3.2 Clasificación de técnicas de control de suelos congelados	20
3.3 Sistemas pasivos	20
3.4 Sistemas de enfriamiento activos	22
3.5 Elementos de los sistemas de enfriamiento activos	22
3.6 Principio de funcionamiento de sistemas de enfriamiento activos	23
3.7 Cálculo de sistemas de enfriamiento activos	24
3.8 Serie de tubos de enfriamiento	25
<b>4 Control de filtraciones por medio de geomembranas</b>	<b>26</b>
4.1 Introducción	26
4.2 Aplicaciones de geomembranas	26
4.3 Tipos de geomembranas	26
4.4 Rotura en las membranas - Punzonado	27
4.5 Instalación	28
4.6 Ensayos de aptitud	29
4.7 Altura efectiva de diseño de geomembranas	30
4.8 Influencia de la forma de las partículas	30

4.9	Selección de geomembrana	30
4.10	Permeabilidad de geomembranas	32
4.11	Antecedente de utilización de geomembranas en climas árticos	32
<b>5</b>	<b>Problemática del lago Boeckella en la Base Esperanza</b>	<b>34</b>
5.1	Ubicación	34
5.2	Comportamiento térmico de lagos	36
5.3	Características generales del Lago Boeckella	37
5.4	Rotura de costa en Lago Boeckella	37
5.5	Construcción del dique artificial	38
5.6	Funcionamiento del dique	39
5.7	Descripción matemática del flujo térmico en suelos	40
5.8	Temperatura en el suelo y penetración de permafrost– Base Esperanza	40
5.9	Propiedades térmicas del suelo – Base Esperanza.	41
5.10	Cálculo de capacidad mínima de enfriamiento – Termosifones lago Boeckella	42
5.11	Pre-dimensionamiento de barrera complementaria con geomembrana	45
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>47</b>

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al Dr. Alejo O. Sfriso por su constante dedicación, vocación y por brindarme la motivación necesaria para realizar este proyecto de investigación, aprendizaje y formación en la etapa final de mi carrera.

A la Universidad de Buenos Aires por brindarme una educación pública de excelencia permitiendo mi formación como profesional.

Agradezco a todas las personas que me acompañaron a lo largo de mi carrera y tesis dándome su apoyo a lo largo de todo el proceso de formación.

Finalmente agradezco a mi familia por acompañarme y brindarme su apoyo y paciencia a lo largo de toda mi carrera.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Base Esperanza es una base del Ejército Argentino en la Antártida. Está ubicada en la Bahía Esperanza, en el noroeste de la península Antártica, a 64° 24' de Latitud Sur y 57° 59' de Longitud Oeste. La estación ocupa 43 edificios con un área total de 374.000m<sup>2</sup> y una extensión de 4 Km desde el monte Flora hasta la costa. Aloja unos 80 habitantes permanentes y 1.100 turistas que la visitan durante la temporada cálida. Cuenta con un laboratorio del Instituto Antártico Argentino y una estación meteorológica; se realizan además investigaciones de glaciología, biología marina y terrestre y sismología.

La Base Esperanza se construyó en ese sitio, entre otros factores, porque queda cerca de un lago – el Lago Boeckella – que mantiene un cuerpo de agua líquida permanente. Este cuerpo abastece agua potable a la Base durante todo el año, lo que permite no depender de costosos medios de transporte de agua por mar.

La costa natural del lago – que separa el agua dulce del mar – es un depósito morrénico de arenas y gravas saturadas, con el agua congelada de manera permanente. Los suelos congelados permanentemente – permafrost – son impermeables, y es por esa razón que el agua del lago no se filtra al océano. Además, el permafrost genera mecanismos resistentes que dan estabilidad a los taludes naturales.

Durante el verano extremadamente cálido de 2002 se produjo el descongelamiento parcial del suelo del borde del lago; el agua comenzó a filtrar, occasionó una brecha en el suelo impermeable y un retroceso del frente de suelo congelado que retenía el agua y daba estabilidad a los taludes naturales. Esto produjo una filtración importante de agua dulce al océano y la pérdida de estabilidad de parte del frente natural, lo que trajo aparejado un colapso de parte de la cuenca y la disminución brusca del nivel del lago.

Cuando el lago perdió nivel desapareció el cuerpo de agua que permanecía descongelado durante todo el año, y por lo tanto desapareció la fuente de agua potable de la Base.

Para recuperar la cota de agua requerida para el abastecimiento de la base se construyó un dique de hormigón y se colocó un sistema de enfriamiento que permitió reconstruir el permafrost natural. Sin embargo, esta solución presentó una serie de inconvenientes posteriores que deben ser bien estudiados para poder desarrollar una solución definitiva al problema.

Desde el punto de vista científico, el problema del Lago Boeckella tiene los siguientes aspectos interesantes:

- Es uno de los primeros problemas de estabilidad en suelos congelados que se documentan en la Argentina.

- Es la primera aplicación conocida de un sistema de estabilización de suelos congelados – los termosifones – de la Argentina.
- Mostró que el problema del tratamiento de suelos congelados no está bien comprendido a nivel local, y que es un tema de interés creciente para la Ingeniería Argentina.
- Constituye un caso ideal de estudio, puesto que ocurre en una base científica que tiene amplia información acerca de las condiciones ambientales y meteorológicas, y amplia disponibilidad para continuar con el estudio y medición del comportamiento futuro de los suelos y del lago.

El objetivo de este trabajo de tesis es aprovechar esta oportunidad para:

- Iniciar el conocimiento de los suelos congelados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UBA.
- Estudiar, comprender y describir matemáticamente la secuencia de fenómenos que ocurrieron en los suelos de la costa del lago Boeckella durante 2002 y los eventos posteriores.
- Estudiar los mecanismos de transferencia de calor en suelos congelados – con y sin transporte convectivo – y sus técnicas de control.
- Analizar soluciones ingenieriles para el control de las filtraciones del agua del lago, compatibles con la logística disponible en la Base Esperanza.

Este trabajo se compone por seis capítulos incluyendo esta introducción.

En el capítulo dos se realiza una descripción de los suelos congelados, se analiza su comportamiento térmico, se los clasifica y se describe su comportamiento. El capítulo está escrito con la intención de que constituya una separata empleada como material de estudio en la asignatura Mecánica de Suelos.

En el capítulo tres se describen las técnicas de estabilización de suelos congelados basadas en el control de su temperatura. Se desarrolla la ecuación diferencial de flujo de calor con barrera de congelamiento móvil y los elementos para el cálculo de termosifones.

En el capítulo cuatro se describen las técnicas de control de flujo basadas en el empleo de barreras impermeables – geomembranas – puesto que durante el desarrollo de los estudios se encontró que el empleo de estas barreras es una de las opciones más convenientes para el problema del Lago Boeckella. Se analizan las condiciones de operación de geomembranas colocadas en contacto con suelos gruesos y el flujo de agua a través de los orificios que quedan en la barrera hidráulica por los inevitables defectos de instalación de las geomembranas.

En el capítulo cinco se describe el problema específico del Lago Boeckella, la geomorfología del lugar, el clima y la geografía. Se analiza el comportamiento térmico del lago y se realiza su análisis hídrico para determinar sus afluentes y efluentes. Lue-

go, se estudia el equilibrio térmico de la barrera de permafrost que constituye su costa natural para tres diferentes escenarios de funcionamiento:

- La barrera está formada, se emplea una máquina térmica para mantenerla en funcionamiento estable. Este escenario simula el funcionamiento de una medida preventiva para evitar la propagación de la inestabilidad del permafrost.
- La barrera tiene una brecha, se emplea una máquina térmica para cerrar la brecha y asegurar un funcionamiento estable. Este escenario simula la solución al problema real del Lago Boeckella empleando exclusivamente termosifones.
- La barrera tiene una brecha, se emplea una combinación de barrera hidráulica pasiva - geomembrana – y una máquina térmica para cerrar la brecha y asegurar un funcionamiento estable. Este escenario simula un diseño óptimo de la reparación de la costa.

Finalmente, en el capítulo seis se vierten las conclusiones del trabajo y se indican los caminos de investigación futura para el problema del funcionamiento hidráulico del Lago Boeckella.

## 2 SUELOS CONGELADOS

### 2.1 Introducción

Se define al suelo congelado como aquel cuya temperatura está por debajo de los 0°C.

Las propiedades del suelo congelado dependen de la temperatura. Su comportamiento mecánico varía desde suelo muy frágil a plástico en función de la cantidad de hielo. La presencia de sales modifica la temperatura de congelamiento del agua lo que trae aparejado cambios en el contenido de hielo y en el comportamiento de la masa de suelo.

A diferencia de lo que ocurre con los suelos comunes, en los suelos congelados la humedad incluye agua líquida y hielo, por lo que no es un buen indicador de la resistencia del suelo. En efecto, el agua en estado sólido genera una red cristalina que aporta a la resistencia del material, por lo que un incremento de "humedad" en estado sólido puede significar un aumento de la resistencia de la masa de suelo en lugar de una disminución.

Por esa razón, existe un sistema de clasificación de suelos congelados que es complementario al sistema de clasificación SUCS que se emplea tradicionalmente en la geotecnia.

En este capítulo se describen los suelos congelados y se presentan los aspectos principales de su comportamiento mecánico e hidráulico. Las principales fuentes bibliográficas son Ardensland y Ladanyi 2004, Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2003 y McFadden 2001.

### 2.2 Composición y estructura

El suelo congelado se compone por cuatro elementos, partículas sólidas, hielo, agua y vacíos. Las partículas se encuentran en distintas formas y tamaños, cubiertas por un delgado film de agua descongelada.

El hielo puede estar distribuido uniformemente o acumulado de forma irregular. También se pueden encontrar grandes masas de hielo acumuladas debido a los distintos tipos de fallas de suelo que se explicarán más adelante.

En la Figura 1 (MIT, 1981) se presenta un esquema con la composición típica de un suelo en estado congelado. En la Figura 2 se presenta el diagrama de fases del suelo congelado y el de un suelo descongelado para comparación.

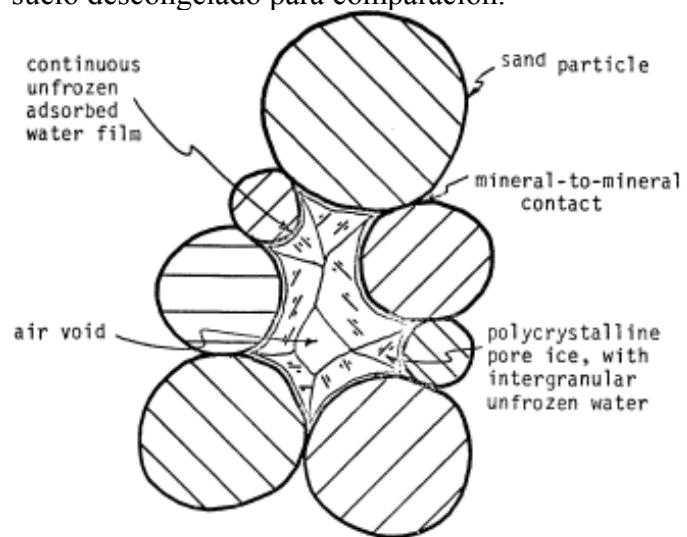


Figura 1: Composición de suelo congelado (MIT, 1981).

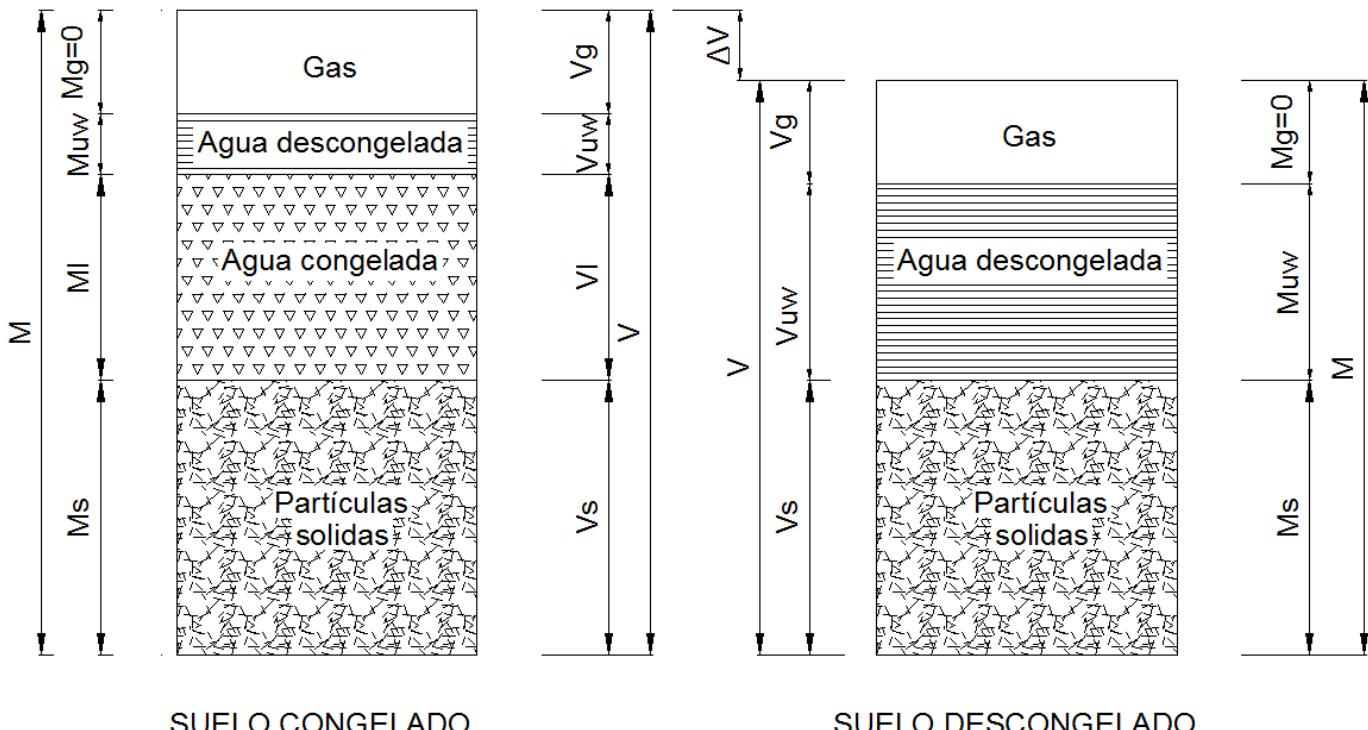


Figura 2: Fases del suelo congelado y descongelado

### 2.3 Clasificación de suelos congelados

La clasificación de los suelos congelados se realiza con el objeto de diferenciar los distintos tipos y anticipar su comportamiento.

Los suelos congelados tienen propiedades relacionadas con la temperatura y con los procesos de congelamiento y ablación. Es por esto que en la clasificación de un suelo congelado se tiene en cuenta la cantidad de hielo además del tamaño de las partículas y la plasticidad.

La clasificación de suelos congelados se realiza en tres etapas. En la primera etapa (I), se lo clasifica mediante el método unificado de Casagrande y se mide su temperatura. En una segunda etapa (II) se incorporan características del suelo en estado congelado y, finalmente, en una tercera etapa (III) se describen las características de la fase hielo.

La etapa uno es común a los suelos congelados y descongelados y no será explicada aquí.

En la etapa dos, los suelos congelados se dividen en dos grupos, aquellos donde las películas de hielo no son visibles (N) y en los que se detecta la presencia de hielo a simple vista (V).

En los suelos de tipo N se puede observar la presencia de hielo entre las partículas sólidas por reflexión de luz o por las fracturas inducidas en la superficie. El grupo se divide en suelos pobemente cementados (NF) y fuertemente unidos (NB), en estos el hielo genera una masa dura. Los del tipo NF se generan cuando el grado de saturación del suelo es muy bajo. A su vez los NB se dividen en tipo NBN, que son aquellos que no tienen hielo segregado y los NBE que tienen exceso de hielo uniformemente distribuido. El objeto de esta clasificación es dar una primera impresión acerca del comportamiento probable de estos suelos para problemas típicos de las construcciones en climas fríos. Por ejemplo, los suelos de tipo NBE – que tienen alto contenido de hielo – tendrán asentamientos importantes en los períodos de ablación.

Los suelos de tipo V se dividen en cuatro grupos: Vx, con cristales de hielo segregados en el suelo; Vc, con cristales de hielo cubriendo las partículas sólidas; Vr, con formaciones de hielo orientadas aleatoriamente; y Vs, con formaciones de hielo estratificadas u orientadas en una dirección predominante. Cuando los cuerpos de hielo obtienen espesores mayores a los 25mm al suelo se lo denomina directamente como hielo.

La Figura 3 (Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2003) muestra el contenido de hielo en los distintos tipos de suelo. En la Figura 4 se resume en un cuadro la clasificación de los suelos congelados (Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2003).

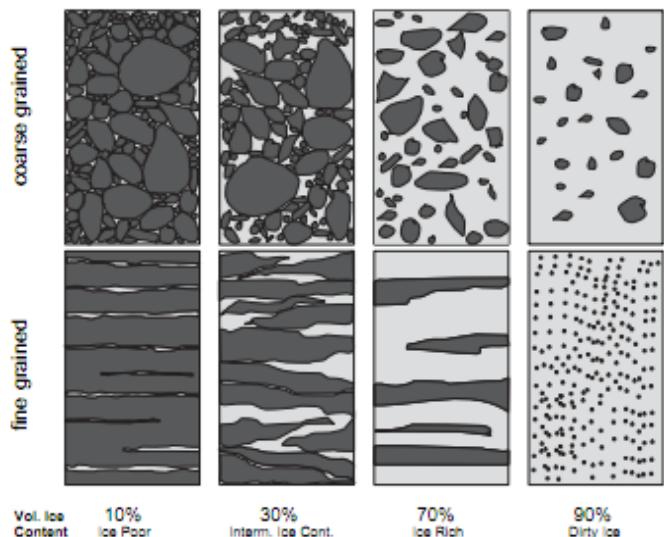


Figura 3: Contenido de hielo en suelos (Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2003).

### 2.4 Geoformas de suelos congelados

A continuación se definen las distintas geoformas típicas de los climas fríos.

#### 2.4.1 Bog Soils

Son suelos que se encuentran en terrenos elevados. Se generan con mezclas de diversos materiales orgánicos y tienen un espesor del orden de 0.5 a 1.2m, que en algunos casos puede llegar a 9m. Su acidez varía desde moderada a fuerte. Este tipo de suelos se caracteriza por un elevado contenido de materia orgánica.

#### 2.4.2 Ground ice

Este tipo de suelo incluye cualquier tipo de abertura en el suelo o la roca. Es un suelo que puede ser estacional o permanente y varía su concentración de zona a zona dependiendo del tipo de material de caja, la humedad disponible y el grado de congelamiento.

#### 2.4.3 Muck

Este suelo se caracteriza por un color oscuro, negro o marrón, compuesto por material orgánico descompuesto y un suelo de grano fino. Tiene una alta proporción de limo.

#### 2.4.4 Talick

Es una capa o cuerpo de suelo sin congelarse dentro del permafrost. Se denominan cerradas cuando se encuentran completamente rodeadas por suelo congelado y abiertas cuando se encuentran parcialmente circundadas por suelo congelado.

#### 2.4.5 Palsa

Es un montículo circular o elongado de una altura máxima de 10m. Está compuesto principalmente de residuos vegetales que cubren el suelo mineral. En su interior se encuentra un núcleo permanentemente congelado que se extiende desde los residuos vegetales hasta el suelo mineral.

**Part I**  
Description of Soil  
Phase (a),  
(Independent of  
Frozen State)

## DESCRIPTION AND CLASSIFICATION OF FROZEN SOILS

Description of Soil				Guide for Construction on Soils Subject to Freezing and Thawing										
Description (2)		Major Group		Sub-Group		Criteria (9)								
Designation (3)		Designation (4)		Designation (5)		Field Identification (6)								
<b>Segregated Ice is not visible by eye (b)</b>		<b>Poofy Bonded or Friable</b>		<b>Nf</b>		Identify by visual examination. To determine presence of excess ice, use magnifying lens as necessary. For soils not fully saturated, estimate degree of ice saturation: Medium, Low, None presence of crystals, or of ice coatings around larger particles.								
<b>Part II</b> <b>Description of Frozen Soil</b>	<b>N</b>	No excess ice	n	In-Place Temperature	Density and Void Ratio	In-Place Temperature								
		Well Bonded	Nb	In Frozen State	Density	Density								
		Excess Ice	e	After Thawing in Place	Void Ratio	and void size								
		a) After Thawing in Place		b) Water Content (Total H <sub>2</sub> O, including ice)	c) Average	and void size								
		d) Distribution		d) Distribution		and void size								
	<b>V</b>	Individual ice crystals or ice coatings on particles		Strength		a) Compressive								
		Random or Irregularly oriented ice formations		b) Tensile		b) Shear								
		Stratified or distinctly oriented ice formations		c) Adfreeze		c) Adfreeze								
		Ice with soil Inclusions		d) Adfreeze		d) Adfreeze								
		Ice + Soil Type		Elastic Properties		Elastic Properties								
<b>Part III</b>	<b>Ice</b>	(Greater than 1 inch in thickness)		Plastic Properties		Plastic Properties								
		Ice without soil Inclusions		Thermal Properties		Thermal Properties								
		Ice		Ice Crystal Structure (using optional instruments.)		Ice Crystal Structure								
		Ice		a) Orientation of Axes		a) Orientation of Axes								
		Ice		b) Crystal size		b) Crystal size								
<b>DEFINITIONS:</b>														
Ice Coatings on Particles are discernible layers of ice found on or below the larger soil particles. They are sometimes associated with hoarfrost crystals, which have grown into voids produced by the freezing action.														
Poorly-bonded signifies that the soil particles are weakly held together by the ice and that the frozen soil consequently has poor resistance to chipping or breaking.														
Crystals may be present alone or in a combination with other ice formations.														
Clearice is transparent and contains only a moderate number of air bubbles. (e)														
Cloudyice is translucent, but essentially sound and non-pervious														
Porousoice contains numerous voids, usually interconnected and usually resulting from melting of air bubbles or along crystal interfaces from presence of salt or other materials in the water, or from the freezing of saturated snow. Though porous, the mass retains its structural unity.														
Candidice is ice which has rotated or otherwise formed into long columnar crystals, very loosely bonded together.														
Granularice is composed of coarse, more or less equidimensional, ice crystals														
Ice Lenses are lenticular ice formations in soil occurring essentially parallel to each other, generally normal to the direction of heat loss and commonly in repeated layers.														
Ice Segregation is the growth of ice as distinct lenses, layers, veins and masses in soils, commonly but not always oriented normal to direction of heat loss.														

**Ice Coatings on Particles** are discernible layers of ice found on or below the larger soil particles. They are sometimes associated with hoarfrost crystals, which have grown into voids produced by the freezing action.

**Poorly-bonded** signifies that the soil particles are weakly held together by the ice and that the frozen soil consequently has poor resistance to chipping or breaking.

**Crystals** may be present alone or in a combination with other ice formations.

**Clearice** is transparent and contains only a moderate number of air bubbles. (e)

**Cloudyice** is translucent, but essentially sound and non-pervious

**Porousoice** contains numerous voids, usually interconnected and usually resulting from melting of air bubbles or along crystal interfaces from presence of salt or other materials in the water, or from the freezing of saturated snow. Though porous, the mass retains its structural unity.

**Candidice** is ice which has rotated or otherwise formed into long columnar crystals, very loosely bonded together.

**Granularice** is composed of coarse, more or less equidimensional, ice crystals

**Ice Lenses** are lenticular ice formations in soil occurring essentially parallel to each other, generally normal to the direction of heat loss and commonly in repeated layers.

**Ice Segregation** is the growth of ice as distinct lenses, layers, veins and masses in soils, commonly but not always oriented normal to direction of heat loss.

The potential intensity of ice segregation in a soil is dependent to a large degree on its void sizes and may be expressed as an empirical function of grain size as follows:

Most inorganic soils containing 3 percent or more of grains finer than 0.02 mm in diameter by weight are frost-susceptible. Gravels, well-graded sands and silty sands, especially those approaching the theoretical maximum density curve, which contain 1.5 to 3 percent finer than 0.02 mm by weight without being frost-susceptible. However, their tendency to occur interbedded with other soils usually makes it impractical to consider them separately.

Soils classed as frost-susceptible under the above criteria are likely to develop significant ice segregation and frost heave if frozen at normal rates with free water readily available. However, they may also be classified as thaw-unstable if frozen with insufficient water to permit ice segregation.

Soils classed as non-frost-susceptible ('NFS') under the above criteria usually occur without significant ice segregation and are not eruct and may be inadequate for some structure applications; exceptions may also result from minor soil variations.

**NOTES:**

- (a) When rock is encountered, standard rock classification
- (b) Frozen soils in the N group may on close examination indicate presence of ice within the voids of the material by crystalline reflections or by a sheen on fractured or trimmed surfaces.
- (c) The impression to the unaided eye is that none of the frozen water occupies space in excess of the original voids in the soil. The opposite is true of frozen soils in the V group.
- (d) When visual methods may be inadequate, a simple field test to aid evaluation of volume of excess ice can be made by placing some frozen soil in a small jar, allowing it to melt and observing the quantity of supernatant water as a percent of total volume.
- (e) Where special forms of ice, such as hoarfrost, can be distinguished, more explicit description should be given.
- (f) Observer should be careful to avoid being misled by surface scratches or frost coating on the ice.

Modified from: Linell, K. A. and Kaplan, C. W. - 1966. Description and Classification of Frozen Soils. Proc. International Conference on Permafrost (1963)., Lafayette, IN, U.S. National Academy of Sciences, Publ. 1287, pp 481-487.

Figura 4: Clasificación de suelos congelados (Alaska Department of Transportation and Public Facilities 2003).

#### 2.4.1 Pingo

Los pingos son montículos de tierra que pueden ser en mayor o menor medida asimétricos con una base circular u oval. El núcleo se encuentra formado por hielo cubierto con suelo o vegetación.

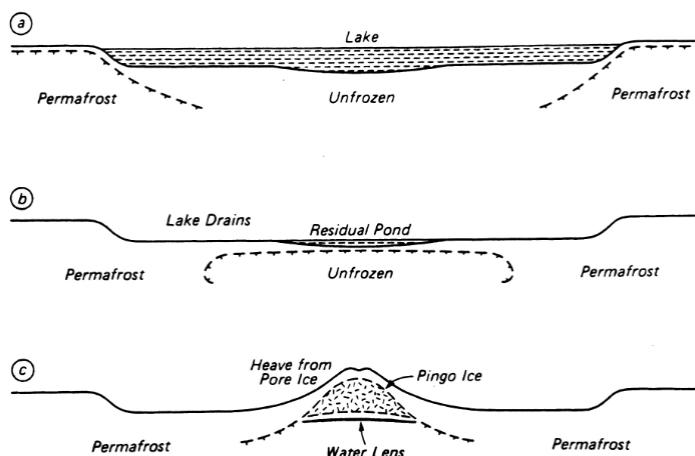
Tienen dimensiones de más de diez metros de altura y de cien metros o más en el plano horizontal. Los pingos pueden generarse mediante dos sistemas, uno hidrostático, o abierto y el otro hidráulico o cerrado.

Los pingos abiertos se producen por acumulación de agua que corre por la masa del terreno y se encuentra con un cuerpo impermeable como un glaciar o un cuerpo de roca no fracturada. El agua se acumula y congela, iniciando un proceso de expansión en superficie.

Los pingos cerrados se producen como consecuencia de presiones hidrostáticas generadas en la tierra por la expansión del agua al congelarse, generalmente asociadas a cambios de balance térmico por caída brusca en el nivel de cuerpos de agua. El tema se expone con más detalle porque será tratado más adelante en el documento durante la descripción de lo ocurrido en la laguna Boeckella.

Normalmente, el suelo que está en contacto con el agua de un lago no está congelado, aunque está apoyado y rodeado por suelos congelados. Cuando el lago pierde bruscamente una cantidad importante de agua, parte de su lecho queda expuesta a la atmósfera y se congela. Esto produce un cuerpo de suelo no congelado rodeado totalmente por suelo congelado (talik). A medida que este talik se congela, se produce una expansión que genera sobrepresiones. Estas levantan el lecho del lago produciendo el pingo.

En la Figura 5 (Andersland y Ladanyi 2004) se presenta el sistema de formación de un pingo.



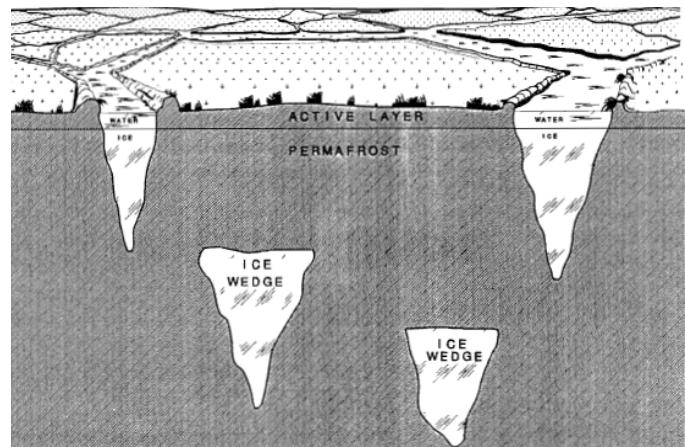
**Figura 5:** Esquema de formación de pingos. (a) Lago en cota normal; (b) Vaciamiento y congelamiento de la base, quedando un talik cerrado; (c) El talik se congela y eleva el núcleo del pingo (Andersland y Ladanyi 2004).

#### 2.4.2 Cuñas de hielo

Son masas de hielo orientadas verticalmente que ocurren en el permafrost. Son más anchas en la superficie que en la parte inferior y pueden llegar hasta 10 m de profundidad.

La formación de estas cuñas se relaciona con la caída de la temperatura durante el invierno. En este periodo, la superficie trata de contraerse pero se encuentra restringida por las capas inferiores más estables, lo que produce una grieta en el suelo. La caída brusca de la temperatura y las bajas temperaturas favorecen el fenómeno. Las tensiones resultan ser mayores en los lugares donde hay más hielo, debido a que el coeficiente de expansión del agua es del orden de cinco veces el del suelo. Al llegar la primavera la nieve se derrite, llena los vacíos, y luego se congela formando una vena vertical de hielo. En invierno el hielo se expande comprimiendo la vena y levanta el suelo adyacente. La cuña se forma generalmente bajo la capa activa y no es visible.

En la Figura 6 se presenta un esquema de cuñas de hielo (McFadden 2001).



**Figura 6:** Cuñas de hielo (McFadden 2001).

#### 2.4.3 Cuña de suelo

Es un cuerpo sólido con forma de cuña, diferente en estructura y textura que el suelo circundante. Se pueden producir por la ruptura repetida del suelo congelado y la infiltración de suelo donde no se generaron cuñas de hielo.

#### 2.4.4 Till

Es un suelo caracterizado por sus depósitos de grava, arena, arcilla, etc. Cubre la superficie de la roca donde antes se situaba un glaciar. Son suelos que se caracterizan por la presencia de canales y canaletas en superficie y muy alta porosidad.

#### 2.4.5 Varved clay

Consiste en capas alternativas de arcilla oscura y de gris e inorgánica. La profundidad de las capas no excede los 12 mm, sin embargo, pueden encontrarse de menor espesor. Los materiales sólidos son transportados por el deshielo de glaciares en los períodos de ablación.

#### 2.4.6 Permafrost

Se define el permafrost como el suelo cuya temperatura permanente no supera los 0°C durante dos años consecutivos, o lo que es lo mismo, un año y el siguiente verano.

La definición de permafrost es exclusivamente termodinámica, no tiene en cuenta ningún otro parámetro, es por esto que la definición no da ninguna noción sobre características químicas o mecánicas del suelo.

El permafrost puede ser dividido en dos grandes zonas: continuo y discontinuo. En la Figura 7 (Andersland y Ladanyi 2004) se presenta un esquema con las dos zonas.

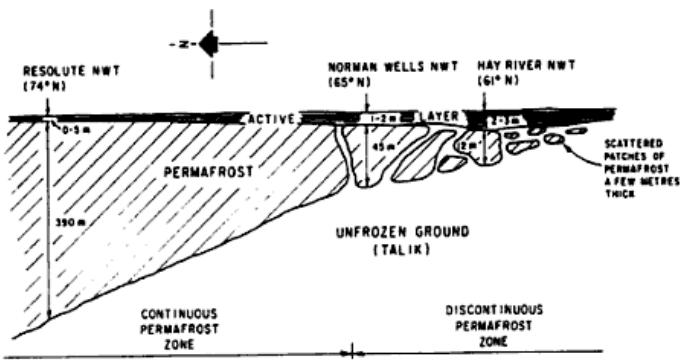


Figura 7: Estratificación de permafrost. Zona de permafrost continuo y discontinuo (Andersland y Ladanyi 2004).

El permafrost se puede clasificar como estable o inestable frente a procesos de deshielo. Esta clasificación depende únicamente del contenido de agua entre las partículas de suelo. Cuando el suelo tiene un contenido de agua tal que se encuentre en su punto de saturación o inferior, el volumen de suelo permanecerá constante durante el deshielo debido a que sus partículas se encuentran en contacto. En esta situación se dice que el suelo es estable. En caso en el que el suelo tenga mayor contenido de agua que el de saturación, al derretirse el hielo el suelo sufrirá contracción. En este caso se dice que el suelo es inestable.

En la Figura 9 y la Figura 10 (Bockheim 2004) se presenta un mapa de la distribución de permafrost en Sudamérica y en el territorio antártico basándose únicamente en la temperatura media anual (datos estadísticos).

#### 2.5 Temperatura en el suelo

La penetración del permafrost se establece mediante la estimación un índice derivado de información meteorológica.

La temperatura del suelo a distintas profundidades está determinada por la temperatura del aire (o temperatura de la superficie), los flujos de calor provenientes del interior de la tierra, y las propiedades térmicas del suelo. La acción del clima produce una variación cíclica de año a año. Esta

variación, aproximadamente sinusoidal, se trasladada al suelo con una amplitud que disminuye con la profundidad hasta que se mantiene aproximadamente constante a lo largo del año para profundidades del orden de los 9 a 15m. A partir de estos niveles se produce un aumento lineal de la temperatura debido al calor proveniente del núcleo de la tierra.

Los factores climáticos responsables por la variación de temperatura en la superficie son la radiación, flujos de calor convectivos, evaporación y condensación.

Como la temperatura de la superficie varía según funciones periódicas, una diaria y otra anual (Figura 8, Andersland y Ladanyi 2004), se la puede estimar con

$$T_{st} = T_m + A_s \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{p}\right) \quad (1)$$

Donde  $T_{st}$  es la temperatura instantánea,  $T_m$  es la temperatura media anual,  $A_s$  es la amplitud térmica de la superficie,  $t$  es el tiempo y  $p$  es el período (un año).

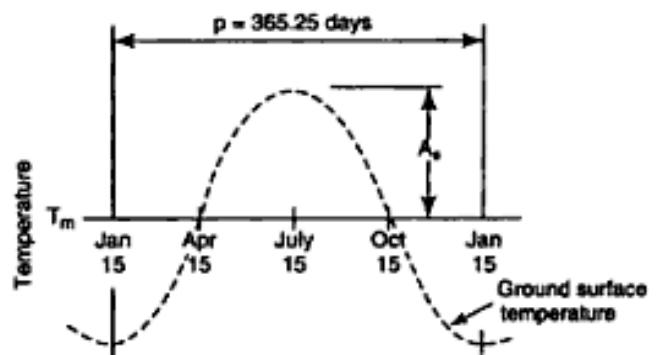


Figura 8: Ciclos térmicos en la superficie (Andersland y Ladanyi 2004).

Esta amplitud se reduce con la profundidad. Para un suelo homogéneo en que no ocurren cambios de estado, la temperatura a una determinada profundidad es

$$T_{st} = T_m + A_s \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_u \cdot p}}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{p} - z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_u \cdot p}}\right) \quad (2)$$

donde  $\alpha_u$  es el coeficiente de difusión del suelo y  $z$  es la profundidad.

En la Figura 11 se presenta la curva teórica de la temperatura del suelo para distintas profundidades. Se grafican las temperaturas máximas, mínimas y las medias para cada nivel. Debido a su forma particular a esta curva se la denomina “trumpet curve”.

Las características de la trumpet curve y el efecto de los parámetros  $A_s$  y  $\alpha_u$  en la profundidad de penetración se estudia con detalle más abajo en el documento.

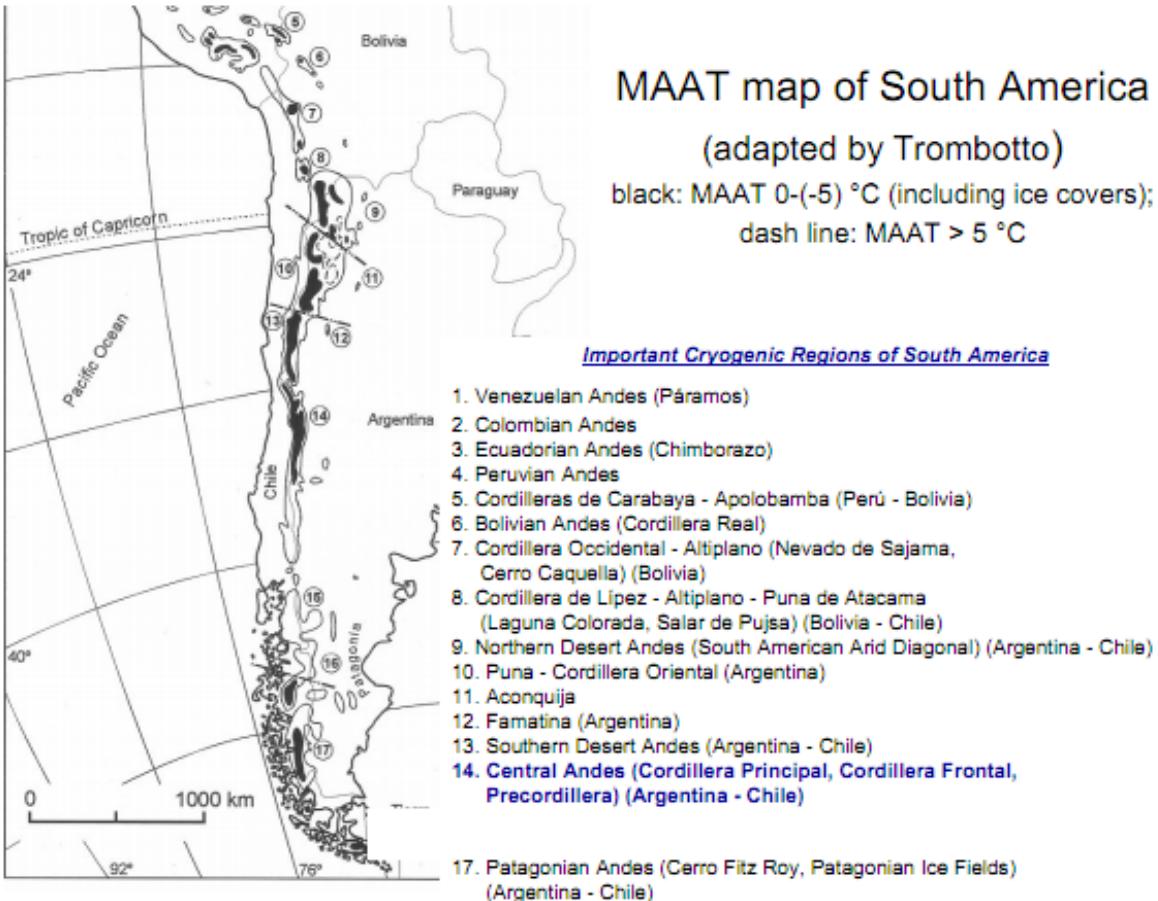


Figura 9: Mapa de permafrost en Sudamérica (Bockheim 2004).

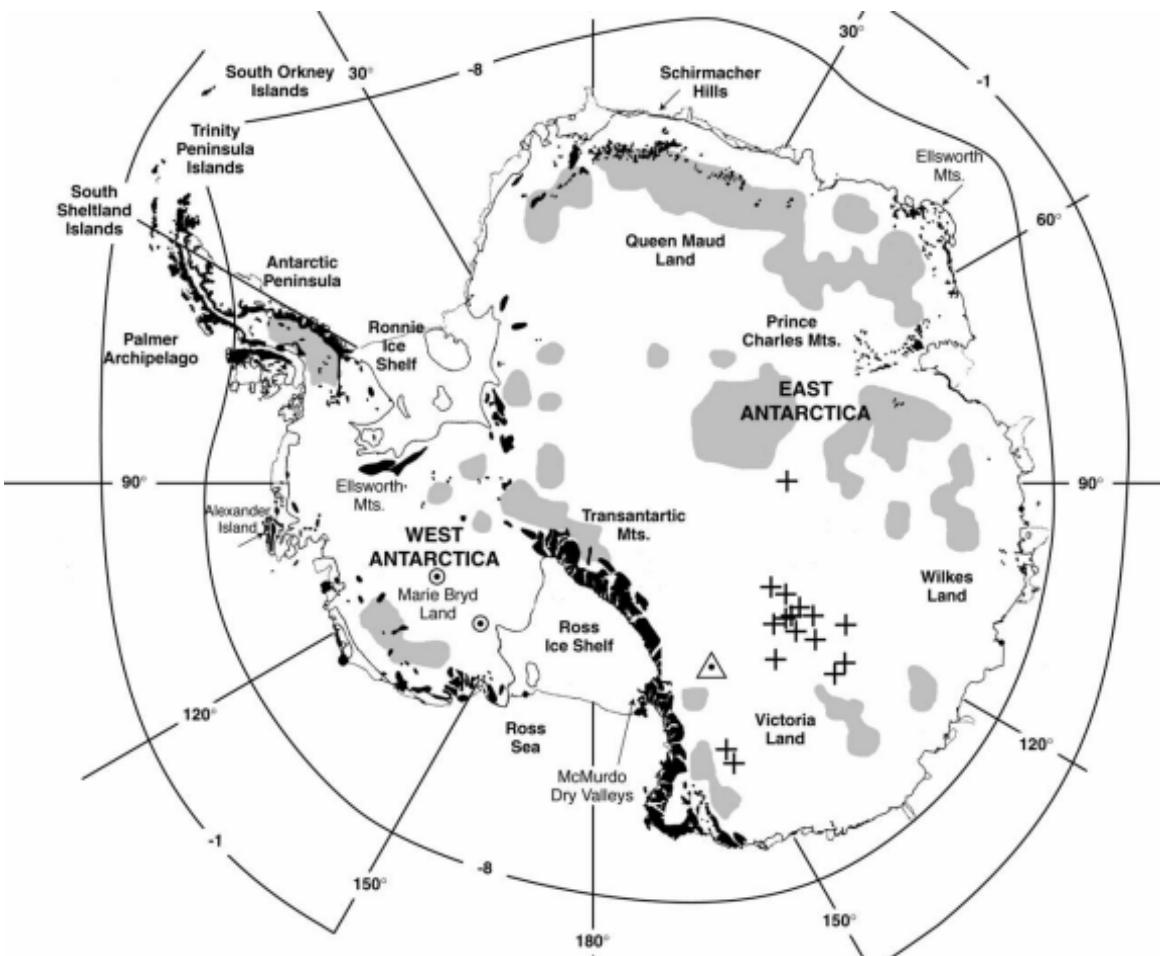


Figura 10: Mapa del permafrost en el continente antártico (Bockheim 2004).

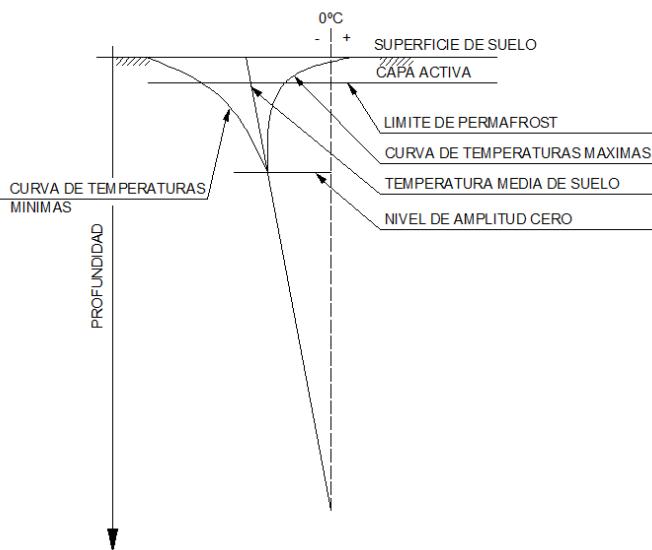


Figura 11: Curva de temperatura teórica en el suelo.

En la Figura 12 se presentan las temperaturas del suelo en función del tiempo (días) para distintas profundidades. En el gráfico se puede observar una disminución en las temperaturas máximas y mínimas, lo que implica una menor amplitud térmica con el aumento de la profundidad. Además, se produce un desfasaje entre los picos de las temperaturas para diferentes profundidades. Este desfasaje se debe a que la penetración de la temperatura es un proceso difusivo. La amplitud del desfasaje depende de la difusión del suelo.

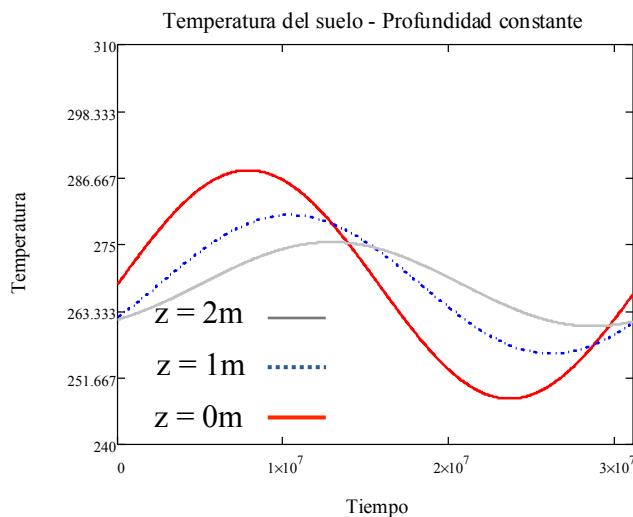


Figura 12: Evolución del ciclo térmico anual para distintas profundidades. La abscisa está en segundos.

En realidad, el calor aportado por la tierra no es despreciable y no debe ser ignorado en los balances térmicos; la diferencia de conductividad del suelo en estado congelado y descongelado es muy importante; los suelos no son medios perfectamente homogéneos; y la temperatura superficial no tiene una ley perfectamente sinusoidal debido a efectos localizados como la acumulación de nieve, vegetación y demás factores.

Como no existe una ecuación que englobe todos estos parámetros, para determinar correctamente la temperatura a una determinada profundidad deben realizarse mediciones en el campo y modelos numéricos.

Para tener en cuenta el flujo de calor proveniente de la tierra se puede adoptar conservadoramente un aumento de la temperatura según un gradiente entre 1° y 3°C cada 100m.

En la

Figura 13 se presentan los resultados de ensayos realizados en los que se mide la temperatura del suelo a distintas profundidades para un caso donde se tiene la superficie cubierta de nieve y sin cubrir (Goodrich 1982). En la Figura 14 (Romanovsky et al 2007) se presenta un esquema con las temperaturas en una montaña. Se puede observar como las condiciones climáticas afectan la distribución de temperaturas en este tipo de topografías.

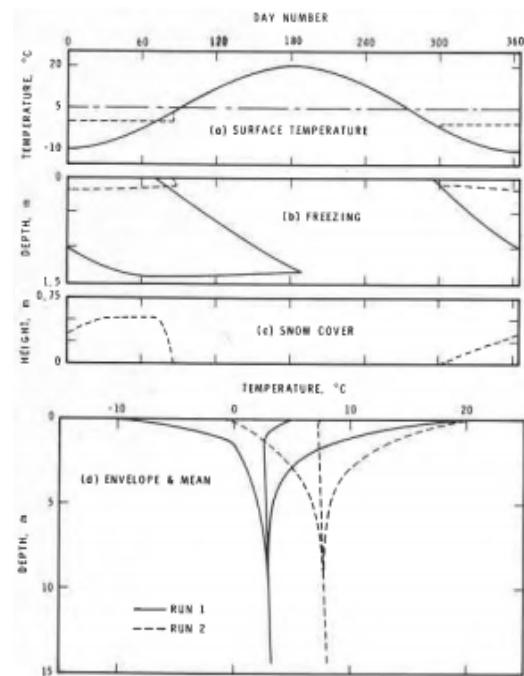


Figura 13: Mediciones de temperatura del suelo para superficie cubierta de nieve y expuesta (Goodrich 1982).

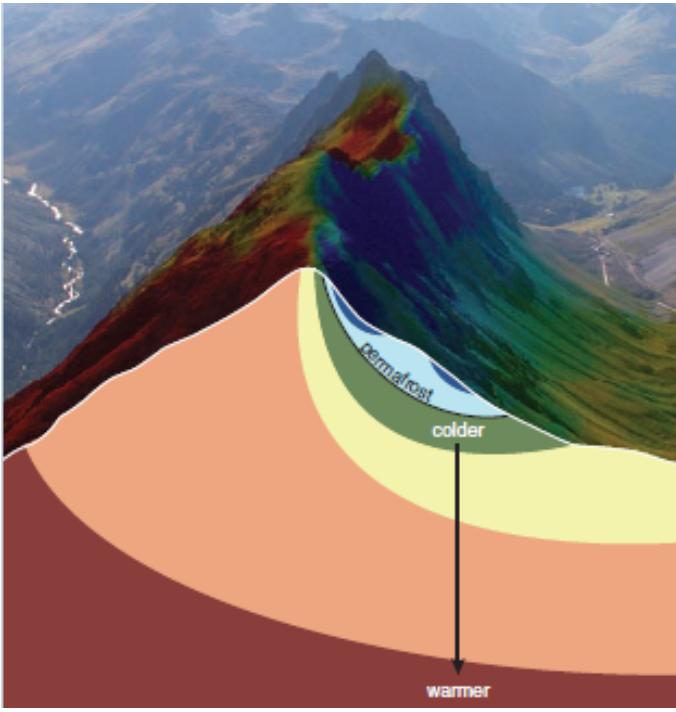
## 2.6 Conductividad

La conductividad del suelo es la propiedad que tiene este de transferir calor a través de su masa. Se mide como la razón entre la cantidad de calor unitario transferido y el gradiente térmico que genera ese desplazamiento.

$$q = -k_u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

donde,  $k_u$  es la conductividad del suelo descongelado y  $dT/dx$  es el gradiente térmico.

La conductividad de un suelo está determinada por su humedad, su grado de saturación y su densidad seca. Un aumento de cualquiera de estos parámetros produce un aumento en la conductividad.



**Figura 14: Distribución de temperaturas en climas cordilleranos (Romanovsky et al 2007).**

Otros factores de menor influencia son la composición química y mineralógica del suelo, el contenido de sales del agua y la temperatura. Los procesos de congelamiento y deshielo, típicos en los suelos superficiales en zonas frías, alteran la estructura macroscópica del suelo y producen fuertes cambios en sus propiedades térmicas.

Distintos autores tales como Van Rooyen and Winterkorn (1957), Johansen (1975), De Vries (1952), Gemant (1952), Kersten (1949) han presentado diversas ecuaciones que permiten estimar la conductividad de un suelo. Uno de los métodos más genéricos y por lo tanto de mayor aplicación es el propuesto por Johansen (1975), que propone la siguiente expresión

$$k_u = (k_{sat} - k_{dry}) \cdot K_e + k_{dry} \quad (4)$$

donde  $k_u$  es la capacidad calorífica,  $k_{sat}$  es la conductividad del suelo en estado saturado,  $k_{dry}$  es la conductividad del suelo en estado seco, y  $K_e$  (número de Kersten) es un factor adimensional que depende de la clasificación y del grado de saturación del suelo.

## 2.7 Capacidad calorífica

Se define la capacidad calorífica de un material como el cociente entre el calor almacenado por unidad de masa y unidad de incremento de temperatura. En el caso de los suelos, la capacidad calorífica es la media ponderada de acuerdo a la masa de cada uno de sus elementos componentes en sus respectivas fases.

$$c_v = \rho_{df} (c_s + c_w \cdot w_u + c_i \cdot w_i) \quad (5)$$

donde  $c_v$  es la capacidad calorífica volumétrica del suelo,  $\rho_{df}$  es la densidad seca del suelo,  $w_u$  es el contenido de agua en estado líquido, y  $w_i$  es el contenido de agua en estado sólido. Los demás términos se definen a continuación.

Para suelos típicos, la capacidad calorífica volumétrica del suelo congelado es

$$c_{vu} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left( 0.17 + 1.00 \cdot \frac{w}{100} \right) \cdot c_{vw} \quad (6)$$

donde  $\rho_d$  es la densidad del suelo seco y  $\rho_w$  es la densidad del suelo húmedo. Para suelo descongelado, la capacidad calorífica queda

$$c_{vf} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left[ \left( 0.17 + \frac{w_u}{100} \right) + 0.50 \left( \frac{w - w_u}{100} \right) \right] \cdot c_{vw} \quad (7)$$

donde

$$c_{vw} = 4.187 \frac{MJ}{m^3 \cdot ^\circ C} \quad (8)$$

Los coeficientes 0.17, 1.00 y 0.50 corresponden al calor específico del suelo mineral, el agua y hielo respectivamente.

En la Figura 15 (Goodrich 1982). se presenta un resumen con las propiedades generales de los distintos tipos de suelos.

Material	$k_f$ Frozen thermal conductivity (W/(m·K))	$C_f$ Frozen volumetric heat capacity (MJ/(m <sup>3</sup> ·K))	$k_t$ Thawed thermal conductivity (W/(m·K))	$C_t$ Thawed volumetric heat capacity (MJ/(m <sup>3</sup> ·K))	$\rho$ Bulk density (t/m <sup>3</sup> )	W Water content (mass basis) (%)	$L_y$ Volumetric latent heat (MJ/m <sup>3</sup> )
Snow	$k = 2.9\rho^2$	2.09 $\rho$	—	—	0.25 or variable	—	—
Fine-grained soil	2.21	1.92	1.13	2.87	1.3	35	152.0
Coarse-grained soil	3.01	1.86	2.19	2.40	1.75	15	87.7
Organic surface layer	1.20	2.30	0.40	3.89	0.17	500	283.9

Figura 15: Propiedades de suelos congelados (Goodrich 1982).

## 2.8 Índices de congelamiento y deshielo

El índice de congelamiento de suelo es un indicador del tiempo en que la temperatura se mantiene por debajo de los 0°C. Depende del índice de congelamiento del aire y de la rugosidad de la superficie del terreno. El índice de ablación es un indicador del tiempo en que la temperatura se mantiene por encima de los 0°C.

Los índices de congelamiento y deshielo del aire se definen como la amplitud del diagrama grados-día acumulados (Figura 16). Se lo determina a partir de temperaturas medidas a 1.50 metros por sobre el nivel de terreno natural.

Se define el índice de ablación (*air thawing index*) a la cantidad de grados-día entre el mínimo producido en primavera y el máximo del siguiente otoño.

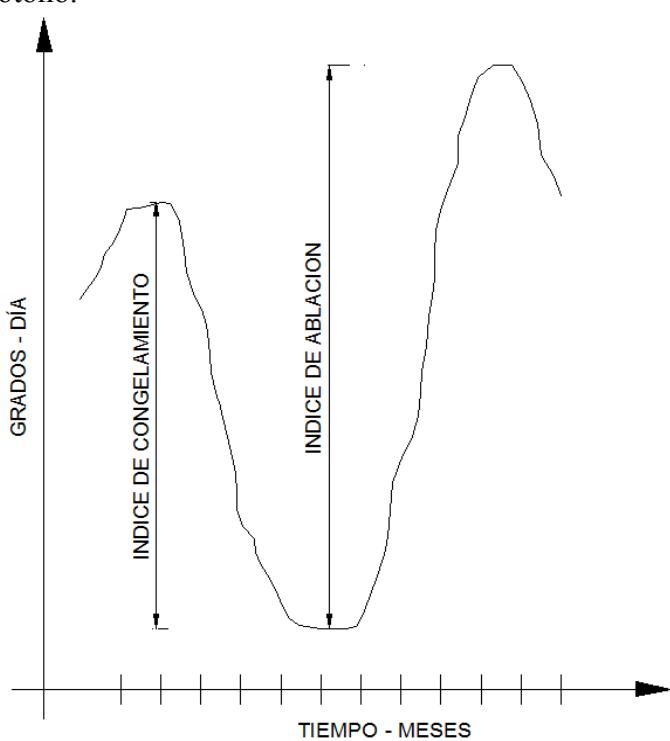


Figura 16: Definición de índice de congelamiento y deshielo.

El índice de congelamiento y deshielo del suelo se utiliza para cuantificar el efecto climático generado

por la combinación entre duración y magnitud de la temperatura durante una determinada estación. Estos parámetros resultan muy útiles para determinar la penetración del permafrost. Cuando faltan registros históricos de temperaturas en el suelo que permitan establecer directamente el índice de congelamiento y deshielo del suelo, se recurre a su determinación indirecta por medio del índice de congelamiento y deshielo del aire. Para poder correlacionar ambos índices se utilizan factores empíricos. Dichos factores se encuentran tabulados en función de las características del entorno en que se encuentra el suelo en estudio.

## 2.9 Determinación de existencia y penetración del permafrost

Para que se desarrolle permafrost se debe cumplir que la relación entre la conductividad térmica del suelo congelado y la del suelo sin congelar sea mayor que la relación entre el índice de ablación del suelo y el índice de congelamiento del suelo.

Existen diversas ecuaciones que permiten determinar con mayor o menor grado de exactitud la penetración del permafrost. A continuación se analizan dos métodos analíticos, el de Steffan (Aldrich and Payner 1966) y la ecuación modificada de Bergreen (Aldrich and Payner 1966).

### 2.9.1 Método de Steffan

Este método plantea como hipótesis que el calor latente del contenido del agua del suelo es el único calor a remover para congelarlo. Desprecia el calor volumétrico acumulado en las partículas de suelo congelado y descongelado. Dada esta simplificación, los valores calculados subestiman la profundidad de penetración del permafrost.

La profundidad de penetración del permafrost es

$$X [ft] = 7 \sqrt{\frac{k [BTU/h \cdot ft \cdot ^\circ F] \cdot I_{sf} [^\circ F \cdot dia]}{L [BTU \cdot ft^3]}} \quad (9)$$

donde  $X$  es profundidad de penetración del permafrost,  $k$  es la conductividad térmica del suelo congelado,  $L$  es el calor latente del suelo,  $I_{sf}$  es el índice de congelamiento del suelo.

### 2.9.2 Método de Bergreen

Este es un método basado en la solución de Steffan, en el que se incorpora un factor de corrección que tiene en cuenta la capacidad calorífica del suelo congelado y descongelado. La expresión es

$$X[\text{ft}] = 7\lambda \sqrt{\frac{k[\text{BTU}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot {}^\circ\text{F}] \cdot I_{sf}[{}^\circ\text{F} \cdot \text{dia}]}{L[\text{BTU} \cdot \text{ft}^3]}} \quad (10)$$

donde  $\lambda$  es un factor de corrección tabulado en base a observaciones empíricas.

## 2.10 Comportamiento mecánico de suelos congelados

Los suelos congelados se caracterizan por tener un comportamiento mecánico ampliamente variable entre muy frágil y plástico en función de la cantidad de hielo que tienen incorporado y de la magnitud de la tensión aplicada.

En la Figura 17 (Arenson 2002) se presenta un gráfico en el que se muestran tres zonas de comportamiento mecánico en función de la velocidad de carga aplicada y el contenido de hielo.

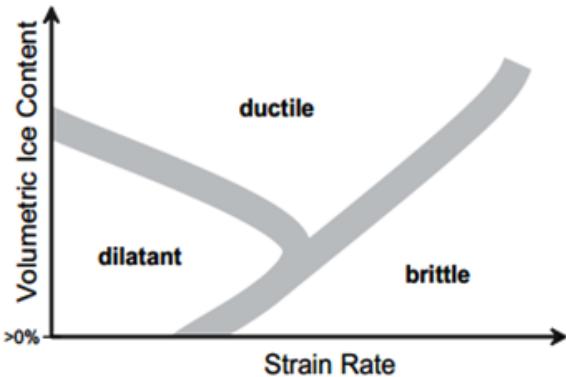


Figura 17: Contenido de hielo – velocidad de carga aplicada (Arenson 2002).

En este tipo de suelos, la fase sólida del agua interactúa con las partículas sólidas para brindar nuevos mecanismos de resistencia que dependerán de las cantidades de cada uno de estos componentes en el conjunto. La fase sólida del agua genera una matriz cristalina que incorpora propiedades cementantes, lo que fusiona las partículas sólidas aumentando la resistencia y rigidez del conjunto.

Los mecanismos principales de resistencia de los suelos congelados son la resistencia del suelo y la resistencia aportada por el hielo.

La resistencia del suelo es igual a la de los suelos descongelados. Dominan los mecanismos de fricción entre partículas, dilatancia, etcétera. El hielo es más rígido que el agregado de partículas aunque tiene menor resistencia.

La resistencia del suelo congelado es mayor que la suma de la resistencia del suelo y la del hielo por separado. Esto se debe a la interferencia cinemática entre las fases sólidas hielo y partículas que retarda

el desarrollo de sus mecanismos de rotura individuales. Las propiedades cementantes de la matriz cristalina aumenta la resistencia a la dilatancia de las partículas sólidas.

En la Figura 18 (Tin 1981) se muestra un mapa con los distintos mecanismos de rotura del suelo. Se puede observar que a partir del 40% en volumen de contenido de partículas sólidas comienzan a manifestarse los mecanismos de rotura de ambos componentes actuando como conjunto.

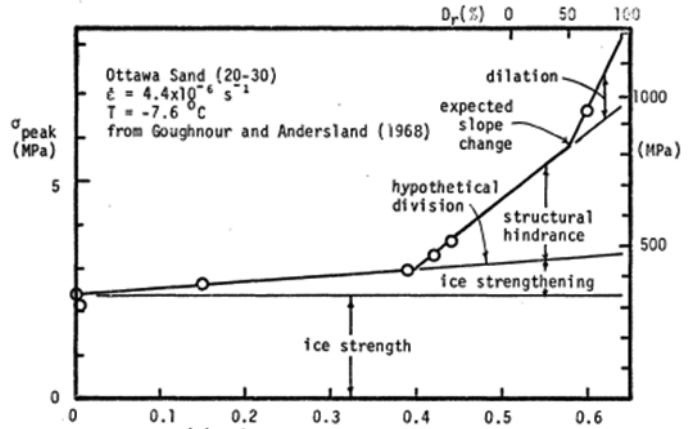


Figura 18: Mapa de mecanismos de rotura (Tin 1981).

En la Figura 19 (Baker 1979) se muestra una curva con la resistencia del suelo en función de la humedad. En los dos extremos de la curva se muestra la resistencia del suelo seco ( $w = 0$ ) y del hielo ( $w_f = 1$ ), los valores intermedios de humedad muestran el aumento de resistencia dado por los mecanismos antes mencionados.

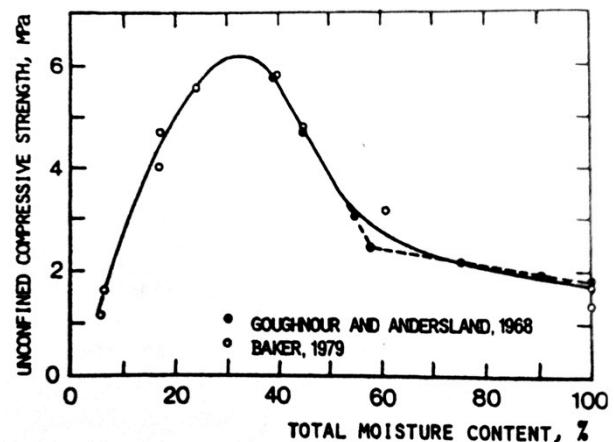


Figura 19: Resistencia en función del contenido de humedad (Baker 1979).

## 2.11 Derretimiento por aplicación de presión

El derretimiento por presión es un fenómeno que se produce debido a la disminución de la temperatura de fusión del agua a distintas presiones. En la Figura 20 (Petrenko y Whitworth 1999) se presenta un esquema de la curva de la presión en función de la temperatura del agua. En el esquema se aprecia que la curva que separa las fases sólido-líquido no es vertical, sino que tiene una pendiente hacia la fase

sólida que representa la disminución de la temperatura de fusión del agua a distintas presiones.

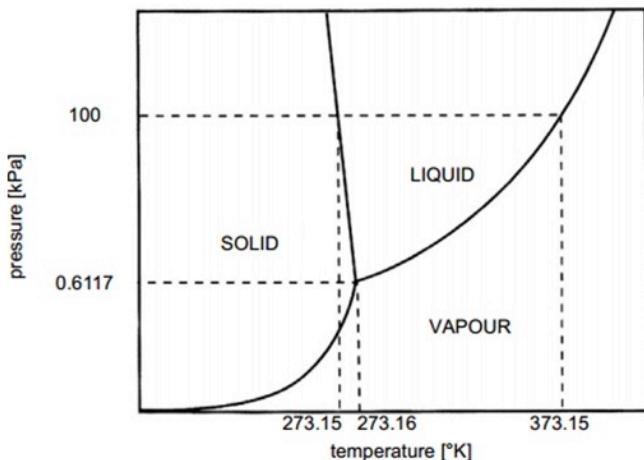


Figura 20: Curva presión-temperatura del agua (Petrenko y Whitworth 1999).

El descongelamiento por aplicación por presión no suele ser un fenómeno determinante al momento de realizar diseños de ingeniería a menos que las presiones aplicadas al suelo sean muy importantes.

## 2.12 Creep en suelos congelados

Al aplicar una carga sobre suelos congelados a temperatura constante se observa una deformación instantánea y un aumento de deformación (a carga constante) en función del tiempo. Este aumento de deformación es producido por el creep de la matriz de agua congelada, y tiende a estabilizarse cuando la resistencia del suelo es grande comparada con la resistencia aportada por el hielo. En la Figura 21 (Andersland, Sayles y Ladanyi 1978) se presentan curvas de presión en función del tiempo a carga y temperatura constantes.

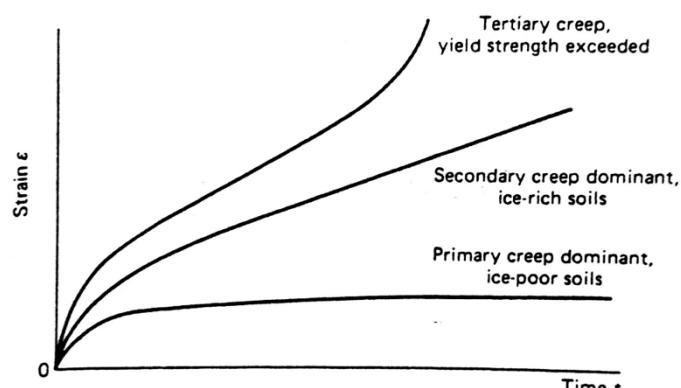


Figura 21: Tensión en función del tiempo (Andersland, Sayles y Ladanyi, 1978).

En la Figura 22 (Andersland, Sayles y Ladanyi 1978) se pueden definir tres zonas, una primera zona (I) con tasa de crecimiento de creep negativa, una segunda zona (II) con tasa de crecimiento de creep constante y finalmente una tercera zona (III) con tasa de crecimiento de creep positiva. Cada una de estas zonas delimita los denominados creep

primario, secundario y terciario que ocurren para diferentes contenidos de hielo, rango de tensiones y tiempo de aplicación de las cargas.

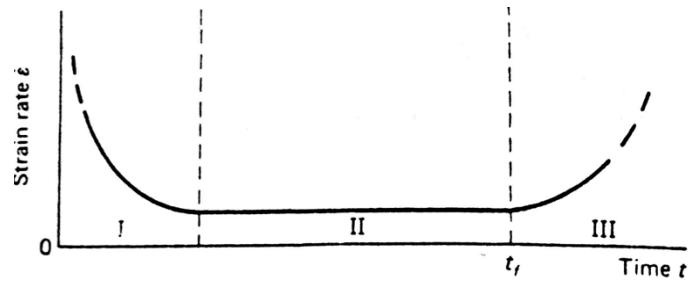


Figura 22: Tasa de crecimiento de creep en función del tiempo (Andersland, Sayles y Ladanyi 1978).

Debido a que la fase hielo introduce un comportamiento viscoplastico al conjunto, para suelos congelados se definen dos resistencias, una a corto y otra a largo plazo. Estas resistencias son conceptualmente distintas a los conceptos clásicos de "drenado" y "no drenado". En la Figura 23 (Ladanyi 1972) se muestran resultados experimentales de medición de resistencia del suelo en función del tiempo de aplicación de carga.

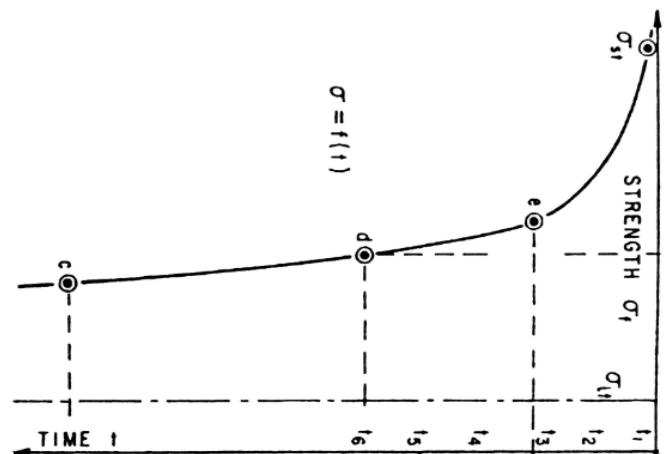


Figura 23: Resistencia del suelo en función del tiempo de aplicación de carga (Ladanyi 1972).

## 2.13 Permafrost en lagunas

El permafrost tiene un rol muy importante en la disponibilidad de agua en lagunas en zonas de suelos congelados. El permafrost cumple tres funciones principales:

- Restringe la carga, descarga y movimiento de agua a través del terreno.
- Actúa como una capa de confinamiento.
- Limita el agua que puede ser almacenada.

Recíprocamente, el agua contenida en los lagos también tiene efectos en el permafrost:

- Aumenta la temperatura en el permafrost.
- Se congela.

Un aumento en la temperatura del permafrost debido a la presencia de agua genera un aumento en la

permeabilidad del suelo circundante. Dicho aumento trae como consecuencia el ingreso de agua que incrementa la temperatura en el permafrost y genera su retroceso.

En la Figura 24 (Burgesas 1985) se presenta el perfil térmico de un lago típico en las cercanías del río Mackenzie, Canadá, donde se aprecia la forma del talik (zona sombreada) creado por el cuerpo caliente (agua en estado líquido del lago).

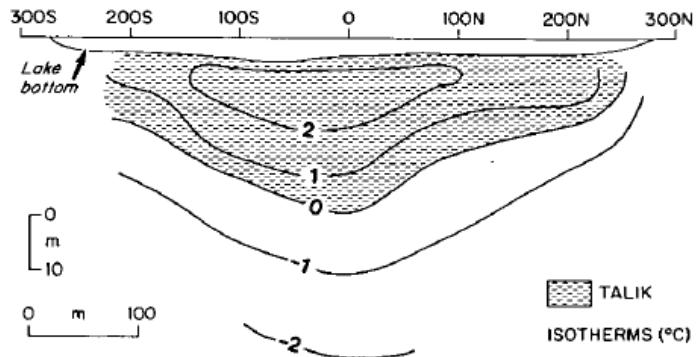


Figura 24: Perfil térmico típico de un lago en climas fríos (Burgesas 1985).

### 3 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CONGELADOS BASADOS EN CONTROL DE TEMPERATURA

#### 3.1 Introducción

En este capítulo se describen las técnicas de estabilización de suelos congelados basadas en el control de su temperatura. Entre ellas, se describe con mayor detalle la técnica de los termosifones empleada por el Ejército para el control de filtraciones de la laguna Boeckella, en la Base Esperanza.

#### 3.2 Clasificación de técnicas de control de suelos congelados

El control de la temperatura consiste en mantener el suelo congelado de manera permanente, protegiéndolo de las ablaciones estacionales.

Existen distintas técnicas de estabilización de suelos congelados que se pueden clasificar en activas o pasivas. Las técnicas activas extraen calor con una máquina térmica, que puede tener funcionamiento natural o forzado. Los métodos pasivos, en cambio, actúan reduciendo la transferencia de calor en la superficie del terreno. En la Figura 25 se presenta un esquema con la clasificación de los sistemas de control de temperatura.

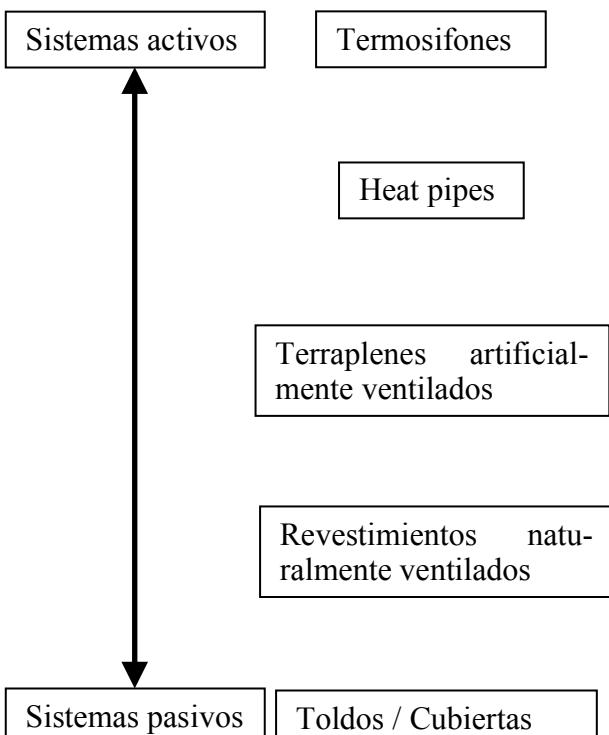


Figura 25: Clasificación de sistemas de estabilización de temperatura en suelos.

#### 3.3 Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos son barreras de aislación térmica que reducen el intercambio de calor entre el suelo y el medio ambiente. En la mayoría de los casos, su uso es complementario a sistemas activos – que se describen más abajo – de manera que hay una máquina térmica que fuerza el intercambio de calor en las épocas frías del año y una barrera que aisla el terreno en las épocas calurosas.

##### 3.3.1 Aislación de poliestireno expandido

Las placas de poliestireno expandido son una barrera pasiva que se coloca en la superficie del terreno.

En invierno, cuando la temperatura del suelo es superior a la del aire, los sistemas activos actúan, extraen calor del terreno mientras las placas están inactivas. En verano, cuando la temperatura exterior es mayor que la del suelo y los sistemas activos naturales se bloquean, las placas ayudan a mantener la baja temperatura del terreno. En la Figura 26 y la Figura 27 (Ferrell 2010) se presenta la colocación de estas barreras.



Figura 26: Colocación de aislación de poliestireno (Ferrel 2010).



Figura 27: Colocación de aislación de poliestireno (Ferrel 2010).

En general, las aislaciones de poliestireno tienen adecuadas propiedades resistentes frente a la absorción de agua y el tránsito de vehículos. Su vida útil se estima en el orden de los 50 años.

### 3.3.2 Toldos / cubiertas

Las cubiertas reducen la radiación solar, minimizan la infiltración de agua, la acumulación de nieve, y aumentan el enfriamiento por convección de aire. Este tipo de estructuras puede construirse con distintos tipos de materiales como telas, maderas y metales. En la Figura 28 y Figura 29 se presentan esquemas de este tipo de soluciones.

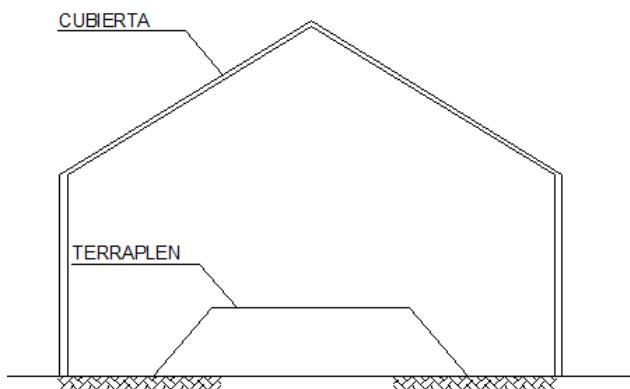


Figura 28: Esquema de solución mediante cubiertas.



Figura 29: Aplicación de solución mediante cubiertas (Ferrel 2010).

Las cubiertas y toldos se utilizan cuando la radiación solar tiene mucha influencia en el intercambio de calor y cuando la infiltración de agua es significativa para la degradación del permafrost. Son sistemas muy susceptibles a daños debido a causas naturales o vandalismo.

### 3.3.3 Terraplenes naturalmente ventilados

La ventilación de terraplenes se materializa mediante la utilización de enrocado abierto, sin finos. En general, se emplean fragmentos de roca de 10 a 30cm de diámetro, que configuran una red de vacíos muy abierta por la que fluye el aire frío.

Las configuraciones de diseño dependen de la dirección del viento, de la influencia de la radiación solar y de la caída de nieve. En la Figura 30 (Ferrell 2010) se presentan distintas configuraciones de terraplenes naturalmente ventilados.

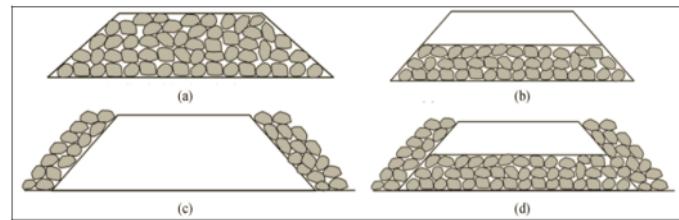


Figura 30: Esquemas de configuraciones de terraplenes ventilados (Ferrel 2010).

Estos terraplenes se utilizan donde las líneas ferroviarias cruzan zonas con permafrost, que compromete la estabilidad a largo plazo del terraplén.

En la Figura 31 (Ferrell 2010) se muestra cómo los terraplenes se construyen con agregados mal graduados para lograr una porosidad que permita la circulación de aire.



Figura 31: Construcción de un terraplén con enrocado abierto mal graduado (Ferrel 2010).

Por su baja conductividad térmica, este tipo de terraplenes produce una barrera aislante que limita el ingreso de calor al núcleo del terraplén.

### 3.3.4 Terraplenes artificialmente ventilados

Los terraplenes ventilados artificialmente son terraplenes construidos tradicionalmente atravesados por alcantarillas. Estos sistemas de ventilación permiten al aire pasar a través del terraplén y arrastrar el calor fuera del suelo.

Durante el verano las alcantarillas pueden tener un efecto desfavorable, aumentando la temperatura del suelo. Para evitar esto, muchas de estas

ventilaciones se equipan con escotillas que permiten cerrar el paso al aire durante el verano. En la Figura 32 y la Figura 33 se presenta la aplicación de este tipo de sistemas en una ruta de Alaska (Ferrell 2010).



**Figura 32:** Aplicación de terraplenes ventilados en Alaska (Ferrel 2010).



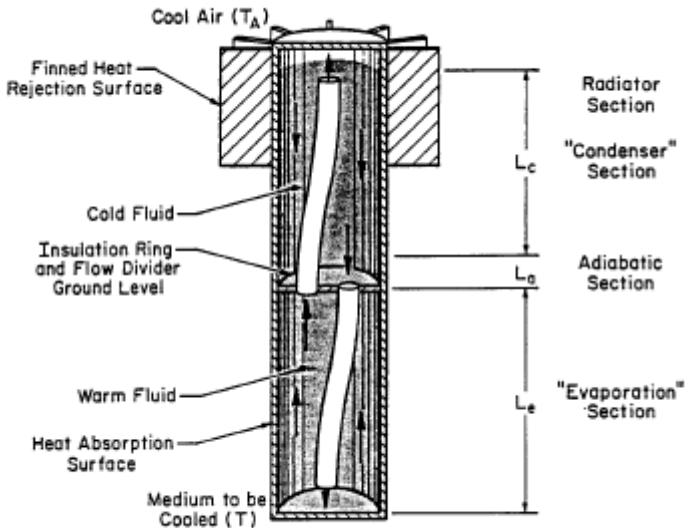
**Figura 33:** Aplicación de terraplenes ventilados en Alaska (Ferrel 2010).

#### 3.4 Sistemas de enfriamiento activos

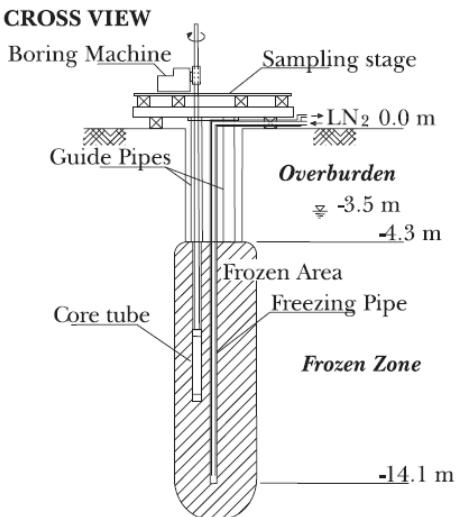
Los sistemas de congelamiento activos se materializan a través de máquinas térmicas. Las más comunes están compuestas por un tubo cilíndrico enterrado capaz de extraer calor del suelo circundante mediante convección de un fluido en su interior.

Los sistemas se clasifican como forzados o naturales. Los sistemas de enfriamiento forzados son aquellos que requieren una fuerza motriz no natural (ej. bomba de calor) para producir el intercambio de calor; se le debe entregar al sistema un trabajo suficiente como para que se efectúe el proceso. Los sistemas de enfriamiento naturales son aquellos en los que el intercambio de calor se produce naturalmente, sin trabajo mecánico exterior. En la Figura 34 (Mc Fadden 2001) y la Figura 35 (Goto 1992) se presenta un sistema de enfriamiento natural y un sistema de

extracción de muestras complementado con un sistema de enfriamiento artificial.



**Figura 34:** Sistema de enfriamiento natural (Mc Fadden 2001).



**Figura 35:** Sistema de extracción de muestras mediante un sistema de enfriamiento forzado (Goto 1992).

#### 3.5 Elementos de los sistemas de enfriamiento activos

Los sistemas de enfriamiento activos realizan intercambios de calor entre dos zonas, una de menor y otra de mayor temperatura. Están formadas por tres componentes principales:

##### 3.5.1 Contenedor

El contenedor es el recipiente encargado de proveerle al fluido el espacio y forma necesaria para que éste pueda circular en su interior produciendo el intercambio de calor. Debe tener la capacidad mecánica para resistir las presiones a las que se encuentra el fluido.

##### 3.5.2 Fluido

El fluido es un compuesto que se coloca dentro del contenedor y es el encargado de realizar la transferencia de calor. El fluido puede ser un líquido o un

gas; en general se opta por un líquido debido a su facilidad a la hora de la fabricación y manipulación. En un comienzo, el fluido utilizado para estos equipos era el amoníaco en estado gaseoso, que resultó ser muy inestable y tóxico. Durante el transcurso de la segunda guerra mundial, se descubrieron nuevos compuestos, tales como el Freón VI, XII y XXII que finalmente fueron reemplazados por el 134 A que, si bien tiene menor poder de absorción de calor, no produce un deterioro de la capa de ozono como sus antecesores.

### 3.5.3 Fuerza motriz

Para que pueda producirse un intercambio de calor entre dos zonas debe existir una fuerza motriz capaz de generar un movimiento en el interior del termosifón. Ésta puede ser motor o el gradiente térmico producido por la diferencia de temperaturas en las zonas en las que se trabaja.

## 3.6 Principio de funcionamiento de sistemas de enfriamiento activos

Existen dos tipos de termosifones clasificados en función de su principio de funcionamiento: los termosifones propiamente dichos y los *heat pipes*.

### 3.6.1 Termosifones

Los termosifones son máquinas que funcionan en el ámbito de un campo gravitacional. Existen dos tipos de termosifones: de una o de dos fases. Los primeros son aquellos en los que el fluido en el interior se mantiene en una única fase, mientras que los de dos fases son aquellos en los que existe un cambio de fase en el interior del contenedor.

En un termosifón de una única fase, inicialmente, el fluido en el interior se encuentra en estado de equilibrio (no hay diferencia de temperaturas entre la parte superior y la inferior). Cuando comienza a actuar un gradiente térmico cercano al de diseño, el fluido comienza a elevar su temperatura en la parte inferior y a disminuirla en la parte superior. Esto produce que el peso específico del compuesto disminuya en la parte inferior y aumente en la parte superior, lo que genera una circulación dentro del contenedor. Al elevarse, el fluido caliente llega a la parte superior, de bajas temperaturas, y comienza a liberar calor al entorno. Con el fluido descendente pasa lo opuesto, desciende hasta la parte inferior de temperaturas mayores, y ahí absorbe calor del entorno hasta que nuevamente comienza a elevarse para generar un nuevo ciclo.

En los termosifones de dos fases ocurre un efecto similar al de los de una única fase. El fluido en la parte inferior comienza a calentarse, pero en este caso hasta su punto de vaporización. En este punto el fluido comienza a evaporarse ascendiendo a través del contenedor. En la parte superior el vapor disminuye su temperatura debido al contacto con la superficie fría y condensa. El fluido condensado desciende

de hasta la parte inferior del termosifón donde comienza un nuevo ciclo. En la Figura 36 se presenta un esquema de funcionamiento de un termosifón.

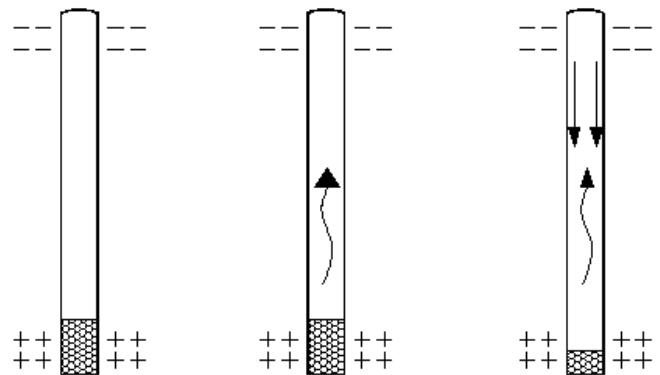


Figura 36: Esquema de funcionamiento de un termosifón.

En la Figura 37 se presenta la fundación de una turbina eólica con termosifones de estabilización (Dilley, Hulse 2006).



Figura 37: Fundaciones de un parque eólico con termosifones (Dilley y Hulse 2006).

### 3.6.2 Heat pipes

Los *heat pipes* son máquinas térmicas que funcionan de forma similar a los temosifones propiamente dichos. La diferencia es que se incorpora una membrana capilar en las paredes internas del contenedor que induce el fluido hacia el evaporador. El principio de funcionamiento es similar al de los termosifones pero, al condensar, es la membrana la encargada de transportar el fluido hacia el condensador. Esto permite que los tubos operen en posición inclinada.

El rendimiento de los tubos de calor es inferior al de los termosifones cuando ambos sistemas se colocan en posición vertical. En la Figura 38 se presenta un esquema con el funcionamiento de un *heat pipe*, donde se puede observar la membrana capilar en las

paredes laterales que se encarga de desplazar el fluido al evaporador.

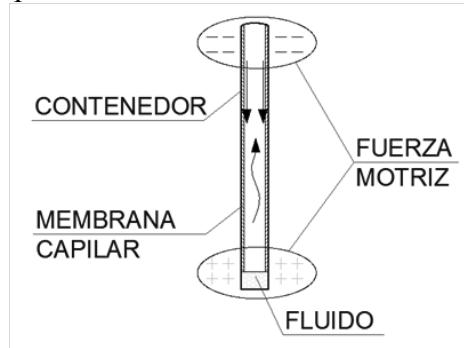


Figura 38: Esquema de funcionamiento de un *heat pipe*.

### 3.7 Cálculo de sistemas de enfriamiento activos

El cálculo de sistemas para el congelamiento de suelos no es una tarea sencilla. El proceso térmico se caracteriza por la transformación del agua intersticial en hielo y la extracción de calor de las partículas de suelo, por lo que hay cambios de la conductividad y la capacidad calorífica producidas por el cambio de fase producido del agua. Para poder abordar una solución analítica es necesario incorporar hipótesis que simplifiquen la resolución matemática del problema.

En este trabajo se estudia el comportamiento de un único tubo de enfriamiento y luego extrae el análisis a un conjunto de tubos. Las hipótesis son:

- La extracción de calor es independiente de la fuerza motriz utilizada.
- No se producen cambios bruscos en las isotermas (proceso cuasi estático).
- El radio de suelo afectado por los sistemas de congelamiento es proporcional al radio de suelo congelado en el instante cero.
- El calor latente de cada fase puede ser expresado como una energía específica.
- Se desprecia el calor proveniente del interior de la tierra.

Bajo estas hipótesis, la ecuación diferencial del flujo de calor producido por un tubo de enfriamiento en dos dimensiones resulta

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

donde  $T$  es la temperatura a un cierto radio  $r$ . Las condiciones de borde del problema son

$$\begin{aligned} r = r_0 &\rightarrow T = T_s \\ r = R &\rightarrow T = 0 \\ r = R_A &\rightarrow T = T_0 \end{aligned} \quad (12)$$

Donde  $T_s$  es la temperatura del termosifón,  $R$  es el radio límite de suelo congelado, y  $T_0$  es la tempera-

tura ambiente. En la Figura 39 se muestra la distribución de temperaturas del suelo y la influencia del sistema de enfriamiento. Se marca la zona en que el tubo de enfriamiento logra congelar por completo el suelo. La zona de influencia del equipo está delimitada por  $R_A$ .

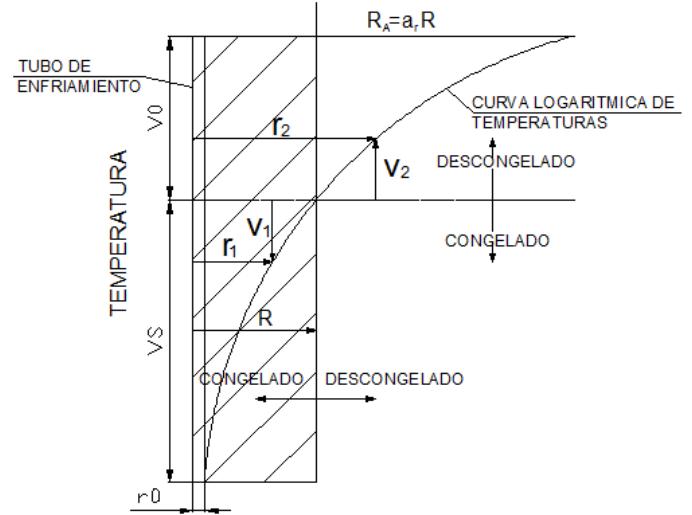


Figura 39: Influencia de los termosifones en la temperatura del suelo.

La solución de la ecuación diferencial es

$$T_1 = \frac{T_s - T_0}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_1}\right) \quad \text{para } r_0 < r_1 < R \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{T_0}{\ln\left(\frac{R_A}{R}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{R}\right) \quad \text{para } R < r_2 < a_r * R \quad (14)$$

donde  $T_1$  es la temperatura a un cierto radio  $r_1$  en la zona congelada,  $T_2$  es la temperatura a un cierto radio  $r_2$  en la zona descongelada,  $R$  es el radio de la interfaz suelo congelado-descongelado,  $r_0$  es el radio del tubo,  $R_A$  es el radio de influencia del termosifón,  $a_r$  es la relación entre el radio de congelamiento y el radio de influencia del termosifón,  $T_s$  es la diferencia entre la temperatura de la superficie del equipo y la de congelamiento del agua,  $T_0$  es la diferencia entre la temperatura ambiente y la de congelamiento del agua. El calor extraído es

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot \left( L + \frac{a_r - 1}{2 \cdot \ln(a_r)} \cdot c_{vu} \cdot T_0 + \frac{c_{vf} \cdot T_s}{2 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \right) \quad (15)$$

para  $R < r_2 < a_r * R$

donde  $L$  es el calor latente volumétrico del suelo,  $c_{vf}$  es la capacidad calorífica del suelo congelado,  $c_{vu}$  es la capacidad calorífica del suelo descongelado.

Para compensar que no se incluye la extracción de calor que ocurre en las zonas no congeladas se incrementa el valor calculado en un 30%.

Otro método utilizado para tener en cuenta la capacidad calorífica de las partículas sólidas es la aplicación de un radio equivalente superior de suelo, este método se presenta más adelante.

### 3.8 Serie de tubos de enfriamiento

El funcionamiento conjunto de varios tubos de enfriamiento se calcula en dos etapas.

- En la etapa I se considera el incremento del diámetro de las columnas congeladas hasta que comienzan a tocarse (Figura 40).
- En la etapa II ocurre desde que comienzan a interactuar las columnas congeladas por los tubos de calor (Figura 41).

En la Figura 42 se presenta la evolución de espesor de una pared congelada formada por termosifones. En la Figura 43 (Lackner, Amon y Lagger 2005) se presenta un muro realizado con tubos de enfriamiento.

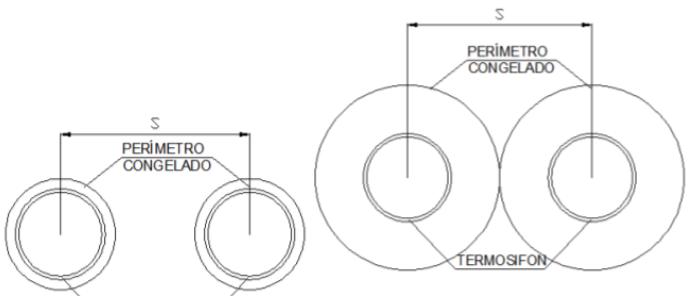


Figura 40: Comienzo y finalización de la etapa I.

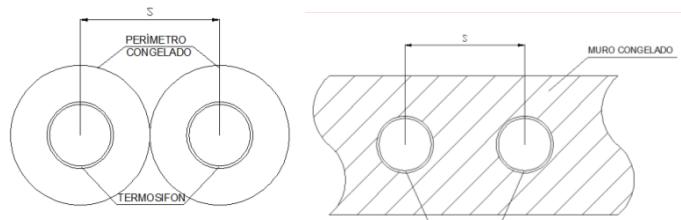


Figura 41: Comienzo y finalización de etapa II.

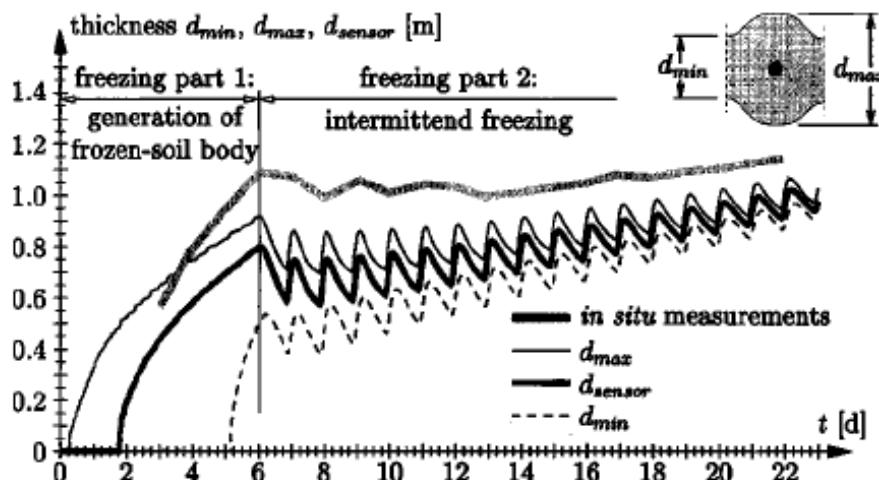


Figura 42: Espesor de un muro en función del tiempo.

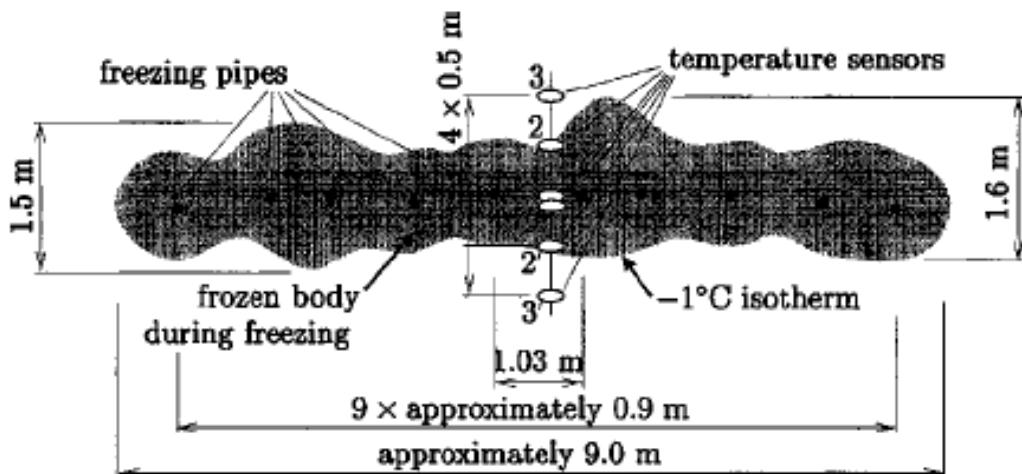


Figura 43: Muro congelado realizado con tubos de enfriamiento.

En general, con una única fila de tubos de enfriamiento, se obtienen muros entre 2 y 3 metros de espesor. Para mayores espesores se debe incluir una

segunda o tercera fila de tubos. Para el diseño de estos casos se incorpora una tercera etapa en la que se considera la interacción entre distintas filas de tubos.

## 4 CONTROL DE FILTRACIONES POR MEDIO DE GEOMEMBRANAS

### 4.1 Introducción

Las geomembranas son mantas impermeables formadas por materiales sintéticos utilizadas en suelo, roca, o cualquier otro tipo de material geotécnico con el objeto de evitar el paso de un flujo de agua. Las membranas se componen con polímeros de mediana densidad con espesores de 0.25 a 3.5mm. En algunos casos las geomembranas requieren refuerzos que se generan con mallas de materiales resistentes que le brindan una mayor flexibilidad.

Las geomembranas son muy utilizadas para la contención de fluidos contaminados. En muchos casos, con el objeto de prevenir la dispersión de materiales las geomembranas se utilizan en conjunto con geotextiles o cualquier otro tipo de filtro de materiales. La utilización conjunta de las geomembranas y geotextiles también es, como se verá más adelante, un método para evitar las pinchaduras en la geomembrana.

### 4.2 Aplicaciones de geomembranas

Dada a su versatilidad y capacidad para resistir agresiones químicas, las geomembranas se utilizan en mayor medida para la contención de desechos contaminantes y la prevención de derrame de contaminantes al ambiente. En minería se utilizan para cubrir grandes superficies evitando que los efluentes contaminados por la lixiviación percolen a través del medio generando su contaminación. También tienen aplicaciones en el ámbito de la construcción como impermeabilizante de sótanos, generación de lagunas artificiales, impermeabilización de túneles, etcétera.



Figura 44: Aplicación de geomembranas para la construcción de lagunas artificiales



Figura 45: Aplicaciones en impermeabilización de canales.

### 4.3 Tipos de geomembranas

Las membranas se dividen en tres grandes grupos en función de su comportamiento mecánico: flexibles, de alta densidad y reforzadas.

#### 4.3.1 Flexibles

Las membranas flexibles presentan una curva tensión-deformación suave, sin límite elástico definido, hasta el punto de rotura (Figura 46, Giroud y Soderman 1995).

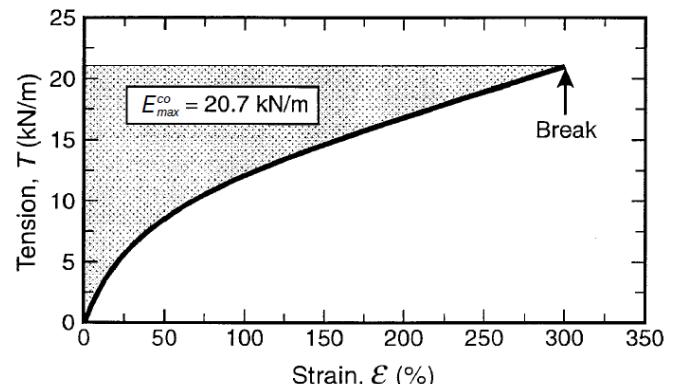
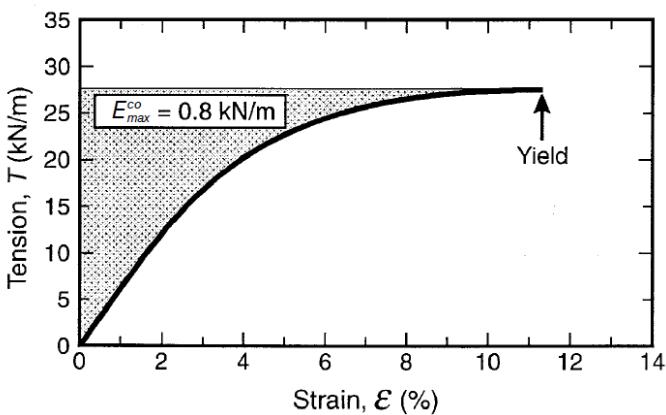


Figura 46: Gráfico de tensión-deformación – Membranas flexibles (Giroud y Soderman 1995).

#### 4.3.2 Alta densidad

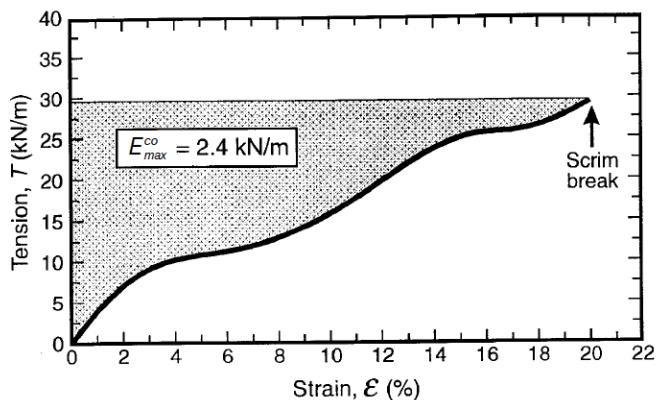
Las membranas de alta densidad presentan mayor rigidez que las membranas flexibles, y una tensión de fluencia bien definida. La rotura del material ocurre para deformaciones en el orden del 700% con tensiones muy inferiores a la de fluencia inicial (Figura 47, Giroud y Soderman 1995).



**Figura 47:** Gráfico de tensión-deformación – Membranas de alta densidad (Giroud y Soderman 1995).

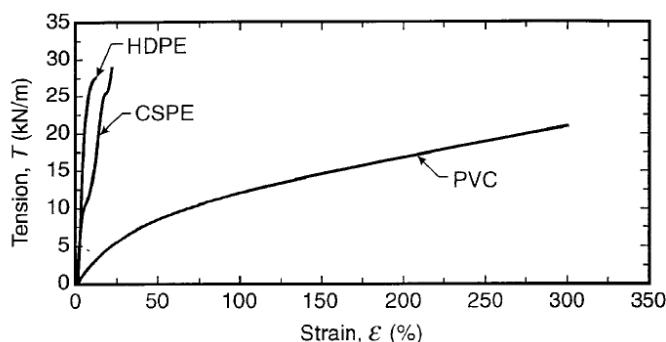
#### 4.3.3 Reforzadas

Las membranas reforzadas no tienen un límite elástico definido y presentan rotura frágil. Tienen un comportamiento mecánico que depende del entretejido adoptado (Figura 48, Giroud y Soderman 1995).



**Figura 48:** Gráfico de tensión-deformación – Membranas reforzadas (Giroud y Soderman 1995).

La susceptibilidad de los distintos tipos de membranas frente al punzonado aumenta con el aumento de la rigidez debido a un aumento en la concentración de tensiones. Por esta razón, las geomembranas de alta densidad requieren mayor protección que las restantes y se dimensionan con coeficientes de seguridad mayores. En la Figura 49 (Giroud y Soderman 1995) se presenta un gráfico comparativo de los tres tipos de membranas.



**Figura 49:** Gráfico de tensión-deformación de los tres tipos de membranas (Giroud y Soderman 1995). HDPE: alta densidad; CSPE: reforzadas; PVC: flexibles.

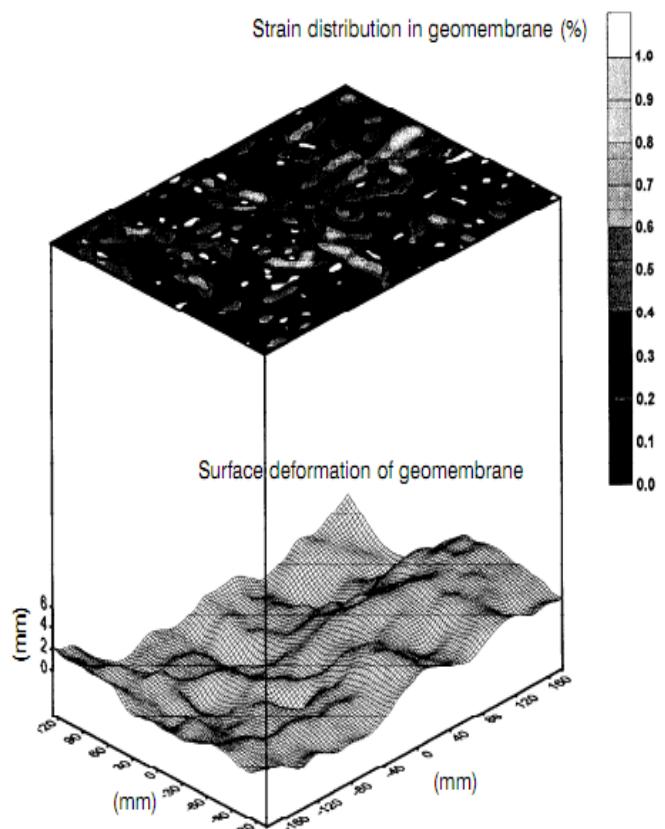
Pese a tener menor tenacidad, las geomembranas de alta densidad tienen gran aplicación en los rellenos sanitarios dada la alta resistencia a los agentes químicos. El diseño de una correcta protección es indispensable en este tipo de sitios dada la gran variedad de elementos que pueden producir el punzonado de la membrana y la alta peligrosidad del fluido contenido.

#### 4.4 Rotura en las membranas - Punzonado

Las fallas en las membranas se producen debido a objetos salientes que producen penetraciones, perforaciones, aperturas o cortes. En todos los casos anteriormente enumerados la falla identificada es la de punzonado. Los objetos que punzonan pueden ser piedras, palos, vidrio, pisadas y rodado de vehículos.

La ruptura de la geomembrana se produce debido a una concentración de tensiones en el punto en que se encuentre la protuberancia, por lo que la propiedad controlante es la energía complementaria de deformación ( $E^{CO}$ , Figura 46 a Figura 48).

En la Figura 50 (Geosynthetic Institute 2002) se muestra la distribución de tensiones en una geomembrana y la deformada determinada a través de ensayos de laboratorio.



**Figura 50:** Distribución de tensiones y deformada de las geomembranas (Geosynthetic Institute 2002).

En la Figura 51 y la Figura 52 (Narejo 1995) se presenta una imagen con el comportamiento de una membrana con una escasa protección.



Figura 51: Comportamiento de una geomembrana con escasa protección (Narejo 1995).



Figura 52: Comportamiento de una geomembrana con escasa protección (Narejo 1995).

#### 4.5 Instalación

Las geomembranas deben ser cuidadosamente instaladas, cuidando cada uno de los detalles realizados en obra. Los errores en la instalación de las geomembranas pueden producir que un sistema bien diseñado teóricamente resulte ineficaz.

Las geomembranas deben ser colocadas en bases libres de partículas granulares, raíces, maderas, y debe ser una superficie lo más nivelada posible. Una correcta instalación de la geomembrana contempla una base con las siguientes condiciones:

- Se debe contar con personal calificado para inspeccionar la colocación y construcción del sistema de impermeabilización.
- Debe realizarse el compactado y alisado de la superficie de forma tal de evitar que la geomembrana quede expuesta al punzonado por partículas salientes.
- En caso de no lograr una superficie libre de piedras expuestas se debe colocar una capa de material fino que evite que las partículas entren en contacto directo con la geomembrana. No deben permanecer partículas de tamaño superior a 1cm en contacto directo con la geomembrana.
- Se debe minimizar el tránsito de personas y vehículos por sobre la geomembrana. En todo

momento debe mantenerse una capa superior de suelo de forma de evitar el contacto directo de vehículos sobre la geomembrana.

- La unión entre paños debe realizarse en un momento del día en el que la temperatura de la geomembrana sea similar a la temperatura media diaria.
- Deben evitarse los bordes filosos en las excavaciones. Las trincheras deben ser excavadas poco antes de la instalación de la geomembrana para evitar el deterioro por lluvias, etcétera.
- El layout de las geomembranas debe ser diseñado de forma tal de minimizar las juntas.
- Debe evitarse la generación de juntas adicionales y arrugas que puedan generar la concentración de tensiones produciendo una ruptura prematura del sistema.
- Deben minimizarse las juntas en esquinas o zonas en pendiente. Las juntas deben realizarse a no menos de 1.50m de rampas para evitar las concentraciones de tensiones en estas zonas.

Existen dos formas de soldadura de geomembranas: aquellas en las que se sueldan los dos paños sin incorporación de material y aquellas donde se le incorpora material. En la Figura 53 y la Figura 54 (Reddy y Butul 1999) se presentan los dos tipos de soldadura mencionados.



Figura 53: Soldadura por fusión sin incorporación de material (Reddy y Butul 1999).

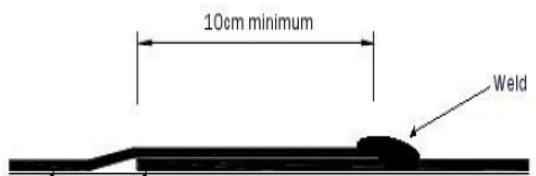


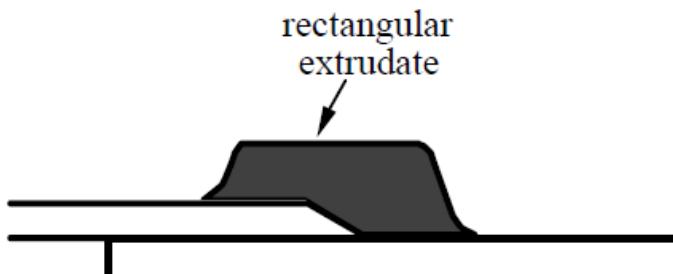
Figura 54: Soldadura por fusión con incorporación de material (Reddy y Butul 1999).

Antes de la materialización de la soldadura de dos paneles debe controlarse que los solapes estén adecuadamente realizados y las superficies estén limpias y secas. Se recomiendan solapes de 10cm para soldaduras sin incorporación de material y 7.5cm para aquellas en las que se incorpora material. En la Figura 55 se presenta un ejemplo de ejecución correcta de una soldadura entre dos paños de geomembrana.

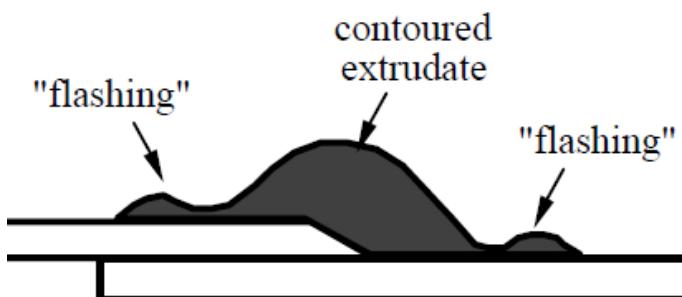


**Figura 55: Soldadura de dos paños de geomembrana.**

En la Figura 56 (Geosynthetic Institute 2002) se presenta una correcta soldadura con incorporación de material para temperaturas inferiores a los 0°C. En la Figura 57 (Geosynthetic Institute 2002) se presenta una soldadura típica para temperaturas superiores a los 0°C.



**Figura 56: Soldadura para temperaturas inferiores a los 0°C (Geosynthetic Institute 2002).**



**Figura 57: Soldadura en zonas con temperaturas superiores a los 0°C (Geosynthetic Institute 2002).**

Las soldaduras deben ser ensayadas de forma tal de verificar la capacidad del equipo y el operador. Estos ensayos deben ser realizados en lo posible al comienzo de cada una de las jornadas de trabajo. Esto es debido a que el equipo al ser apagado puede cambiar su rendimiento. Los ensayos deben ser realizados bajo las mismas condiciones que tendrá la geomembrana en la obra.

En caso que un espécimen de los ensayados falle, se debe reparar todas las soldaduras realizadas y el equipo debe ser ensayado nuevamente junto con el operador. Se debe evitar la generación de arrugas en zonas de soldadura. En caso que se produzcan debe cortarse la geomembrana y soldarse nuevamente de forma tal de obtener una superficie plana. Si no puede realizarse debe colocarse un parche con el mismo material en la zona donde se produjo la arruga. Los parches deben abarcar como mínimo 15cm en todas las direcciones del sector dañado o en reparación.

Una vez instalada la geomembrana se la ancla para evitar su levantamiento a causa del viento. Para ello se colocan bolsas de arena o cubiertas de vehículos que no dañen el sistema ya instalado. Si resulta inevitable el paso de vehículos antes de la instalación de la capa protectora de suelo se recomienda generar zonas de paso en las que se coloque una doble capa de geomembrana.

#### 4.6 *Ensayos de aptitud*

Existen distintos ensayos de aptitud de geomembranas dentro de los que se pueden distinguir dos grandes grupos: gran escala y aquellos de pequeña escala.

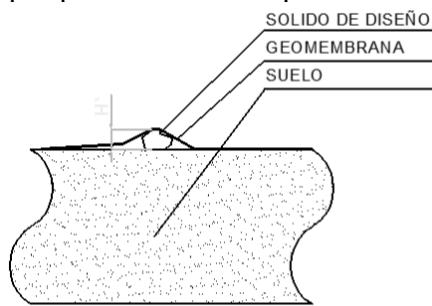
Los ensayos realizados a gran escala se utilizan únicamente para la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y métodos empíricos de cálculo. Dentro de los ensayos de pequeña escala se pueden distinguir tres tipos.

- Ensayos de índice de punzonado (ASTM D4833 - 07). Se realizan para el control de calidad de las geomembranas y para aceptación. Es un ensayo realizado generalmente por los proveedores para determinar la calidad de su producto. Este ensayo no reproduce las condiciones a las que estará expuesta la geomembrana en el sitio.
- Ensayos de quasi-desempeño de punzonado (ASTM D 5514). Estos ensayos se realizan replicando únicamente ciertas condiciones a las que estará expuesta la geomembrana en campo. La principal diferencia es la utilización de protuberancias artificiales en lugar de las del suelo real. Estos ensayos se realizan principalmente para la investigación de materiales y para la comparación del funcionamiento de las membranas frente a los distintos materiales utilizados.
- Ensayos de desempeño (ASTM D 5514-06). Estos ensayos replican todas las condiciones a las que estará expuesta una geomembrana a lo largo de su vida útil. Se le aplica la misma presión sobre un suelo con las mismas características y se le coloca la misma protección que tendrá en sitio.

#### 4.7 Altura efectiva de diseño de geomembranas

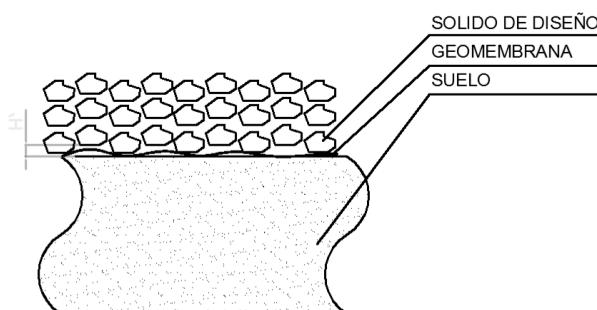
Se define la altura efectiva de diseño como la máxima dimensión del sólido más grande, agregado o cualquier otro objeto al que estará expuesta la geomembrana a lo largo de su vida útil. La altura efectiva depende principalmente de la disposición de los materiales. Esta puede tener los sólidos agrupados o bien separados.

En las protuberancias segregadas o separadas cada uno de los sólidos en contacto con la geomembrana actúa de forma independiente con un mecanismo de falla por punzonado. Para el dimensionamiento de las geomembranas se toma como altura efectiva la máxima dimensión del sólido considerando que el sólido queda totalmente expuesto contra la geomembrana. En la Figura 58 se muestra el esquema de falla de una geomembrana solicitada por protuberancias separadas.



**Figura 58:** Punzonado mediante protuberancias independientes

Cuando hay varias protuberancias cercanas, el dimensionamiento se hace teniendo en cuenta el efecto del grupo. En estos casos solo una parte de los sólidos se encuentra en contacto con la geomembrana debido a que los elementos adyacentes esconden el resto de la partícula amortiguando el efecto de punzonado. En este caso la altura efectiva se toma como la mitad de la máxima dimensión del sólido dimensionante. En la Figura 59 se presenta el esquema de punzonado mediante partículas agrupadas.

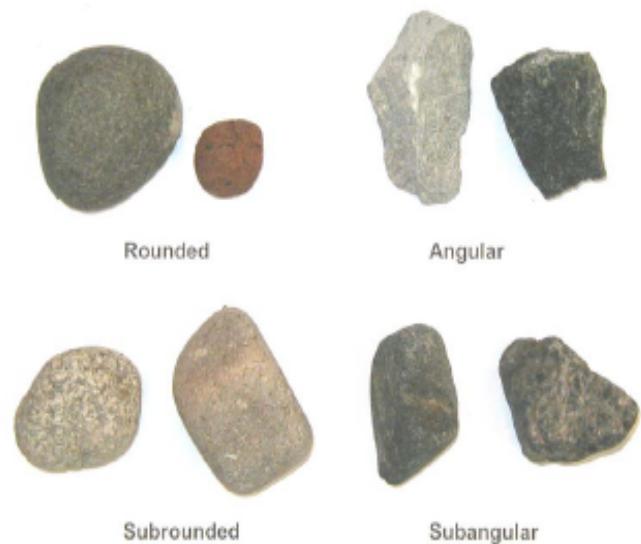


**Figura 59:** Punzonado mediante protuberancias agrupadas

#### 4.8 Influencia de la forma de las partículas

Para el correcto diseño de una geomembrana se debe conocer el tamaño, forma y distribución

granulométrica de las partículas. Resulta intuitivo que un suelo con partículas angulosas tiene mayor probabilidad de generar daños en la geomembrana que un suelo compuesto por partículas redondeadas. Para el dimensionamiento de las geomembranas es suficiente una clasificación cualitativa de la forma de las partículas. En la Figura 60 (ASTM D488) se presenta la clasificación de las partículas en función de su grado de angulosidad.

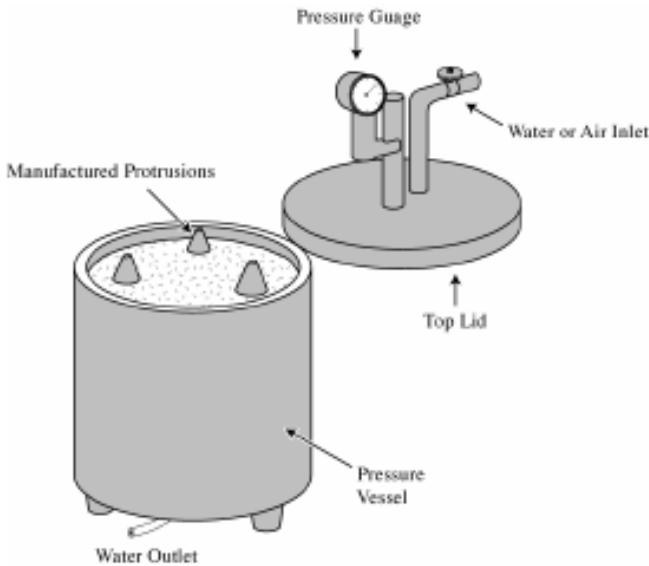


**Figura 60:** Clasificación de partículas.

#### 4.9 Selección de geomembrana

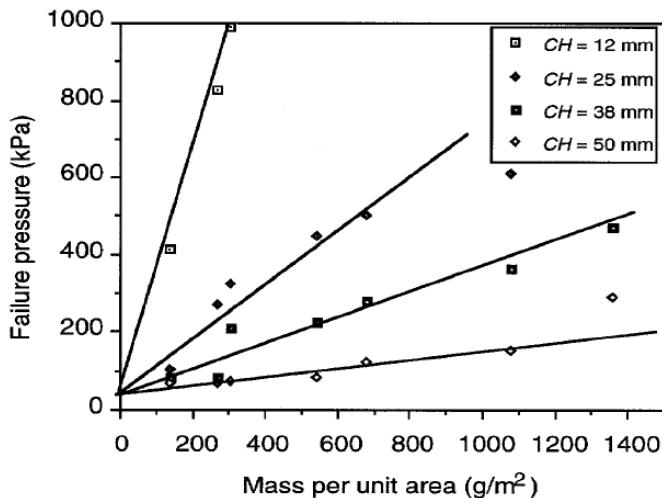
A continuación se presenta la formulación determinada empíricamente para la determinación de la presión de falla de una membrana basada en la aplicación de una presión hidrostática a corto plazo. Para llevar esa presión a las condiciones de trabajo se le aplican una serie de factores que consideran la forma de las partículas, la agrupación, etcétera.

Se realizaron ensayos de cono truncado para simular las peores condiciones de trabajo. En la Figura 61 (Narejo 1996) se presenta la máquina utilizada para el ensayo.



**Figura 61: Maquina de ensayo de membranas-ASTM D 5514 (Narejo 1996).**

En la Figura 62 (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996) se grafican las presiones de falla obtenidas para distintas membranas, alturas del cono truncado y con diferentes masas por unidad de área.



**Figura 62: Presión de rotura en función de la masa por unidad de área y altura de cono truncado (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996).**

De los resultados se observa que la presión de rotura varía linealmente en función de la masa por unidad de área manteniendo fija la altura de cono truncado. También resulta evidente que la presión de falla varía con las distintas alturas de cono planteadas.

La presión admisible resulta:

$$P_{adm} = d \cdot M \quad (16)$$

donde  $M$  es la masa por unidad de área de la geomembrana en gramo por metro cuadrado,  $P_{ALLOW}$  es la presión admisible  $d$  es la constante de proporcionalidad. De la Figura 62 resulta que

$$d = \frac{450}{H^2} \quad (17)$$

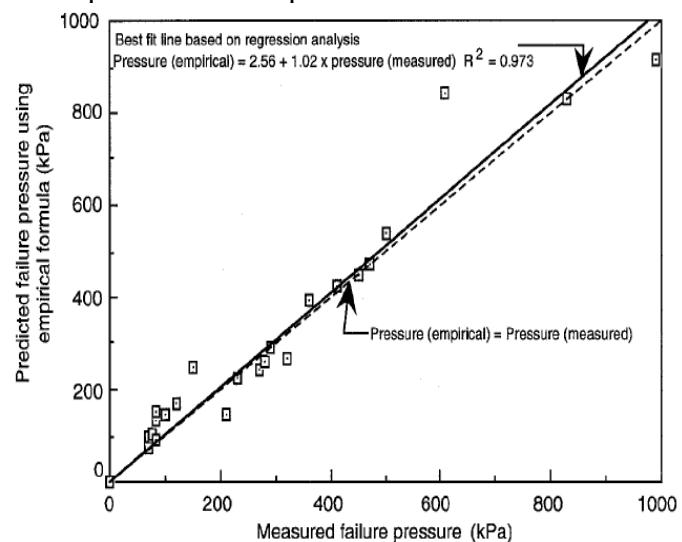
donde  $H$  es la altura del cono truncado en mm. Combinando las ecuaciones (16) y (17) se obtiene que

$$P_{1.5mm} = 450 \cdot \frac{M}{H^2} \quad (18)$$

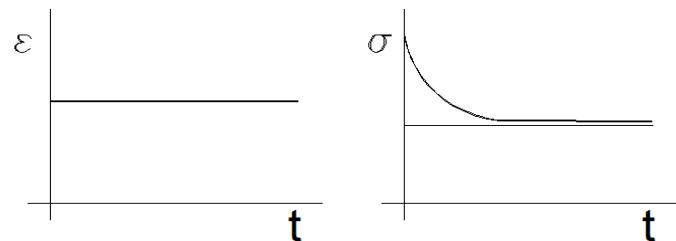
donde  $H$  es la altura del cono en mm y  $M$  es la masa por unidad de área de la geomembrana.

En la Figura 63 (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996) se grafica la presión de falla de distintas membranas junto con la predicha a través de la ecuación (17).

Las geomembranas y los geotextiles son materiales visco elásticos. En este tipo de materiales el tiempo de falla es función del porcentaje de carga aplicado respecto a la de rotura. En la Figura 64 se presenta el comportamiento de los materiales ante una deformación constante. Sin embargo, el ensayo de penetración de cono actúa únicamente por un breve período de tiempo.

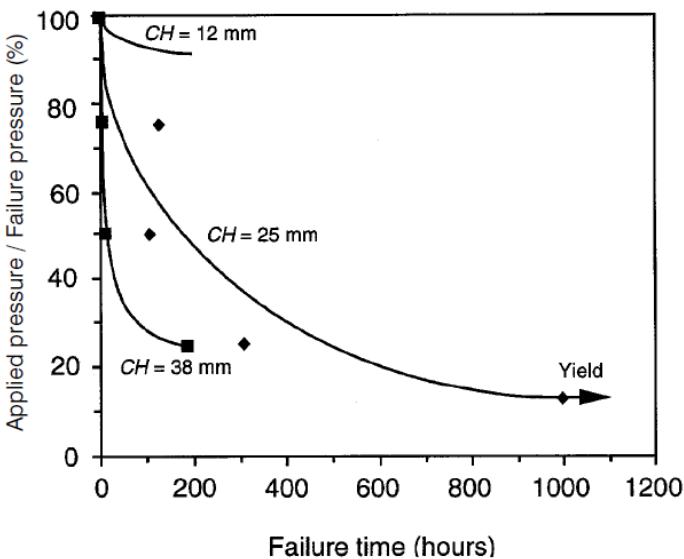


**Figura 63: Presión de falla predicha y obtenida a través de ensayos (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996).**



**Figura 64: Comportamiento mecánico de materiales visco elásticos.**

En la Figura 65 (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996) se presenta un gráfico con la influencia de la resistencia de la geomembrana en función del tiempo de aplicación de la carga.

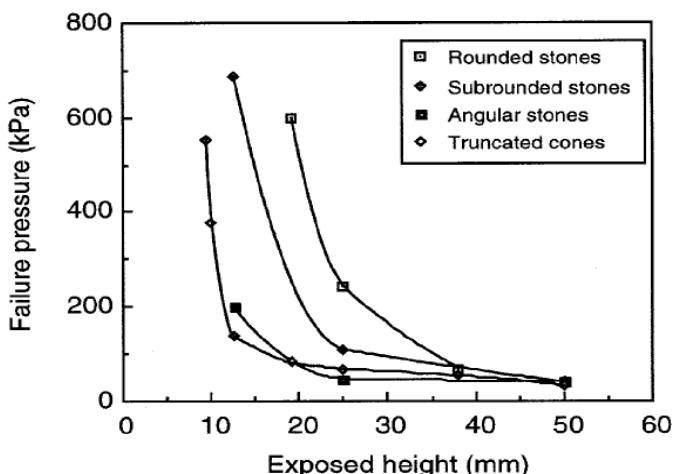


**Figura 65: Influencia del tiempo de aplicación de la carga (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996).**

Se observa que para cargas inferiores al 10% de la que produce la rotura de la geomembrana el tiempo de falla resulta asintótico. Por esta razón la presión de diseño se aplica un factor de minoración  $F_{CR}$  por lo que queda

$$P_{1.5mm} = 450 \cdot \frac{M}{H^2} \cdot \frac{1}{F_{CR}} \quad (19)$$

En la Figura 66 (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996) se presentan el efecto de la altura de las protuberancias de suelos reales en la resistencia al punzonamiento de geomembranas de alta densidad, para distintos tipos de suelo. Se observa que la presión de falla disminuye con partículas angulosas de suelo.



**Figura 66: Resistencia al punzonamiento de geomembranas para distintas formas de partículas de suelo (Narejo, Koerner y Wilson-Fahmy 1996).**

Para determinar la influencia del arreglo de las partículas sólidas se realizaron ensayos donde se reemplazaron los conos truncados por agregados. De esta manera se determinó que si el arreglo es tal que

cada partícula se ve influenciada por una partícula sólida vecina se minora la altura efectiva en un 50%.

Finalmente, la ecuación para determinar la presión admisible por una geomembrana resulta

$$P_{adm} = 450 \cdot \frac{M}{H^2} \cdot \frac{1}{MF_{PS} \cdot FS_{cr} \cdot FS_{cb}} \quad (20)$$

donde  $P$  es la presión admisible (kPa),  $M$  es la masa por unidad de área ( $\text{g/m}^2$ ),  $H$  es la altura efectiva de áridos en mm,  $FS_{cr}$  es el factor de minoración por creep,  $FS_{cb}$  es el factor de minoración por degradación química y biológica y  $MF_{PS}$  es el factor de minoración por forma.

La presión determinada con la ecuación 19 no contempla incertidumbres constructivas. Para determinar la presión de diseño se utilizan dos factores de minoración adicionales, uno para la falla por punzonado y otro para eventuales pérdidas del fluido contenido. El coeficiente de minoración frente a la falla por punzonado resulta independiente de la peligrosidad del fluido contenido; suele adoptarse en 3. Para el cuidado de la impermeabilización se adopta un coeficiente en función de la altura de las protuberancias variable entre 3 y 10. Debe recordarse que estos coeficientes de minoración no son coeficientes de seguridad, sino reducciones empíricas de diseño para funciones específicas.

#### 4.10 Permeabilidad de geomembranas

La conductividad de las geomembranas varía entre  $1 \cdot 10^{-12}$  m/s y  $1 \cdot 10^{-15}$  m/s, es por esto que se las considera como barreras impermeables. En caso de una eventual pinchadura, el flujo máximo atraviesa la discontinuidad se determina de acuerdo a la ecuación de orificio perfecto planteada por Bernoulli (Giroud 1984).

$$Q = 0.6 \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (21)$$

donde,  $a$  es el área de la pinchadura,  $g$  es la aceleración gravitatoria y  $h$  la altura del fluido.

#### 4.11 Antecedente de utilización de geomembranas en climas árticos

La utilización de geomembranas para evitar el paso de un flujo de agua ya ha sido aplicada en climas extremos como el antártico y es ecológicamente tolerable.

Las geomembranas han sido utilizadas para evitar que flujos de líquidos contaminantes provenientes de reservorios de petróleo alcancen el océano, y para residuos sanitarios en los que se evita que fluidos contaminantes ingresen al suelo natural. Estos sistemas son muy utilizados para la retención de fluidos debido a su alta resistencia a agentes químicos y biológicos. Por otro lado estos sistemas son inertes para el ecosistema en el que se colocan.

En la Figura 67 (Bathurst, Rowe, Zeeb y Reimer 2005) se presenta un ejemplo de aplicación de esta tecnología.



**Figura 67:** Ejemplo de aplicación de membranas en climas extremos (Bathurst, Rowe, Zeeb y Reimer 2005).

## 5 PROBLEMÁTICA DEL LAGO BOECKELLA EN LA BASE ESPERANZA

### 5.1 Ubicación

La Base Esperanza está ubicada en la Bahía Esperanza, en el noroeste de la península Antártica, a  $64^{\circ} 24'$  de Latitud Sur y  $57^{\circ} 59'$  de Longitud Oeste. La estación ocupa 43 edificios con un área total de  $374.000\text{m}^2$  y una extensión de 4 km desde el monte Flora, hasta la costa. Aloja unos 80 habitantes permanentes y 1.100 turistas que la visitan durante la temporada cálida.

Cuenta con un laboratorio del Instituto Antártico Argentino y una estación meteorológica; se realizan además investigaciones de glaciología, biología marina y terrestre y sismología. En la Figura 68 (Google maps) se presenta una foto satelital con la ubicación geográfica de la base Esperanza. En la Figura 69 y la Figura 70 se presenta una imagen aérea de la base.

La base se encuentra situada sobre una superficie de roca, a 25 msnm y a unos 30 m de la costa, frente a la Bahía Esperanza. Adyacente a ella hay un glaciar en el que pueden aterrizar aviones de porte mediano. La zona donde se emplaza la base corresponde a las reclamaciones territoriales antárticas de Argentina, Chile y el Reino Unido.



Figura 68: Foto satelital de la base Esperanza.

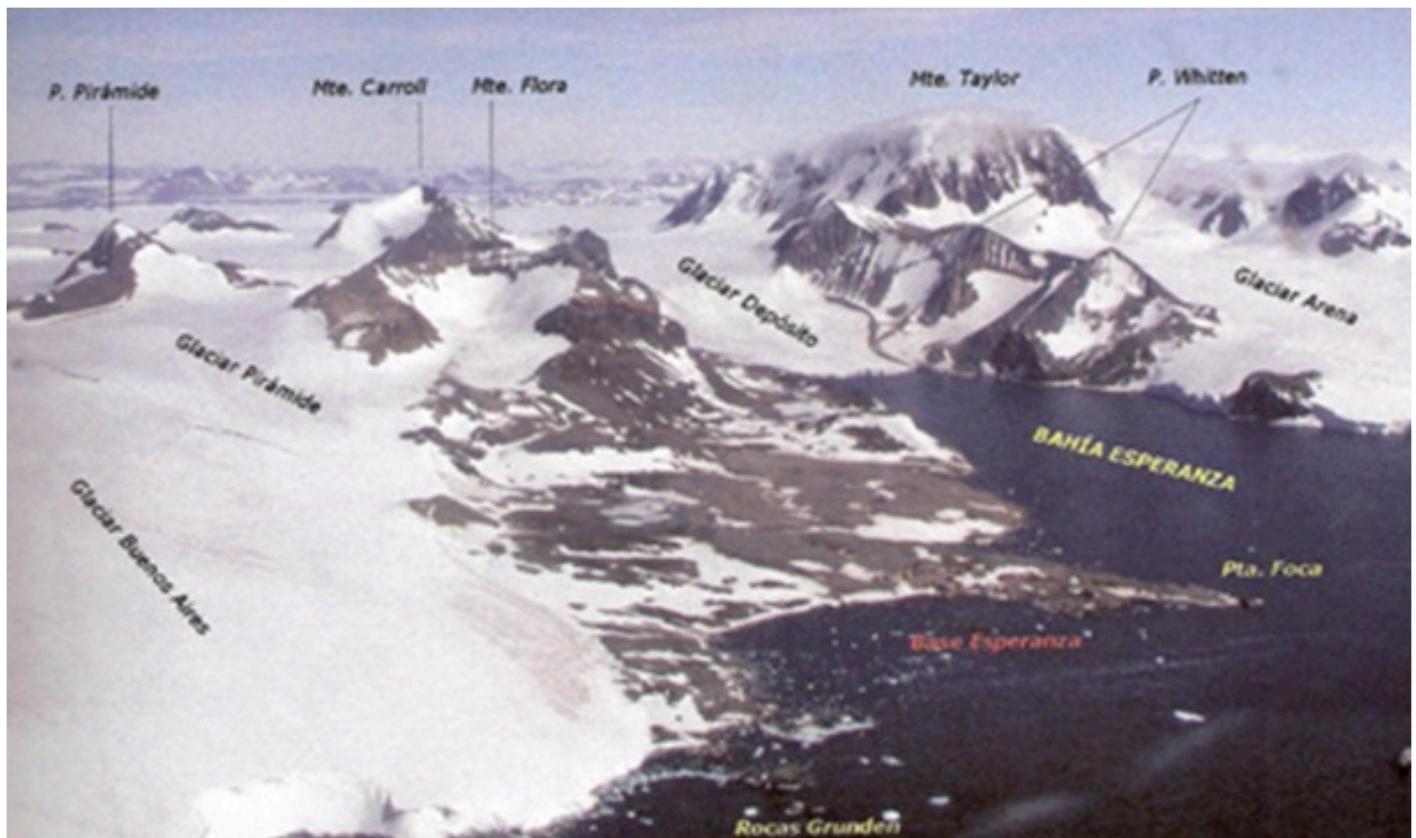


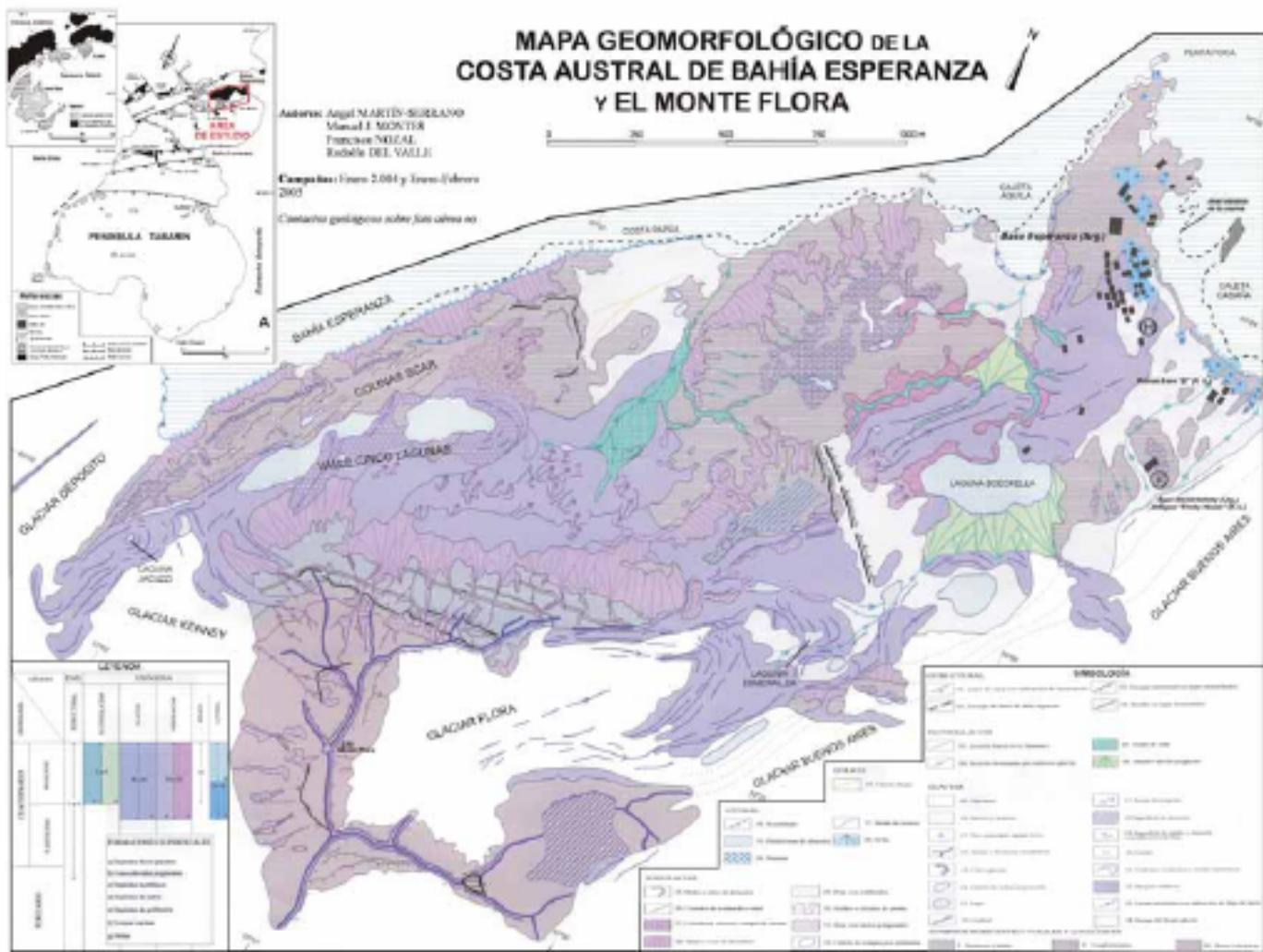
Figura 69: Foto aérea de la base Esperanza.



Figura 70: Foto de la ubicación del lago Boeckella y la base Esperanza.

La Base Esperanza se fundó en las cercanías de un lago para abastecerse de agua potable durante todo el año sin depender de costosos medios de transporte de agua. Dadas las condiciones térmicas del lugar se debe realizar un análisis profundo de las propiedades del lago, no sólo teniendo en cuenta la presencia de

una fuente de abastecimiento, sino también verificando que el aporte de agua sea durante todo el año y no durante los períodos de ablación. En la Figura 71 (Montes, Martín-Serrano, Nozal y del Valle 2005) se presenta un mapa geomorfológico de la bahía Esperanza.

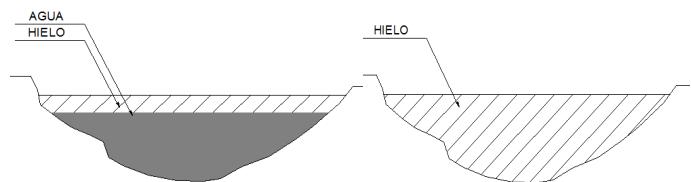


**Figura 71: Mapa Geomorfológico de Bahía Esperanza (Montes, Martín-Serrano, Nozal y del Valle 2005).**

## 5.2 Comportamiento térmico de lagos

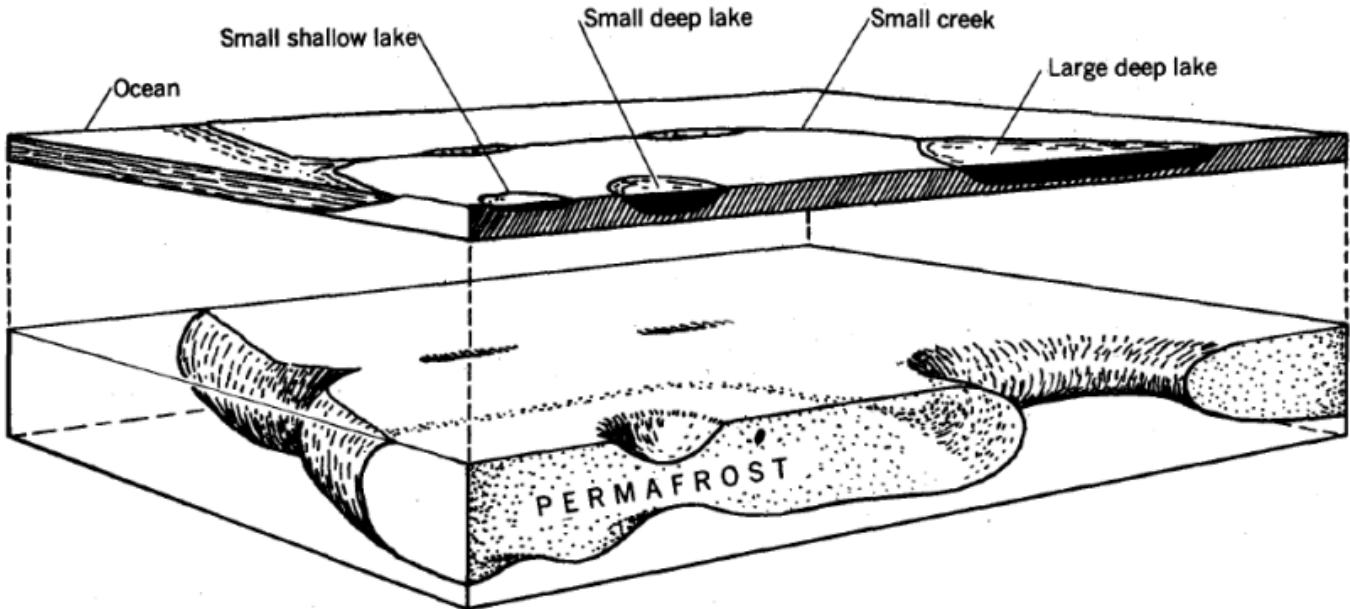
Los lagos son grandes reservorios de energía calórica debido a que el agua en estado líquido se encuentra a una temperatura superior a aquella en estado sólido. Esto implica que en zonas en las que existe permafrost también existirá un flujo continuo de calor desde los lagos hacia el suelo congelado.

Teniendo en cuenta el comportamiento térmico, existen tres tipos de lagos: aquellos que se congelan por completo en invierno (lagos pequeños), los que no llegan a congelarse por completo (lagos de mayor porte) y lagos grandes y profundos que logran penetrar en el permafrost. En la Figura 72 se presenta un corte de ambas tipologías de lagos durante el invierno.



**Figura 72: Lagos profundos y poco profundos**

En la Figura 73 (Andersland y Ladanyi 2004) se esquematiza la influencia de los cuerpos de agua en el permafrost. Puede apreciarse que mientras un lago pequeño sólo produce una perturbación del espesor del permafrost, un lago profundo y grande produce una interrupción completa del suelo congelado. El lago Boeckella no alcanza a penetrar por completo el permafrost inferior, dado que el espesor de permafrost en ese lago es de unos 180 metros.



**Figura 73: Influencia de cuerpos de agua en el permafrost (Andersland y Ladanyi 2004).**

### 5.3 Características generales del Lago Boeckella

Los lagos importantes de la zona de estudio tienen su origen en el retroceso de glaciares; el caso del lago Boeckella no es la excepción y se originó debido al retroceso del glaciar Buenos Aires. Existen lagunas de menor porte que deben su formación al retroceso del permafrost con el consecuente asentamiento del suelo y la acumulación de agua a través de precipitaciones.

En el caso del lago Boeckella, el principal emisario de agua es el glaciar Buenos Aires remanente a través de torrentes de deshielo movilizados principalmente a lo largo de tills.

El lago Boeckella, abastecedor de agua de la base, está a una distancia de 500 metros del mar y 600 metros de la base Esperanza. El cuerpo de agua tiene un típico comportamiento de lagos antárticos: su comportamiento es gobernado por las bajas temperaturas y el aporte de agua de deshielo de glaciares, en este caso del glaciar Buenos Aires, a través de la descarga de agua en épocas de ablación. La temperatura del lago resulta ser un factor variable en función de la profundidad y de la época del año. Los estratos superiores del lago son muy influenciados por factores superficiales como la radiación, viento y geografía, mientras que los estratos inferiores conservan una temperatura más estable, sin grandes amplitudes a lo largo del año, del orden de los 2.6°C a 3.5°C. El comportamiento de este lago es el de un lago profundo; en condiciones normales, el abastecimiento de la base Esperanza se encuentra asegurado durante todo el año.

### 5.4 Rotura de costa en Lago Boeckella

Durante el mes de Enero del año 2001 se produjo un deshielo parcial del permafrost generando infiltración de agua, produciendo la ruptura de la costa natural y una disminución brusca del nivel del lago (Figura 74, fotografía enviada por la Base Esperanza).



**Figura 74: Ruptura de la costa natural**

Este fenómeno modificó el comportamiento del lago Boeckella, que cambió su comportamiento de lago profundo a poco profundo; se congela en las cercanías de la toma de agua lo que impide el abastecimiento de la base durante el invierno.

Como consecuencia del nivel bajo del lago, la caja de toma de agua, responsable de abastecer a la base de agua durante todo el año, quedó inhabilitada, desabasteciendo de agua potable a la base. En la Figura 75 (fotografía enviada por la Base Esperanza)

y la Figura 76 (fotografía enviada por la Base Esperanza) se presentan dos fotografías de la casilla en verano e invierno respectivamente.



**Figura 75:** Fotografía de la casilla de toma de agua en verano.



**Figura 76:** Fotografía de la casilla de toma de agua en invierno.

### 5.5 Construcción del dique artificial

Con el objetivo de recuperar el nivel del lago se construyó un dique de hormigón y rellenos obtenidos de una cantera de la zona. El dique se compone por una estructura de hormigón de treinta y dos metros de longitud y una altura variable entre 1.50 y 1.80 m. En la Figura 77 (fotografía enviada por la Base Esperanza) y la Figura 78 (fotografía enviada por la Base Esperanza) se muestran los trabajos realizados en el sector dañado.

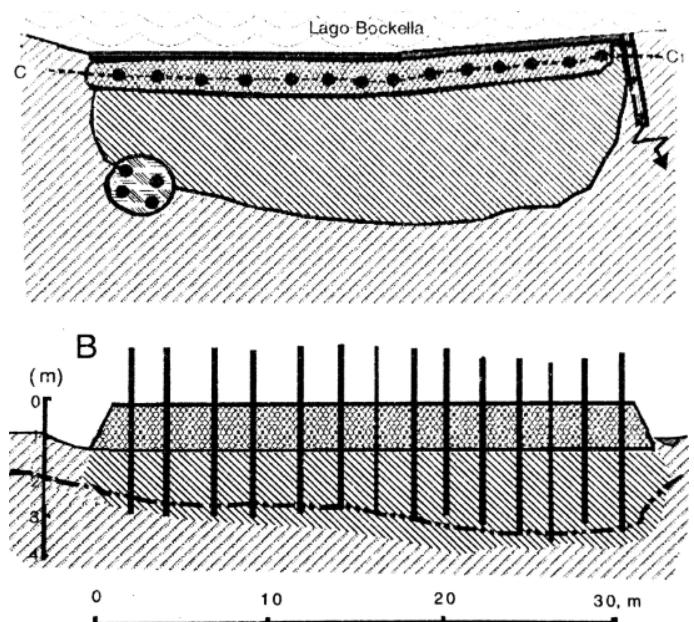
En el dique del lago Boeckella se realizó un terraplén con arenas y gravas y se lo congeló por medio de dieciocho termosifones separados aproximadamente un metro entre sí. En la Figura 79 (Ermolin 2003) se presenta un esquema con la construcción realizada. Se puede observar la magnitud de la construcción y la serie de termosifones colocados.



**Figura 77:** Trabajos realizados para la recuperación del nivel del lago.



**Figura 78:** Trabajos realizados para la recuperación del nivel del lago.



**Figura 79:** Esquema de dique en la base Esperanza (Ermolin 2003).

Los trabajos de construcción se realizaron entre el 23 de Febrero y el 5 de Marzo de 2002. Esta época es la más favorable para la construcción de la obra dado que es el período en que el suelo comienza a congelarse y la acción de aguas subterráneas es mínima. La fundación se materializó mediante un relleno de aproximadamente  $160\text{ m}^3$  de áridos compuestos por gravas y arenas (Figura 80). Los áridos se obtuvieron de una cantera ubicada en las cercanías de la costa marítima, a 400 metros del lago.



**Figura 80:** Fotografía del tipo de áridos ubicados en la zona de la base Esperanza.

La construcción de los termosifones se realizó en el taller de la base utilizando tubos soldados y chapas. Una vez colocados en el dique, los termosifones, fueron llenados con JP-1 (Jet Fuel), un destilado de petróleo que se encuentra disponible en la base para uso militar.

En la Figura 81 (fotografía enviada por la Base Esperanza) y la Figura 82 (fotografía enviada por la Base Esperanza) se presentan fotografías del sistema de enfriamiento de suelos utilizado en el dique de la Base Esperanza.



**Figura 81:** Sistema de enfriamiento del dique.



**Figura 82:** Sistema de enfriamiento del dique.

### 5.6 Funcionamiento del dique

Luego de la construcción del dique se recuperó parcialmente el nivel del lago. Con el paso del tiempo el nivel se redujo debido a la generación de un talik cerrado en la base del muro construido, que inició la retrocesión del permafrost.

Andersland y Ladanyi (2004) describen estos fenómenos como los más perjudiciales para la estabilidad del sistema y recomiendan el cierre inmediato del flujo pasante por medios alternativos a los utilizados en el lago Boeckella dado que estos tienen poca capacidad de enfriamiento. Según la información suministrada por el instituto antártico, La porción enterrada del muro varía entre 1.2 y 1.5m, por lo que queda embebida en el espesor del talik.

Un fenómeno particular y distintivo fue la formación parcial de un Pingo. En la Figura 83 y la Figura 84 (fotografías enviadas por la Base Esperanza) se presentan fotografías del Pingo generado en la Base Esperanza.



**Figura 83:** Fotografía de Pingo.



**Figura 84: Fotografía de Pingo.**

### 5.7 Descripción matemática del flujo térmico en suelos

El problema es un flujo térmico a través de un medio permeable en dos dimensiones. La ecuación que rige el movimiento es la de Laplace

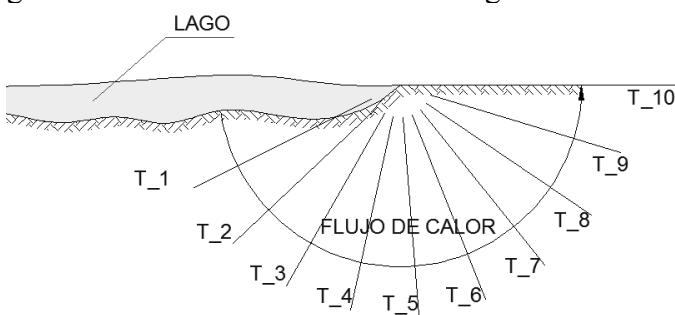
$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (22)$$

donde  $x$  y  $z$  son las coordenadas. Asumiendo que la conductividad en el medio es constante en todos los puntos y en el caso en que hay dos espacios infinitos con diferencias de temperaturas, la solución a esa ecuación diferencial es:

$$T - T_g = \frac{T_s - T_g}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{z}{x} \right) \quad (23)$$

donde  $T_s$  es la fuente de mayor temperatura y  $T_g$  es la fuente de menor temperatura.

En la Figura 85 se presenta un esquema en el que se indica la dirección del flujo y las isotermas. Debe notarse que las isotermas son líneas aproximadamente rectas y que hay grandes gradientes térmicos en el borde del lago.



**Figura 85: Flujo de calor e isotermas en el suelo en presencia de un cuerpo de agua.**

El flujo de calor en el suelo congelado es en general un proceso difusivo lento. Cuando aparece la componente convectiva producida por la circulación de agua, la tasa de intercambio de calor crece mucho.

El desplazamiento de agua superficial como subsuperficial genera una degradación en el permafrost e impide la generación de nuevo permafrost. Esto genera que mayor cantidad de agua fluya y deprima el permafrost, fenómeno que se ve incrementado en suelos granulares, permeables, que en suelos arcillosos.

Analizando el caso más general, los lagos deben su volumen de agua acumulado al siguiente balance:

$$P + E + Q_{in} + Q_{eg} + Q_{sp} + Q_{sb} + Q_s = \frac{dV}{dt} \quad (24)$$

donde  $P$  es el agua proveniente de la precipitación,  $E$  es la evaporación superficial del lago,  $Q_{in}$  es el ingreso de agua a través de canales conectados con el lago,  $Q_{eg}$  es el egreso de agua a través de canales conectados con el lago,  $Q_{sp}$  es el balance de agua desplazada a través del suprapermanfrost (interfase entre capa activa y permafrost),  $Q_{sb}$  es el flujo de agua a través del subpermafrost (permafrost discontinuo inferior),  $Q_s$  balance de agua superficial o por medio de Tills,  $V$  es el volumen de agua acumulada y  $t$  es el tiempo.

El permafrost es considerado una barrera impermeable; para que circule agua a través de él, tanto suprapermanfrost como subpermafrost, deben generarse fallas. Una vez generado el camino por medio de fallas, el agua proveniente del subpermafrost proveerá el calor suficiente para mantener la vía abierta.

El agua que circula a través del suprapermanfrost se debe principalmente a lluvia y a los períodos de ablación. El agua se desplaza a través de las Tills generadas en el suelo.

Como no existen caudales de ingreso y egreso por medio de canales, el balance hídrico de la laguna Boeckella es

$$P + E + Q_{sp} + Q_{sb} + Q_s = \frac{dV}{dt} \quad (25)$$

### 5.8 Temperatura en el suelo y penetración de permafrost– Base Esperanza

De acuerdo a datos brindados por el Instituto Antártico Argentino la temperatura media anual de la base resulta de 268°K (-5°C), la amplitud térmica es de 20°K y el gradiente geotérmico de la zona es de 3°C/100m.

El problema del flujo elemental de calor fue descripto en el Capítulo 2, donde se presentó la ecuación (1) que se repite a continuación

$$T_{st} = T_m + A_s \cdot \sin \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{p} \right) \quad (26)$$

donde  $T_m$  es la temperatura media para cada profundidad. Si se incorpora el gradiente geotérmico queda la expresión

$$T_m = T_s + G \cdot z = -5^\circ C + \frac{3^\circ C}{100m} \cdot z \quad (27)$$

La difusividad térmica, de acuerdo a la mineralogía de la zona (Montes (2007) - Ermolin (2003)), se estima en  $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , este valor resulta adecuado para gravas y arenas limosas. Tomando un período de 365 días se obtiene la denominada curva “látigo” o curva de temperaturas instantáneas del suelo en función de la profundidad.

$$T_z = T_m + 20^\circ \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\eta}{365\text{días}}}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{365\text{días}} - z\sqrt{\frac{\eta}{t}}\right) \quad (28)$$

donde se usó la variable auxiliar

$$\eta = \frac{\pi}{4 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}} \quad (29)$$

Para obtener la *Trumpet curve* se procede a calcular los máximos y mínimos de la curva “látigo” a lo largo del año.

$$T_{z,\max} = T_m + 20^\circ \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\eta}{365\text{días}}}} \quad (30)$$

$$T_{z,\min} = T_m - 20^\circ \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\eta}{365\text{días}}}} \quad (31)$$

En la Figura 86 se presenta el perfil de temperaturas máximo y mínimo de la Base Esperanza junto con la curva látigo en un instante dado en el año para una profundidad de 0-10m. El gráfico permite determinar el límite de la capa activa, ubicado a dos metros ochenta de profundidad. Este valor corresponde a los datos obtenidos por el instituto antártico en la zona de la base.

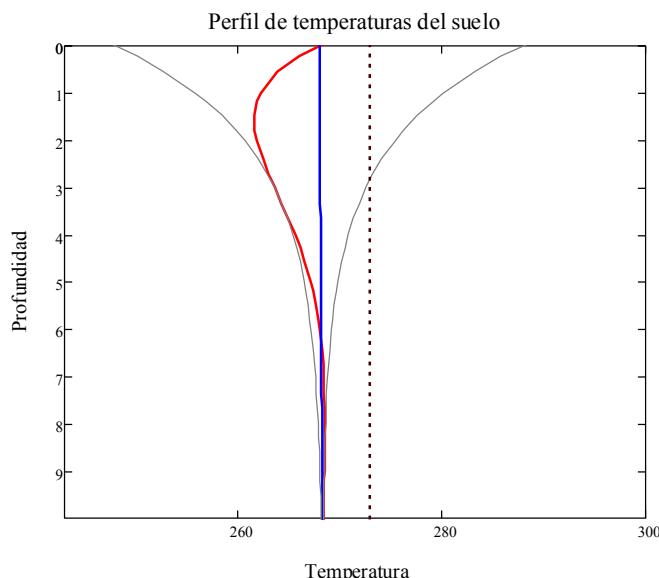


Figura 86: Trumpet Curve- Base Esperanza (0-10m).

En la Figura 87 se presentan las curvas de temperatura en superficie y para profundidades de

uno y dos metros ochenta (límite superior de la capa activa). Esta es la aplicación a la Base Esperanza de la Figura 12.

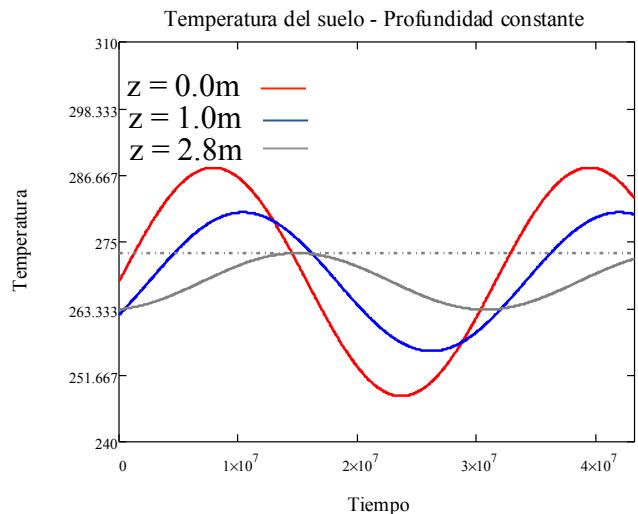


Figura 87: Curva de temperaturas-z=0, z=1m y z=2,80m, Base Esperanza.

En la Figura 88 se presenta la *Trumpet Curve* de cero a ciento ochenta metros. En el gráfico se observa el límite inferior del permafrost, ubicado a ciento cincuenta metros de profundidad, este valor se corresponde con las estimaciones realizadas por el instituto antártico para la zona. La Figura 86 es la vista cercana de la Figura 88.

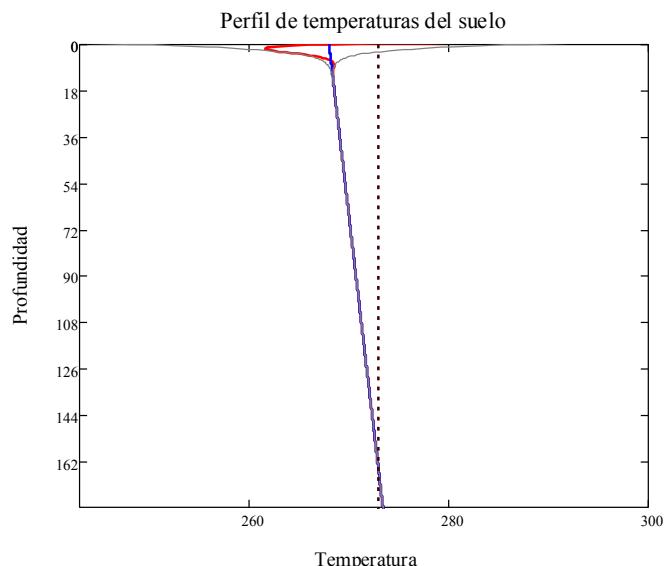


Figura 88: Trumpet Curve - Base Esperanza (0-180m).

## 5.9 Propiedades térmicas del suelo – Base Esperanza.

En la Base Esperanza y de acuerdo con los valores observados en pozos cercanos al dique, el contenido total de humedad es del orden del 25% con un valor potencial de congelamiento entre 18 y 20%.

De acuerdo con las ecuaciones (6) y (7) se puede calcular la capacidad calorífica volumétrica del sue-

lo congelado y descongelado del lago Boeckella como

$$c_{vu} = \frac{21.5 \text{ kN/m}^3}{18.0 \text{ kN/m}^3} \cdot \left( 0.17 + 1.00 \cdot \frac{25}{100} \right) \\ 4.18 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} = 3.78 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \quad (32)$$

$$c_{vf} = \frac{21.5 \text{ kN/m}^3}{18.0 \text{ kN/m}^3} \cdot \left( 0.17 + \frac{18}{100} + 0.50 \frac{25-18}{100} \right) \\ 4.18 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} = 4.59 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \quad (33)$$

La conductividad térmica de las gravas y arenas varía entre 1.3-1.7 W/(m °C). De acuerdo a ensayos realizados por el Instituto Antártico Argentino se toma el valor (Ermolin 2003)

$$k = 1.70 \frac{W}{\text{m} \cdot ^\circ \text{C}} \quad (34)$$

### 5.10 Cálculo de capacidad mínima de enfriamiento – Termosifones lago Boeckella

Para el cálculo de la capacidad de extracción requerida por los termosifones se realiza un modelo analítico desarrollado por Sanger-Sayles (1979). Las condiciones de operación son:

- Un metro de radio de acción.
- Temperatura media anual 268°K
- Amplitud térmica 20°K
- Flujo de agua pasante nulo

La relación entre radio de congelamiento y radio de extracción  $a_r$  establece el radio de influencia del termosifón;  $a_r$  igual a uno da una eficiencia de extracción máxima; valores más elevados indican que el equipo extrae mayor cantidad de calor “no útil” o “no requerido”. El valor de  $a_r$  fue estimado en diversos estudios, entre ellos por Sanger-Sayles (1979), se determinó que un valor de tres resulta adecuado para los cálculos en esta clase de equipos.

Bajo estas hipótesis de diseño las frigorías obtenidas serán una cota inferior de la energía de extracción requerida por estos equipos para lograr el congelamiento del núcleo del dique y restituir la estanqueidad de la obra civil.

Este cálculo presupone la utilización de una barrera de impermeabilización temporal que garantice un flujo nulo de agua mientras dure el proceso de congelamiento del núcleo del dique. Esta barrera podría estar materializada por una geomembrana – temporal o definitiva – instalada en el borde del lago.

$$T_g = 288^\circ \text{K} \quad T_s = 258^\circ \text{K} \quad T_0 = 273^\circ \text{K} \quad (35) \\ R_A = R \cdot a_r = 1\text{m} \cdot 3 = 3\text{m}$$

De acuerdo a las ecuaciones (13) y (14) se puede establecer el régimen térmico en el suelo de forma polar al momento de alcanzar el equilibrio entre el medio y el termosifón

$$76\text{mm} < r < 1\text{m} \rightarrow t = \frac{-15^\circ \text{K}}{\ln(1\text{m}/0.076\text{m})} \cdot \ln\left(\frac{1\text{m}}{r}\right) \quad (36)$$

$$1\text{m} < r < 3\text{m} \rightarrow t = \frac{-15^\circ \text{K}}{\ln(3\text{m}/1\text{m})} \cdot \ln\left(\frac{r}{1\text{m}}\right)$$

En la Figura 89 se presenta la curva de temperaturas en el Dique del lago Boeckella con el sistema de termosifones instalado. Hay un cambio de curvatura a partir del radio de congelamiento que se explica debido al cambio de fase que se manifiesta en el suelo. El suelo que se encuentra en el radio de acción del termosifón está congelado, mientras que el que se encuentra por fuera y por encima del límite del permafrost está descongelado.

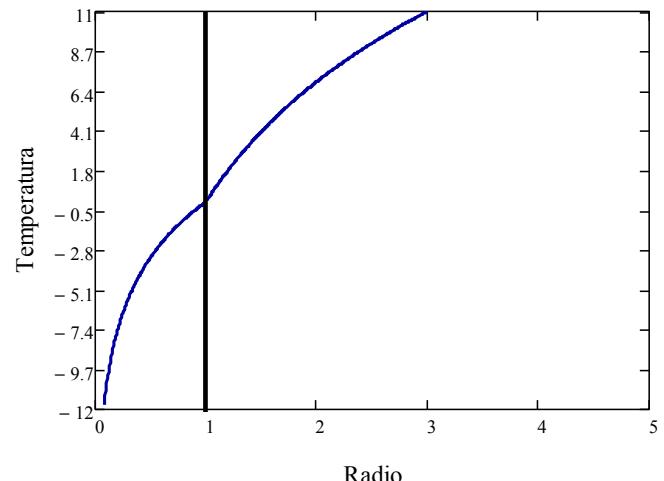


Figura 89: Temperatura de un termosifón en función del radio, Lago Boeckella (2D).

El cálculo de la extracción de calor se hace mediante la ecuación (15). Pekeris y Slichter (1939) definieron el radio efectivo o equivalente como un auxiliar de cálculo que permite tener en cuenta el calor a extraer de las partículas sólidas de suelo. Se define radio efectivo o equivalente a

$$R_{EQ} = \frac{R}{\sqrt{1 - 0.12 \cdot Ste}} \quad (37)$$

donde  $R$  es el radio real que se desea congelar

$$Ste = \frac{C_{vu} \cdot v_s}{L} \quad (38)$$

es el número de Stefan,  $C_{vu}$  es la capacidad calorífica del suelo descongelado,  $L$  es el calor latente del suelo,  $v_s$  es la diferencia entre la temperatura del equipo y la de congelamiento del agua.

Queda

$$Ste = \frac{4.40 \frac{MJ}{m^3 K} \cdot 15K}{83.43 \frac{MJ}{m^3}} = 0.79 \quad (39)$$

El radio efectivo queda en 1.05m, numéricamente igual a R. Para la determinación del calor se adoptará como radio equivalente dos metros y se aplicará un factor de corrección del 30% de acuerdo Sanger y Sayles (1979)

Reemplazando los valores estimados en la ecuación (15) se obtiene la cantidad de calor requerida para congelar una masa de suelo de radio 1m sin flujo de agua pasante.

$$Q = \pi \cdot (1m)^2 \left\{ \begin{array}{l} 8.34 \cdot 10^4 \frac{kJ}{m^3} + \\ \frac{3-1}{2 \cdot \ln(3)} \cdot 3.78 \frac{MJ}{m^3 K} \cdot (-15K) + \\ \frac{4.59 \frac{MJ}{m^3 K} \cdot (-15K)}{2 \cdot \ln \left( \frac{1,00m}{0,076m} \right)} \end{array} \right\} = 8.70 \cdot 10^5 \frac{kJ}{m} \quad (40)$$

En este caso no se tiene en cuenta el pasaje de flujo de agua a través del área de influencia del termosifón.

El calor calculado da la cantidad requerida teóricamente por metro de termosifón para congelar una columna de suelo. Sanger y Styles (1979) demostraron que el calor requerido resulta ser un 30% mayor en los ensayos de campo realizados, por lo tanto la cantidad de calor real a extraer (en BTU) resulta

$$Q_R = 1.30 \cdot Q \equiv 1.07 \cdot 10^6 \frac{BTU}{m} \quad (41)$$

Para realizar un análisis acabado de la situación real de los equipos se procederá a calcular el calor generado por el lago para tres regímenes, dos transitorios y uno estacionario. En el primer caso (Escenario I) se analiza un estado permanente en el los termosifones deberán tener extraer el calor generado por la proximidad del Lago Boeckella. En el segundo caso (Escenario II) se analiza un estado transitorio con flujo de agua en el que los termosifones deben extraer el calor incorporado por el agua circulante. Finalmente, en el tercer caso (Escenario III) se analiza el Escenario II con la incorporación de una geomembrana.

Se adopta una temperatura media del lago 276K (Ermolin 2003) y la del aire en 268K (Ermolin 2003).

### 5.10.1 Escenario I – Flujo de agua nulo

El flujo de calor en este caso se calcula aplicando la definición de conductividad. Se considera como límite adiabático el límite superior del permafrost en el sector del dique, a 1.5m de profundidad. El espesor del terraplén artificial es de aproximadamente 2.5m. Con una diferencia de temperatura de 8K y un espesor del dique de 2.5m se reemplaza en la ecuación (3) y se obtiene

$$Q_E = -1.70 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 1.0 \frac{m^2}{m} \cdot \frac{8K}{2.5m} = 18.5 \frac{BTU}{m \cdot h} \quad (42)$$

Finalmente el calor anual generado por el lago es

$$Q_E = 18.5 \frac{BTU}{m \cdot h} \cdot 1 \text{ año} \cdot 2m = 3.24 \cdot 10^5 \frac{BTU}{m} \quad (43)$$

En este caso el valor del calor entregado por el Lago Boeckella al dique resulta de un orden de magnitud inferior que el calor de extracción requerido para el congelamiento de los áridos, sin embargo es un calor que debe tenerse en cuenta para el cálculo de la capacidad de los equipos en todos los estados analizados.

$$Q_I = Q_R + Q_E = 1.40 \cdot 10^6 \frac{BTU}{m} \quad (44)$$

### 5.10.2 Escenario II – Flujo de agua continuo

De acuerdo a mediciones de caudal realizadas en el dique se obtuvieron valores de flujo de filtración proveniente del suprapermafrost de  $7.81 \frac{m^3}{día} m^2$  durante todo el período de descongelamiento estacional (Ermolin 2003).

El tiempo de descongelamiento estacional se calcula mediante la ecuación (1) considerando la temperatura a superficie. Queda

$$t_d \approx 365 - \frac{365}{\pi} \text{ días} \cdot \cos^{-1} \left( \frac{268K - 273K}{20K} \right) \approx 170 \text{ días} \quad (45)$$

Debe agregarse el calor incorporado por el flujo pasante de agua al dique de hormigón durante un año. Se considera que el flujo pasante no llega a congelarse pero si baja su temperatura hasta los 273K, entregando al dique esa cantidad de calor.

$$Q_w = D \cdot Q_{H_2O} \cdot C_{H_2O} \cdot t_d \cdot \Delta T$$

$$Q_w = 2m \cdot 7.81 \frac{m^3}{día \cdot m^2} \cdot 4180 \frac{kJ}{m^3 \cdot K} \cdot 170 \frac{días}{(276K - 273K)} \equiv 3.3 \cdot 10^7 \frac{BTU}{m} \quad (46)$$

De acuerdo a los cálculos realizados, la cantidad de calor requerida para el congelamiento del radio de

1.0m ( $8.70 \cdot 10^5$  kJ/m) resulta de un orden inferior que la cantidad de calor proporcionada por el flujo de agua pasante ( $3.33 \cdot 10^6$  kJ/m), lo que prueba que el flujo de agua resulta un factor determinante de dimensionamiento.

Para esta situación de carga los termosifones deberán extraer una cantidad de calor equivalente a la suma del calor requerido para congelar un radio de dos metros con la proximidad del lago Boeckella (Escenario I) más el calor erogado por el flujo pasante.

$$Q_{II} = Q_I + Q_W = 3.45 \cdot 10^7 \frac{BTU}{m} \quad (47)$$

### 5.10.3 Escenario III-Punzonado de la geomembrana

Se analiza finalmente un caso en que se coloca una geomembrana impermeable que se punzona localmente permitiendo el paso de flujo de agua a través de ella.

Para cada rotura de la geomembrana se considera una apertura circular de 0.5mm de diámetro y una carga hidráulica constante durante el año de 0.75m. Reemplazando en la ecuación (21) se obtiene el caudal de cada apertura puntual.

$$Q_{H_2O} = 0.6 \cdot \frac{\pi \cdot (0.02m)^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.75m} \quad (48)$$

$$Q_{H_2O} = 0.04 \frac{m^3}{\text{día} \cdot \text{falla}}$$

Se considera una falla por metro cuadrado y un tiempo de ingreso de caudal constante a lo largo del año. Este valor de pérdidas resulta aceptable de acuerdo a observaciones realizadas sobre presas de relaves impermeabilizadas con geomembranas de baja calidad (Beck 2009).

Se considera que el flujo pasante no llega a congelarse pero si baja su temperatura hasta los 273K, entregando al dique esa cantidad de calor.

$$Q_W = D \cdot Q_{H_2O} \cdot C_{H_2O} \cdot t_d \cdot \Delta T$$

$$Q_W = 2m \cdot 0.04 \frac{m^3}{\text{día} \cdot m^2} \cdot 4180 \frac{kJ}{m^3 \cdot K} \cdot 365 \text{día} \cdot (276K - 273K) \equiv 3.5 \cdot 10^5 \frac{BTU}{m} \quad (49)$$

En este caso el valor del calor entregado por el flujo de agua pasante a través de las pérdidas en la geomembrana al dique resulta de un orden de magnitud inferior que el calor de extracción requerido para el congelamiento de los áridos.

$$Q_{III} = Q_I + Q_W = 1.75 \cdot 10^6 \frac{BTU}{m} \quad (50)$$

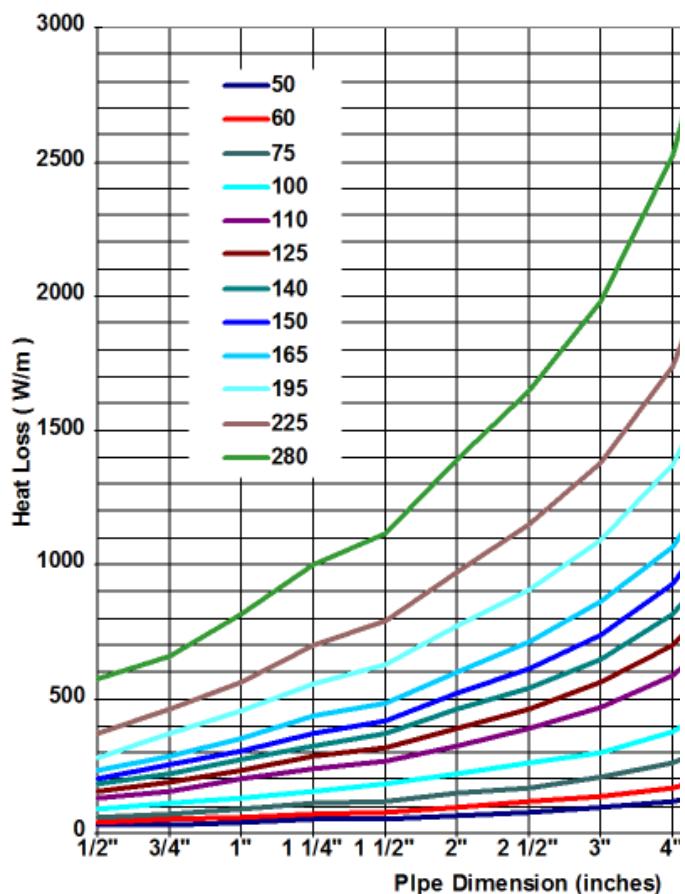
### 5.10.4 Análisis de resultados

En la Tabla 1 se presenta el calor requerido a extraer para el congelamiento del sector del dique ( $Q_R$ ), la cantidad de calor mínima requerida a extraer por los equipos para tener un sobrante de extracción y, con el transcurso del tiempo ir generando un avance del permafrost sobre el talik y finalmente se presenta la cantidad de calor para lograr enfriar la totalidad del dique en una temporada para cada caso.

**Tabla 1: Calor anual a remover requerido para cada escenario analizado.**

Esc.	$Q_R$ (BTU/m)	$Q_{min}$ (BTU/m)	$Q_T$ (BTU/m)
I	$1.07 \cdot 10^6$	$3.24 \cdot 10^5$	$1.40 \cdot 10^6$
II	$1.40 \cdot 10^6$	$3.31 \cdot 10^5$	$3.45 \cdot 10^6$
III	$1.40 \cdot 10^6$	$3.50 \cdot 10^5$	$1.40 \cdot 10^6$

En la Figura 90 (Engineering Tools 2012) se muestra el diagrama de diseño de termosifones activos similares a los empleados en la Base Esperanza para distintos diámetros y gradientes térmicos.



**Figura 90. Diagrama de diseño de termosifones activos (Engineering Tools 2012).**

Para equipos de 76mm ( $2 \frac{1}{2}"$ ) de diámetro y un gradiente térmico mínimo recomendado de 50K (muy superior a las condiciones de la Base Esperanza) se logran extraer 300 BTU/m h que equivale a  $1.25 \cdot 10^6$  BTU/m año.

Para los casos I, barrera establecida, y III, geomembrana, los termosifones analizados tienen

suficiente capacidad de extracción de calor como para lograr el restablecimiento del permafrost en el sector del talik e impermeabilizar el dique.

En el caso II, flujo de agua continuo durante los períodos de ablación, los equipos no pueden extraer la cantidad de calor aportada por el flujo de agua. En esta situación los termosifones están funcionando como máquinas retardadoras de la degradación del permafrost, pero no logran reestablecerlo.

En el diseño de los equipos instalados por el Ejército no se incluyó la circulación del agua como fuente de ingreso de calor. Esto justifica porqué los termosifones instalados no resultan efectivos: la cantidad de calor aportada por una brecha de agua, por mínima que sea, es demasiado alta para las máquinas instaladas; por lo que se requiere una barrera pasiva complementaria que no fue instalada en la primera reparación de la costa.

### 5.11 Pre-dimensionamiento de barrera complementaria con geomembrana

La situación actual de la costa está bien representada por el Escenario II analizado más arriba. Para convertir el Escenario II en Escenario III se debe colocar una barrera hidráulica pasiva complementaria. Como ya se explicó, una geomembrana puede cumplir esta función.

Las características de los suelos superficiales de la costa del lago no son favorables para la instalación de una geomembrana. Hay muchas piedras angulosas y salientes importantes. Por esta razón, el pre-dimensionamiento de una geomembrana es parte de la factibilidad de la solución. En otras palabras, hay que demostrar que existe una geomembrana que pueda ser colocada en las condiciones geotécnicas y logísticas de la costa del Lago Boeckella y que quede razonablemente íntegra para que funcione como barrera retardadora temporalia durante un evento de ablación de permafrost.

Para el diseño de geomembranas como barreras hidráulicas es necesario establecer el riesgo asociado a las pérdidas de la barrera. La calidad de la protección requerida para la geomembrana es función de la peligrosidad del fluido y de los costos de pérdidas por punzonado de la geomembrana. Por ejemplo, en el caso de rellenos sanitarios, el riesgo de filtración de lixiviado se considera una peligrosidad muy elevada dado que esto puede producir daños importantes al medio ambiente. En el caso de canalización de ríos, lagunas, etc. el riesgo de contaminación asociado es bajo. En el caso específico de la Base Esperanza, la pérdida de agua contenida en la laguna Boeckella genera la imposibilidad de habitar el sitio o aumenta sus costos generando pérdidas económicas importantes. Por esta razón, en este predimensionamiento se asume que el riesgo de pérdidas es alto.

El tipo de áridos utilizados en la construcción del dique fueron gravas y arenas limosas del tipo F-2. En la Tabla 2 se presentan las características de los materiales utilizados. En la Figura 91 se muestra una imagen de los áridos del sitio en los que se puede apreciar una forma angular y sub angular.

**Tabla 2: Propiedades de los áridos utilizados en la construcción del dique.**

Tamicos #				Hf	LL	$\gamma_f$	$\gamma_f$	$\gamma_f$	Cf
4	18	60	230	mm	%	t/m <sup>3</sup>			
90	45	25	8	140	8	1.67	1.8	2.15	F-2

Debido al riesgo de asentamientos diferenciales producido por los procesos de congelamiento y deshielo conviene que la geomembrana sea flexible, con bajo módulo de deformación y alta tenacidad. Por esta razón conviene una membrana de PVC. En la Tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas del modelo seleccionado.



**Figura 91: Forma de los áridos del lugar.**

**Tabla 3: Especificaciones técnicas de la membrana seleccionada.**

Propiedad	Unidad	Valor
Espesor nominal	mm	1.4
Material	-	PVC
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1.280
Resistencia mín a tracción	MPa	15
Elongación mín a rotura	%	300
Resistencia mín al dessgarre	daN/cm	4
Doblado a -30°C	No quiebra	
Estabilidad dimensional máx	%	3
Resistencia mín a lixiviados	%	±25

Las verificaciones de punzonamiento se hacen para una protuberancia de altura

$$H_f = 140 \text{ mm} \quad (51)$$

Se considera que las partículas tienen un funcionamiento de grupo, por lo tanto, se minora la altura efectiva a la mitad.

$$H_e = \frac{H_f}{2} = 70\text{mm} \quad (52)$$

Reemplazando el valor de la altura efectiva determinado en (52) en la ecuación (18), la presión de punzonado neta de la membrana para corto plazo resulta

$$P_{cp} = 450 \cdot \frac{1250 \frac{g}{m^2}}{(70\text{mm})^2} = 117\text{kPa} \quad (53)$$

Aplicando los factores de reducción por creep ( $\text{FS}_{\text{creep}} = 1.5$ ) se obtiene la presión neta para largo plazo

$$P_{lp} = 78\text{kPa} \quad (54)$$

A esta presión de punzonado a largo plazo hay que aplicarle el factor de seguridad 3.0 correspondiente a las condiciones de alto riesgo y funcionamiento permanente. Con esa reducción, la presión de agua admisible de la geomembrana elegida es

$$P_{adm} = 26\text{kPa} \quad (55)$$

Por lo tanto, la geomembrana es capaz de soportar una presión de agua de 26kPa, equivalente a una columna de agua de 2.6m. La columna de agua que actúa en el borde del lago es de 1.50m a 2.0m de altura, por lo que la geomembrana verifica punzonado.

Esto prueba que una geomembrana de PVC puede ser instalada en la costa del Lago Boeckella y funcionar como barrera hidráulica. Como es una barrera pasiva, no tiene capacidad para regenerar permafrost y por lo tanto no reemplaza a los termosifones. Sin embargo, permite cambiar el escenario de diseño del Escenario II al Escenario III estudiado más arriba, y por lo tanto asegurar que el sistema tiene redundancia suficiente como para recuperarse de un proceso de ablación de permafrost y reconstituir la barrera congelada que contiene el agua del Lago Boeckella.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el comportamiento de los suelos que forman la costa del Lago Boeckella, fuente de agua potable de la Base Esperanza, en la Antártida Argentina. El trabajo se inspiró en una serie de acontecimientos que comenzaron con la ruptura parcial del borde del lago y el derrame al océano.

El estudio comenzó por la descripción del comportamiento y clasificación de los suelos en climas fríos. Se describieron las geoformas que se producen en zonas de congelamiento permanente y temporal, las características físicas y mecánicas de los suelos congelados y se explicaron las bases para tratamiento de estos suelos cuando interesan a obras de ingeniería. En particular, se describieron las técnicas que se emplean para asegurar que los suelos permanezcan congelados, y así aprovechar sus particulares propiedades mecánicas para el control del flujo de agua en suelos.

Luego se estudió el problema de la transferencia de calor en un medio poroso saturado, tanto en fase fluida como en fase sólida. Se analizó el comportamiento de termosifones activos. Se efectuó la formulación matemática del problema, se mostró la solución a las ecuaciones diferenciales que se obtienen y se detallaron los procedimientos para el diseño de sistemas de termosifones.

Se apreció que la capacidad de transferencia de calor de los termosifones no es compatible con los fenómenos de flujo de agua en suelos en los que el calor aportado por el agua que fluye es significativo.

Se concluyó que el control del flujo requiere el empleo de dos sistemas complementarios: una barrera hidráulica pasiva que controle el caudal pasante sumada a un sistema de máquinas térmicas capaces de congelar el suelo mientras circula el flujo remanente que no es retenido por la barrera pasiva.

Como ejemplo de barrera pasiva se describieron las barreras de geomembranas. Se presentaron ejemplos de su aplicación a climas fríos, se describieron los conceptos asociados a la selección de geomembranas para control de fluidos y se presentaron los elementos básicos para su predimensionamiento. También se describieron los requisitos mínimos para su correcta instalación.

Estos conceptos generales fueron aplicados al problema del lago Boeckella. Este lago sufrió la ablación natural de una de sus márgenes, a consecuencia de la cual perdió un importante volumen de agua en un corto tiempo. La disminución del espesor del cuerpo de agua trajo aparejado un cambio de comportamiento del lago, que pasó de comportarse como profundo (aguas líquidas permanentes) a poco profundo (congelamiento total en invierno). Este cambio de comportamiento interrumpió el suministro de agua a la Base y desencadenó el problema.

Se describieron las obras ejecutadas por el Ejército Argentino para estabilizar la margen. Estas obras incluyeron la construcción de un dique artificial con materiales granulares y la instalación de termosifones de convección líquida construidos en la propia base. La solución resultó ser eficiente a corto plazo, puesto que se recuperó gran parte del nivel del lago. Sin embargo, con el paso del tiempo comenzaron a producirse sistemas de talik cerrados y nuevas filtraciones, por lo que el problema no quedó completamente resuelto.

Se aplicaron las expresiones de transferencia de calor y diseño de termosifones a la solución implementada en la Base Esperanza, y se concluyó que si el suelo está congelado y el flujo de agua es nulo, la cantidad de calor que debe intercambiarse para mantener el sistema estable es moderada y manejable con los termosifones instalados.

Se apreció también que, si por cualquier motivo se produce una brecha de agua, el calor convectivo aportado por el flujo es un orden de magnitud superior al que puede ser extraído por termosifones líquidos de convección natural, por lo que se requiere una máquina térmica mucho más robusta para estabilizar el proceso.

Los cálculos indican que, en el caso del Lago Boeckella, el congelamiento de la margen bajo flujo pasante requiere una cantidad no razonable de termosifones. En cambio, si se coloca una geomembrana que actúe como barrera pasiva, el sistema puede recuperarse de un descongelamiento parcial del suelo con una instalación moderada de termosifones.

La aplicación de geomembranas para este propósito es bien conocida en términos generales, pero nunca fue aplicada en Argentina en combinación con termosifones. Para demostrar su viabilidad, se predimensionó la geomembrana en función de los datos geológicos, geotécnicos y geométricos del proyecto. Se probó que una geomembrana disponible en el mercado resiste las solicitudes generadas por el contacto con los suelos gruesos y angulosos del sitio bajo las condiciones imperantes de clima y medio ambiente.

Este trabajo es sólo una introducción al comportamiento de los suelos congelados y al diseño de termosifones para la generación de barreras hidráulicas con suelo congelado. El tema requiere un importante esfuerzo de investigación aplicada que permita calibrar las correlaciones, fórmulas empíricas y otras variables de diseño a las condiciones particulares de las bases antárticas argentinas.

Estas tecnologías tienen aplicación en Argentina fuera del continente Antártico. En efecto, el problema del manejo de agua en suelos congelados afecta también a muchos proyectos mi, bases militares y estaciones de investigación ubicadas en alta montaña en la Cordillera de Los Andes, donde el manejo del agua puede ser tan crítico como lo es en la Base Esperanza.

## REFERENCIAS

- Alaska Department of Transportation and Public Facilities (2003). "Alaska Field Guide for Soil Classification".
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004). "Frozen Ground Engineering". ASCE, Ch 1-4 and 9.
- Arenson, L.U., "Unstable alpine permafrost: A potentially important natural hazard – variations of geotechnical behavior with time and temperature". Swiss federal institute of technology of Zurich.
- Bathurst, R. J., Rowe, R. K., Zeeb, B. and Reimer, K. (2005). "A geocomposite barrier for hydrocarbon containment in the Arctic". International Journal of Geoengineering Case Histories, Vol. 1, p.18 – 34.
- Beck, A., Smith, M.E., Sample, K. (2009). "Geomembranes for tailing impoundments". The Mining Record.
- Bockheim, J. G. (2005). "International Workshop on Antarctic Permafrost and Soils". National Science Foundation, Office of Polar Programs, Antarctic Section, 1-84.
- Bowman, E. T., Saga, K. and Drummond, T. W. (2000). "Particle Shape Characterisation using Fourier Analysis". CUED/D-SoWTR315.
- Burgesas, J. M., Tayloarn, D., Allen V. (1985). "Ground temperature studies of permafrost growth at a drained lake site, Mackenzie Delta". Earth Physics Branch, No. 969.
- Cherkauer, K. A., Bowling, L. C., Lettenmaier, D. P. (2002). "Variable infiltration capacity cold land process model updates". Global and Planetary Change, Vol 38, 151–159.
- Claussen, M. (1993). "Estimation of regional heat and moisture fluxes in homogeneous terrain with bluff roughness elements". Journal of Hydrology, N°166, 353-369
- Collins, P. A., Orio, C.D., Smiriglio, S. (2002). "Geothermal Heat Pump Manual". NYC Department of Design and Construction.
- Dilley, L. M., Hulse, L. (2006). "Foundation Design of Wind Turbines in Southwestern Alaska, a Case Study". The artic energy summit.
- Ermolin E. (2003)."Primera experiencia en diseño y construcción de un dique en permafrost antártico: Lago Boeckella, Bahía Esperanza". Contribución del Instituto Antártico Argentino, No 537.
- Ferrell S.M., (2010)." Rail Embankment Stabilization on Permafrost – Global Experiences"
- Gao, H., Bohn, T. J., Podest, E., McDonald, K. C. (2011). "On the causes of the shrinking of Lake Chad". Environ. Res. Lett. 6 (7pp)
- Geosynthetic Institute (1995)."Cold Weather Seaming of Geomembranes".
- Geosynthetic Institute (2002). "Test Methods and Properties for Nonwoven Geotextiles Used as Protection (or Cushioning) Materials". Geosynthetics International , Vol. 3, No. 5, 605-628.
- Giroud J.P. and Bonaparte R., "Leakage Through Liners Constructed with Geomembranes, Part I: Geomembrane Liners", Geotextiles and Geomembranes, 8, 1: 27-67, 1989.
- Giroud J.P., "Impermeability: The Myth and a Rational Approach", Proceedings of the International Conference on Geomembranes, Denver, USA, 1:157-162, 1984.
- Giroud J.P., Badu-Tweneboah K. and Soderman K.L., "Evaluation of Landfill Liners", Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5-9 September 1994.
- Giroud J.P., Khire M.V., and Soderman K.L., "Liquid Migration Through Defects in a Geomembrane Overlain and Underlain by Permeable Media", Geosynthetics International, Vol. 4, Nos. 3-4, pp.293-321, 1997.
- Giroud, J.P. and Soderman K.L.(1995). "Comparison of geomembranes subjected to differential settlement". Geosynthetics International , Vol. 2, No. 6, 953-969.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K. and Soderman, K.L.(1995). "Theoretical analysis of geomembrane puncture". Geosynthetics International , Vol. 2, No. 6, 1019-1048.
- Giroud, J.P., Pelte, T. and Bathurst R.J. (1995). "Uplift of geomembranes by wind "Geosynthetics International , Vol. 2, No. 6, 897-952.
- Giroud, J.P., Soderman K.L, Pelte, T. and Beech J.F. (1995). "Design Method to Prevent Geomembrane Failure in Tank Corners". Geosynthetics International , Vol. 2, No. 6, 971-1018.
- Goodrich, L. E. (1982). "The influence of snow cover on the ground thermal regime". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19, 421-432.
- Gurney, S. D. (1998). "Aspects of the genesis and geomorphology of pingos: perennial permafrost mounds, Progress in Physical Geography". Volumen 2, 307-324.
- Holubec, I. (2008). "Flat Loop Thermosyphon Foundations in Warm Permafrost". Government of the NT Asset Management Division Public Works and Services.
- Johansen, O (1975). "Thermal conductivity of soils." Ph.D. thesis. Trondheim, Norway
- Kersten, M. S. (1949). "Thermal properties of soils." Minneapolis: Engineering Experiment Station, University of Minnesota.
- Koerner, R. M., Wilson-Fahmy, R. F. y Narejo, D. (1996). "Puncture protection of geomembranas, Part III: Examples". Geosynthetics International , Vol. 3, No. 5, 655-675.
- Lackner, R., Amon, A. y Lagger, H. (2005). "Artificial Ground Freezing of Fully Saturated Soil: Thermal Problem". Journal of engineering mechanics, 211-220.
- Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Froio, F., Rinolfi, A., Jamiolkowski, M. (2006). "Stress-strain-strength behaviour of undisturbed and reconstituted gravelly soil samples". Rivista Italiana Di Geotecnica, 9-27.
- M. A. dos Santos Bernardes (1992). " Developments in heat transfer". Janeza Trdine 9, Rijeka, Croatia, 91-115.
- Mahjoub, S. and Mahtabroshan A. (2008)." Numerical Simulation of a Conventional Heat Pipe".World Academy of Science, Engineering and Technology 39.
- Martín-Serrano, A., Montes, M., Nozal, F. y del Valle, R. (2005). "Geomorfología de la Costa austral de Bahía Esperanza (Península Antártica)". Geogaceta, 38, 95-98.
- McFadden, T. (2001). "Design manual for stabilizing foundations on permafrost". Permafrost Technology Fundation.
- Montes, M., Martín-Serrano, A., Nozal, F. y del Valle, R. (2005). "Geología de la Costa austral de Bahía Esperanza (Península Antártica)". Geogaceta, 35, 91-94.
- Montes, M., Martín-Serrano, A., Nozal, F. y del Valle, R. (2007). "Mapa geológico 1:10.000 del NE de la península de Tabarín (Bahía Esperanza, Península Antártica)". VI Simposio Argentino y III Latino Americano sobre Investigaciones Antárticas.
- Narejo, D. B. (1995). "Three levels of geomembrane puncture protection". Geosynthetics International , Vol. 2, No. 4, 765-769.
- Narejo, D., Koerner, R. M. y Wilson-Fahmy, R. F. (1996): "Puncture protection of geomembranas, Part II: Experimental". Geosynthetics International , Vol. 3, No. 5, 629-653.
- O'Connors, T. R., Kang, D. S. and Wells, R. (1986). "Thermodynamic Parameters Are Sequence-dependent for the Supercoil-induced B to Z Transition in Recombinant Plasmids". The jurnal of biological chemistry, Vol 261, October 5, pp 13302-13308.
- Peggs, I. D. (2003). "Geomembrane and liner durability: Contributing factors and the status quo". I-Corp International, inc.
- Pimentel, E., Sres, A. y Anagnostou, G. (2007). "Modelling of ground freezing in tunnelling". Taylor & Francis Group , 331-336.

- Prigent, C., Aires, F. and Rossow, W. B. (2003). "Land surface skin temperatures from a combined analysis of microwave and infrared satellite observations for an all-weather evaluation of the differences between air and skin temperatures". *Journal of geophysical research*, Vol. 108, Nº D10.
- Reddy, D. V. and (Butul, B.) (1999). "A comprehensive literature review of liner failures and longevity". Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida.
- Romanovsky, V. E., Gruber, S. Instanes, A. Jin, H., Marchenko, S. S., Smith, S. L., Trombotto, D. and Walter, K. M. (2007) "Frozen Ground". *Global outlook for ice and snow*, 182-200.
- Wagner, A. M., Zarling, J. P., Yarmak, E. (2001). "Unique Thermosyphon Roadway Test Site". *Geo2010*.
- Watts, C.J., Chehbouni, A., Rodriguez, J.-C. Kerr, Y.H., Hartogensis, O., de Bruin, H. A. R. (2000). "Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico". *Agricultural and Forest Meteorology* 105 (2000) 81–89.
- Webb, B. W. and Walling, D. E. (1992). "Long term water temperature behavior and trends in a Devon, UK, river system". *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, Vol 37,6,12.
- Williams, J. R. (1996). "Ground Water in permafrost regions of Alaska".
- Wilson-Fahmy, R. F., Narejo, D. y Koerner, R. M. (1996) "Puncture protection of geomembranas, Part I: Theory".
- WU Cun-zhen, VAN Yang, QIN Yue-hui (1999)." Numerical investigation on the phase change of water saturated porous media with thermosyphon". ISSN 1009- 3095 *Journal of Zhejiang University (SCIENCE)*, Vol. 1 ,No.2,P. 129- 135.
- Yermolin, E. y Silva Busso, A. (2007). "Desarrollo de Termokarst y aguas subterráneas en Bahía Esperanza, península antártica". VI Simposio Argentino y III Latinoamericano sobre investigaciones antárticas.
- Zanzinger, H. (1999). "Efficiency of Geosynthetic Protection Layers for Geomembrane Liners: Performance in a Large-Scale Model test". *Geosynthetics International* , Vol. 6, No. 4, 303-317.
- Zarling, J. P. and Haynes, F. D. (1985). "Thermosyphon devices and Slab-on-grade fundations design". State of Alaska Department of transportation and public facilities, Report No. AK-RD-86-16.
- Zarling, J. P., Hansen, P. and Koziseki, L. (1996). "Design and performance experience of fundations stabilized with thermosyphons". *Nordicana* No 54, 365-370.
- Zhang, G. and Horne, W. T.. "Applications of Numerical Thermal Analysis in Engineering Designs and Evaluations for Northern Mines". Government of the NT Asset Management Division Public Works and Services.