

SPARE

PRESAS DE GOMA

RUBBER DAMS

PRESAS INFLABLES

INTRODUCCIÓN
A
LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS

Marzo del año 2.011
Revisión R 6

INDICE

CAP	CONTENIDO	Página
1	NUEVO ENFOQUE EN EL MANEJO DEL AGUA	
1.1	UNA ÓPTICA NUEVA SOBRE EL USO DEL AGUA	07
2	BREVE HISTORIA DE LOS DIQUES INFLABLES	
2.1	NACIMIENTO DE LA IDEA	08
2.2	DEL LLENADO CON AGUA AL LLENADO CON AIRE	08
2.3	PRIMERAS INVESTIGACIONES EN JAPÓN	10
3	APLICACIONES MÁS COMUNES	
3.1	UTILIZACIONES DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS	11
3.2	SUSTITUCIÓN DE COMPUERTAS DE MADERA Y/O ACERO	11
3.3	SUSTITUCIÓN DE COMPUERTAS DE GOMA	12
3.4	RECRECIMIENTO DE EMBALSES EXISTENTES	12
3.5	INFLADO Y DESINFLADO FRECUENTE	12
3.6	USO ESPORÁDICO	12
3.7	BARRERA DE MAREAS	12
4	COMPUERTA NEUMÁTICA O RÍGIDA	
4.1	COMPARACIÓN ENTRE COMPUERTA NEUMÁTICA Y COMPUERTA RÍGIDA	14
4.2	LOSA DE ANCLAJE	14
4.3	ESTRIBOS	14
4.4	PILARES INTERMEDIOS	15
4.5	MANTENIMIENTO	15
4.6	SEGURIDAD	16

5	DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	
5.1	DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	18
5.2	DOBLE LÍNEA DE ANCLAJE	21
5.3	EQUIPAMIENTO ASOCIADO A UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	23
6	LA LÁMINA DE GOMA	
6.1	ESTRUCTURA DE LA LÁMINA DE GOMA	24
6.2	EL CAUCHO	25
6.3	EL TEJIDO RESISTENTE	29
7	SISTEMAS DE SEGURIDAD Y CONTROL	
7.1	SISTEMA MECÁNICO DE AUTO DESINFLADO AUTOMÁTICO	31
7.2	EL MADS SISTEMA FLOTADOR	31
7.3	EL MADS SISTEMA BALDE	33
7.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	35
8	OPERACIÓN	
8.1	INFLADO Y DESINFLADO MANUAL	37
8.2	INFLADO Y DESINFLADO AUTOMÁTICO	38
8.3	TIEMPOS DE INFLADO Y DESINFLADO	38
8.4	INFLADO EXCESIVO	39
8.5	MANTENIMIENTO	39
8.6	NECESIDADES ESPECIALES DE INSPECCIÓN	40
8.7	DAÑOS EN EL CUERPO DE GOMA	40
8.8	LIBRO DE INSTRUCCIONES	40
9	CONDICIONES AMBIENTALES DE OPERACIÓN	
9.1	BAJAS TEMPERATURAS	41

9.2	TEMPERATURAS DIARIAS EXTREMAS	41
9.3	CURSOS DE AGUA CON ARRASTRES DE HIELO	42
9.4	RÍOS CON INUNDACIONES FRECUENTES	43
9.5	AGUAS CONTAMINADAS	43
9.6	ARRASTRES IMPORTANTES	44
9.7	CURSOS DE AGUA CON ALTA SEDIMENTACIÓN	44
9.8	INSTALACIÓN EN ÁREAS NO ELECTRIFICADAS	44
9.9	INSTALACIÓN EN ÁREAS INACCESIBLES O SIN ATENCIÓN	44
9.10	RESPECTO AL PAISAJE NATURAL	45
10	DURABILIDAD	
10.1	DAÑOS POR ARRASTRES	46
10.2	GRAVA Y ROCAS	46
10.3	TRONCOS Y ÁRBOLES	46
10.4	SEDIMENTOS	47
10.5	VIDA ÚTIL DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	47
10.6	ESTABILIDAD DE LA CIMENTACIÓN	48
10.7	VANDALISMO	48
11	CONDICIONAMIENTOS HIDRODINÁMICOS	
11.1	OVERTOPPING MÁXIMO	49
11.2	DATOS DEL CURSO DE AGUA NECESARIOS PARA EL DISEÑO	49
11.3	PRESIÓN DEL AIRE DE INFLADO	49
11.4	COEFICIENTE DE DESCARGA	50
11.5	INFLUENCIA DEL OVERTOPPING EN LA ALTURA DE LA COMPUERTA	51
11.6	INFLUENCIA DEL OVERTOPPING EN LA PRESIÓN DE LA COMPUERTA	51
11.7	EL EFECTO V	52
11.8	OSCILACIÓN Y VIBRACIONES	52
11.9	MAQUETAS DE ENSAYO	52

12	PROBLEMAS COMUNES A TODAS LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS	
12.1	INCONVENIENTES HIDRODINÁMICOS DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS CUANDO PERMANECEN DESINFLADAS	53
12.2	INCONVENIENTES GENERADOS POR LA DOBLE LÍNEA DE ANCLAJE	58
12.3	INCONVENIENTES HIDRODINÁMICOS DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS CUANDO TRABAJAN CON OVERTOPPING	60
12.4	EL PROBLEMA DE LAS SOBRE PRESIONES	62
13	ANTEPROYECTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	
13.1	CAPACIDAD TÉCNICA NECESARIA	67
13.2	COSTES EN RELACIÓN CON OTRAS ALTERNATIVAS	67
13.3	DESARROLLO DE UN ANTEPROYECTO	68
13.4	ALTURA DE LA COMPUERTA	68
13.5	LONGITUD DE LA COMPUERTA	68
13.6	PENDIENTE DE LOS ESTRIBOS	68
13.7	CANAL DE DESVÍO	69
13.8	CASETA DE CONTROL	69
13.9	ESCALA DE PECES	70
13.10	ATAGUÍA DESMONTABLE	70
13.11	ANTEPROYECTO DE LA OBRA CIVIL	70
14	CÁLCULO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA	
14.1	LÍNEAS Y COTAS DE NIVEL FUNDAMENTALES	71
14.2	DIMENSIONAMIENTO DE LA LOSA Y ESTRIBOS	72
14.3	CÁLCULO DE LA LOSA	73
14.4	CÁLCULO DE LA TENSIÓN EN LA LÁMINA DE GOMA	74
14.5	CÁLCULO DE LOS TORNILLOS DE ANCLAJE	75
14.6	CÁLCULO DE LA PLETINA DE EXPANSIÓN	76
14.7	TORNILLOS ANCLADOS CON RESINA	77

14.8	RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	78
14.9	CÁLCULO DE LAS PLACAS CLAMPING	80
14.10	CÁLCULO DEL TIEMPO DE INFLADO	80
14.11	CÁLCULO DEL TIEMPO DE DESINFLADO	83
14.12	COMPROBACIONES EN LOS CORNERS	85
15	DESARROLLO DEL PROYECTO	
15.1	PLAZO DE ENTREGA	87
15.2	EXPEDICIÓN DE LOS EQUIPOS	87
15.3	EL MONTAJE	88
15.4	EQUIPO TÉCNICO Y HUMANO NECESARIO	91
15.5	DURACIÓN DEL MONTAJE	91
15.6	ESTIMACIÓN DEL PRECIO	92

CAPÍTULO 1

NUEVO ENFOQUE EN EL MANEJO DEL AGUA

1.1.- UNA ÓPTICA NUEVA SOBRE EL USO DEL AGUA

Desde una óptica tradicional parece contradictorio y causa inseguridad que una presa o una compuerta hidráulica pueda estar fabricada en goma e inflada con aire. Sin embargo, contrariamente a resultar una debilidad, la naturaleza flexible de las compuertas inflables es la fuente de muchas de sus ventajas. Así mismo, la calidad de los materiales y lo avanzado del diseño de las compuertas de goma convierten el concepto en una alternativa viable a los sistemas convencionales de gestión de los recursos hídricos.

El peso y la energía cinética del agua la convierten en uno de los principales retos de la ingeniería civil. El método de control habitual, que consiste en enfrentarse a la fuerza del agua “cara a cara” mediante una mayor rigidez y resistencia, no constituye ni la única ni necesariamente la mejor alternativa.

Las cajas de peces de alta mar (“Hi-Seas Fish Cage”) empleadas en acuicultura marina es una muestra palpable de los beneficios que implica el tratar de vivir con la fuerza del agua en vez de enfrentarla. La industria de la cría de pescados en la mar ha utilizado tradicionalmente cajas rígidas de madera, metal y aluminio. Dicho tipo de estructuras rígidas necesitan estar localizadas en zonas protegidas y sufren roturas esporádicas con mala mar, con la consiguiente pérdida de stocks.

La actual solución a este problema consiste en el empleo de una estructura flexible de goma que absorbe la energía y que sirve de soporte a las redes del pescado. Esta solución está actualmente aceptada en todo el mundo y está revolucionando esta industria, ya que permite su colocación en alta mar y tiene mayor capacidad de almacenamiento que las soluciones anteriores.

Las compuertas de goma no son cajas para peces, pero el principio que emplean es muy semejante: estar en armonía con el entorno para constituir una alternativa práctica a las soluciones convencionales.

La postura tradicional frente a los nuevos materiales o métodos de trabajo es normalmente escéptica, pero no debería incluir un rechazo inmediato. SPARE con este documento no trata de vender presas de goma, sino de aportar información para permitir que el producto se promocióne a sí mismo.

CAPÍTULO 2

BREVE HISTORIA DE LOS DIQUES INFLABLES

2.1.- NACIMIENTO DE LA IDEA.

La compuerta inflable fue desarrollada para satisfacer una necesidad que no quedaba cubierta por otros sistemas. Norman Imbertson, ingeniero jefe de operaciones del Departamento de Aguas y Electricidad de la Ciudad de Los Ángeles, concibió la idea de la Compuerta Inflable Imbertson (Fabridam) en 1956.

En aquella época en Los Ángeles se empleaban tabloneros removibles y compuertas de acero para desviar cursos de agua a campos adyacentes con el objeto de recargar la capa freática por filtración. Se necesitaba mano de obra para abrir las compuertas de tabloneros y el retraso en su apertura generaba con cierta frecuencia inundaciones y problemas de arrastre de compuertas barridas por la fuerza del agua, e incluso accidentes a los trabajadores. Además, los daños de las inundaciones obligaban a frecuentes sustituciones de los tabloneros de las compuertas y se perdían notables cantidades de agua.

La solución al problema consistió en el empleo de un cuerpo de goma anclado a una cimentación dentro de un cauce de agua. Dicho cuerpo de goma podía elevarse y descender mediante la introducción o extracción de agua. El material empleado necesitaba ser capaz de resistir la tensión derivada de mantener un desnivel de agua, ser resistente a la abrasión y penetración y ser lo suficientemente flexible como para doblarse y quedar plano sobre el fondo del cauce cuando no estuviera en uso.

2.2.- DEL LLENADO CON AGUA AL LLENADO CON AIRE.

Aunque las primeras compuertas inflables utilizaban agua como medio de inflado, se comprobó casi desde el principio que era mejor alternativa el llenado con aire; y por ello las compuertas neumáticas se han convertido en la norma.

Se emplea aire por las razones siguientes:

- Las sustancias disueltas en agua pueden provocar la corrosión y el bloqueo de las tuberías salvo que se disponga de agua limpia en circuito cerrado.
- En tiempo muy frío existe riesgo de congelación del agua tanto en el interior del cuerpo de goma de la presa como en las tuberías de llenado.

- Aunque en algunos aspectos exige mayor tecnología, tanto el diseño como el sistema constructivo son más simples con aire.
- Las compuertas infladas con agua necesitan mayor número de tuberías y de mayor diámetro, además de un depósito nodriza para el agua de llenado, para prevenir que el caudal del río en que está instalada pueda ser insuficiente o tenga agua contaminada.
- Desde un punto de vista operacional, las compuertas neumáticas necesitan mucho menos tiempo tanto para su inflado como para su desinflado (entre 5 y 10 veces menos), por lo que son más seguras ante una crecida repentina o inesperada.
- La cantidad de lámina de goma empleada en la fabricación de una compuerta inflada con agua es mayor, ya que la relación entre perímetro y altura es 4.8 en vez de 3.5 para una de aire.
- Necesitan una cimentación de mayores dimensiones, para acomodar en el lecho del río la goma cuando la presa se desinflen y descansen sobre la misma.

Entre las desventajas que presentan las compuertas neumáticas respecto de las infladas con agua, hay dos que se deben mencionar:

- La oscilación del cuerpo de goma de una compuerta neumática; que es creciente a medida que se incrementa la altura de la compuerta y la cantidad de agua (overtopping) que pasa por encima de la misma
- El efecto V que presenta la compuerta neumática cuando se desinfla, efecto que no existe en las compuertas infladas con agua. Este efecto se estudia en capítulos posteriores.

Las oscilaciones también se da en las compuertas infladas por agua, pero se da en menor medida, porque tienen mayor inercia a causa de la masa aportada por el agua de llenado y porque su forma ovalada y achatada disminuye el espacio de aire en el trasdós de la compuerta.

La baja intensidad o ausencia de vibraciones en estos equipos permite a muchos constructores con bajo nivel tecnológico seguir actualmente fabricando y suministrando compuertas infladas con agua. En su gran mayoría, casi todos ellos, están localizados en la Europa del Este y en China, donde la tecnología está menos desarrollada; y se trata de equipos de calidad muy deficiente.

También existen algunas aplicaciones muy específicas en las que se ha demostrado que es conveniente inflar una parte con agua y el resto con aire. Nosotros, en este escrito nos referiremos únicamente a las compuertas infladas con aire o compuertas neumáticas.

2.3.- PRIMERAS INVESTIGACIONES EN JAPÓN.

Debido a los tifones y las inundaciones que azotan con frecuencia a Japón, se hacía imprescindible que los sistemas de control instalados en sus cursos fluviales generasen el mínimo obstáculo posible a las crecidas cuando éstas tuvieran lugar. Cuando las márgenes del río Tama de Tokio se desbordaron en 1974 por causa de una compuerta fija, el gobierno japonés ordenó estudiar y redactar un informe en relación con los diferentes métodos existentes para el control de los cursos de agua.

Las compuertas neumáticas recibieron una cálida acogida en cuanto a seguridad debido a su mecanismo automático de desinflado para situaciones de emergencia y a que, en caso de avenida, permiten el aprovechamiento del 100% de la sección útil del curso de agua en el que están instaladas. También quedaron claras sus ventajas en cuanto a costes de mantenimiento y en cuanto a su menor incidencia respecto a turbulencias en el curso de agua que controlan, gracias a que no generan discontinuidad alguna ni en el flujo del agua ni en el cauce.

El grupo japonés Sumitomo Electric adquirió la patente y todos los derechos de la compuerta Fabridam desarrollada por Imbertson en California y comenzó a construirlas e instalarlas en Japón. Unos años más tarde, el primer fabricante mundial de productos de caucho, la también japonesa corporación Bridgestone, partiendo de tecnología propia, desarrolló y puso en el mercado un nuevo modelo de compuerta neumática, que después sería el más difundido por todo el mundo.

Las primeras compuertas neumáticas presentaron resultados dudosos, con problemas en el cuerpo de goma debidos a desgaste del tejido, daños por fatiga de la goma, erosiones, pérdida de propiedades del caucho, sobre presiones por calentamiento, etc. Fueron precisos largos años de fuertes inversiones en investigación aplicada, en desarrollo de nuevos materiales y en tecnología, para llegar a construir compuertas de goma capaces de desarrollar todo su potencial.

Además del desarrollo de nuevos materiales, cuando se desarrolló la tecnología de la goma para las tuberías submarinas de petróleo, se obtuvo una idea mucho más precisa de las fuerzas que actúan sobre las compuertas inflables mediante maquetas y modelos a escala real. El tejido desarrollado durante esta etapa, junto a los avances en el diseño de las compuertas, hicieron posible que estos equipos se tomaran como alternativa válida para la solución de numerosos problemas primero en Japón y luego en el resto del mundo.

CAPÍTULO 3

APLICACIONES MÁS COMUNES

3.1.- UTILIZACIONES DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS

Las compuertas neumáticas han sido y están siendo empleadas con éxito en multitud de aplicaciones en todo el mundo. El número de aplicaciones está en constante aumento, ya que se adaptan perfectamente a las necesidades de los especialistas en control de cursos de agua.

Actualmente, las aplicaciones más habituales son las siguientes:

- Creación de estanques de recreo.
- Represado de agua para alimentación de turbinas en centrales hidroeléctricas de baja y alta potencia, minicentrales, etc..
- Suministro de agua cruda a plantas potabilizadoras.
- Regulación muy precisa de la cota del espejo de agua en un embalse.
- Represado de agua destinada a regadío.
- Aliviadero de embalses.
- Compuertas de vaciado de sedimentos.
- Retención, regulación y tratamiento de aguas residuales.
- Recarga de agua de la capa freática.

Hay otras aplicaciones menos habituales pero también muy extendidas por todo el mundo y con funcionamiento plenamente contrastado, que a continuación vamos a comentar. En estos casos el proyecto exige, en general, un estudio más cuidadoso y pormenorizado.

3.2.- SUSTITUCIÓN DE COMPUERTAS DE MADERA Y/O ACERO

Las compuertas neumáticas pueden adaptar su diseño a casi cualquier configuración existente, permitiendo el cambio de tipo de compuerta con un mínimo de modificación estructural. Numerosas instalaciones en servicio en USA y en otras partes del mundo no son sino sustituciones de sistemas de compuertas rígidas que resultaban inoperantes o excesivamente caros de mantener. La sustitución requiere la revisión y posible remodelación de la losa y estribos de amarre, la instalación de placas embebidas en la cimentación antigua, la adición de las tuberías y el montaje del cuerpo de goma.

3.3.- SUSTITUCIÓN DE COMPUERTAS DE GOMA

En el mundo se han llevado a cabo numerosas sustituciones de compuertas de goma infladas con agua. En estos casos se retiran tanto el cuerpo de goma original como la línea de anclaje existente y se coloca un conjunto de anclajes nuevo que sirve de base a un nuevo cuerpo de goma. Las tuberías de agua de la instalación existente sirven para su conexión a un compresor de aire. También se han sustituido varios cuerpos de goma de compuertas neumáticas deterioradas; aunque esto es menos frecuente.

3.4.- RECRECIMIENTO DE EMBALSES EXISTENTES

Las compuertas neumáticas también se utilizan para incrementar la altura de presas fijas de hormigón ya existentes para incrementar la capacidad del vaso del embalse correspondiente. Su facilidad de instalación las convierte en un medio especialmente apto para incrementar la altura hidrostática de embalses ya construidos o para mejorar el rendimiento de centrales hidroeléctricas o incrementar la capacidad del vaso de un pantano.

3.5.- INFLADO Y DESINFLADO FRECUENTE

El inflado y desinflado frecuente de la compuerta no provoca fatiga en el cuerpo de goma. Las compuertas neumáticas no tienen partes mecánicas móviles salvo el compresor de aire, que tiene un desgaste y un mantenimiento muy reducido.

Con respecto a la fatiga del cuerpo de goma en sí, los resultados de numerosos ensayos, permiten afirmar que 400.000 ciclos de carga no producen una reducción apreciable en las características de la lámina de goma.

3.6.- USO ESPORÁDICO

Las compuertas neumáticas son la mejor alternativa cuando el proyecto prevé un uso infrecuente de las mismas. Existen numerosos ejemplos de compuertas que sólo son utilizadas de manera estacional en la primavera y verano, para proveer agua para el regadío. Los problemas de sedimentos que se generan en las compuertas rígidas cuando permanecen inactivas durante largo tiempo no representan ningún problema para las compuertas neumáticas, ya que el sedimento depositado sobre ellas se elimina durante el inflado.

3.7.- BARRERA DE MAREAS

Existen en servicio un número considerable de compuertas neumáticas trabajando como barreras de mareas. Estas compuertas son especiales, ya que tienen algunas diferencias y especificidades propias que necesitan ser cuidadosamente estudiadas y a veces, también ensayadas en modelos reducidos.

Al soportar presión de agua a ambos lados, la compuerta necesita de una doble línea exterior de amarres a ambos lados del cuerpo de goma para resistir el empuje del agua.

Cuando existe presencia de agua salada o salobre, los anclajes se construyen siempre en acero inoxidable. La naturaleza no corrosible de la goma la convierte en un excelente material para el funcionamiento en ambiente salado.

La mayor barrera de mareas del mundo tiene de 3 vanos de 8.50 m de altura x 90 m de longitud cada uno, y está instalada en los polders de Ramspol, en Holanda.

CAPÍTULO 4

COMPUERTA NEUMÁTICA O RÍGIDA

4.1.- COMPARACIÓN ENTRE COMPUERTA NEUMÁTICA Y COMPUERTA RÍGIDA

Dado que las compuertas neumáticas suponen un concepto poco conocido, vamos a intentar explicar algunas de sus características haciendo una comparación con un sistema que resulta más familiar, como es el sistema de las compuertas rígidas.

Lo que exponemos a continuación es aplicable a casi todas las compuertas rígidas existentes actualmente en el mercado, ya sean de acero, de hormigón y/ o de otros materiales.

4.2.- LOSA DE ANCLAJE

Algunas compuertas rígidas emplean mecanismos hidráulicos sumergidos y/o sistemas de limpieza de arrastres; además, todas necesitan mecanismos más o menos complejos para su operación y estructuras auxiliares para soportarlas cuando están abiertas. El peso propio de la compuerta y las cargas que las estructuras de soporte y los mecanismos de accionamiento transmiten a las cimentaciones hacen necesario que éstas sean más rígidas, sólidas y complicadas y deban ser mucho más resistentes y estar mejor ancladas que la sencilla losa de amarre de cualquier compuerta neumática.

En el diseño de las losas de anclaje de las compuertas neumáticas se examina su rigidez y el sifonado inferior, y se normalmente se calculan a vuelco. Por tanto, un aspecto notable de las compuertas neumáticas es su simplicidad en cuanto a necesidades de cimentación, en contraste con las compuertas rígidas, que generalmente necesitan de cimentaciones más resistentes, complicadas y costosas.

4.3.- ESTRIBOS

Una diferencia apreciable entre las compuertas rígidas y las de goma reside en que, mientras que las compuertas rígidas necesitan de estribos totalmente verticales, las compuertas neumáticas se adaptan a la geometría del talud de la ribera en donde van a ser colocadas.

Esta facilidad de adaptación se traduce en 4 importantes ventajas:

1.- Las compuertas que tienen los estribos verticales estorban al flujo natural del agua cuando se abren, modificando el régimen del mismo. El flujo turbulento que se genera aguas abajo puede erosionar seriamente el lecho del río y/ o sus márgenes, especialmente en caso de avenida.

2.- Los estribos inclinados necesitan menos elementos resistentes, menos refuerzos de acero y tienen un método constructivo más sencillo que los muros de contención verticales.

3.- Las pendientes naturales están más en armonía con la estética del río que las verticales, ya que su impacto visual es mucho menor. Esto es especialmente importante en proyectos en los que la preocupación por la estética esté presente.

4.- En caso de movimiento en la cimentación por asentamiento del terreno o por un movimiento sísmico, una compuerta rígida no puede seguir operando, pues no puede cerrarse si estaba abierta o abrirse si estaba cerrada.

4.4.- PILARES INTERMEDIOS

Un factor importante en la reducción de costes y simplificación de las cimentaciones de las compuertas de goma es la menor necesidad de estructuras intermedias para reducir la longitud de los vanos. Mientras que las compuertas rígidas difícilmente pueden tener luces de longitud superior a los 15/ 20 metros, una compuerta inflable puede cubrir fácilmente un vano de 50 metros sin necesidad de pilares u otras estructuras intermedias o de refuerzo.

Esta ausencia o reducción del número de pilares intermedios en cualquier sistema de compuertas neumáticas se traduce también en 4 importantes ventajas:

1.- Favorece que se mantenga el régimen laminar en el curso de agua, dejando que ésta fluya de forma natural, sin estorbos, con menores turbulencias, lo cual minimiza los problemas de erosión y las dimensiones de las escolleras.

2.- Impide que en los pilares intermedios se depositen basuras y arrastres de restos transportados por la corriente.

3.- El impacto paisajístico y medio ambiental es mínimo; y casi nulo cuando la compuerta está desinflada; porque permanece oculta dentro del cauce.

4.- Simplifica el diseño y reduce el coste de la losa de amarre.

4.5.- MANTENIMIENTO

Salvo los anclajes, que son anticorrosivos, las compuertas neumáticas no tienen grúas pórtico, cadenas, cables, tubos, cilindros oleohidráulicos, engranajes, ni ninguna otra pieza metálica, ni en reposo ni en movimiento; por lo que no necesitan engrase ni pintura. Se elimina, así mismo, el mantenimiento de los sistemas hidráulicos y/o

mecánicos de elevación. Por ello, comparativamente, sus costes de mantenimiento son considerablemente inferiores.

4.6.- SEGURIDAD

Desde el punto de vista de la seguridad en caso de avenida, debemos tener en cuenta lo siguiente:

1.- Las compuertas neumáticas se pueden desinflar muy fácilmente en todos los casos con seguridad absoluta, ya que, en caso de avería solo se precisa abrir una válvula y dejar escapar el aire.

2.- Si la tempestad que precede o acompaña a cualquier avenida cortase el suministro de energía eléctrica a la Cámara de Control, la compuerta cuenta con un dispositivo mecánico de desinflado automático de seguridad que funciona sin alimentación de corriente eléctrica. Las compuertas rígidas precisan de energía eléctrica para su manipulación, y en caso de fallo, se debe arrancar el grupo electrógeno (si existe y funciona) o acceder a los dispositivos manuales de emergencia, lo cual no siempre es posible.

3.- Para cerrar la compuerta, la operación es también muy sencilla. Basta arrancar la soplante de baja presión ($< 0,40 \text{ Kg/cm}^2$ según la altura de la compuerta) e inflarla hasta la presión consigna; o empalmar la manguera de un compresor de aire cualquiera en caso de corte en el suministro eléctrico.

4.- El cuerpo de goma presenta una notable flexibilidad a tracción y a compresión. Esto le permite a la compuerta neumática absorber pequeños asentamientos de las cimentaciones sin daño alguno, y permanecer igualmente sin daños durante cualquier movimiento sísmico. Los demás sistemas resultarían dañados en ambos casos.

Desde el punto de vista de seguridad operativa, podemos mencionar lo siguiente:

1.- Contrariamente a su imagen de fragilidad, los cuerpos de goma de las compuertas inflables son capaces de absorber la energía de impacto de rocas y árboles, convirtiéndolos en un accesorio especialmente adecuado para cursos de agua con sedimentos y/o con grandes cantidades de arrastres. Por ello, por su robustez y flexibilidad constituyen también una alternativa más segura que la correspondiente de compuertas rígidas convencionales.

2.- Es muy poco habitual que una compuerta neumática de buena calidad y bien instalada se llegue a perforar de forma accidental o fortuita (no intencionada); y aunque así ocurriera, en tal caso, la baja presión de inflado hace que sea necesario mucho tiempo para que ocurra una bajada significativa de su presión interior, lo que hace que sea muy remota la probabilidad de un desinflado total accidental de la compuerta y su consiguiente puesta fuera de servicio.

3.- Además, el sistema de sensores que habitualmente se instala (al menos en nuestras compuertas) detecta de inmediato cualquier pérdida de presión y el sistema de inflado añade el aire de reposición que se necesite, asegurando que la compuerta

se mantenga en su posición de trabajo aunque esté sufriendo pérdidas regulares de aire. En resumen, las pérdidas de aire son raras, el desinflado que provocan es muy lento, sus causas son extraordinarias y en los casos en que llega a ocurrir, generalmente no son una amenaza para que la compuerta pueda permanecer operativa.

4.- La reparación de pinchazos fortuitos, agujeros de bala, pequeños cortes y otros accidentes, siempre muy poco habituales, exigen un reducido tiempo de reparación (del orden de solo algunos minutos) y se puede programar la reparación correspondiente para llevarla a cabo cuando la puesta fuera de servicio de la compuerta genere menos problemas, aunque se retrase tal reparación varias semanas o meses.

5.- Finalmente, la presencia de hielo o las temperaturas muy bajas no suponen ningún problema para mantener operativa una compuerta neumática.

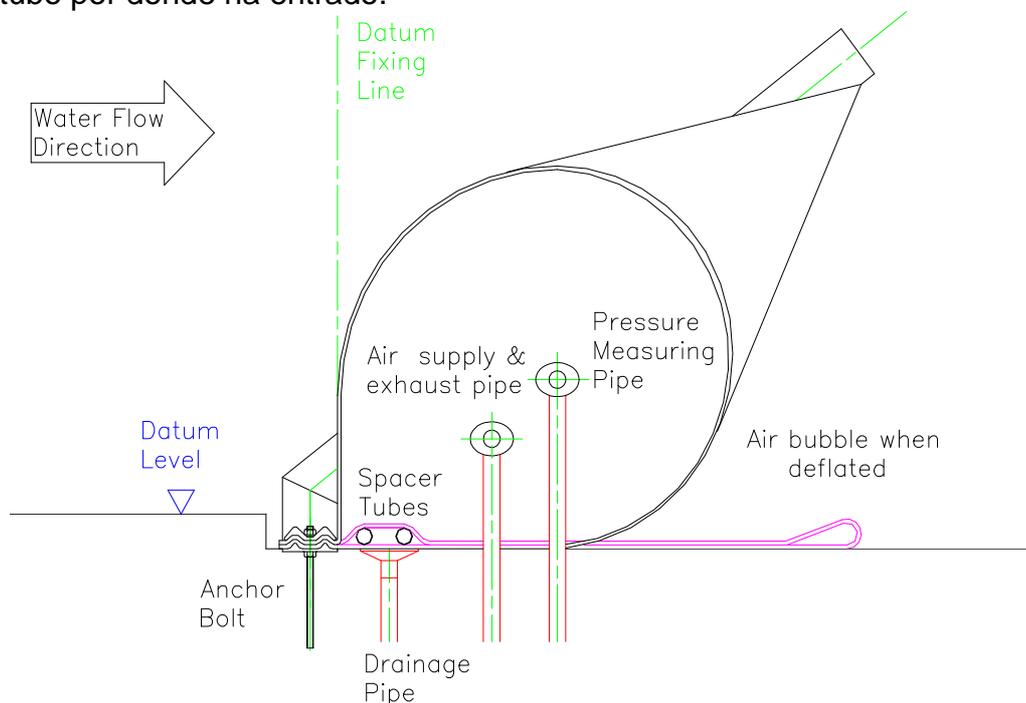
CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

5.1.- DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

La descripción más simple de una compuerta neumática es la de un tubo de goma sellado por sus extremos e instalado frente a un curso de agua, que se eleva mediante llenado con aire y desciende mediante vaciado del aire retenido en su interior.

Cuando arrancamos la soplante para inflar la compuerta, el aire accede al interior del cuerpo de goma por **el tubo de aire** (en el esquema, el tubo denominado Air supply & exhaust pipe), y cuando abrimos la válvula de desinflado, el aire sale al exterior por el mismo tubo por donde ha entrado.



La presión del aire en el tubo de inflado es siempre la suma de dos presiones: la presión estática que soporta el cuerpo de goma + la presión dinámica o altura cinética del aire cuando éste está en movimiento dentro del tubo, debida a la velocidad con que el aire se desplaza por el interior del mismo en caso de que nos encontremos inflando o desinflando la compuerta.

Por tanto, la lectura de la presión que se puede obtener en el tubo de aire NO siempre se corresponde con la presión estática real en el interior del cuerpo de goma en el momento del inflado.

Sin embargo, necesitamos poder controlar el valor de la presión estática en el interior del cuerpo de goma en numerosas ocasiones en las que el aire va a estar en movimiento en el tubo de aire. Por ejemplo:

- En las maniobras de inflado de la compuerta para saber cuando debemos detener el inflado.
- En las maniobras de regulación del nivel de agua embalsada para controlar el inflado o el desinflado parcial de la compuerta.
- En las maniobras de ajuste de la presión de funcionamiento para el control de posibles sobre presiones debidas a calentamiento por insolación o falta de presión por enfriamiento después de los progresivos desinflados de ajuste anteriores.
- Para detectar los incrementos o decrementos del caudal del río y del overtopping.
- Para gestionar los desinflados totales de emergencia por causa de una avenida.

En todos estos casos que se ponen como ejemplo, necesitamos conocer con exactitud el valor real de la presión estática en el interior del cuerpo de goma, y por esta razón se recurre a la instalación del **tubo de presión**, que es un tubo independiente (denominado en el dibujo Pressure Measuring Pipe) que comunica el interior del cuerpo de goma con la Cámara de Control, y nos permite conocer en todo momento su presión estática real.

Por otra parte, cuando inflamamos una compuerta, tanto para ponerla en servicio como para su regulación, el aire que empleamos en el inflado (generalmente muy húmedo a la orilla del río) normalmente tiene una temperatura muy superior a la del agua del cauce que tratamos de regular, por lo que este aire, al llegar al interior del cuerpo de goma (que está a la misma temperatura que el agua) se enfría rápidamente. El vapor de agua que dicho aire húmedo lleva disuelto, se condensa por efecto del enfriamiento; y el agua de condensación generada en los sucesivos inflados, permanecería indefinidamente en el interior del cuerpo de goma si no instalásemos un dispositivo de purga para el drenaje de esa agua. Ese es el objetivo del **tubo de drenaje** que aparece en el dibujo como Drainage pipe.

Otra particularidad que podemos observar en las compuertas neumáticas, es el llamado efecto V, que se produce cuando comenzamos a desinflar completamente la compuerta desde una posición de trabajo con el vaso del embalse lleno o medio lleno.

En los primeros momentos, cuando comienza el desinflado de una compuerta neumática, ésta no reduce nunca su altura de forma gradual en toda la anchura del cauce en que está instalada ni se desinfla con velocidad uniforme.

Por el contrario, habitualmente forma una o varias entallas en forma de V (llamado V Notch) tal como se refleja en la fotografía adjunta.



El peso del agua aplasta la parte superior del cuerpo de goma contra la parte inferior del mismo que permanece sobre la losa de cimentación, creando una o varias cavidades herméticas (señalada con una flecha roja en el caso de la foto) que impiden o dificultan al aire retenido en su interior que éste llegue hasta los estribos y alcance el fitting del tubo de aire para salir al exterior.

Para eliminar este efecto, que dificulta el normal desinflado de la compuerta, se instalan unas mangueras de caucho (spacer tubes) que impiden la hermeticidad de estas cavidades, y permiten que el aire atrapado en su interior alcance los estribos. Estas mangueras se llaman **tubos espaciadores** o separadores, y aparecen en el esquema anterior junto a la línea de anclaje entre ambas capas del cuerpo de goma desinflado (en color magenta).

Otra particularidad de las compuertas neumáticas es la **bolsa de aire** que se forma en el extremo de aguas abajo debido a la rigidez de la lámina de goma, que tiene gran importancia y que analizaremos en el capítulo siguiente.

Finalmente, debemos conocer dos parámetros importantes de cualquier compuerta neumática: el datum level y la datum fixing line.

- El datum level es la cota teórica del lecho del río que se toma como origen para medir la **altura efectiva** de la compuerta.
- La datum fixing line es la línea que marca la posición topográfica de la compuerta y a partir de esta línea se toman todas las dimensiones de la obra.

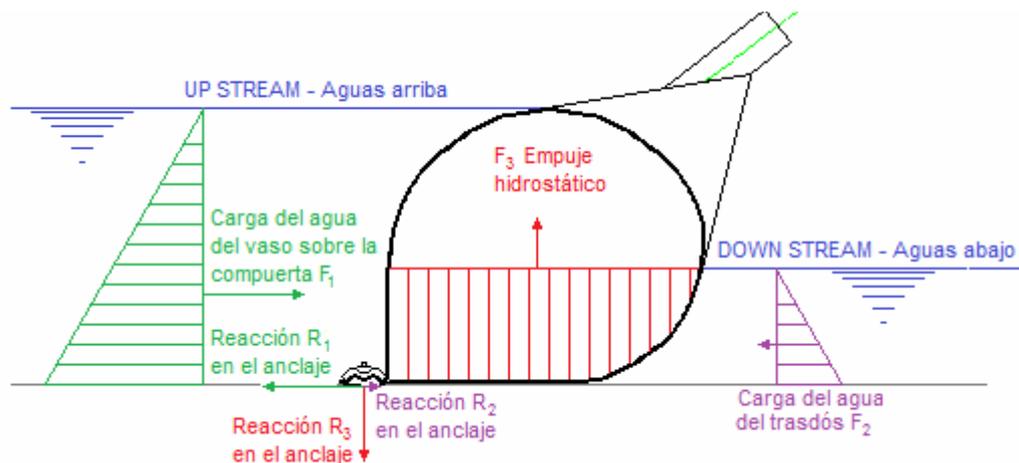
Cuando la compuerta se instala en el lecho de un cauce, se practica un receso hidráulico en la losa (generalmente de 100 mm) para proteger la compuerta y su sistema de anclaje de la acción erosiva de los arrastres del río. La cota de este receso se toma como cota de pie y es el origen que se utiliza para definir la **altura real** de la compuerta que es igual a la cota de coronación menos la cota de pie.

En los casos en que la compuerta está anclada sobre un dique a cota superior a la del lecho del río, no se construye este receso; y en tales casos, obviamente, la altura real de la compuerta coincide con su altura efectiva.

5.2.- DOBLE LÍNEA DE ANCLAJE

En numerosas ocasiones es preciso amarrar la compuerta a la losa con dos líneas de anclaje para conseguir una multiplicidad de propósitos (eliminar la flotación, controlar un alto overtopping, eliminar depósitos en el trasdós del RDB, presencia de flujo inverso, etc.). A modo de ejemplo, vamos a explicar qué ocurre cuando una compuerta tiene problemas de flotación y cómo se resuelven, pues pensamos que puede ayudar a entender cómo funciona hidráulicamente una compuerta neumática.

Imaginemos una compuerta inflada con el vaso completo pero sin overtopping y con un nivel de agua down stream cercano al 50% de su altura real. Las solicitaciones a que estaría sometido el cuerpo de goma son las que se detallan en el esquema adjunto.



1.- El agua retenida en el vaso ejercerá una presión hidrostática sobre el cuerpo de goma de la compuerta y la resultante de este esfuerzo F_1 tendrá su punto de aplicación emplazado en una cota situada a $H/3$ por encima de la cota de pie. Los anclajes absorberán este esfuerzo generando una reacción R_1 de igual magnitud que F_1 pero de sentido contrario dado que la compuerta no se mueve. F_1 y R_1 forman un par de fuerzas que presiona al cuerpo de goma para hacerlo girar alrededor de la línea de anclajes en el sentido de las agujas del reloj, aplastando la compuerta contra la losa de cimentación, favoreciendo su estabilidad. En el esquema aparece representado en color verde.

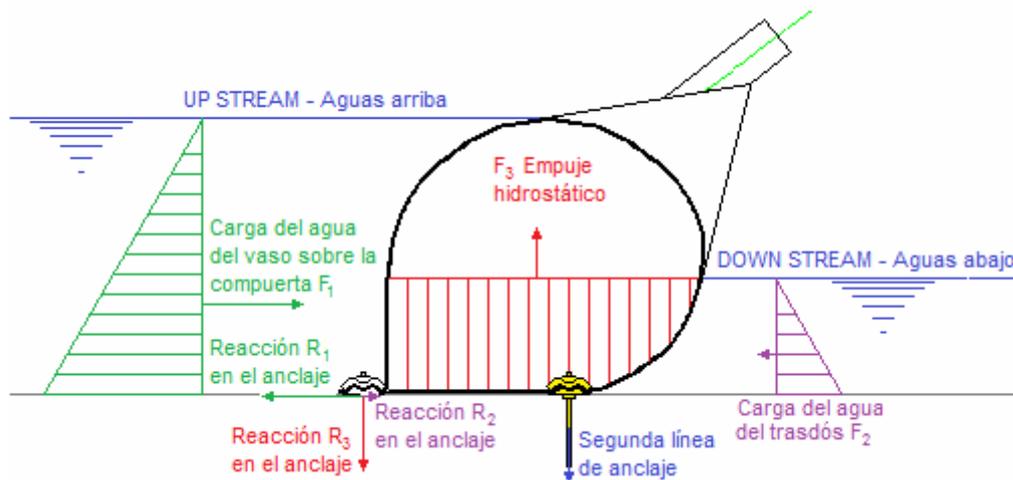
2.- El agua presente down stream generará una resultante F_2 cuyo punto de aplicación se situará a una distancia del lecho de $h/3$ de la altura de agua en el trasdós de la compuerta. Este esfuerzo también será absorbido por los anclajes, provocando una reacción R_2 de igual magnitud pero de sentido contrario. El correspondiente par de fuerzas tratará de levantar la compuerta haciéndola girar alrededor de la línea de anclaje en sentido contrario a las agujas del reloj, oponiéndose al par de fuerzas generado por el agua retenida en el vaso. En el esquema parece representado en color magenta.

3.- Finalmente, según el teorema de Arquímedes, cualquier cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del fluido desalojado (señalado en color rojo en el esquema). La resultante F_3 tendrá su punto de aplicación en el centro de gravedad del fluido desalojado. Este esfuerzo también será absorbido por los

anclajes con una reacción R_3 de igual magnitud pero de sentido contrario, generando otro par de fuerzas que tratará de levantar la compuerta haciéndola girar alrededor de la línea de anclajes en sentido contrario a las agujas del reloj, oponiéndose igualmente a la acción del agua del vaso.

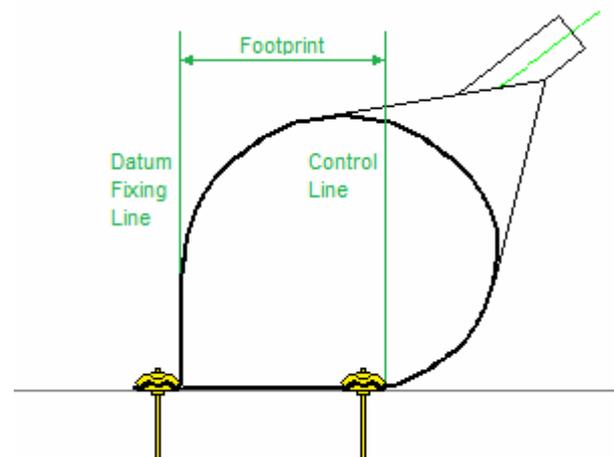
Tenemos por tanto un par de fuerzas que trata de aplastar la compuerta contra la losa y dos pares de fuerzas que tratan de levantarla haciéndola girar hacia aguas arriba. Estos esfuerzos se equilibran cuando la altura de agua down stream se sitúa en una cota aproximada del 40% de la altura real de la compuerta, si bien este ratio varía ligeramente de unos modelos a otros según la geometría de cada compuerta.

Para impedir la flotación de una compuerta, se debe colocar una segunda línea de anclaje en una posición situada aguas abajo tal como se puede ver en el esquema adjunto.



La línea sobre la que se instala la segunda línea de anclaje se llama Control Line y la distancia que la separa de la Datum Fixing Line se denomina footprint. Según los diferentes constructores, la longitud del footprint varía entre $0,90H$ y $1,20H$, siendo H la altura real de la compuerta.

La segunda línea de anclaje no se aplica únicamente para impedir la flotación de la compuerta; tiene otras aplicaciones, tales como impedir que limos o arenas se depositen bajo el cuerpo de goma en el trasdós de la misma, limitar las posibilidades de vibración y facilitar el control de las oscilaciones, proteger los fittings, proteger la lámina antiabrasión, etc. y se instala en todas las compuertas de más de 2 metros de altura real.



Además del coste, la instalación de una segunda línea de anclaje también plantea algunos inconvenientes. Mas adelante veremos cuáles son y como se solucionan.

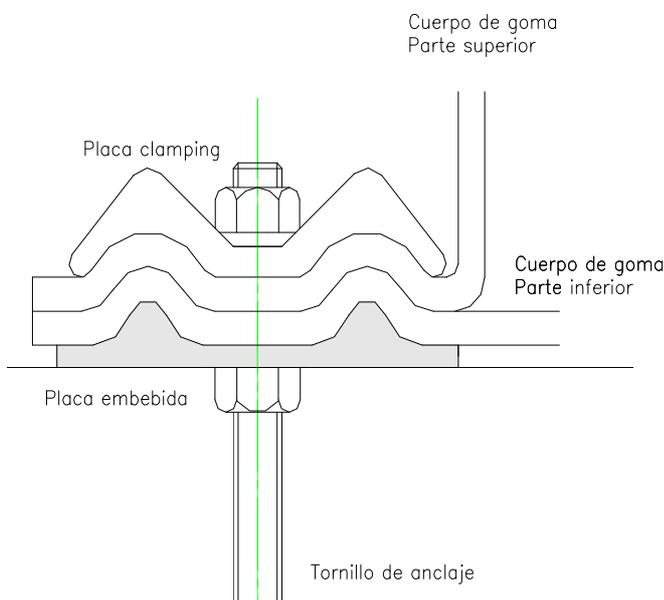
5.3.- EQUIPAMIENTO ASOCIADO A UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

Las compuertas neumáticas, salvo casos especiales, se componen habitualmente de los siguientes elementos básicos:

1.- El cuerpo de goma, que está formado por un tejido resistente a tracción laminado con el caucho base que está construido con fibras de nylon o poliéster, y hace las veces de armadura.

2.- El anclaje del cuerpo de goma a la cimentación, que consta de los elementos siguientes:

- Los tornillos de anclaje, tuercas de amarre y arandelas, están habitualmente construidas en acero al carbono galvanizado en caliente, o en acero inoxidable en los casos en que la compuerta deba trabajar con agua salada, salobre o con ph muy bajo o muy alto.
- Las placas embebidas están habitualmente construidas en fundición nodular galvanizada en caliente o acero inoxidable en los casos anteriormente mencionados.
- Las placas clamping o placas de cierre, que también se construyen en fundición nodular galvanizada en caliente o en acero inoxidable según la calidad del agua.



3.- Un sistema de inflado/ desinflado, compuesto de unas tuberías que conectan el cuerpo de goma a una soplante de aire.

4.- Un sistema manual; o uno eléctrico, mediante contactores; o uno electrónico mediante PLC, para controlar los parámetros y ordenar las maniobras de la compuerta de forma automática. En este último caso, es habitual la instalación de un sistema de alarmas y televisualización de parámetros vía telefónica o internet desde las oficinas del propietario.

5.- Un sistema de desinflado mecánico automático, que desinfla el equipo cuando el nivel aguas arriba sube por encima de un valor consigna.

cuando el nivel aguas arriba sube por encima de un valor consigna.

CAPÍTULO 6

LA LÁMINA DE GOMA

6.1.- ESTRUCTURA DE LA LÁMINA DE GOMA

El constructor de compuertas neumáticas habitualmente adquiere la lámina de goma a un fabricante de productos de caucho, que suele producirla en instalaciones dedicadas a la fabricación de cintas transportadoras. Normalmente el fabricante la corta, empalma y vulcaniza las uniones para construir el cuerpo de goma, pero en algunos casos lo hace el propio constructor.

La lámina de goma que se emplea para construir los cuerpos de goma tiene dos componentes fundamentales: el caucho y el tejido de refuerzo. Tal como exponemos a continuación existen en el mercado una gran diversidad de cauchos y calidades. Es importante, por tanto, preguntar al constructor quién es el fabricante de la lámina de goma y conocer el país de origen de la misma.

La altura real de la compuerta determina la presión de inflado y en consecuencia, la carga a tracción que deberá absorber la lámina de goma. Una vez conocida la resistencia que debe tener, se definen su espesor y el número de capas de caucho y de tejido resistente con que deberá contar.

A continuación mostramos un esquema de una lámina de goma con dos capas de tejido resistente, estructura típica de la lámina de un cuerpo de goma de una compuerta cualquiera.



En general, es recomendable que el espesor de la lámina sea el mayor posible porque tiene varias ventajas; pero algunos constructores que trabajan con láminas de baja calidad también emplean láminas de elevados espesores. Por tanto, **el espesor de la lámina no siempre es un índice de la calidad del cuerpo de goma.**

El tejido resistente (reinforcement layer) de la lámina de goma, es la armadura de que dispone la misma para poder absorber la carga a tracción que deberá soportar cuando esté inflada; es como el acero corrugado para un elemento de hormigón armado. La goma trabaja muy bien a compresión pero mal a tracción (como el hormigón) y su tejido resistente es quien se encarga de los esfuerzos a tracción.

Salvo para algunas aplicaciones muy especiales, el tejido resistente con que se construyen los recipientes de goma a presión puede estar fabricado con 3 materiales diferentes:

- Cable trenzado de alambre acero. Es la armadura normal en los neumáticos radiales, que son ya prácticamente casi la totalidad de los que se fabrican para toda clase de vehículos. El cable de acero no se puede emplear en las compuertas neumáticas porque su rigidez impediría el desinflado.
- Cordón trenzado de fibras de nylon. Se emplea en los neumáticos diagonales y es el más empleado en la fabricación de láminas de goma destinadas a la construcción de compuertas neumáticas.
- Cordón trenzado de fibras de poliéster, es notablemente mejor que el nylon; y poco a poco se va imponiendo en la fabricación de láminas para cuerpos de goma.

La fabricación de la lámina de goma se hace mediante vulcanizado en caliente en prensas especiales, prensando y calentando en bloque las diversas capas de caucho crudo con las capas de tejido resistente interpuestas, en un delicado proceso en el que se deben controlar con extremo cuidado la presión de vulcanizado, la temperatura y el tiempo; parámetros que varían de unos cauchos a otros.

Existen algunos constructores que se fabrican su propia lámina de goma mediante vulcanizado en frío en sus talleres, utilizando unos cementos de caucho especiales, como si fueran pegamento. Es extremadamente difícil obtener buenos resultados con esta técnica, y el riesgo de desfoliación de la lámina de goma así fabricada es muy elevado. Por ello, se debe rechazar cualquier cuerpo de goma que se haya construido con lámina fabricada mediante vulcanizado en frío.

6.2.- EL CAUCHO

Existen numerosos cauchos en el mercado con los cuales se pueden fabricar láminas de goma. Algunos fabricantes de láminas de goma emplean mezclados entre sí varios cauchos diferentes, y otros utilizan un solo producto. Los cauchos más habituales son los siguientes:

- El NR (nitrilo rubber) se obtiene del polímero CP (cis poli isopreno), producido de forma natural por un árbol originario del Amazonas llamado hevea brasiliensis que se cultiva en algunas zonas de África y sudeste de Asia, o su homólogo SBR (estireno butadieno rubber) obtenido de forma sintética procedente de derivados del petróleo.

Este caucho, cuando se utiliza, se emplea únicamente a modo de componente marginal, para mejorar algunas propiedades de la mezcla de que forma parte, ya que presenta las características siguientes:

- Excelentes características mecánicas, como carga de rotura, elasticidad y resistencia al desgarro.
 - Alta resiliencia, excelentes propiedades dinámicas y baja deformación remanente
 - Buena resistencia a ácidos, bases y sales.
 - No es aconsejable su uso en contacto con aceites, grasas o hidrocarburos.
 - Campo de temperaturas entre -50°C y 90°C
 - Amplia gama de durezas, desde 35° a 90° Shore A.
- El CR (cloropreno rubber) o caucho de policloropreno, es un homopolímero del clorobutadieno o cloropreno. El átomo de cloro aumenta el nivel de resistencia a los aceites, situándolo entre el caucho natural y el caucho nitrílico. Ofrece el conjunto más equilibrado de propiedades deseables y es el más apropiado para muchas aplicaciones técnicas.

Sus características más sobresalientes son las siguientes:

- Excelentes propiedades mecánicas y de abrasión.
- Tiene una buena adherencia al metal.
- Algunos tipos presentan tendencia a la cristalización a bajas temperaturas.
- Presenta cierta absorción de agua
- Resistente a productos químicos inorgánicos, excepto ácidos oxidantes y halógenos.
- No resiste a la mayoría de compuestos orgánicos, excepto alcoholes.
- Moderada resistencia a los hidrocarburos alifáticos (parafinas, aceites vegetales, grasas animales, etc.).
- Resiliencia algo inferior al NR, en vulcanizados de baja dureza, pero superior a partir de durezas de 60° Shore A.
- Es auto extingible y no propaga la llama.
- Buena resistencia a la temperatura y al ozono.
- Campo de temperaturas: entre -25°C y 125°C

Las propiedades típicas de un cloropreno comercial, de entre los muchos existentes en el mercado, podrían ser las siguientes:

MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
Peso específico	1,65	gr/cm^3
Dureza	70	Shore A
Carga de Rotura	120	Kp/cm^2
Alargamiento	300	%
Compresión set (24h a 70°C)	18	%
Temperatura de Trabajo	$-35 +105$	$^{\circ}\text{C}$

- EPDM (etileno propileno dieno monómero) Los copolímeros del etileno y del propileno (EPM) solo se pueden vulcanizar con peróxidos o radiación, mientras

que añadiendo el dieno (EPDM) es posible realizar la vulcanización convencional con azufre, mejorando con ello su resistencia al desgarró. Es indiscutiblemente el mejor caucho para aplicaciones al aire libre, y por tanto, el más recomendable para construir cuerpos de goma para compuertas.

Sus características más sobresalientes son las siguientes:

- Excelente resistencia al envejecimiento, ozono y luz ultravioleta, siendo prácticamente inalterable a la intemperie.
- Gran resistencia a numerosos productos químicos corrosivos.
- Excelentes propiedades eléctricas y estabilidad en la radiación.
- No resiste los aceites y es atacado por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, así como por los solventes halogenados.
- Moderada adhesión al metal y pobre adherencia a otros materiales.
- Campo de temperaturas entre - 45°C hasta +120°C.
- Resistente a la mayoría de productos químicos orgánicos
- Limitada resistencia a los ácidos oxidantes.
- Altamente resistente a los ácidos minerales, detergentes, éteres fosfóricos, cetonas, alcoholes y glicoles de bajo peso molecular.
- Buen resultado en presencia de agua caliente y de vapor a alta presión.

Aunque también existen diferentes calidades de EPDM, a continuación exponemos las propiedades típicas de un EPDM comercial:

MAGNITUD	VALOR	UNIDAD
Peso específico	1,40	gr/cm ³
Dureza	60	Shore A
Carga de Rotura	60	kp/cm ²
Alargamiento	350	%
Compresión set (24h a 70°C)	30	%
Temperatura de trabajo	- 25 +100	°C

Es fácil encontrar un CR que presente mejores características mecánicas que un EPDM tipo, pero el CR tiene dos importantes inconvenientes:

- Se degrada más rápidamente que el EPDM por la acción de los elementos cuando está al aire libre, especialmente cuando está expuesto a la luz solar.
- Resiste peor la contaminación orgánica

Ambos factores son muy importantes en las propiedades que se le deben exigir al cuerpo de goma de cualquier compuerta neumática. En resumen, podemos decir que el EPDM es notablemente más inerte que el CR.

Por esta razón, no deben equivocarnos ni inducirnos a error algunas de las características del caucho base que ofrecen algunos constructores de compuertas, como la resistencia, la densidad o la dureza shore, cuando ofrecen cloroprenos en

lugar de EPDM, ya que, al compararlos, parece que el EPDM es peor material que el CR, como se aprecia en la tabla siguiente:

MAGNITUD	CR	EPDM	UNIDAD
Peso específico	1,65	1,40	gr/cm ³
Dureza	70	60	Shore A
Carga de Rotura	120	60	Kp/cm ²
Alargamiento	300	350	%
Compresión set (24h a 70°)	18	30	%
Temperatura de Trabajo	-35 +105	-25 +100	°C

Hay un parámetro que tiene especial relevancia para calibrar si una lámina de goma reúne condiciones como para construir con ella una buena compuerta neumática; y ese parámetro es la resistencia a tracción de su caucho. Se pensará que no tiene sentido ni siquiera conocer la resistencia a tracción de un componente como el caucho que en la lámina de goma trabaja únicamente a compresión, pero sí que lo tiene; y vamos a explicar por qué.

El envejecimiento del caucho de la capa exterior de cualquier lámina de goma no es un proceso repentino, sino gradual; que comienza el mismo día en que se instala la compuerta. La primera manifestación de tal envejecimiento consiste en la aparición de unas micro grietas de tamaño muy reducido, que se demoran en aparecer desde unas semanas o meses hasta varios años, según las condiciones medioambientales a que está sometida la lámina de goma; tales como horas e intensidad de la insolación que recibe, ozono, rayos UVA, calidad del agua, etc.

Este fenómeno, ligado al envejecimiento del caucho, se presenta con notable presteza en todos los cloroprenos porque resisten peor la acción de los elementos, y en menor medida y mucho más tarde, pero se presenta también en los EPDM. Retrasar la aparición de estas grietas es alargar la esperanza de vida útil de nuestra compuerta, y está demostrado que estas grietas son más precoces, profundas y numerosas cuando la resistencia a tracción del caucho es más baja.

La resistencia a tracción del caucho puede variar desde 9/11 MPa de un constructor chino, pasando por 14/16 MPa de un japonés y llegar hasta 20/22 MPa de un buen fabricante europeo.

6.3.-EL TEJIDO RESISTENTE.

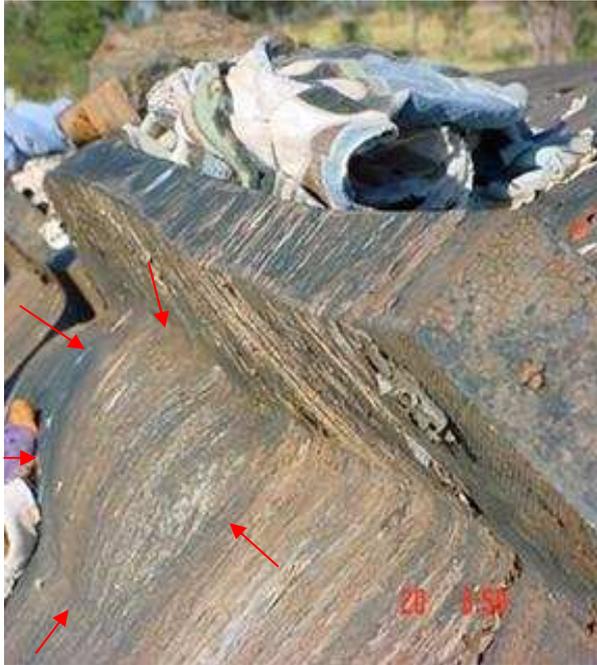
Como ya hemos indicado, el tejido resistente de la lámina de goma trabaja como si se tratase de una armadura de la goma destinada a absorber los esfuerzos a tracción, cumpliendo la misma misión que las armaduras de acero corrugado en el hormigón armado.

También hemos indicado anteriormente, que los tejidos resistentes con que se fabrican las láminas de goma que luego se emplearán en la construcción del cuerpo de goma pueden ser de nylon, de poliéster o, en algunos fabricantes, de una mezcla de ambos.

Existen numerosos tipos diferentes de nylon y de poliéster, y casi se puede decir que, cada fabricante, emplea uno distinto. Aunque ambos materiales son derivados del petróleo, entre ellos presentan propiedades notablemente diferentes. Las principales diferencias son las siguientes:

- El nylon es **más flexible** que el poliéster, es decir, se dobla más fácilmente que éste y es capaz de plegarse sobre sí mismo con mayor facilidad. Esta es una buena propiedad, porque le confiere a la lámina de goma mayor flexibilidad, lo cual permitirá a la compuerta correspondiente desinflarse más rápidamente y dejar menos aire residual retenido en su interior.
- El nylon es **menos elástico** que el poliéster, y si recibe un enérgico plegado localizado permanece con deformaciones plásticas permanentes con mayor facilidad que el poliéster. Esta es una mala cualidad, especialmente relevante en compuertas que soportan gran carga de sedimentos o que permanecen desinfladas por períodos largos; ya que se deforman con notable facilidad y no recuperan totalmente su forma primitiva cuando de nuevo deben volver a trabajar.
- El nylon es **menos resistente a tracción** que el poliéster. Algunos fabricantes superan esta dificultad añadiendo una capa suplementaria de tejido resistente para que la lámina alcance las especificaciones, resultando láminas de mayor espesor para resistencias iguales. Por esta razón, el espesor de la lámina de goma, utilizado como argumento comercial por algunos constructores no siempre es un parámetro a tener en cuenta.
- El nylon **no se adhiere al caucho**, por lo que necesita ser "activado" previamente a la vulcanización del caucho que va a ser armado con él. En cambio, el poliéster es un adhesivo natural para muchos cauchos y forma parte de numerosas colas y pegamentos para encolar otros materiales. En el caso de formar parte de una lámina con EPDM también se suele activar el tejido de poliéster; pero solo se hace por precaución dado que el EPDM es un caucho especialmente inerte.
- El nylon **absorbe agua**, en cantidades que pueden llegar hasta un 15 / 20% de su peso según la calidad del nylon en cuestión, mientras que el poliéster no absorbe absolutamente nada.

Esta última característica del nylon constituye una desventaja fundamental para su empleo en la construcción de compuertas neumáticas, porque el agua que se infiltra por las microgrietas que hemos descrito en el apartado anterior termina por llegar al tejido resistente y se queda en la fibra extendiéndose por capilaridad por amplias zonas del tejido resistente. La humedad permanente de las fibras provocada por el agua que tienen en su interior; con el tiempo deteriora la capa de "activado" que poseía el nylon en el momento de la vulcanización; lo cual, unido a su mala adherencia al caucho, termina por despegarlo del tejido resistente.



El efecto que produce el tejido resistente en la lámina de goma cuando se ha despegado del caucho, es parecido al que generaría en una viga de hormigón armado el acero corrugado si se despegara del hormigón que lo rodea.

El caucho, sin su armadura que absorba la tracción al que está sometida la lámina de que forma parte, se infla como un globo y aparece en el exterior, tal como se muestra en la fotografía de la compuerta adjunta.

La fotografía está tomada durante unas reparaciones de la compuerta.

El caucho, con baja resistencia a tracción, inflado como aparece termina por reventar, alargando la línea de rotura a lo largo de toda la compuerta, lo cual provoca el colapso de la compuerta y su desinflado instantáneo.

Hay dos efectos que contribuyen a evitar este tipo de averías: el empleo de tejido de refuerzo de poliéster, que es mucho más difícil de despegar del caucho que el nylon, y la utilización de caucho de mayor resistencia, que retrasa la posibilidad y minimiza el tamaño y número de microgrietas en las capas exteriores del caucho de la lámina de goma, cerrando el paso al agua y a la humedad.

Por esta razón se debe exigir al constructor que la resistencia a tracción del caucho de su lámina de goma sea alta, del orden de 20 MPa

CAPITULO 7

SISTEMAS DE SEGURIDAD Y CONTROL

7.1.- SISTEMA MECÁNICO DE AUTODESINFLADO AUTOMÁTICO.

Los mecanismos de auto desinflado automático MADS - Mechanical Auto Deflation System - empleados en las compuertas de goma son una de sus principales ventajas respecto de todos los demás sistemas. Los MADS aseguran que la compuerta se desinflará cuando el nivel de agua alcance una cota predeterminada, y que, por tanto, se podrá utilizar toda la sección útil del cauce para evacuar la crecida del río. Dado que se trata de un dispositivo puramente mecánico, funcionará siempre, aunque esté interrumpido el suministro de energía eléctrica a la cámara de control.

La elección de un sistema u otro depende de la distribución de la caseta de control. Lo más frecuente es que se utilice uno de los dos sistemas siguientes:

A.- El primer sistema comprende la instalación de un **flotador** sobre el nivel de agua del embalse pasado por vasos comunicantes al interior de la cámara de control inundando el subterráneo.

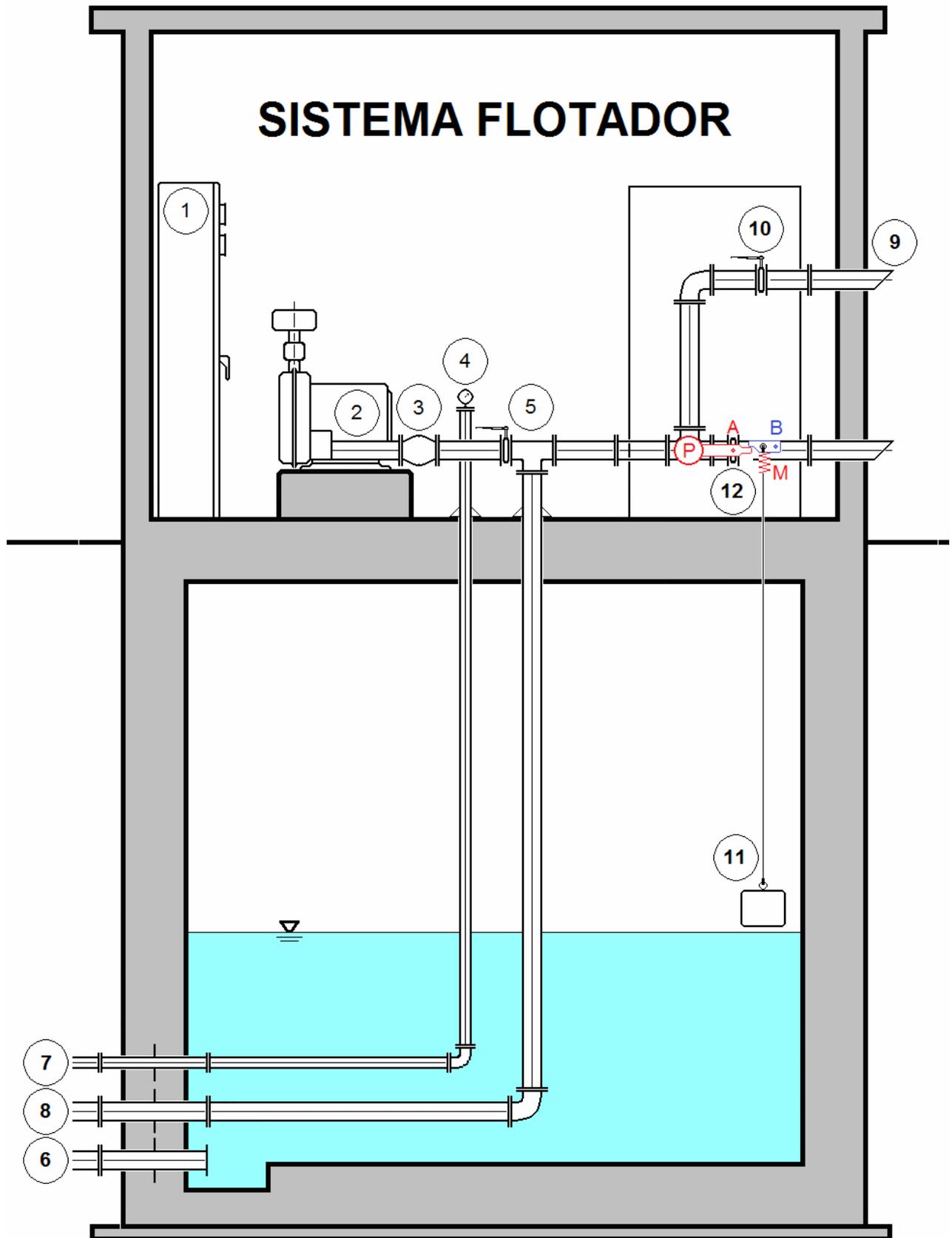
B.- El segundo sistema consiste en la instalación de un **balde** que mantiene en su interior un nivel de agua igual al nivel que se registra en el embalse.

Existe también un tercer sistema de tubo con forma de U para el caso de que no pueda instalarse ninguno de los dos sistemas anteriores por encontrarse la cámara de control ubicada demasiado lejana del curso de agua, o excesivamente elevada.

7.2.- EL MADS SISTEMA FLOTADOR

Funciona mediante la transferencia del nivel del agua en el embalse a través de una tubería hasta la cámara de control.

Este sistema cuenta con un flotador que permanece en el aire colgando de un cable por encima de esta agua. Cuando el nivel de agua sube y llega al flotador, éste comienza a flotar y deja de transmitir su peso al sistema, la tensión del cable sobre la válvula disminuye, hasta que la fuerza del muelle M empujando la palanca que lo mantiene estable supera el peso del balde y dispara la válvula de mariposa de contrapeso.



En el dibujo, los números indican lo siguiente:

- 1 - Panel de control
- 2 - Soplante de aire
- 3 - Válvula de retención - One way valve
- 4 - Manómetro para lectura de presión en el cuerpo de goma
- 5 - Válvula de inflado. Se abre para inflar y se cierra después.
- 6 - Entrada de agua - Water Intake
- 7 - Tubo de presión - Pressure measuring pipe
- 8 - Tubo de aire - Air supply and exhaust pipe
- 9 - Salida del aire de desinflado
- 10 - Válvula de desinflado. Se abre para desinflar.
- 11 - Flotador
- 12 - Válvula de apertura rápida MADS tipo flotador

El brazo de color rojo con el contrapeso P puede girar alrededor del punto A en el sentido contrario a las agujas del reloj si se libera del enclavamiento a que la somete la uña de color azul, que puede girar alrededor del punto B.

El muelle M empuja la uña azul hacia arriba, y el peso del flotador hacia abajo. Mientras el flotador permanece en el aire, el sistema está en equilibrio. Si sube el nivel de agua en el embalse también sube en el sótano de la cámara de control; y cuando el agua alcanza al flotador, éste deja de transmitir su peso y el muelle levanta la uña azul liberando el brazo de color rojo que rápidamente gira hacia abajo alrededor del punto A y abre la válvula 12 (MADS) que desinfla la compuerta.

Este sistema, aunque es simple, tiene numerosos inconvenientes (renovación del agua, suciedad y/o sedimentos importados desde el curso de agua, necesidad de mantenimiento y limpieza del sótano, posible presencia de insectos y roedores, etc.

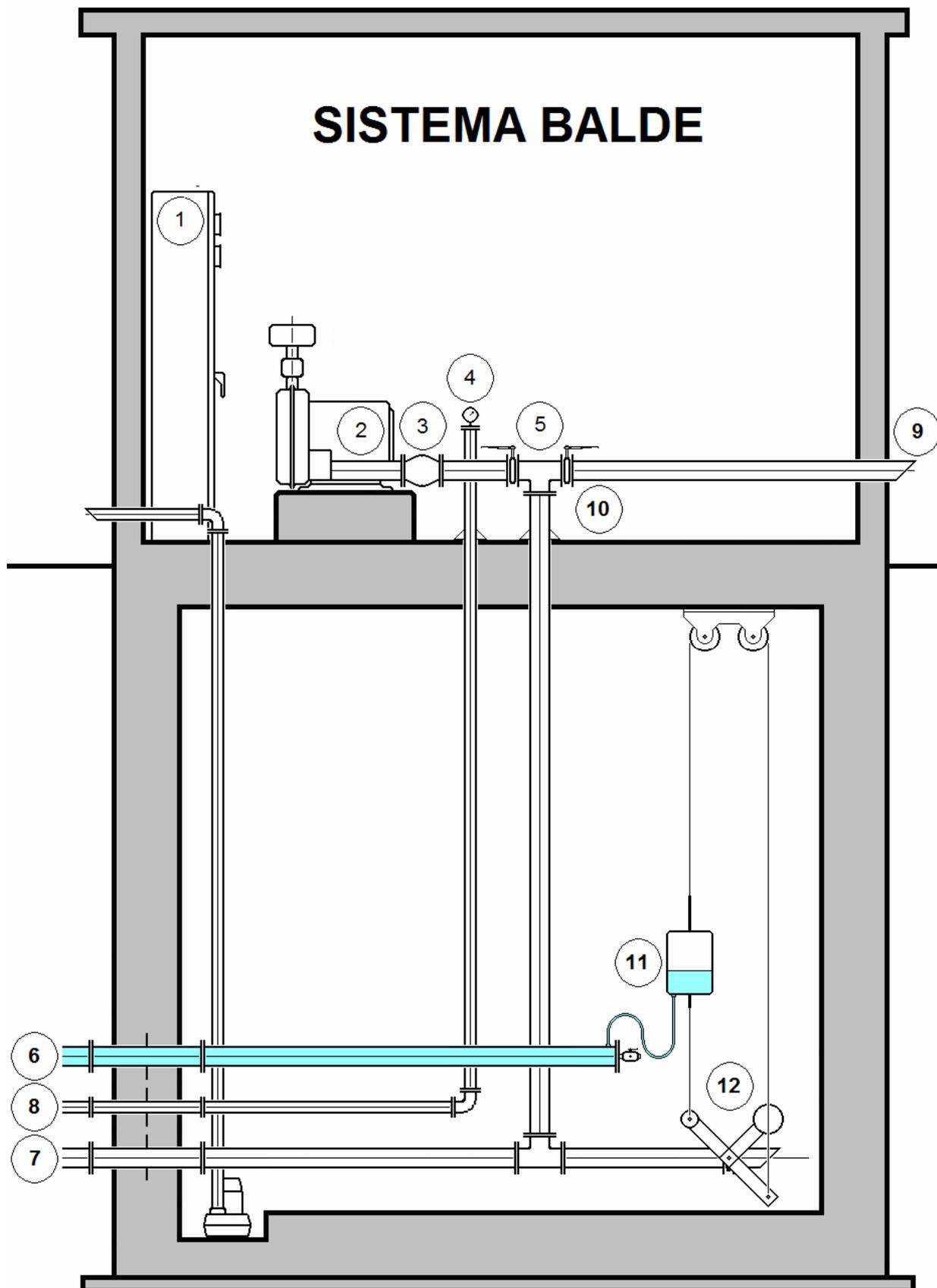
7.3.- EL MADS SISTEMA BALDE

Permite su instalación cuando se trata de compuertas tanto de un vano como de varios vanos.

Una tubería transmite al interior de la cámara de control el nivel de agua que se registra en el embalse. El agua llega hasta el cubo y va llenándolo progresivamente a medida que va subiendo el nivel de agua en el embalse.

Cuando el nivel aguas arriba sube por encima de un valor consigna, el peso del balde lleno de agua transmitido por el sistema de poleas y cables, vence la resistencia de los contrapesos, mueve la cruceta de los contrapesos y abre la válvula MADS (12) que desinfla rápidamente la compuerta.

El sistema balde necesita un sótano profundo en la caseta de control, debido a la baja posición de la válvula de escape y contrapeso, pero es más eficiente, y permite un buen y fácil drenaje de la compuerta.



En el dibujo, los números indican lo siguiente:

- 1 - Panel de control
- 2 - Soplante de aire
- 3 - Válvula de retención - One way valve
- 4 - Manómetro para lectura de presión en el cuerpo de goma
- 5 - Válvula de inflado. Se abre para inflar y se cierra después.
- 6 - Entrada de agua - Water Intake
- 7 - Tubo de presión - Pressure measuring pipe
- 8 - Tubo de aire - Air supply and exhaust pipe
- 9 - Salida del aire de desinflado
- 10 - Válvula de desinflado. Se abre para desinflar.
- 11 - Balde que con su peso provoca la apertura de la válvula
- 12 - Válvula de apertura rápida MADS tipo balde

7.4.- CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control para el manejo de las compuertas neumáticas son muy diversos y se puede decir que cada constructor de compuertas tiene los suyos propios; pero todos ellos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1.- Sistemas manuales, operados mediante pulsadores con o sin contactores. Estos sistemas no tienen ningún tipo de circuito lógico y necesitan de un operador presente en la cámara de control para accionar el pulsador correspondiente. Son extremadamente sencillos y económicos, pero son poco seguros ya que fácilmente pueden generar daños en la compuerta si se operan mal. Se emplean solo por constructores de bajo nivel tecnológico, en compuertas de pequeño tamaño y pocos requerimientos y únicamente en países poco desarrollados.

2.- Sistemas automáticos basados en circuitos lógicos de contactores. Son más seguros que los sistemas manuales ya que la intervención del operador está mucho más limitada. Frecuentemente incorpora n medidores electrónicos de la presión interior en el cuerpo de goma y del nivel de agua retenida en el vaso del embalse. El grado de automatización es muy variable. Para su operación, mantenimiento y reparación de averías precisan de personal poco especializado. Necesitan armarios eléctricos más voluminosos. Su coste supera en muchos casos al correspondiente sistema electrónico con un nivel de automatización semejante, por lo que están desapareciendo rápidamente del mercado.

3.- Sistemas automáticos electrónicos, basados en la una lógica previamente programada en un PLC. Estos sistemas también utilizan contactores para alimentar de fuerza a algunos determinados actuadores. El grado de automatización varía de unos constructores a otros.

Muchos de estos sistemas permiten el telecontrol remoto de las variables del embalse desde las oficinas del operador y archivan y transmiten los valores históricos de los parámetros de funcionamiento de la compuerta y del embalse hasta el ordenador central del mismo.

Advertimos de que, salvo casos excepcionales, el telecontrol que facilitan estos sistemas electrónicos se debe instalar únicamente como herramienta informativa, para

poder visualizar caudales, niveles de agua, presión en el interior del cuerpo de goma, chequear el histórico de incidencias, recibir y transmitir mensajes de alarma, alertas a las autoridades, etc. pero no como centro de mando y operación de la compuerta; ya que, por motivos de seguridad, se debe estar presente en la cámara de control cuando se interviene manualmente.

En algunos casos, estos sistemas de control son capaces de inflar totalmente la compuerta de forma automática sin intervención del operador cuando el sistema detecta que el nivel de agua embalsada ha bajado de una cota consigna previamente establecida a tal fin. Esta función es especialmente importante en los casos en que la pérdida de agua supone un quebranto económico porque la compuerta está destinada a almacenar agua potable cruda, o agua de alimentación a una minicentral hidroeléctrica, o agua para riego, etc.. El sistema no permite que el embalse permanezca con la compuerta abierta y perdiendo agua hasta que se vacíe completamente. La compuerta, automáticamente desinflada por causa de la avenida, puede programarse para volver a cerrarse (reinflar la compuerta) antes de que tal avenida finalice; aprovechando la cola de la misma para reponer el agua perdida y rellenar de nuevo el embalse.

Los sistemas electrónicos de control más sofisticados mezclan la automatización electrónica con circuitos neumáticos lógicos, y emplean aire comprimido para los actuadores, lo cual, aunque es más caro, también es más eficiente y seguro.

Hay dos grandes grupos de sistemas de control automáticos electrónicos, según se instalen en compuertas que trabajan todo o nada (totalmente infladas o totalmente desinfladas) o compuertas que trabajan parcialmente infladas en posiciones intermedias de inflado.

- **SISTEMAS DE BANDA ANCHA:** En las compuertas que trabajan todo o nada, el sistema no controla el overtopping dentro del intervalo de trabajo de la compuerta, que va desde overtopping cero al overtopping máximo que permite el proyecto. Para una compuerta de 2 metros de altura real con el 20% de overtopping máximo (0,40 metros), el sistema no actuaría en una **BANDA ANCHA** de 400 mm. sobrepasados los cuales, el sistema automáticamente desinflaría totalmente la compuerta.
- **SISTEMAS DE BANDA ESTRECHA:** Cuando una compuerta está construida con una lámina de goma de gran calidad, ésta puede trabajar en posiciones intermedias de inflado, es decir, parcialmente inflada, sin sufrir deformaciones permanentes. En tales casos el sistema mantiene el nivel de agua embalsada dentro de una **BANDA ESTRECHA** de fluctuación de niveles, en algunos casos del orden de ± 5 mm. Para ello, cuando el nivel comienza a subir, el sistema de control desinfla parcialmente la compuerta de forma que disminuye su altura y deja pasar más agua, y cuando el nivel comienza a descender, reinfla parcialmente la compuerta de forma que aumente su altura y disminuya el overtopping. Este sistema se llama USWLCS por sus iniciales en inglés (Up Stream Water Level Control System).

CAPÍTULO 8

OPERACIÓN

8.1.- INFLADO Y DESINFLADO MANUAL

En el caso de una compuerta neumática en posición de cauce abierto, que permanece desinflada sobre la losa de cimentación, el procedimiento empleado para levantarla es el que se indica a continuación:

- 1.- Comprobar que no hay personas o equipos que puedan quedar afectados por un nivel de agua elevado.
- 2.- Cerrar la válvula de escape de aire.
- 3.- Abrir la válvula de entrada de aire.
- 4.- Poner en funcionamiento el compresor.
- 5.- Monitorizar el control de presión mientras se infla la compuerta para añadir o quitar aire hasta alcanzar el nivel de presión requerido.

Si el nivel de agua es inferior al 50% de la altura real de la compuerta la presión de aire debería situarse en torno al 60% de la presión de diseño. En este caso la presión subirá en proporción con el nivel de agua en el embalse.

Cuando el nivel de agua alcance la cota requerida, la presión en el cuerpo de goma subirá hasta aproximadamente la presión de diseño. Si es necesario, se ajustará la presión de aire a su nivel apropiado.

El procedimiento para el desinflado de una compuerta neumática inflada es el siguiente:

- 1.- Comprobar que no hay personas ni equipos en el área del cauce que va a ser afectada por el flujo elevado de agua.
- 2.- Comprobar que la parte de la cimentación situada aguas abajo que va servir de descanso al cuerpo de goma está libre de objetos.

3.- Comprobar que no hay presencia de agua de condensación dentro del cuerpo de goma abriendo la tubería de drenaje hasta que solo sale aire.

4.- Abrir la válvula de escape del aire.

8.2.- INFLADO Y DESINFLADO AUTOMÁTICO

En el apartado 7.3 referido a la selección del sistema de control, hemos descrito 3 sistemas diferentes dotados de desinflado eléctrico, y por tanto, automáticos. Alguno o varios de ellos es seguro que responden a la fabricación estándar de casi cualquier constructor de compuertas.

Los sistemas de control automático, según hemos visto, se pueden dividir en dos grupos según sean electrotécnicos o electrónicos. En los primeros, las maniobras se realizan mediante circuitos lógicos de contactores y en los segundos el circuito de mando está cargado dentro de un PLC. En ambos casos se pueden emplear transductores electrónicos para detectar y cuantificar las variaciones de presión en el interior del cuerpo de goma y en el nivel del agua represada, y generar así las señales que después utilizará el circuito de mando correspondiente. También en ambos casos, se utilizan contactores para las salidas de fuerza de alimentación a algunos actuadores determinados.

Salvo casos especiales, podemos decir que cualquier sistema de control electrónico aunque sea sencillo, siempre será más capaz, exacto y fiable que el más sofisticado de los sistemas electrotécnicos; mucho más propensos a averías y fallos que los electrónicos.

Existen tantos sistemas de control distintos como constructores de compuertas neumáticas, pues cada constructor tiene desarrollado el suyo propio, con diferentes lógicas y diferentes secuencias de funcionamiento.

Antes de pulsar el botón que desencadena el inflado automático de la compuerta se deben tomar las mismas precauciones indicadas para el inflado manual, y la secuencia de operaciones que puede y debe realizar cualquier sistema de control automático para el inflado o desinflado de la compuerta, sea electrotécnico o electrónico, son las mismas que las que se necesitan realizar para una secuencia manual de inflado y desinflado, solo que el sistema automático las realiza sin intervención del operador.

8.3.- TIEMPOS DE INFLADO Y DESINFLADO

El tiempo necesario para inflar una compuerta neumática es una variable que está en función del volumen de su cuerpo de goma y de la capacidad de la soplante instalada por el constructor de la compuerta. Salvo aplicaciones o requerimientos especiales, el tiempo de inflado suele estar comprendido entre 30 y 45 minutos, y es variable de unos constructores a otros.

El tiempo de desinflado varía en función de la presión de agua que soporte el cuerpo de goma y del diámetro de las tuberías de escape del aire. Cuando una compuerta de goma carece de presión de agua actuando contra su pared se desinfla más despacio que si la tiene. Con presión de agua, que es el caso más habitual, el tiempo de desinflado es aproximadamente la mitad del de inflado.

El aire de desinflado suele presentar mal olor debido al agua de condensación corrompida que arrastra del interior del cuerpo de goma y en los primeros desinflados suele estar contaminado con gases tóxicos residuales del proceso de vulcanización que quedan atrapados en el interior del cuerpo de goma, por lo que en cualquier caso el aire de desinflado debe ser siempre lanzado al exterior de la cámara de control.

8.4.- INFLADO EXCESIVO.

Según las seguridades instaladas por cada fabricante, pueden darse o no inflados excesivos que deterioren la compuerta o que incluso, lleguen al colapso de la misma. Aunque no en todos los casos, los sistemas de inflado suelen disponer de una válvula de seguridad para escape de aire en casos de sobre presión; para así proteger tanto al cuerpo de goma como al compresor de una eventual sobrecarga en el momento del inflado de la compuerta.

El inflado excesivo es muy perjudicial para una compuerta neumática. Y en el extremo opuesto, para que una compuerta pueda trabajar parcialmente inflada, se requiere un cuerpo de goma de excelentes características técnicas, que le permita trabajar en estas condiciones, alejado de cualquier deformación permanente debido al inflado parcial.

Hay muy pocos constructores de compuertas neumáticas que permiten que sus equipos trabajen parcialmente inflados. Lo más habitual en casi todos ellos, suele ser inflar su compuerta hasta la presión consigna, vigilar y prevenir con mejor o peor fortuna cualquier exceso de presión al cuerpo de goma mediante algún dispositivo de seguridad y desinflar completamente el equipo cuando el overtopping alcanza un valor consigna previamente definido en el proyecto.

8.5.- MANTENIMIENTO.

El reducido mantenimiento que necesita normalmente una compuerta neumática (inspecciones visuales y drenajes periódicos) representa una importante ventaja.

Las compuertas neumáticas no tienen cilindros hidráulicos, carriles guía, mecanismos de elevación, cables o poleas que necesiten periódicamente ser engrasados o pintados porque pueden sufrir corrosión. Las únicas partes metálicas sumergidas presentes en ellas son las placas de anclaje, que son componentes fijos y pueden ser fabricados de acero inoxidable para presas emplazadas en entornos de aguas saladas o salobres químicamente activas. Se elimina, por tanto, la necesidad periódica de instalación de tablestacas y la paralización de la actividad para el mantenimiento de las compuertas.

8.6.- NECESIDADES ESPECIALES DE INSPECCIÓN.

Las compuertas neumáticas no tienen necesidades especiales de inspección. Con la entrega de cada equipo nosotros facilitamos un manual de instrucciones en el que incluimos una lista de comprobaciones recomendables, que periódicamente es conveniente llevar a cabo.

8.7.- DAÑOS EN EL CUERPO DE GOMA.

Si se sospecha de la existencia de un orificio en el cuerpo de goma se debe, ante todo, descubrir su localización, forma y dimensiones. La forma correcta de hacerlo es vaciar el embalse y chequear con agua jabonosa la compuerta en seco inflada al 70% de su presión nominal de trabajo.

En el caso que el agujero se encuentre aguas arriba y cuando vaciar el embalse suponga un fuerte quebranto por la pérdida del agua retenida, la forma más segura de hacerlo consiste en desviar el overtopping del río por el canal de desvío y chequear la presencia de burbujas saliendo del cuerpo de goma de la compuerta inflada y sin verter desde una pequeña embarcación neumática.

En el caso de que la pérdida de presión esté en el lado aguas abajo del cuerpo de goma, se deberá desviar igualmente el overtopping por el canal de desvío y la inspección puede llevarse a cabo caminando por la losa por el lado de aguas abajo untando la lámina de goma con agua enjabonada hasta descubrir las burbujas que delatan la localización de la fuga de aire.

En ambos casos, se trata de una maniobra peligrosa que solo debe ser realizada por personal especializado.

Una vez se descubre la pérdida, el método de reparación depende de su localización, de su tamaño y de su forma. En el caso de agujeros se emplean tapones, que se colocan después de la oportuna limpieza y raspado de las paredes del mismo con la compuerta inflada.

En caso de que se trate de cortes de mayor tamaño se emplean parches externos aplicados con cemento vulcanizador después del raspado y limpieza de la superficie, y siempre sobre superficie seca.

8.8.- LIBRO DE INSTRUCCIONES

Nosotros siempre entregamos con nuestros equipos un Libro de Instrucciones. El manual incluye procedimientos operativos, listas de inspección, instrucciones de reparación de daños eventuales y descripción de los equipos auxiliares suministrados.

CAPITULO 9

CONDICIONES AMBIENTALES DE OPERACIÓN

9.1.- BAJAS TEMPERATURAS

Las compuertas neumáticas pueden operar bajo temperaturas extremadamente frías sin ningún problema. Entre los numerosos ejemplos que podemos mencionar, está la compuerta de BROADWATER, en Montana (USA). Tiene 7 vanos de 15.54 m x 3.35 m de altura y opera sin ningún problema con temperaturas que en invierno suelen bajar hasta los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. De hecho, el empleo de aire como medio de inflado impide la congelación en las tuberías interiores.

9.2.- TEMPERATURAS DIARIAS EXTREMAS

Debido al empleo de aire a presión para mantener la forma de la compuerta, cabe preguntarse si un cambio de temperatura en el ambiente que la rodea puede afectar a la temperatura del aire de inflado retenido en su interior y provocar un cambio de presión en el cuerpo de goma; y también, qué consecuencias puede tener tal cambio y si el mismo puede afectar la rigidez o la forma exterior del cuerpo de goma.

Este problema se puede plantear en dos situaciones muy distintas y con consecuencias totalmente diferentes, según que el cuerpo de goma de la compuerta tenga overtopping (esté vertiendo agua por encima) o esté seco.

La temperatura del agua de un río con circulación permanente de agua necesita semanas o meses para variar dentro de intervalos siempre muy reducidos. Por tanto, las variaciones de temperatura del aire ambiente no afectan, en general, a la temperatura del agua dentro del río si el río fluye. Por ejemplo, en verano, con una fuerte insolación y temperaturas muy altas (por ejemplo 45°C) durante las horas centrales del día y temperaturas frescas durante la noche; o en invierno, con temperaturas frescas durante el día y un intenso frío durante la noche (por ejemplo -10°C). La experiencia muestra que, en ambos casos, la temperatura del agua de un río que soportase estas variaciones extremas de temperatura permanecería muy estable, manteniendo día y noche una temperatura sensiblemente constante en verano y otra lógicamente más fresca durante el invierno.

Por tanto, cuando la compuerta está vertiendo agua, la temperatura de la lámina del cuerpo de goma situada bajo el agua va a permanecer también estable noche y día manteniendo una temperatura prácticamente constante.

Obviamente, si el cuerpo de goma no varía su temperatura exterior, tampoco el aire de inflado retenido en su interior podrá variar la suya. En consecuencia, la presión del aire también permanecerá estable; y las variaciones de temperatura del exterior no afectarán en nada a las constantes de funcionamiento de la compuerta. En conclusión, las temperaturas exteriores no influyen en los parámetros de funcionamiento de una compuerta neumática si ésta se encuentra vertiendo.

En cambio, la situación es totalmente diferente cuando la compuerta se encuentra reteniendo agua en reposo y sin overtopping, o peor aún, completamente inflada y con poca agua o casi sin agua. En estos casos, la lámina de goma se encuentra expuesta al sol y se comporta como un cuerpo negro, que absorbe casi la totalidad de la radiación solar que le llega en las horas centrales del día en un día soleado; y esa radiación, que se transforma en calor, eleva rápidamente la temperatura de la goma, que a su vez, calienta el aire del interior del cuerpo de goma, provocando un aumento de la temperatura del mismo.

Un neumático de un automóvil, cuando está inflado a su presión de trabajo, tiene un volumen nominal que permanece casi constante aunque multipliquemos por 2 su presión, y puede llegar a reventar sin haber variado significativamente su forma exterior. De igual manera, el volumen de cualquier cuerpo de goma, cuando está inflado a su presión nominal de trabajo, es prácticamente constante, y aunque aumente significativamente la presión del aire de su interior, el incremento de volumen es muy difícil que sobrepase el 3% ni siquiera en los cuerpos de goma con débil tejido resistente.

De igual manera, el cuerpo de goma inflado a la presión de trabajo, expuesto a la radiación solar y sin la protección que le brinda el agua del overtopping, sufre un intenso calentamiento que se transmite al aire de inflado retenido en su interior, y en consecuencia, una elevación de la presión, ya que como hemos dicho, la transformación es prácticamente isócora.

Estas sobre presiones que se generan en el interior del cuerpo de goma por calentamiento del mismo, consecuencia de encontrarse a merced de la radiación solar, son extremadamente perjudiciales para el cuerpo de goma y serán objeto de un estudio más pormenorizado en un capítulo posterior.

9.3.- CURSOS DE AGUA CON ARRASTRES DE HIELO

La estructura flexible que posee una presa de goma es más adecuada para operación en corrientes con arrastres de hielo que una estructura rígida, que debe ser diseñada para resistir a una deformación, que de ocurrir, es de carácter permanente.

Las compuertas neumáticas pueden resistir el hielo por su habilidad para absorber su impacto y energía de manera inofensiva, esto es, con un incremento de presión de aire que produce una depresión en el cuerpo de goma. Una vez pasado el hielo la compuerta vuelve a su forma original.

En el caso de ríos en los que haya propensión a la helada, la presa inflable, por sus características físicas (lados en pendiente y menor frecuencia de estructuras intermedias) es la estructura más adecuada. Una estructura de corte clásico acumula hielo más fácilmente, causando inundaciones aguas arriba, daños a las estructuras inmóviles y atascos en las compuertas.

En el Estado de Montana (USA) y en otras muchas localizaciones distribuidas por el mundo existen numerosos ejemplos, donde las compuertas neumáticas han demostrado que son la alternativa más conveniente para regular cursos de agua con importantes arrastres de témpanos de hielo.

9.4.- RÍOS CON INUNDACIONES FRECUENTES

La compuerta neumática es el equipo más adecuado para el uso en ríos propensos a la inundación debido a las razones siguientes:

1.- Sistema mecánico de auto desinflado. Este sistema, también llamado MADS por sus iniciales en inglés (Mechanical Auto Deflation System) no sólo funciona sin necesidad de personal humano, sino que además es totalmente mecánico. Esto significa que puede funcionar sin energía eléctrica, cuyo suministro puede fallar durante la tempestad que precede o acompaña a una avenida. El sistema funciona mediante un mecanismo que se dispara con el incremento del nivel aguas arriba, abriendo una válvula de desinflado que deja escapar el aire retenido en el interior del cuerpo de goma.

2.- Bloqueo de restos flotantes. Las presas de goma permiten mayor longitud de vanos, lo que se traduce en una menor cantidad de obstáculos al paso de residuos flotantes durante las épocas de caudales elevados.

3.- Pendientes laterales. Las presas de goma inflable pueden colocarse en márgenes con cualquier pendiente. En cambio, las estructuras rígidas, como las compuertas de acero, requieren el empleo de paredes verticales, lo cual afecta al flujo del agua aguas abajo y por tanto a la base de la sedimentación natural del río.

4.- Inmersión de la compuerta. Con excepción de la cámara de control, las compuertas neumáticas pueden y deben permanecer totalmente sumergidas durante cualquier inundación sin deteriorarse. Las compuertas elevadas, en cambio, deben ser diseñadas para levantar la compuerta por encima del máximo nivel de inundación esperado.

9.5.- AGUAS CONTAMINADAS

El caucho EPDM es un polímero casi inerte que es extremadamente estable ante una innumerable cantidad de principios químicos activos. Por ejemplo, resiste el ataque del ácido acético mejor que el acero y de hecho se utiliza en compuestos de goma destinados a recubrir estanques de aguas contaminadas y/o tóxicas.

Si existe un motivo de preocupación con respecto a los anclajes es posible el suministro de elementos de acero inoxidable.

9.6.- ARRASTRES IMPORTANTES

Los arrastres de fondo representan generalmente un grave problema para las compuertas rígidas, ya que su andar discontinuado permite en numerosas ocasiones que se depositen de tal forma que dificultan o impiden la maniobra de estas compuertas. Este problema no existe con las compuertas neumáticas.

9.7.- CURSOS DE AGUA CON ALTA SEDIMENTACIÓN.

Una compuerta neumática puede levantar sin ningún problema al menos el 20% de su altura en sedimentos: por ejemplo, una presa de 2 m puede levantar al menos 0.40 m de sedimento sin ningún problema.

Utilizando el inflado manual, es posible superar la presión normal de trabajo para levantar el peso añadido de los sedimentos, pero posteriormente será necesario reducir la presión mediante el escape de algo de aire, cuando los sedimentos hayan sido ya eliminados.

Si se acumula una gran cantidad de sedimento aguas abajo (down stream) de una compuerta, puede ser aconsejable desinflarla en cuanto exista aguas arriba (up stream) acumulación de un cierto nivel de agua; y después volver a levantarla. Este procedimiento permite que el agua acumulada se lleve el sedimento en la avenida provocada con el desinflado.

Es muy raro (en muy pocas compuertas) y esporádico (muy pocas veces) que los sedimentos del curso de agua en donde está colocada la compuerta lleguen a interferir en la operación normal del equipo.

9.8.- INSTALACIÓN EN ÁREAS NO ELECTRIFICADAS

La falta de energía eléctrica para dar potencia a los compresores de aire puede ser compensada mediante el empleo de un generador o de unos paneles fotovoltaicos dotados de su correspondiente banco de baterías y sistema ondulator.

9.9.- INSTALACIÓN EN ÁREAS INACCESIBLES O SIN ATENCIÓN

Las compuertas neumáticas se pueden instalar en localizaciones de visita infrecuente, ya que su sistema de desinflado automático asegura que en caso de inundación la compuerta se desinflará automáticamente.

Además, hay numerosas experiencias de instalaciones controladas por control remoto.

9.10.- RESPETO AL PAISAJE NATURAL

No es necesario decir que la función primaria de una compuerta es interrumpir el flujo natural del agua. Por otro lado, una compuerta neumática al desinflarse permite un

pasaje del agua mucho más natural que las compuertas de acero y minimiza la interrupción del paso del agua con respecto a las compuertas rígidas de las siguientes maneras:

- Por la habilidad que tienen las compuertas neumáticas para adaptarse a cualquier pendiente lateral, lo cual les permite asumir la forma natural del curso de agua. Al no variarse la sección transversal del río se necesita menos ribera y menor trabajo de adaptación.
- Al necesitar menos estructuras intermedias, las compuertas neumáticas generan menos turbulencias, minimizando los problemas de erosión que puedan tener efecto aguas abajo de las compuertas.
- La simplicidad de la obra civil, así como la no-necesidad de estructuras en altura, aseguran un menor impacto visual en el paisaje.

CAPITULO 10

DURABILIDAD

10.1.- DAÑOS POR ARRASTRES

Si los ríos sólo llevaran agua fresca sin contaminar, la mayoría de las estructuras de control de agua funcionarían sin problemas por períodos largos de tiempo. Sin embargo, como bien es sabido por todos los técnicos que toman parte en el proceso de diseño, construcción y utilización de sistemas de control hidráulico, lo que más peligro presenta del agua es lo que lleva consigo.

Las compuertas neumáticas deben soportar muchos tipos de residuos, algunos de los cuales están descritos a continuación.

10.2.- GRAVA Y ROCAS

Numerosas pruebas de laboratorio y evaluaciones in situ permiten afirmar y demostrar que la resistencia al daño y a los desgastes por parte de las compuertas neumáticas al paso de grava y rocas es notablemente mejor que la correspondiente de cualquier sistema rígido.

La flexibilidad y capacidad de almacenamiento de energía que caracteriza a las compuertas neumáticas les permite disipar la energía en vez de transmitirla, al contrario que en los sistemas rígidos convencionales de compuerta de acero.

10.3.- TRONCOS Y ÁRBOLES

Constituyen una causa de preocupación debido a su masa, fuerza de impacto y frecuencia con la que bajan por los cursos de los ríos. La mejor forma de encuentro entre la compuerta neumática y los troncos es con la compuerta desinflada en el lecho del río, su posición correcta para prevenir inundaciones en la época de grandes caudales.

Una compuerta desinflada sobre el lecho del río presenta un perfil muy reducido, con superficies relativamente lisas. Si a esto se añade que no existe ninguna estructura intermedia en el interior del cauce, o que ésta es muy pequeña, las probabilidades de atrapar troncos y árboles se reducen casi a cero, lo que lo convierte en un sistema

especialmente apto para localizaciones donde sea previsible la avenida de restos de este tipo.

Sin embargo, puede ocurrir que el río lleve troncos que interfieran con la compuerta en posición de trabajo. En tal caso la habilidad de la compuerta para esquivar troncos depende en gran medida del tamaño del tronco, si tiene proyecciones, y del overtopping o profundidad de vertido.

Si el tronco no es grande y la profundidad de vertido es razonable, el tronco debería rodar por encima. Si esto no es así, el tronco se quedará en el embalse hasta su retirada manual o hasta que la compuerta se desinflen para dejarle pasar.

10.4.-SEDIMENTOS

En cuanto a los arrastres no flotantes transportados por un río, el más frecuente suele ser el sedimento, que transportado a grandes velocidades (superiores a 3 m/seg.) no constituye una preocupación, ya que la goma es menos susceptible de sufrir erosión que el hormigón.

En el caso de cursos de agua susceptibles de depositar grandes cantidades de sedimento sobre la compuerta, debemos tener en cuenta que, como ejemplo, una compuerta de 2 metros de altura real puede y debe inflarse a 0.2 kgf/cm². Esta presión, a pesar de ser muy pequeña, supone que en un m² (10.000 cm²) la compuerta despliega una fuerza ascensional de 2.000 kgr. Esto quiere decir que aunque exista 1 metro o 1,5 metros de profundidad de sedimentos, (dependiendo de la densidad de los mismos) la compuerta no debe tener ningún problema para emerger del lecho del río y dejar que los sedimentos que durante el inflado no hayan caído a los lados del cuerpo de goma los arrastre la corriente del río.

En general no se recomienda levantar más del 20% de su altura en sedimentos (en el ejemplo 0,4 metros). Para evitar forzar el comportamiento de estas compuertas, y especialmente, para que una vez levantado el sedimento la presión interior vuelva a su valor óptimo, se suelen instalar unas instrucciones adicionales en el sistema de control que impidan levantar la compuerta usando solamente la presión de aire.

10.5.- VIDA ÚTIL DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

Se estima que la vida útil de una compuerta neumática actualmente, dependiendo de las condiciones en que trabaje, puede exceder fácilmente de 25/30 años. Esta estimación se basa en la experiencia acumulada hasta la fecha, en las mejoras que se han ido introduciendo en los compuestos del caucho, en el diseño y disposición de las actuales compuertas respecto de las primeras y en las pruebas de envejecimiento acelerado realizadas en laboratorio.

Así por ejemplo, los actuales cuerpos de goma tienen casi el doble de grosor que antes; se han encontrado mezclas y compuestos de caucho cada vez más eficientes, como el EPDM; el empleo de deflectores elimina la oscilación y permite que la compuerta descansa desinflada sobre la losa sin golpearla; ya se fabrican cuerpos de

goma capaces de trabajar parcialmente inflados, los sistemas de control son mucho más precisos y seguros, los inflados excesivos y las sobre presiones por calentamiento están notablemente mejor controlados que antes, etc. Pues bien, existen numerosas compuertas en todo el mundo que, aunque están construidas con los materiales y la tecnología de aquel tiempo y que no cuentan con ninguno de estos adelantos, llevan más de 30 años instaladas y aún funcionan perfectamente.

Sin embargo, la vida útil de una compuerta depende en gran medida de las condiciones medioambientales en que trabaja. Especialmente importante es el ataque de los rayos ultravioletas y del ozono, que hacen envejecer prematuramente el caucho. Por ello, el deterioro más rápido se da en las compuertas que permanecen infladas sin overtopping.

Respecto del desgaste, en condiciones normales, en ausencia de arrastres erosivos y con velocidades por debajo de 3 m/seg. en el curso de agua, tras numerosas pruebas y ensayos de laboratorio se estima que la reducción en el espesor del caucho de la lámina exterior de goma (la situada entre el agua y la primera capa de tejido resistente) es de 0.010 a 0.015 mm/año dependiendo de la calidad del mismo.

10.6.- ESTABILIDAD DE LA CIMENTACIÓN

Las compuertas neumáticas constituyen elementos dinámicos y flexibles que absorben energía del agua y de los restos que vienen contra la compuerta, con lo que transmiten muchos menos impactos y vibraciones a las cimentaciones en donde se encuentran ancladas que sus homólogos sistemas tradicionales.

Además, pequeños fallos locales de la cimentación, como agrietamientos y/o asentamientos o movimientos de la losa, que pueden llegar a causar el atasco de compuertas de acero, no interfieren con el normal funcionamiento de una compuerta neumática.

Por tanto, desde el punto de vista de las cimentaciones, no generan problemas y absorben algunos de los que se puedan presentar ajenos a su trabajo.

10.7.- VANDALISMO

Obviamente, las compuertas neumáticas no resisten los ataques de cuchillos o pistolas igual de bien que los elementos de hormigón o acero. Se recomienda que se evalúe la amenaza de vandalismo dentro del estudio de viabilidad de la instalación de una compuerta neumática.

Existen estudios y experiencias que indican que las balas pueden perforar el cuerpo de goma. El daño en esos casos es debido a la velocidad, no a la masa, lo que explica que una bala sea una amenaza y una roca no lo sea. En todo caso, el orificio causado por la bala es menos de 1/3 de su diámetro debido a la elasticidad de la goma, que rellena el mismo.

La presión del aire en el cuerpo de goma es siempre reducida, con lo que la pérdida de aire por agujero de bala es siempre muy lenta. Además, si la compuerta cuenta con un sistema automático de control, el sistema detectará inmediatamente la pérdida de presión de aire, y cuando se salga del intervalo de tolerancia marcado como consigna, arrancará el compresor y le dará orden de inflar hasta reponer el aire perdido.

Un ataque con cuchillo puede perforar la goma si se ejecuta con fuerza, por lo que resulta necesario considerar este tipo de amenaza. El ataque con cuchillo es más preocupante que el de bala porque el corte es mayor y más laborioso de reparar.

Nosotros tenemos un sistema para combatir el vandalismo. Consistente en el empleo de fragmentos de cerámica embebidos en la cara exterior de la goma para protegerla de los cortes de navaja o cuchillo.

CAPITULO 11

CONDICIONAMIENTOS HIDRODINÁMICOS

11.1.- OVERTOPPING MÁXIMO

Una compuerta neumática estándar, trabajando con el sistema de control más sencillo, es decir, totalmente inflada o totalmente desinflada, sin posiciones intermedias de inflado, de forma continuada y sin limitación de tiempo, la máxima altura de la lámina de agua de vertido que puede soportar es del **20%** de la altura real de la compuerta. Por ejemplo, para una compuerta de 2 m de altura, la lámina de agua máxima no debería exceder 0.40 metros.

Cuando la compuerta puede trabajar parcialmente inflada, y tiene instalado un sistema USWLCS, el caudal que puede verter depende de la calidad del cuerpo de goma. Con una lámina de goma de gran calidad se puede llegar a trabajar con la compuerta inflada al 10% de su altura manteniendo estable el nivel de agua en el vaso, es decir, con un overtopping de hasta el **90%** de su altura real.

11.2.- DATOS DEL CURSO DE AGUA NECESARIOS PARA EL DISEÑO

Siempre son necesarios los datos referentes a la pendiente del lecho del río 100 m. antes y 1.000 m. después del lugar previsto para la instalación de la compuerta, y la gama de caudales; especialmente cuando se prevea el empleo de un sistema USWLCS que permite el mantenimiento del nivel de agua dentro de unos límites muy estrictos.

11.3.- PRESIÓN MÁXIMA DEL AIRE DE INFLADO

La presión máxima de inflado de las compuertas neumáticas depende de su altura y del overtopping máximo con el que van a trabajar. En la tabla de la página siguiente puede comprobarse que la presión de aire para una determinada altura de compuerta es la misma que la presión de la correspondiente columna de agua igual a la altura de la compuerta más el overtopping máximo.

En el caso de sistemas escasamente automatizados, el overtopping máximo suele ser el 20%. En los casos en que se instale el USWLCS, se trabaja con un **overtopping teórico a presión máxima** (compuerta totalmente inflada) del 5 %.

ALTURA REAL metros	INFLADO TODO O NADA mbar	SISTEMA USWLCS mbar
1.0	120	110
2.0	240	220
3.0	360	330
4.0	480	440

11.4.- COEFICIENTE DE DESCARGA

El caudal de descarga teórico de una compuerta neumática **cuando está totalmente inflada**, puede ser obtenido de la fórmula siguiente:

$$Q = C \cdot B \cdot h_u^{3/2}$$

Donde:

- Q = Caudal (m³/s)
- B = Longitud de la presa de goma (metros)
- h_u = Altura o profundidad de la lámina de vertido (metros)
- H_R = Altura efectiva real de la presa
- C = Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga se calcula según la fórmula siguiente:

$$C = 1.77 \cdot h_u/H_R + 1.05$$

Una vez conocida la relación h_u/H_R, se puede obtener el coeficiente de descarga en la siguiente tabla:

h _u /H _R	C	h _u /H _R	C	h _u /H _R	C	h _u /H _R	C
0,001	1,052	0,075	1,183	0,275	1,537	0,450	1,847
0,005	1,059	0,100	1,227	0,300	1,581	0,475	1,891
0,010	1,068	0,150	1,316	0,325	1,625	0,500	1,935
0,015	1,077	0,175	1,360	0,350	1,670	0,525	1,979
0,020	1,085	0,200	1,404	0,375	1,714	0,500	1,935
0,025	1,094	0,225	1,448	0,400	1,758	0,575	2,068
0,050	1,139	0,250	1,493	0,425	1,802	0,600	2,112

11.5.- INFLUENCIA DEL OVERTOPPING EN LA ALTURA DE LA COMPUERTA

El peso del agua tiene un efecto muy escaso sobre la altura del cuerpo de goma.

H_W/H_R	H/H_R	H_W/H_R	H/H_R
0,55	1,082	1,05	0,982
0,60	1,078	1,10	0,965
0,65	1,072	1,15	0,956
0,70	1,065	1,20	0,947
0,75	1,057	1,25	0,938
0,80	1,049	1,30	0,930
0,85	1,040	1,35	0,922
0,90	1,031	1,40	0,915
0,95	1,014	1,45	0,909
1,00	1,000	1,50	0,905

El cuadro de al lado muestra la relación entre la altura instantánea de la compuerta H y su altura real H_R en función de la proporción entre la altura de agua embalsada H_W y la altura real H_R , de la compuerta cuando ésta está totalmente inflada.

Supongamos que queremos calcular la altura instantánea de una compuerta totalmente inflada cuya altura real H_R es de 2 metros y que se encuentra vertiendo agua en una cota H_W de 2.40 metros, es decir, con el 20 % de overtopping.

Calculamos el factor $H_W/H_R = 2.40/2.00 = 1.20$. Entrando en la tabla con el valor calculado para $H_W/H_R = 1.20$ obtenemos $H/H_R = 0.947$.

Por tanto, la altura instantánea H de la compuerta en ese momento será la siguiente:

$$H = 0.947 H_R = 0.947 \times 2 \text{ m} = 1.894 \text{ metros}$$

11.6.- INFLUENCIA DEL OVERTOPPING EN LA PRESIÓN DE LA COMPUERTA

La tabla siguiente muestra la presión instantánea del aire del interior del cuerpo de goma de una compuerta neumática P totalmente inflado a su presión nominal de trabajo P_0 según se incrementa el nivel de agua en contacto con ella H_W en relación con su altura real H_R .

H_W/H_R	P/P_0	H_W/H_R	P/P_0
0,60	0,7100	1,05	1,0780
0,65	0,7468	1,10	1,1148
0,70	0,7836	1,15	1,1516
0,75	0,8204	1,20	1,1884
0,80	0,8572	1,25	1,2252
0,85	0,8940	1,30	1,2620
0,90	0,9308	1,35	1,2988
0,95	0,9676	1,41	1,3356
1,00	1,0044	1,45	1,3724
1,05	1,0412	1,50	1,4130

Supongamos que queremos calcular en las mismas circunstancias la presión instantánea de la compuerta del ejemplo anterior.

La altura real H_R es de 2 metros y se encuentra vertiendo agua en una cota H_W de 2.40 metros, es decir, con el 20 % de overtopping.

Entrando en la tabla con el valor calculado para $H_W/H_R = 1.20$ obtenemos $P/P_0 = 1.1884$

$$\text{Por tanto } P = 1.1884 P_0$$

11.7.- EL EFECTO V

Como ya hemos indicado en el capítulo 5, cuando describíamos la función de los tubos separadores, el cuerpo de goma no se desinfla de manera uniforme, esto es, el azud de una presa no se mantiene recto y paralelo a la cimentación según se está desinflando. El vertido de agua por encima de una compuerta en proceso de desinflado incrementa la presión sobre el cuerpo de goma, que tiende a hundirse en una región localizada, creando una depresión en forma de cuña en “V”.

Esta cuña se mantiene hasta que se ha evacuado entre el 70% y el 90% del aire de su interior, dependiendo de la altura y longitud del cuerpo de goma, de la altura del agua represada o de la profundidad de la lámina de vertido, de la pendiente del cauce de evacuación del agua represada etc.

La cuña en “V” tiene el efecto de concentrar el flujo en el punto donde la depresión ocurre. Es un fenómeno que no debe ser objeto de preocupación ya que en la práctica no genera ninguna tensión perjudicial en el cuerpo de goma y además, es de corta duración; ya que sólo se produce durante una fase del desinflado.

11.8.- MAQUETAS DE ENSAYO

Los modelos reducidos y maquetas empleadas en los ensayos de laboratorio para estudiar el comportamiento de algunas compuertas neumáticas sometidas a condiciones especiales suelen ser construidos de acuerdo a la Ley de FROUDE.

CAPÍTULO 12

PROBLEMAS COMUNES A TODAS LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS

12.1.- INCONVENIENTES HIDRODINÁMICOS DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS CUANDO PERMANECEN DESINFLADAS.

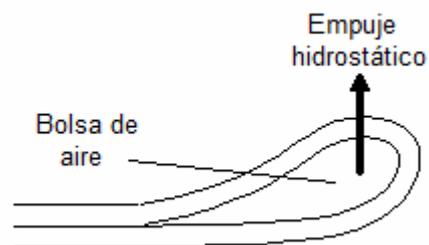


En la figura de la izquierda, se puede ver un esquema con la forma que adoptan las compuertas neumáticas para descansar sobre el lecho del río una vez desinfladas, con una bolsa de aire residual consecuencia del aire que queda retenido en su interior porque el desinflado no puede ser completo a causa de la rigidez de la lámina de goma.

Esta bolsa de aire se encontrará sometida a las 4 sollicitaciones que a continuación detallamos:

1.- Empuje hidrostático.

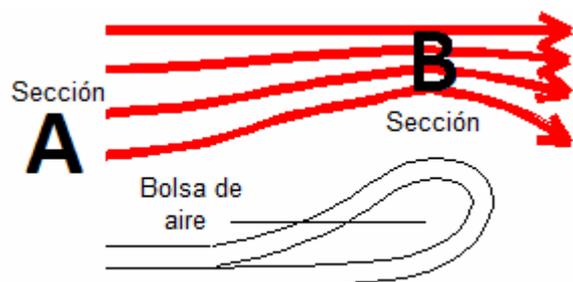
El volumen de aire que queda retenido en el interior del cuerpo de goma empuja hacia arriba la bolsa de aire con la fuerza del empuje o impulso hidrostático, que es igual al peso del agua desalojada por ese volumen de aire.



Dado que la bolsa de aire puede tener fácilmente un \varnothing equivalente de 300 mm, el valor del empuje puede llegar a los 300 Kgr/metro lineal, y teniendo en cuenta que la lámina de goma pesa entre 20 y 30 Kgr/m², el empuje es suficiente para despegar la lámina de goma del fondo del río y elevarla hasta la zona de entre aguas.

2.- Absorción por efecto Venturi

La sección transversal útil del río en el lugar en que se encuentra localizada la bolsa de aire (S_B) es inferior a la sección transversal útil del río situada en el punto A, anterior a la localización de la bolsa



(S_A) y dado que el gasto o caudal del río (m^3/seg) permanece constante, es claro que la velocidad del agua en la sección B (v_B) será mayor que en la sección A (v_A), ya que:

$$\text{Gasto} = S_A v_A = S_B v_B = \text{Constante}$$

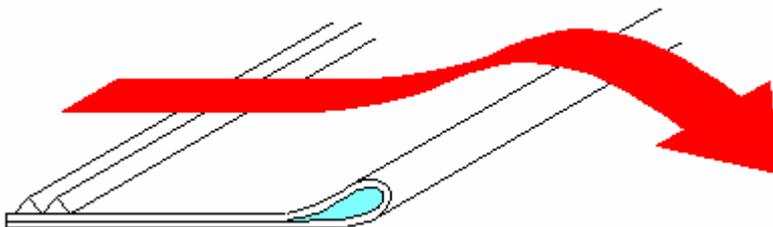
Si la sección (S_A) del cauce en el punto A es mayor que la sección (S_B) del cauce en el punto B, la velocidad (v_A) del agua en el punto A deberá ser inferior a la velocidad (v_B) del agua en el punto B.

El aumento de la velocidad en B determina un incremento de la altura cinética en ese punto, y por lo tanto, según el principio de Bernoulli, un descenso en el valor de la presión estática total en el mismo. Este descenso de la presión estática en B se traducirá en un efecto succión del flujo de agua sobre la zona que contiene la bolsa de aire.

Las acciones simultáneas del empuje hidrostático y la succión generada por el efecto Venturi de la corriente del río, ambas unidas, provocan el despegue de la bolsa de aire de la lámina de goma desde su posición sobre la losa y tiran de ella en dirección ascendente hacia la zona de entre aguas.

3.- Empuje del agua

La corriente de agua presiona sobre la bolsa de aire en dirección hacia aguas abajo, tal como indica la figura, empujando a la lámina de goma hacia la losa de amarre. La fuerza que desarrolla el agua es directamente proporcional a la superficie útil de lámina de goma que la corriente encuentra a su paso; y la superficie útil es progresivamente creciente a medida que la lámina de goma se aleja de la losa.



Dado que la sección útil enfrentada a la fuerza de la corriente es mayor cuando la lámina de goma está más lejos de la losa, la fuerza que hace la corriente también será progresivamente creciente a medida que la lámina de goma se aleje de la losa.

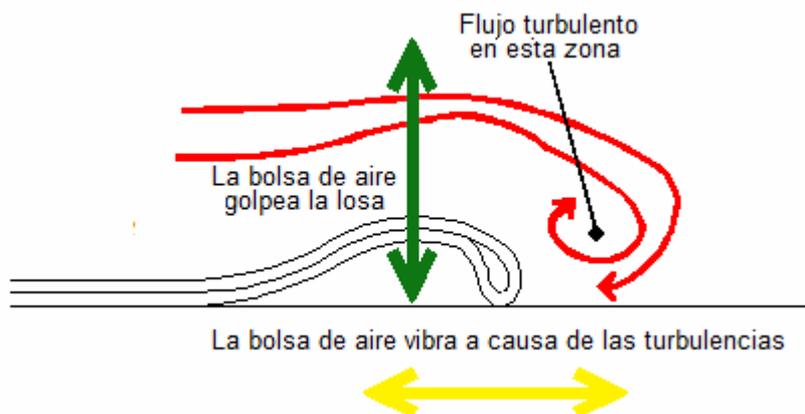
4.- Peso propio de la lámina de goma.

Obviamente empuja también a la lámina de goma hacia la losa.

En resumen, tenemos dos fuerzas que tratan de sacar a flote la bolsa de aire (el empuje y el efecto Venturi) y dos fuerzas que tratan de hundir la compuerta contra la losa (la fuerza de la corriente y el peso propio).

La conjunción de estas fuerzas produce la siguiente secuencia de movimientos:

- El empuje de flotación y el efecto Venturi despegarán la lámina de goma de la losa de anclaje la cual irá ascendiendo entre aguas hacia la superficie del río.
- A medida que la lámina va ascendiendo entre aguas, enfrenta una superficie cada vez mayor a la corriente del río, por lo que la fuerza que hace la corriente del río tratando de empujar a la lámina hacia abajo, contra la losa, va siendo también progresivamente mas fuerte.
- Llego un momento en que la fuerza de la corriente sumada al peso propio de la compuerta superan al empuje + el efecto Venturi; entonces se frena la ascensión de la compuerta, deja de ascender y comienza a descender de forma acelerada hasta que llega a la losa golpeándola.
- Dado que la lámina de goma es elástica, esta rebota en la losa y adquiere impulso para volver a ascender hacia arriba y comienza un nuevo ciclo de ascenso y descenso entre aguas, ciclo que termina con otro golpe sobre la losa.

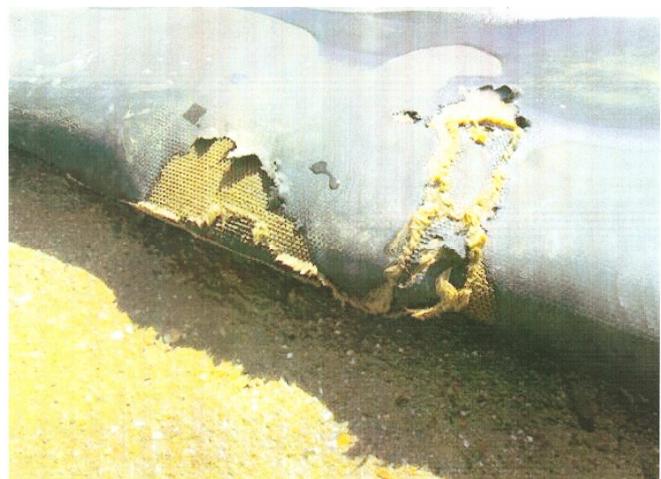


El resultado es un golpeteo permanente de la lámina de goma contra la losa (que está señalado en color verde en la figura adjunta) de intensidad y frecuencia muy variable de unos casos a otros, ya que depende de varios parámetros tales como la velocidad de la corriente, el tamaño de la bolsa de aire, el espesor y peso propio de la lámina de goma, su rigidez, el valor del overtopping, etc.

4.- Turbulencias

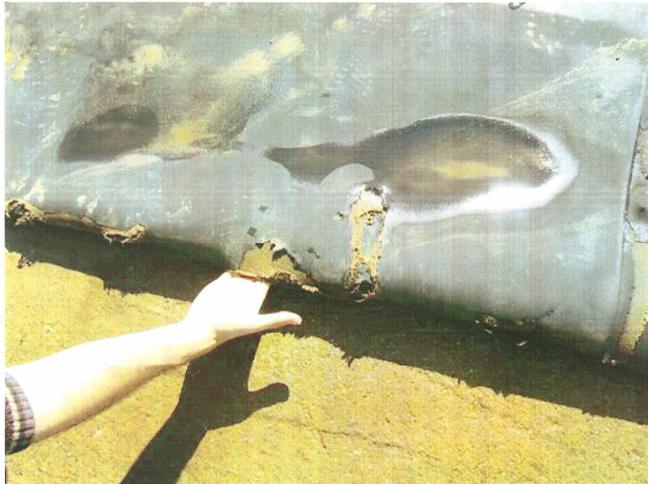
Sin embargo, la superficie que golpea la losa, no siempre es la misma ni es igual en todos los casos, porque influye de manera determinante las turbulencias que se forman en el trasdós de la bolsa de aire. El efecto de esta turbulencia es el movimiento vibratorio que está señalado con una flecha de color amarillo en la figura anterior.

El resultado de ambas acciones sobre la lámina de goma (el golpeteo contra la losa según la flecha verde y el rozamiento según la flecha amarilla) se puede apreciar en las dos fotografías adjuntas, sacadas de un cuerpo de goma erosionado por esta causa.



Existen cuatro caminos alternativos (complementarios no excluyentes) para resolver este problema de las abrasiones y desgastes por golpeteo y rozamiento del cuerpo de goma. Son los siguientes:

1.- La primera alternativa es actuar sobre la geometría de la compuerta y sobre la técnica de fabricación de la lámina de caucho, de forma tal, que se minimice o se anule totalmente la posibilidad de aparición de estas bolsas de aire.



BRIDGESTONE consiguió construir un cuerpo de goma capaz de desinflarse completamente sin que la línea de concentración de tensiones que supone el pliegue de la aleta pusiera en riesgo la estabilidad de su cuerpo de goma; pero la tecnología necesaria para ello desapareció del mercado cuando esta multinacional japonesa decidió en el año 2007 abandonar esta actividad.

Sin embargo en estos años, algunos constructores chinos y coreanos están intentando copiar este sistema, pero dado su bajo nivel tecnológico y el volumen de inversión que es preciso disponibilizar para abordar tal variante de construcción, los modelos que han conseguido (al menos los que están presentando en el mercado) no tienen nada que ver con la compuerta de BRIDGESTONE; ya que no han logrado que estos modelos posean una aleta suficientemente larga y rígida (lo cual la hace inútil como deflector) y están muy lejos de poder asegurar que estas compuertas no colapsen por la línea de la aleta.

Sin embargo en estos años, algunos constructores chinos y coreanos están intentando copiar este sistema, pero

2.- La segunda alternativa existente para combatir este problema consiste en construir la lámina de goma seleccionando los componentes y materiales de la misma, de forma que ésta sea más flexible (menos rígida) y así se minimicen las dimensiones de la bolsa de aire cuando se desinflen la compuerta, puesto que ésta se plegará mejor sobre sí misma.

Para ello se recurre a numerosas argucias, tales como, construir el cuerpo de goma con menores espesores (lo cual lo hace más vulnerable), utilizar cauchos más flexibles como los cloroprenos (menos resistentes que el EPDM – Etileno Propileno Dieno Monómero), construir el tejido de refuerzo con nylon (de inferior calidad y prestaciones que el poliéster, pero más fácil de deformar), rebajar la resistencia a tracción del caucho base (a veces no llega ni siquiera a 12 MPa), etc.

Este tipo de variantes, además de que no resuelven el problema, provocan una disminución evidente en la calidad, durabilidad, seguridad y operatividad de la compuerta en cuestión. Lo realmente interesante de su observación, es que también suponen una significativa reducción en los costes de producción. Aunque muchos constructores optan por esta vía para aminorar los efectos de este problema y aprovechar al mismo tiempo tal disminución de costes, es obvio que ésta no es, ni de lejos, una buena solución para el mismo.

3.- La tercera alternativa consiste en minimizar la rugosidad de la losa de anclaje recurriendo a una cuidadosa terminación del hormigón mediante fratasado de la superficie exterior de la losa donde apoyará la compuerta desinflada. En algunos casos se recurre también a una impregnación posterior de la losa con algún tipo de resina epoxi especial, que la vuelve incluso resbaladiza.

La experiencia ha demostrado que con estas actuaciones se consigue un favorable efecto inmediato, pero la acción erosiva del agua cuando la compuerta está inflada y vertiendo sobre la losa, y la erosión provocada por los arrastres del río cuando la compuerta está desinflada, terminan por levantar la capa de resina si es que existe y en todo caso, dañan la superficie de la losa; que rápidamente se vuelve rugosa y erosiva. Por tanto, se trata de una solución que además de que no es barata, exige un costoso y delicado mantenimiento para no volverse rápidamente inservible.

4.- La cuarta alternativa consiste en la instalación de una lámina antiabrasiva de caucho encima de la losa, de forma que se golpee goma con goma, y también roce goma con goma. Obviamente, esta es la alternativa más costosa, pero también la más eficaz y fiable.

Adjuntamos la fotografía de una compuerta con una lámina antiabrasión instalada. Obsérvese que el agua del overtopping caerá sobre dicha lámina, cuya flexibilidad y resistencia al choque del agua es muy superior a cualquier resina. Además, esta lámina también es mucho más resistente a la erosión que generan las piedras y/o arenas que transporte el río.

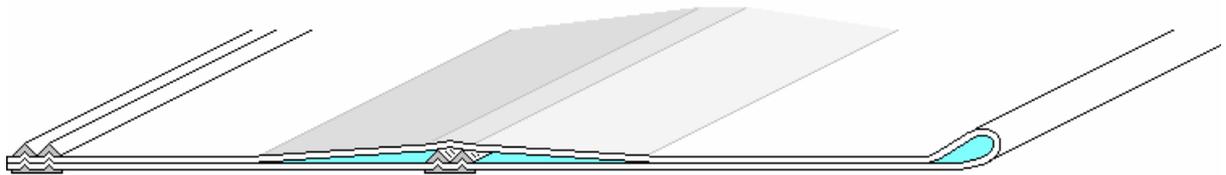


Obviamente, el coeficiente de rozamiento del cuerpo de goma con la lámina antiabrasión es casi cero, porque existe una delgada capa de agua entre ambas superficies; y desde el punto de vista del rozamiento, el agua es para el caucho como la grasa para un rodamiento.

12.2.- INCONVENIENTES GENERADOS POR LA DOBLE LÍNEA DE ANCLAJE

Ya hemos examinado en qué condiciones una compuerta puede presentar problemas de flotación. Este efecto de flotación es muy negativo ya que provoca numerosos problemas en la compuerta, tales como inestabilidad, erosiones en la parte inferior del cuerpo de goma por rozamiento con la losa, acumulación de limos, arenas e inclusive cantos rodados o piedras de bordes afilados entre la losa y la lámina inferior del cuerpo de goma, vibraciones que provocan fatiga en la zona próxima a los anclajes, esfuerzos en la zona de amarre de los fittings, especialmente en el fitting de drenaje, etc. Como ya hemos indicado, en este caso y en otros muchos, se hace necesaria la instalación de una segunda línea de anclaje.

Sin embargo, aunque la segunda línea de anclaje soluciona muchos problemas, también crea otros que deben ser igualmente solucionados, y que aparecen cuando la compuerta se encuentra desinflada. En el esquema adjunto se muestra una compuerta desinflada dotada de una segunda línea de anclaje.



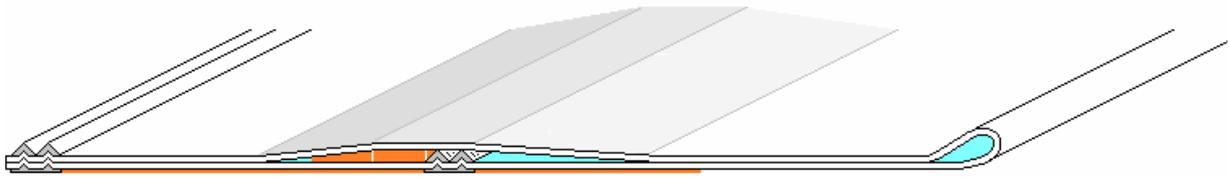
Como podemos apreciar, cuando la compuerta está desinflada, la segunda línea de anclaje provoca la aparición de una protuberancia que deja las superficies sombreadas a merced de los arrastres del río en una zona del cauce que ya se encuentra lejos de la protección que le brinda el receso hidráulico a la 1ª línea de anclaje.

Debemos hacer la observación de que, aún en los casos de baja velocidad de la corriente del río, la compuerta permanece siempre tensa en esta zona, y el hueco que se genera, que en la figura aparece en color azul claro, se mantendrá inalterable favorecido por la rigidez propia de la lámina de goma.

En estas circunstancias, una piedra pesada de bordes afilados o cualquier otro objeto pesado y puntiagudo que se vea arrastrado por la corriente se detendrá en la zona sombreada oscura, y la dificultad que encuentra para rodar por la pendiente de la goma hasta superar la protuberancia de la línea de anclaje, le obligará a permanecer durante un tiempo indeterminado sobre la lámina de goma sometido a los embates del agua que le empujará irremediablemente contra la tensa lámina de goma.

La alta elasticidad y resistencia a compresión del caucho le proporciona a la lámina de goma una gran resistencia al punzonado cuando ésta se encuentra apoyada y el esfuerzo se realiza trabajando el caucho a compresión, pero tal resistencia es muy inferior cuando la lámina de goma está en tensión entre dos apoyos y debe trabajar a flexión o cortadura; y este es el caso que nos ocupa.

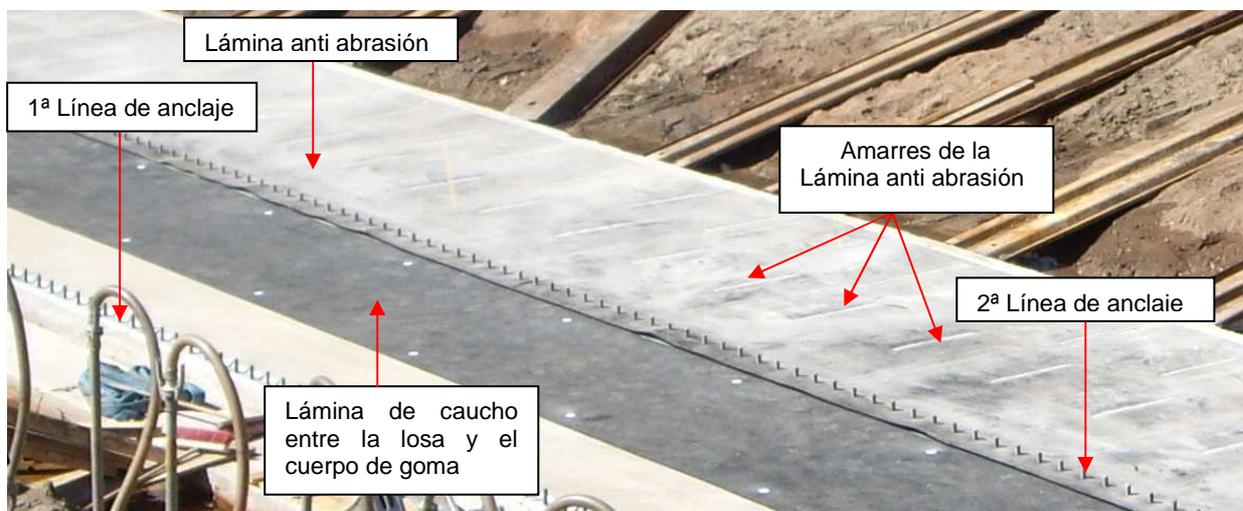
Para paliar este efecto, es necesario "rellenar" estos huecos, de tal forma que la lámina de goma permanezca en esta zona firmemente apoyada cuando está desinflada y se puedan depositar sobre ella objetos pesados y puntiagudos o cortantes sin que la lámina tenga posibilidades de ceder.



Esto se consigue mediante la colocación de una lámina de caucho entre la losa y el cuerpo de goma y unos cojines de caucho en el interior del mismo (en el esquema coloreados en naranja) que cumplen las funciones siguientes:

- 1.- Permiten que la zona del footprint se comporte como un único bloque de caucho.
- 2.- Aumentan la longitud del plano inclinado aumentando la inestabilidad de los arrastres, que encuentran dificultades para permanecer en la zona, favoreciendo, en consecuencia, que sigan su camino aguas abajo.

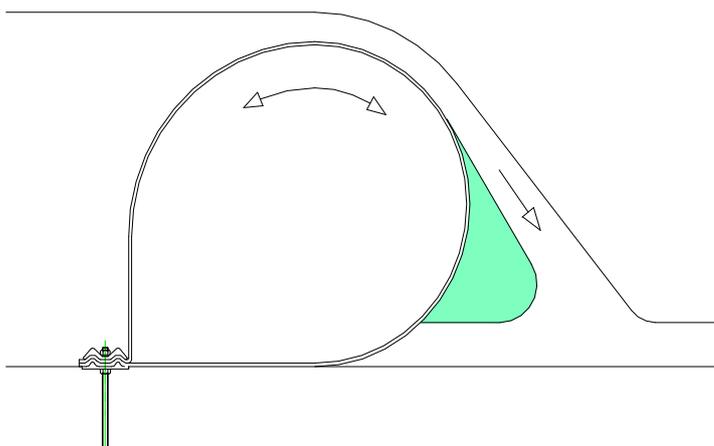
En la fotografía siguiente se muestra la losa con la lámina de caucho y la lámina antiabrasión ya listas para ser instalado sobre ellas el cuerpo de goma.



En la foto de la página siguiente se puede ver un cuerpo de goma abierto mostrando la disposición de los tubos espaciadores y la segunda línea de anclaje. Los cojines de caucho interiores se instalan entre las dos líneas de anclaje, en el espacio que se denomina foot print. Omitimos información gráfica de su instalación porque el sistema está amparado por la correspondiente patente y no podemos divulgarla.



12.3.- INCONVENIENTES HIDRODINÁMICOS DE LAS COMPUERTAS NEUMÁTICAS CUANDO TRABAJAN CON OVERTOPPING



Cuando cualquier compuerta está trabajando inflada y con overtopping, se crea un espacio herméticamente cerrado (que en el dibujo aparece rellenado de color azul) delimitado por el nivel de agua down stream (o por losa), el trasdós de la compuerta y el agua de vertido.

La vena líquida adquiere una velocidad progresivamente creciente en su caída, provocando por efecto Venturi una absorción de aire de esta cavidad y por consiguiente, genera una depresión o vacío en este espacio.

El efecto que este vacío provoca en la compuerta es parecido al que se provocaría en una persona que estuviera sentada en una silla y apoyada en el respaldo, a la cual en un momento determinado se le retirase tal respaldo y cayese de espaldas. Cuando disminuye la presión en su trasdós, la compuerta también pierde su soporte y se "cae" hacia aguas abajo.

Al desplazarse hacia aguas abajo, la compuerta comprime el espacio hermético, y eleva casi instantáneamente la presión. Una vez equilibrada la presión en el trasdós con las fuerzas de aguas arriba, la única fuerza que queda es la del caucho en tensión, que provoca que la compuerta recupere su posición inicial.

De nuevo se volverá a generar la depresión en el espacio hermético y la compuerta "caerá" de nuevo hacia aguas abajo hasta equilibrar la presión. El ciclo se repite indefinidamente y a gran velocidad, generando una vibración de varios ciclos por segundo de frecuencia, que es extremadamente perjudicial porque fatiga la lámina de goma en la región más próxima a los anclajes y provoca erosiones en el trasdós de la compuerta al rozar con la losa.

Estas depresiones provocadas por los caudales de vertido también se dan en los embalses de hormigón y son bien conocidas por los especialistas.

En los diques de hormigón, la depresión creada en este espacio cerrado termina por compensarse con aire obtenido del exterior, que atraviesa la vena líquida en forma de



pequeñas burbujas de aire recubiertas de agua que se proyectan con gran violencia contra el hormigón (cavitación) generando desgastes y desconchados en las paredes exteriores del dique. Para evitar este pernicioso efecto se suelen instalar una o varias tomas de aire que comunican este espacio con el exterior, las cuales permiten compensar la pérdida del aire que absorbe el vertido, eliminando la hermeticidad y la cavitación.

En las compuertas neumáticas no se puede recurrir a la instalación de ningún tubo por las pequeñas dimensiones de este espacio y por la disposición geométrica de la compuerta, pero la solución es la misma: es necesario romper la hermeticidad de este espacio; y esto se consigue con aletas deflectoras que separan del cuerpo de goma a la vena líquida, dejando espacios abiertos que comunican el trasdós de la compuerta con el aire exterior.

12.4.- EL PROBLEMA DE LAS SOBREPRESIONES

Otro problema que afecta a todas las compuertas neumáticas aunque de forma muy variable dependiendo de las condiciones medioambientales en que debe operar y de las características del río en que está instalada, es el problema de las sobre presiones del aire en el interior del cuerpo de goma.

Hay dos circunstancias que, cuando se presentan, pueden suponer un aumento importante de la presión del aire de inflado del interior; y son el calentamiento por efecto de la radiación solar y los aumentos repentinos del caudal del río; bien al principio de una avenida o por laminación desde un pantano de cabecera.

En el punto 9.2 ya hemos explicado que una compuerta que no vierte agua, cuando está expuesta a una insolación intensa se calienta, en primer lugar, la lámina exterior de goma y al de cierto tiempo, también se calienta el aire de su interior. Además, si tenemos en cuenta que el calor específico del aire es muy pequeño, deduciremos que con una pequeña cantidad de calor aportado, el aire del interior se calentará fácilmente y elevará rápidamente su temperatura.

Aunque el aire no es un gas perfecto, para simplificar podemos estudiar su comportamiento (con la suficiente aproximación) como si lo fuese. Recordemos que la ecuación de estado de los gases perfectos, para una masa determinada de aire, nos dice que:

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P \cdot V}{T}$$

En esta expresión los símbolos representan lo siguiente:

- **P₀** es la presión que ejerce el aire frío sobre las paredes del cuerpo de goma.
- **V₀** es el volumen que ocupa el aire frío, que obviamente es igual al volumen de la compuerta.
- **T₀** es la temperatura absoluta (en grados Kelvin) del aire frío y se calcula según la expresión $T_0 = 273 + t_0$, siendo t_0 la temperatura del aire frío en °C
- **P** es la presión que ejerce el aire caliente.
- **V** es volumen que ocupa el aire cuando está caliente, que es el volumen de la compuerta cuando ésta está caliente. Dado que es prácticamente despreciable el aumento de volumen del cuerpo de goma por efecto de la dilatación y de la sobre presión, podemos considerar el volumen del cuerpo de goma inalterable. Por tanto $V \approx V_0$
- **T = T₀ + ΔT** es la temperatura absoluta del aire caliente, siendo ΔT el incremento de temperatura absoluta del aire, es decir, $\Delta T = (273 + t) - (273 + t_0) = t - t_0 = \Delta t$, donde t es la temperatura del aire caliente, t_0 la del aire frío e Δt el incremento de temperatura en grados centígrados respectivamente. Por tanto $T = 273 + t_0 + \Delta t$

Simplificando en la expresión anterior el volumen, sustituyendo T₀ y T por su valor y operando, obtenemos la expresión siguiente:

$$P = P_0 + P_0 \cdot \frac{\Delta t}{273 + t_0}$$

Por tanto, a un Δt en la temperatura del aire en grados centígrados, corresponderá un ΔP que se puede calcular según la expresión:

$$\Delta P = P_0 \cdot \frac{\Delta t}{273 + t_0}$$

Nosotros hemos podido comprobar que la lámina de goma de una compuerta expuesta a una intensa radiación solar llega a sufrir temperaturas muy elevadas, superiores a 70°C y aún mayores, aunque la temperatura ambiente no llegue ni siquiera a 30°C.

Imaginemos una compuerta cualquier día de verano, que durante la noche se encuentra inflada a su presión nominal de trabajo vertiendo un pequeño overtopping de agua fría (que en muchos casos no llegará a los 15°C).

Supongamos también que por cualquier causa deja de verter durante el día y se vacía en parte o totalmente el vaso (apertura de compuertas de riego, desvíos, bombeo de agua del río para utilización urbana o rural, escala de peces, etc.) y el cuerpo de goma queda expuesto a la radiación solar, sin verter agua y con poca agua en el vaso, circunstancia que es bastante habitual en algunos casos. En las horas posteriores al mediodía, esa compuerta puede llegar fácilmente a tener que soportar un 25% de presión superior a la normal de trabajo; lo cual puede causarle serios daños.

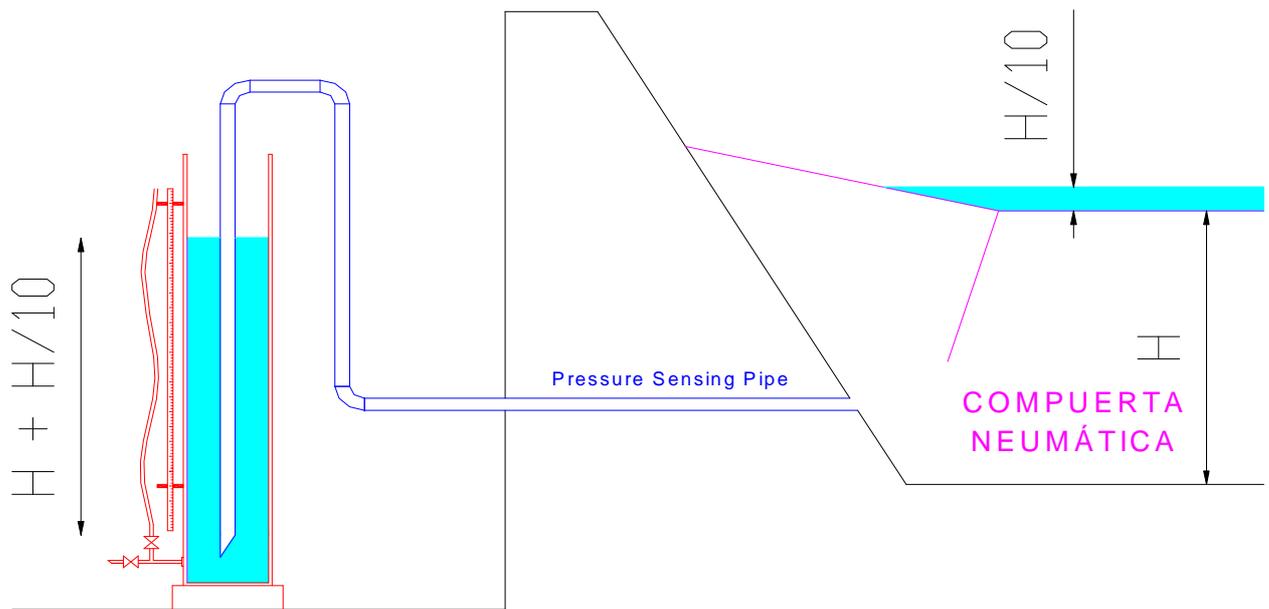
Por otra parte, casi ningún constructor de compuertas tiene previsto desinflar sus equipos con el MADS, que, en general, funciona como un último recurso para desinflar la compuerta como emergencia en circunstancias excepcionales. Además debemos tener en cuenta que el MADS desinfla completamente la compuerta, lo cual supone en casi todos los casos la pérdida completa de todo el agua embalsada, y esto equivale a un injustificable despilfarro de agua que el propietario de la compuerta no siempre se puede permitir. Por estas razones, es habitual que el MADS se instale para que entre en acción con overtoppings elevados, en algunos casos de hasta el 45%, y se le deja a la compuerta para que absorba puntas de caudal por debajo de este nivel de vertido.

Sin embargo, también es habitual que el río en que está instalada la compuerta cuente con uno o varios pantanos situados en cabecera del cauce, aguas arriba de la localización de la compuerta, que pueden empezar a laminar agua de forma súbita, porque empieza a turbinar la central hidroeléctrica a la que alimentan, o porque deben suministrar agua para un sistema de riego, o porque se ven en la necesidad de aliviar, porque les llega agua en gran cantidad procedente de otro embalse situado más arriba, o porque está empezando una avenida, o por cualquier otra causa.

En estos casos llega a la compuerta una gran masa de agua que va a pasar por encima de ella generando overtoppings elevados pero insuficientes para disparar el MADS. El resultado de ese incremento de vertido es un incremento de presión que puede dañar seriamente la compuerta.

Para eliminar las sobrepresiones de aire en el interior del cuerpo de goma de sus compuertas, ya sea por calentamiento excesivo o por llegada súbita de una gran masa de agua, los constructores recurren a tres tipos de dispositivos de alivio de presión, que son los siguientes:

1.- Dispositivos hidrostáticos como el ABT (Air Blow-off Tank) que describimos a continuación. Estos dispositivos se basan en que la compuerta, para que mantenga su geometría rígida y que no se "abolle", debe cumplir que la presión del aire en el interior del cuerpo de goma sea igual o superior a la presión del agua que la comprime.



El tanque de color rojo de la figura se llena con agua. Abrimos la válvula inferior y dejamos escapar agua del interior del tanque hasta que con la ayuda de la manguera transparente situada a la izquierda y la regla amarrada al tanque, situamos el nivel de agua en una profundidad útil igual a la altura consigna que establezcamos, generalmente igual a la altura de la compuerta más un diez por ciento.

Cuando la altura de agua en el vaso del embalse supere el valor de la altura consigna del tanque blow-off, la presión del aire del interior del cuerpo de goma también superará esa altura hidrostática, y comenzará a escapar por la tubería (de color azul) saliendo a través del agua del tanque en forma de burbujas. El cuerpo de goma, a medida que pierde aire a través del tanque también irá perdiendo presión interior, y continuará así hasta que la presión en el cuerpo de goma se iguale a la presión de la altura de agua consigna establecida por nosotros en el tanque.

Este sencillo sistema, de funcionamiento teóricamente impecable, en la práctica no es tan perfecto, y presenta dos importantes problemas:

- Cuando el nivel baja, no hay nadie que reponga el aire perdido por la compuerta, y en caso de que se haya dado una pérdida severa de aire, la compuerta permanecerá parcialmente inflada, vaciando parcialmente el vaso del embalse,

hasta que el operador repare en la pérdida de agua, revise la instalación y reponga el aire perdido.

- Se trata de un dispositivo relativamente delicado y difícil de limpiar, en el que irremediablemente se terminan por acumular hojas, partículas transportadas por el aire de inflado desde el interior del cuerpo de goma, limo, vegetación subacuática, etc. que terminan por dejarlo fuera de servicio en poco tiempo. No hemos encontrado ni uno solo entre todos los dispositivos de este tipo que hemos examinado que funcione normalmente.

2.- Válvulas de seguridad por retorno de muelle conectadas en derivación sobre el tubo de entrada y salida de aire o sobre el pressure measuring pipe. Se trata de una válvula cuya lengüeta de cierre permanece obturando la salida de aire presionada por un resorte. Cuando la presión del aire en el interior del cuerpo de goma supera la presión de apertura tarada con el resorte, el aire empuja la lengüeta; entonces la válvula se abre y deja escapar aire hasta que la presión del muelle supera de nuevo a la presión del aire y el resorte vuelve a cerrar la válvula.

Hay muchos modelos y se instalan habitualmente en numerosas instalaciones, como grupos de bombeo y tuberías de agua, vapor o cualquier otro fluido, calefacción, circuitos oleohidráulicos, gas, aire comprimido, etc.

Presentan los mismos problemas que los dispositivos ABS pues el aire que pierde la compuerta hay que reponerlo de forma manual, y además, fácilmente acumulan partículas transportadas por el aire de inflado procedentes del cuerpo de goma que con el tiempo, si no media un mantenimiento relativamente exigente, terminan por depositarse en el asiento de la lengüeta dificultando un cierre hermético; y la compuerta termina perdiendo aire. Se deben utilizar únicamente como seguridad adicional, acompañando a un sistema electrónico de control de presión para el caso en que éste deje de funcionar adecuadamente por avería o corte en el suministro eléctrico a la cámara de control.

3.- Dispositivos electrónicos de control de presión, que detectan la presión en el interior del cuerpo de goma mediante transductores y la mantienen dentro de unos límites estrictos, desinflando o reinflando la compuerta hasta restablecer el valor consigna. Obviamente, son los más seguros y además no precisan de la intervención del operador para mantener permanentemente a la compuerta trabajando con la presión adecuada. Muchos constructores no los instalan porque incrementan sus costes y/o porque no tienen nivel tecnológico suficiente para ello, pero debe exigirse su instalación en todos los proyectos; especialmente en los que sea posible que la compuerta se encuentre sometida a alguna sobrepresión.

CAPÍTULO 13

ANTEPROYECTO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

13.1.- CAPACIDAD TÉCNICA NECESARIA

Aunque la compuerta neumática es un equipamiento de alta tecnología, la capacidad técnica necesaria para proyectarla, instalarla y operarla no es elevada. Por ello, estos proyectos permiten, tanto para su diseño como para su posterior construcción y explotación el empleo de mano de obra local en prácticamente todos los países y en todos los casos.

13.2.- COSTES EN RELACIÓN CON OTRAS ALTERNATIVAS.

Las compuertas neumáticas tienen unas posibilidades de utilización que cubren prácticamente todas las necesidades importantes de manejo de aguas; mientras que muchos de los sistemas convencionales en ocasiones no pueden cubrir debido a su elevado coste, dificultad de instalación, operación compleja o mantenimiento exigente.

La relación de costes con otras alternativas depende en gran medida de un conjunto de variables diferentes en cada caso que son tan diversas que es difícil poder ilustrar este punto con algún ejemplo real; pero sí que se pueden delimitar algunos campos de utilización en los que las compuertas neumáticas suponen una opción más económica, rápida, segura, etc. que los sistemas tradicionales habituales. A modo de ejemplo citamos los siguientes:

- Cuando se aumenta la longitud de sus vanos, ya que se eliminan las estructuras intermedias comunes a los sistemas tradicionales.
- Cuando se trata de elevar la altura de una presa de hormigón ya existente constituyen la alternativa más barata y eficaz.
- En el caso de alimentación a minicentrales hidroeléctricas, generalmente, los costes del equipo se recuperan rápidamente debido al incremento de desnivel que mejora el rendimiento de las turbinas.
- La compuerta de goma tiene el beneficio adicional de un mantenimiento prácticamente inexistente, comparado con una estructura de acero que necesita engrase, lijado y pintado periódico.

- Cuando es importante el impacto medioambiental y/o paisajístico, ya que, comparativamente con los demás sistemas, son casi invisibles.

13.3.- DESARROLLO DE UN ANTEPROYECTO

Una vez tomada la decisión de estudiar la instalación de una compuerta neumática, en primer lugar se debe definir la altura de la compuerta, después decidir si contará con uno o varios vanos, calcular su longitud horizontal a lo ancho del río, y luego definir la inclinación de los estribos de cada vano, tanto en las márgenes como en los pilares intermedios si los hay.

Después se deberá estudiar la posición de la caseta de control, del canal de desvío, y de la escala de peces. Con estos datos les elaboraremos un esquema preliminar del proyecto en el que se recogerán las dimensiones más importantes del mismo.

13.4.- ALTURA DE LA COMPUERTA

La máxima altura a la que se debe llegar con una compuerta de goma es 4 m. Por encima de esta altura los equipos tienen mayor riesgo de oscilación, son menos estables y seguros, es necesario estudiar muy detenidamente su diseño, se encarecen sobre manera y no suelen resultar una alternativa económicamente viable.

Hay cuatro cotas o alturas del nivel de agua que son importantes y que deberán facilitarnos:

- La cota del suelo o fondo del cauce del río (Datum Level o Riverbed Level)
- La cota del agua represada y sin verter o (Crest Level).
- La cota máxima a la que llegará el agua sin abrir (desinflar) la compuerta.
- La cota máxima de seguridad que en ningún caso debe ser sobrepasada.

13.5.- LONGITUD DE LA COMPUERTA

La posibilidad de suprimir los pilares intermedios supone una importante ventaja para las compuertas neumáticas, ya que éstos encarecen el proyecto, disminuyen la sección útil del cauce de agua y son un obstáculo que habitualmente recoge arrastres del río.

Sin embargo, una compuerta excesivamente larga presenta una serie de dificultades entre las que se encuentra el transporte y manejo en obra debido a su volumen y peso, lo cual encarece el montaje; resulta notablemente más complicado conseguir un inflado y desinflado uniforme, es más difícil controlar las vibraciones, etc. Nosotros no recomendamos la instalación de vanos de longitud superior a 50 metros.

En función de la anchura del río en cuestión, se deberá definir el número de vanos y la longitud individual horizontal de cada vano medida sobre el lecho del río, o la longitud del vano único si se decide no instalar ningún pilar intermedio, teniendo en cuenta lo que acabamos de indicar.

13.6.- PENDIENTE DE LOS ESTRIBOS

Una de las principales ventajas de las compuertas neumáticas es su excelente adaptabilidad a cualquier pendiente lateral de la ribera del río, que le permite conservar la pendiente original de las márgenes del curso de agua. La conservación de la forma del curso de agua reduce al mínimo la turbulencia aguas abajo, minimiza los problemas de erosión y por ello, las labores de encauzamiento y las escolleras de protección de las márgenes y del lecho del río aguas abajo son mucho más simples y económicas. Es otro dato importante para el anteproyecto.

13.7.- CANAL DE DESVÍO

En los proyectos con un solo vano se debe contar con un canal de desvío (Diversion Channel) de capacidad mínima igual a 2,5 veces el caudal medio anual del río en el lugar en que se instalará la compuerta neumática. En algunos proyectos se puede utilizar como escala de peces.

El canal de desvío se utilizará durante la ejecución de los trabajos civiles y durante el montaje de la compuerta; y después de entregada la obra, durante los trabajos de eventuales reparaciones que deban realizarse en la compuerta.

Deberá contar con una compuerta de tajadera a la entrada y otra a la salida de suficiente calidad como para impedir que se acumulen en su interior suciedad y arrastres transportados por el río.

13.8.- CASETA DE CONTROL

Una caseta de control estándar necesita entre 15 y 20 m² de superficie útil (5 m x 3 m o mejor 5 m x 4 m.); requiere de un sótano subterráneo para el sistema de desinflado mecánico automático MADS (Mechanical Auto Deflation System) y para alojar el sistema de drenaje de condensados. La cota de la solera de este sótano debe estar un mínimo de 1 metro por debajo de la cota de anclaje de la compuerta.

La caseta de control debe situarse lo más próxima posible al cuerpo de goma y su acceso debe estar a una cota superior a la cota de avenida con un período de retorno superior a 100 años. La caseta de control contiene los elementos siguientes:

- Todos los circuitos de aire, con las soplantes que sirven para inflar el cuerpo de goma, las válvulas que operan la compuerta (suministro y salida de aire), la válvula de drenaje, las válvulas de mantenimiento, la de seguridad contra sobre presiones, las purgas de agua de condensación, manómetros, transductores, etc. y el sistema de tuberías que comunica a la caseta de control con el cuerpo de goma.
- El armario eléctrico o panel de control, que alberga el PLC, los contactores, las entradas de todos los dispositivos electrónicos, los indicadores que permiten leer los parámetros, el almacén histórico de datos, el sistema de alarmas, etc...

- El compresor que suministra aire para la maniobra neumática que gestiona los actuadores de las válvulas principales, el armario con la lógica neumática, válvulas, presostatos, etc.
- El sistema de toma y visualización del nivel de agua retenida en el embalse.
- El MADS con su manguera de alimentación, balde, poleas, cables, válvula de contrapesos, interruptor de alarma, etc.
- Los equipos de extracción y renovación del aire de su interior, instalación de alumbrado normal y alumbrado de seguridad, enchufes para conexión de pequeña herramienta eléctrica, etc.

13.9.- ESCALA DE PECES

Según la legislación local y los dictados de la autoridad del río, se deberá prever la construcción de una escala de peces, que debe instalarse en todos los casos en la margen no ocupada por la caseta de control. Para el dibujo del anteproyecto es necesario conocer las dimensiones de su gálibo y la posición relativa asignada por el proyectista a este equipamiento.

13.10.- ATAGUÍA DESMONTABLE

El proyecto deberá contar con un sistema de ataguías desmontables (stop log) a base de perfiles en doble T y cabrios de madera cuyo diseño facilitaremos desde SPARE mediante un esquema.

Esta ataguía desmontable se utilizará durante los trabajos de montaje y una vez entregada la instalación, también se utilizará en los trabajos de mantenimiento o con ocasión de eventuales reparaciones o para sustitución del cuerpo de goma cuando acabe su vida útil. Se trata de un equipamiento de escaso coste que es totalmente imprescindible y que en ningún caso suministra el constructor de la compuerta.

13.11.- ANTEPROYECTO DE LA OBRA CIVIL

Con todos los datos anteriores SPARE suministra habitualmente un esquema mostrando la disposición general de los componentes de la compuerta, la definición geométrica de la losa y de los estribos, detallando la posición del cuerpo de goma, la posición y dimensiones de la cámara de control y de la cámara de MADS, y el layout del sistema de tuberías. También se suministra el mapa de cargas que la compuerta transmitirá a la losa y la posición de las ataguías desmontables sobre ella. Es aconsejable que en este esquema se refleje igualmente el eje y el gálibo del canal de desvío y el eje y gálibo de la escala de peces.

No se examinan los anclajes de la losa de cimentación al lecho del río ni el espesor definitivo de la losa de cimentación, que deberán ser diseñados y calculados en función de los parámetros del suelo del cauce por el gabinete civil que se encargue del proyecto. Siempre es responsabilidad del proyectista el diseño y cálculo de la losa, la definición de su anclaje al lecho del río, el estudio de estabilidad de la misma y el cálculo de sus armaduras.

CAPÍTULO 14

CÁLCULO DE UNA COMPUERTA NEUMÁTICA

14.1.- LÍNEAS Y COTAS DE NIVEL FUNDAMENTALES

En el momento de empezar a definir una losa, el dato más importante es el **Datum Level** (DL) o cota de pie, que es la cota nominal sobre el nivel del mar donde será instalada la compuerta y que en general coincide con la cota del fondo del lecho del río o **River Bed Level** (RBL). Esta cota será la cota de pie "oficial" de la compuerta.

La cota de coronación de la compuerta o **Crest Level** (CL) es la cota máxima sobre el nivel del mar que alcanza la generatriz más alta de la parte pseudo cilíndrica horizontal del cuerpo de goma cuando éste está completamente inflado.

La **altura nominal H_0** o altura "oficial" de la compuerta se mide como diferencia entre el Crest Level o cota de coronación de la compuerta y el Datum Level.

$$H_0 = \text{Crest Level} - \text{Datum Level}$$

Cuando la compuerta se va a instalar sobre el lecho de un río, se debe proyectar un escalón o receso hidráulico, tal como aparece en el esquema de la página siguiente. Su objetivo es el de proteger de la acción de los arrastres que transporta el río tanto los anclajes como el cuerpo de goma, cuando la compuerta está desinflada en reposo sobre la losa. Salvo casos especiales, el receso suele ser de **10 cm**, y su cota se llama **Recess Level** (RL).

El Recess Level es la cota real donde irá anclada la compuerta, y es el que nos da la referencia para medir la **altura real H_R** de la compuerta

$$H_R = \text{Crest Level} - \text{Recess Level}$$

Obviamente se cumple que:

$$H_R = H_0 + 10 \text{ cm.}$$

En algunos casos, la compuerta no se ancla en el fondo del cauce sino en un dique ya existente o de nueva construcción cuya cota es superior a la cota de fondo del río o Riverbed Level. Un ejemplo típico lo forman las compuertas que se montan para el recrecimiento de grandes presas de hormigón ya existentes. En estos casos no es necesario practicar receso alguno, y por tanto $H_R = H_0$.

Llamaremos **USWL** (Up Stream Water Level) o cota del nivel de agua embalsada o cota del espejo de agua, a la cota medida en metros sobre el nivel del mar que alcanza la superficie del agua retenida.

La diferencia entre la cota del agua embalsada o USWL y la cota de coronación o Crest Level nos da la profundidad de la lámina de vertido u **overtopping**:

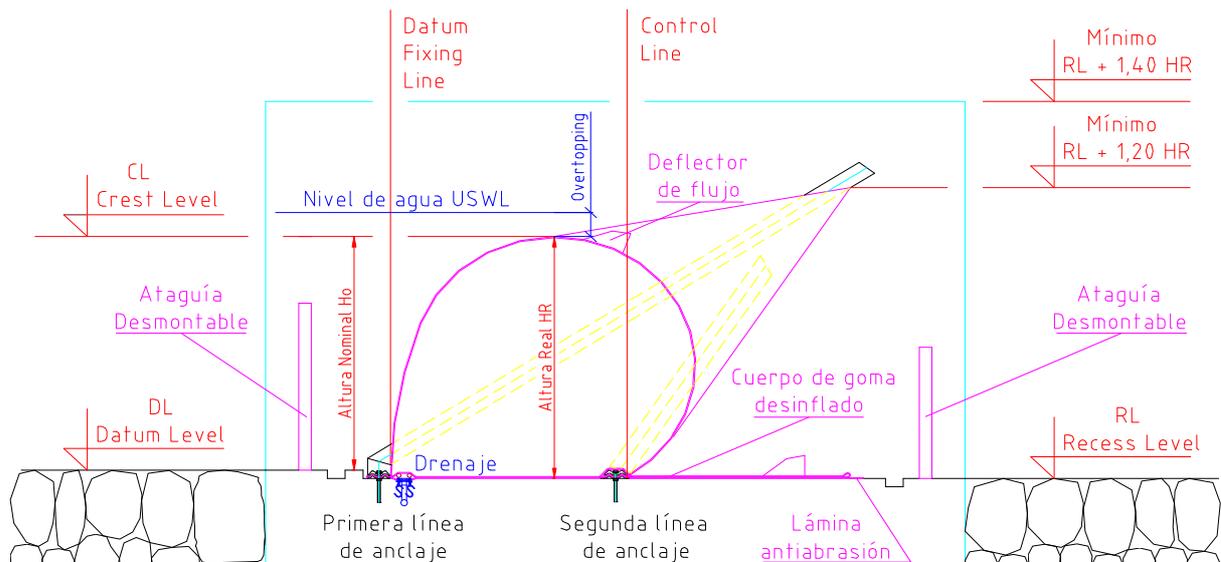
$$\text{Overtopping} = \text{USWL} - \text{Crest Level}$$

Una línea fundamental es la **Datum Fixing Line**, que se utiliza como origen o referencia para tomar todas las demás medidas de la obra. Se considera que en esta línea está situada la compuerta y es la línea a partir de la cual, caminando hacia aguas arriba se considera que marca el comienzo (o la terminación) del vaso del embalse.

Cuando la compuerta se proyecta con una segunda línea de anclaje, la línea que define su posición se llama **Control Line**. La distancia que separa ambas líneas de anclaje se llama **footprint**, y depende de la altura real H_R de la compuerta. Cada constructor tiene su footprint pero, en general esta distancia suele estar en todos los casos entre $0,90 H_R$ y $1,10 H_R$. Nuestro footprint es $0,90 H_R$.

14.2.- DIMENSIONAMIENTO DE LA LOSA Y ESTRIBOS

El cuerpo de goma de una compuerta, cuando está totalmente inflado, adopta la forma siguiente:



Como medida de seguridad, la losa debe tener un **espesor mínimo de 1 metro**, para garantizar que las tuberías y los anclajes quedan correctamente embebidos en el hormigón, y tienen un recubrimiento suficiente antes de llegar al hormigón de limpieza de la base de la losa.

Como ya hemos indicado en capítulos anteriores, para minimizar los problemas de erosión y facilitar el trabajo de las escolleras, **los estribos** de la compuerta deben tener **la misma pendiente de la ribera** respectiva. La compuerta neumática se adapta perfectamente a cualquier inclinación, desde totalmente vertical ($V:H = 1.00:0.00$) hasta inclinaciones de $V:H = 1.00:3.50$ y mayores.

Los estribos pueden tener una inclinación en una de las riberas y en la otra ribera otra inclinación diferente. Si la compuerta tiene varios vanos, tampoco es necesario que los estribos de los pilares intermedios tengan las inclinaciones de sus estribos iguales entre sí, ni iguales a las de los estribos de las riberas. Las diferentes inclinaciones no presentan ningún problema técnico; es solo un problema estético.

La compuerta, cuando está inflada, presenta en el estribo una forma semejante a un cono de revolución cuyo vértice se sitúa estribo arriba a una cota nivel que es función del overtopping máximo que el constructor ha previsto que deberá soportar su compuerta. Habitualmente, este punto se sitúa a una cota igual a $RL + 1.20 H_R$.

La cota de **coronación** del estribo debe ser, como mínimo igual a **$RL + 1,40 H_R$** , y su **espesor** mínimo en coronación nunca inferior a **0.50 metros**.

El receso debe tener una anchura mínima contada a partir de la Datum Fixing Line igual al doble del footprint + 1 metro ($2 \times 0.90 H_R + 1,00$) y aguas arriba, la Datum Fixing Line debe estar situada a 1,50 metros del borde de la losa. Por tanto, la losa debe tener un **ancho mínimo de $1,80 H_R + 2,50$ metros**.

14.3.- CÁLCULO DE LA LOSA

En la definición y cálculo de la losa interviene de forma determinante el tipo de suelo que tenga el cauce. Nosotros destacamos aquí algunas observaciones que debe tener en cuenta el calculista para definir dimensiones, espesores y armaduras.

- La losa debe tener un peso propio suficiente para que el rozamiento con el suelo no la deslice río abajo empujada por la fuerza de la corriente. En suelos de roca dura puede ser suficiente practicar una excavación y empotrar la losa.
- Se debe estudiar el sifonado inferior en todos los casos, especialmente si se trata de suelos porosos. En algunos casos se deberá recurrir a la construcción de pantallas de hormigón o de tablestacas enterradas en toda la anchura del cauce. Hay que estudiar la profundidad de las pantallas necesarias y examinar si es suficiente colocar solamente una aguas arriba o si dada la profundidad necesaria y el gradiente esperado, es mejor construir dos pantallas pero menos profundas, una aguas arriba de la losa y otra aguas abajo de la misma.
- Se deben estudiar las tensiones sobre el lecho y determinar si es suficiente la capacidad portante del terreno, para evitar asentamientos diferenciales. En ocasiones, con terrenos limosos y arenosos será necesario pilotar la losa.
- También se debe estudiar la rigidez de la losa y su estabilidad a vuelco.

14.4.- CÁLCULO DE LA TENSIÓN EN LA LÁMINA DE GOMA

La presión en el interior del cuerpo de goma de la compuerta aparece como consecuencia de tener un volumen de aire llenando su interior y una carga hidrostática actuando frontalmente sobre la lámina de goma en la zona de aguas arriba de la compuerta. Esta carga se transfiere desde el tejido de refuerzo de la lámina de goma hasta las placas de fijación y desde éstas a los tornillos de anclaje y a la losa de cimentación. Cuando la presión del aire del interior se equilibra con la exterior, el agua reduce la carga sobre el cuerpo de goma. Sin embargo, cuando no hay agua ni aguas arriba ni aguas abajo de la compuerta, la carga sobre el cuerpo de goma es máxima.

La tensión de trabajo en la lámina de goma de la compuerta se puede calcular usando la fórmula siguiente:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H_R^2 \cdot k_1 + k_2 \cdot h_u \quad [kgf/cm]$$

T = Tensión en Kgf/cm

ω = Peso específico del agua = 0,001 Kgf/cm³

H_R = Altura real de la compuerta en cm

k₁ = Factor de corrección para análisis de la tensión por ordenador = 1,100

k₂ = Factor de corrección para análisis de la tensión por ordenador = 0,031

h_u = Overtopping máximo en cm, generalmente entre 0.10 y 0,20 Hr

En algunas ocasiones también se aplica la fórmula anterior con K₁ = 1 y K₂ = 0.089

La carga en sentido longitudinal (a lo ancho del cauce) es el 50% de la carga en sentido circunferencial (paralelo al eje del cauce). Esto se tiene en cuenta a la hora de empalmar las sucesivas secciones del cuerpo de goma. Por esta razón todas las compuertas suelen presentar uniones vulcanizadas en sentido circunferencial, como si se tratase de secciones independientes de un presa de gravedad.

Además, la compuerta en sentido longitudinal a lo largo de la losa y en los estribos es una combinación de lámina de goma en la parte superior y hormigón armado en la parte inferior. El hormigón limita la elongación y absorbe parte de la carga en dirección longitudinal.

Coeficiente de seguridad (S_f)

$$S_f = \frac{T_s}{T} \quad S_f \text{ Debe ser } > 8.00 \text{ que es el coeficiente requerido}$$

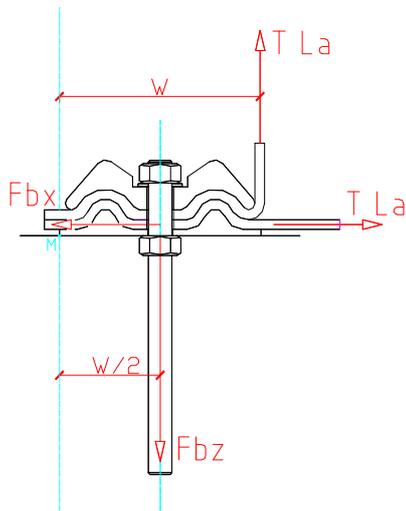
donde

T_s = Tensión de rotura de la lámina de goma elegida

T = Tensión de trabajo de la goma

S_f = Coeficiente de seguridad

14.5.- CÁLCULO DE LOS TORNILLOS DE ANCLAJE



T = Tensión en la lámina de goma.
 L_a = Distancia entre ejes de los tornillos.
 W = Ancho de las placas embebidas.

El momento respecto de M será:

$$F_{bz} \times \frac{W}{2} = T \cdot L_a \times W$$

$$F_{bz} = 2 \cdot T \cdot L_a$$

La distancia entre ejes de dos tornillos inmediatos L_a suele ser fija para cada constructor. En nuestro caso es de 20 cm.

El ancho W de las placas embebidas varía de unos constructores a otros y también según la altura de la compuerta. A continuación incluimos una tabla con las dimensiones utilizadas por FLOECKSMUEHLE:

H_r (m)	W (mm)
Hasta 2.60	165
De 2.60 a 2.90	196
2,90 o más	257

Por tanto, la **componente vertical** de la fuerza transmitida al tornillo por la lámina de goma debida a la presión del aire del interior del cuerpo de goma F_{bz} será:

$$F_{bz} = 2 \cdot T \cdot L_a$$

Esta es la fuerza de arranque a tracción que debe absorber el hormigón de la losa por cada tornillo de anclaje.

La **componente horizontal** de la fuerza transmitida al tornillo por la lámina de goma debida a la presión del aire en el interior del cuerpo de goma F_{bx} será:

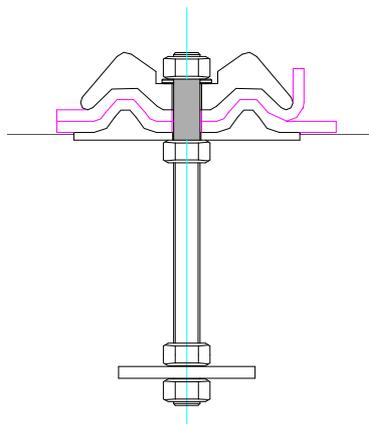
$$F_{bx} = T \cdot L_a$$

Esta es la fuerza a cortadura que deberá absorber el tornillo.

En los casos de doble línea de anclaje, la lámina de goma entre ambas líneas no tiene ninguna tensión al haberla absorbido los tornillos de la segunda línea de anclaje. Por tanto, en tal caso, los tornillos de la primera línea de anclaje trabajan únicamente a tracción, y $F_{bx} = 0$

Para calcular los tornillos, deberemos tener en cuenta también la fuerza F_0 que hacemos con la tuerca superior para apretar con la placa clamping las dos láminas de goma y así asegurar la hermeticidad del cuerpo de goma de la compuerta (para que no pierda aire). Esta fuerza F_0 depende del par de apriete aplicado a la tuerca superior y del paso de rosca del tornillo.

Los torques o pares de apriete habitualmente aplicados a cada rosca en m-Kgrf, la fuerza a tracción F_0 que se desarrolla en la zona del tornillo situada entre las dos tuercas debida a este par de apriete, y la sección útil del tornillo A_b según rosca, se pueden obtener de la tabla siguiente:



Tornillo	Par aplicado m - Kgrf	Fuerza F_0 Kgf	Sección A_b cm ²
M20 x 2.5	10 + 3/-3	2.570	2.45
M24 x 3.0	18 + 5/-3	3.698	3.53
M30 x 3.5	35 +10/-5	5.890	5.61

Por tanto, la fuerza total a tracción que debe soportar el tornillo en la zona marcada en color gris comprendida **entre las dos tuercas** será la suma de la fuerza F_{bz} que le transmite el cuerpo de goma + la fuerza F_0 generada por el par de apriete:

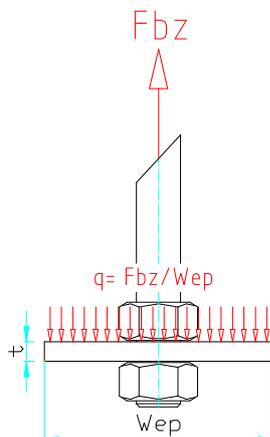
$$F_{TOTAL} = F_{bz} + F_0$$

La tensión a tracción que soporta el tornillo σ_{bt} es en esa zona:

$$\sigma_{bt} = \frac{F}{A_b} = \frac{F_{bz} + F_0}{A_b}$$

La tensión de rotura para un tornillo de acero al carbono construido con acero según norma JIS S45C es $\sigma_{bB} = 5.800 \text{ kgf/cm}^2$. El coeficiente de seguridad será:

$$Sf = \frac{\sigma_{bB}}{\sigma_{bt}} = \frac{5.800 \text{ Kgf}}{\sigma_{bt}} \text{ que debe ser } \geq 3.00$$



14.6.- CÁLCULO DE LA PLETINA DE EXPANSIÓN

Cuando los anclajes se instalan embebidos en el hormigón, se monta una pequeña pletina de expansión en el extremo inferior del tornillo con el objetivo de ampliar el cono de rotura del hormigón y darle al anclaje mayor resistencia al arranque.

Tal como hemos visto en el apartado anterior, la lámina de goma superior tira del tornillo de anclaje con una tracción F_{bz} igual a $2 \cdot T \cdot L_a$ siendo T la tensión en la goma y L_a la distancia entre ejes de dos tornillos adyacentes.

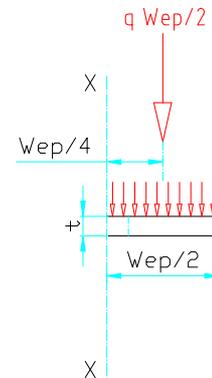
Esto supone para la pletina una carga uniformemente repartida que determina una carga por unidad de longitud q igual a:

$$q = \frac{\text{Fuerza total}}{\text{Ancho de la pletina}} = \frac{2 \cdot T \cdot L_a}{W_{ep}}$$

siendo W_{ep} el ancho de la pletina.

El momento flector respecto del eje XX del tornillo será:

$$M_{xx} = \left(\frac{2 \cdot T \cdot L_a}{W_{ep}} \cdot \frac{W_{ep}}{2} \cdot \frac{W_{ep}}{4} \right)$$



La tensión a flexión que soporta la pletina será la siguiente:

$$\sigma_s = \frac{M_{xx}}{Z_x} \quad \text{Kgf/cm}^2$$

siendo Z_x el módulo seccional o momento resistente de la sección en cm^3 , que se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$Z_x = \frac{(W_{ep} - \Phi) \cdot t^2}{6} \quad \text{cm}^3$$

Donde:

- W_{ep} = Longitud de la pletina (expansion plate) en cm.
- Φ = Diámetro del agujero para paso del tornillo de anclaje en cm.
- t = Espesor de la pletina en cm.

La tensión de rotura para una pletina de acero al carbono construida con acero según norma DIN EN ISO 3506-1 y 3506-2 es $\sigma = 6.100 \text{ Kgf/cm}^2$. El coeficiente de seguridad será:

$$Sf = \frac{\sigma}{\sigma_s} = \frac{6.100 \text{ Kgf}}{\sigma_s} \quad \text{que debe ser } \geq 3.00$$

14.7.- TORNILLOS ANCLADOS CON RESINA

Como acabamos de indicar, la fuerza F_{bz} que transmite la lámina de goma a cada tornillo es:

$$F_{bz} = 2 \cdot T \cdot L_a$$

siendo:

- F_{bz} = Fuerza transmitida por la lámina de goma al tornillo de anclaje
- T = Tensión en la lámina de goma (kgf/cm)
- L_a = Distancia entre ejes de dos tornillos adyacentes (generalmente 20 cm)

La resistencia al arranque F_0 de un tornillo anclado a la losa con resina, se debe calcular examinando la resistencia a cortadura de la resina utilizada entre el tornillo de anclaje y el hormigón; y se calcula según la siguiente expresión:

$$F_0 = A \cdot \tau = \pi \cdot \Phi \cdot L_e \cdot \tau$$

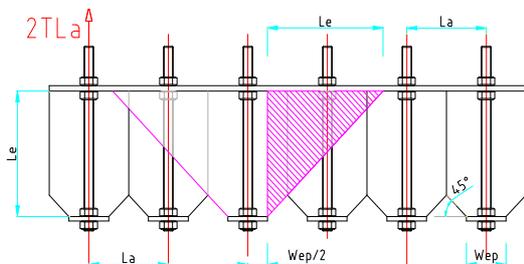
En esta expresión:

- F_0 = Resistencia al arranque
- A = Superficie del tornillo en contacto con la resina
- Φ = Diámetro del tornillo de anclaje
- L_e = Profundidad del tornillo de anclaje embebida en la resina
- τ = Tensión de rotura a cortadura de la resina que depende de la resina utilizada. Un valor típico es $\tau = 90 \text{ Kgf/cm}^2$

El coeficiente de seguridad se calculará según la expresión siguiente:

$$Sf = \frac{F_0}{F_{bz}} \text{ que debe ser } \geq 8.00$$

14.8.- RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

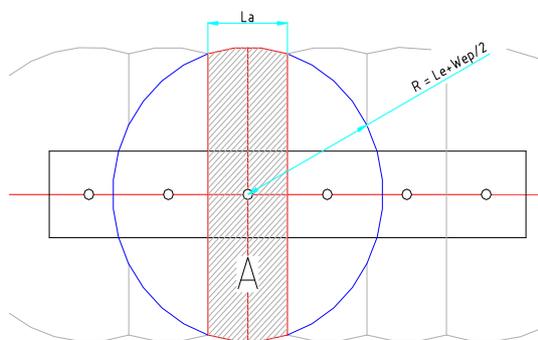


La fuerza que debe absorber el hormigón correspondiente a cada tornillo será la misma fuerza F_{bz} que le transmite la lámina de goma, que como hemos visto es:

$$F_{bz} = 2 \cdot T \cdot L_a$$

siendo:

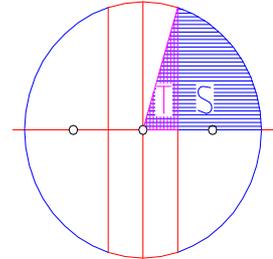
- F_{bz} = Fuerza transmitida por la lámina de goma al tornillo de anclaje
- T = Tensión en la lámina de goma (kgf/cm)
- L_a = Distancia entre los ejes de dos tornillos adyacentes (generalmente 20 cm)



Estableceremos que el hormigón rompe en cono de 45° , por lo que el triángulo rayado en magenta en el alzado de la figura de la izquierda será equilátero, es decir, tendrá los dos catetos iguales y de longitud igual a L_e , siendo L_e la longitud útil del tornillo embebida en el hormigón.

Tratamos de calcular la dimensión de la superficie rayada designada por A en la figura en planta de la página anterior. Para ello, calcularemos en primer lugar la superficie de todo el círculo correspondiente a la proyección del tronco de cono de rotura del hormigón. En el dibujo de la placa en planta de la página anterior podemos ver que la proyección del tronco de cono de rotura sobre la superficie horizontal exterior es una circunferencia de radio $R = L_e + W_{ep}/2$.

Para calcular A, una vez calculada la superficie completa de este círculo $\pi \cdot (L_e + W_{ep}/2)^2$, deberemos descontarle al mismo 4 veces la superficie del sector circular **S** que aparece rayado horizontal en la figura adjunta, y después sumarle 4 veces la superficie del triángulo rectángulo **T** rayado en vertical en la misma figura.



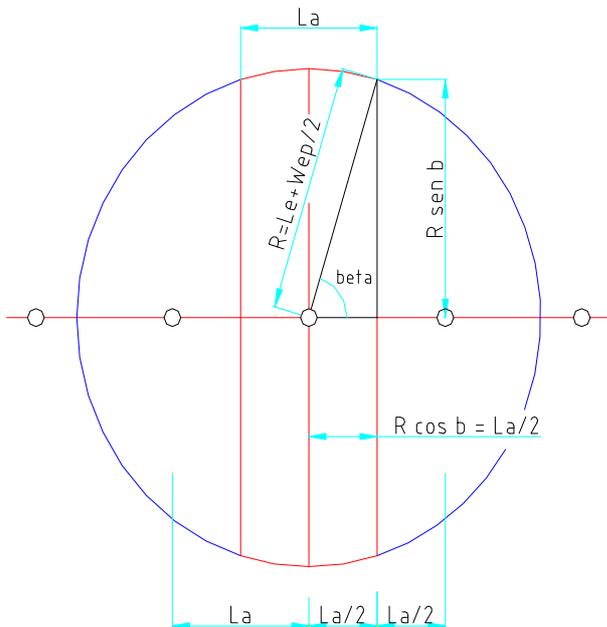
La superficie del círculo completo será la siguiente:

$$S_{\text{Círculo}} = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot \left(L_e + \frac{W_{ep}}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(L_e^2 + 2L_e \frac{W_{ep}}{2} + \frac{W_{ep}^2}{4} \right) \Rightarrow S = \pi L_e (L_e + W_{ep})$$

Despreciamos el valor de $\frac{\pi W_{ep}^2}{4}$ por ser insignificante respecto de los demás sumandos.

Considerando el triángulo rectángulo y su ángulo β , tenemos que:

$$R \cos \beta = \left(L_e + \frac{W_{ep}}{2} \right) \cdot \cos \beta = \frac{L_a}{2} \Rightarrow \cos \beta = \frac{L_a}{2L_e + W_{ep}} \Rightarrow \beta = \arccos \frac{L_a}{2L_e + W_{ep}}$$



La superficie del triángulo será igual a:

$$S_{\text{Triángulo}} = \frac{1}{2} R \cos \beta \cdot R \sen \beta = \frac{R^2 \sen 2\beta}{4}$$

La superficie del sector circular será la siguiente:

$$S_{\text{Sector circular}} = \frac{\beta}{360} \cdot \pi R^2$$

Según hemos dicho anteriormente, la superficie de A será igual a:

$$A = S_{\text{Círculo}} - 4 \cdot S_{\text{Sector circular}} + 4 \cdot S_{\text{Triángulo}}$$

Sustituyendo y simplificando:

$$A = \pi L_e (L_e + W_{ep}) - \frac{\pi \beta}{90} \left(L_e + \frac{W_{ep}}{2} \right)^2 + \left(L_e + \frac{W_{ep}}{2} \right)^2 \sen 2\beta$$

Siendo:

L_e = Longitud útil del tornillo de anclaje embebida en el hormigón.

W_{ep} = Ancho de la pletina de expansión.

$$\beta = \arccos \frac{L_a}{2L_e + W_{ep}}$$

L_a = Distancia entre los ejes de dos tornillos adyacentes

En el caso de tratarse de tornillos anclados con resina, W_{ep} es casi cero (es la diagonal de la tuerca), y la fórmula anterior se transforma en la expresión siguiente:

$$A = \pi L_e^2 \left(1 - \frac{\beta}{90} + \frac{\text{sen } 2\beta}{\pi} \right)$$

siendo el ángulo $\beta = \arccos \frac{L_a}{2L_e}$

Una vez que tenemos calculado el área A , la fuerza que es capaz de asumir el hormigón se calcula según la expresión siguiente:

$$F_0 = \lambda \cdot A \cdot \sqrt{F_c}$$

siendo:

F_0 = Fuerza asumible por el hormigón.

λ = Coeficiente de minoración (generalmente 0.4)

A = Superficie de la proyección del cono de rotura del hormigón recién calculada.

F_c = Resistencia característica del hormigón (210 Kgr/cm²)

El coeficiente de seguridad se calculará según la expresión siguiente:

$$Sf = \frac{F_0}{F_{bz}} \quad \text{que debe ser } \geq 8.00$$

14.9.- CÁLCULO DE LAS PLACAS CLAMPING

Una placa clamping, cuando trabaja apretando las láminas del cuerpo de goma contra la embedded plate con los 6 tornillos a los que hemos dado el apriete estipulado para conseguir la estanqueidad del cuerpo de goma, se ve sometida a una reacción por parte de la goma igual a la fuerza que las tuercas hacen sobre ella, es decir $6 \cdot F_0$.

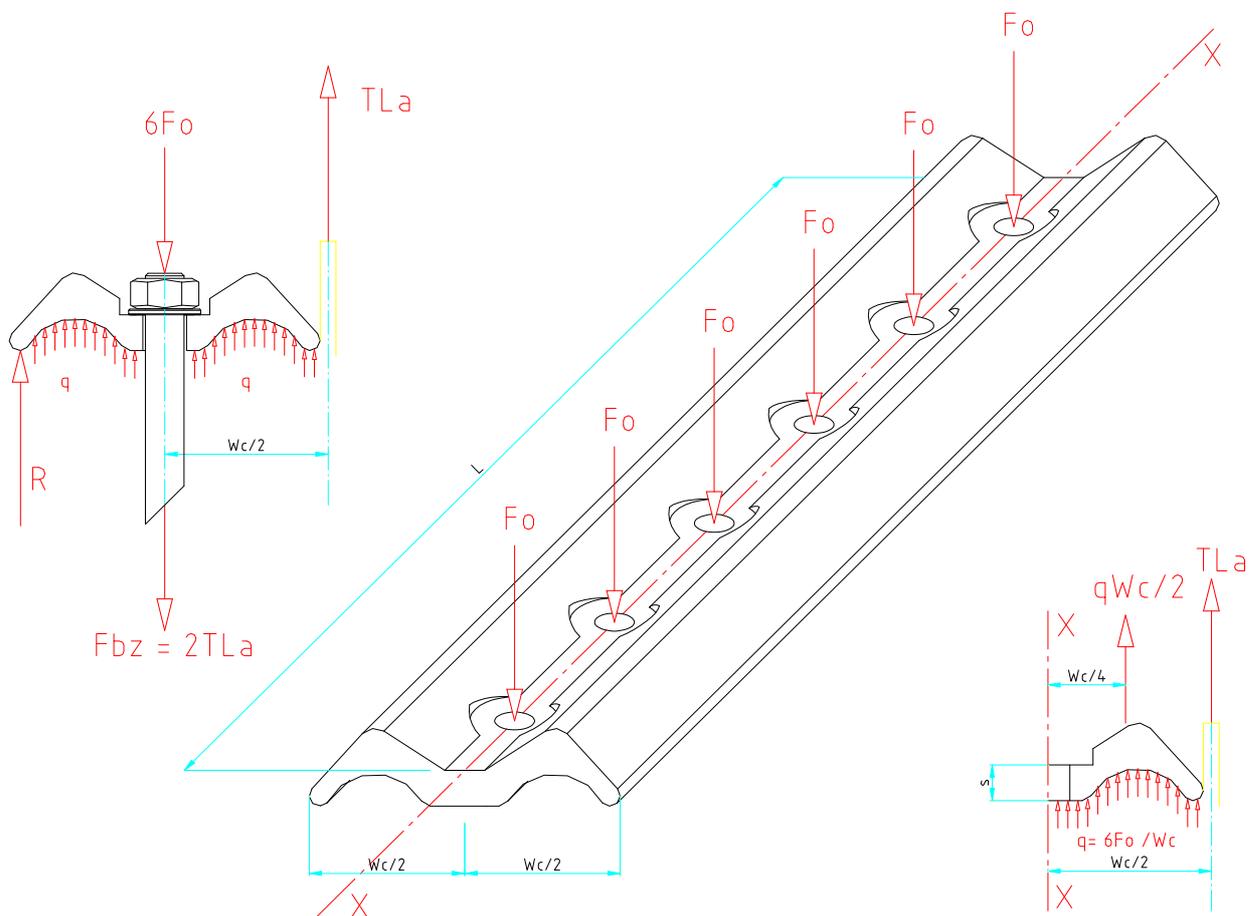
Esta fuerza se reparte uniformemente a lo ancho de la clamping de tal forma que resulta una intensidad de carga o carga por unidad de longitud q en Kgf/cm uniformemente repartida que se calculará según la expresión siguiente:

$$q = \frac{\text{Fuerza total}}{\text{Ancho de la clamping}} = \frac{6 \cdot F_0}{W_c}$$

La anchura de la placa clamping W_c y la fuerza F_0 de apriete que se hace con la tuerca para conseguir la estanqueidad del cuerpo de goma, se puede obtener, en el caso de nuestras compuertas, de la siguiente tabla:

Tornillo	Ancho de placas		Par de apriete	
	Embedded W	Clamping W_c	m - Kgrf	F_0 (Kgf)
M20 x 2.5	165 mm	155 mm	10 + 3/-3	2.570
M24 x 3.0	196 mm	185 mm	18 + 5/-3	3.698
M30 x 3.5	257 mm	245 mm	35 +10/-5	5.890

El momento flector en la sección XX se calcula según la expresión siguiente:



$$M_{xx} = \left(T \cdot L_a \cdot \frac{W_c}{2} \right) + \left(\frac{6F_0}{W_c} \cdot \frac{W_c}{2} \cdot \frac{W_c}{4} \right)$$

La tensión a flexión que soporta la placa clamping será la siguiente:

$$\sigma_s = \frac{M_x}{Z_x} \text{ Kgf / cm}^2$$

siendo Z_x el módulo seccional o momento resistente de la sección de la clamping en cm^3 , que se obtiene mediante la fórmula siguiente:

$$Z_x = \frac{(L_a - \Phi \cdot z) \cdot s^2}{6} \quad cm^3$$

Donde:

- L_a = Longitud de la placa clamping en cm
- Φ = Diámetro de los agujeros para paso de los tornillos de anclaje en cm.
- z = Número de agujeros en cada placa
- s = Espesor de sección resistente de la placa en cm.

En nuestro caso, nuestras placas clamping tienen las dimensiones y el módulo seccional o módulo resistente de la tabla siguiente:

Clamping	M20	M24	M30
L_a	120 cm	120 cm	120 cm
Φ	2.5 cm	3,0 cm	3.4 cm
z	6	6	6
s	1.5 cm	2.4 cm	2.8 cm
Z_x	39.38 cm^3	97.92 cm^3	130.14 cm^3

La tensión a flexión máxima admisible para una clamping construida con material ASTM A536 Gr 80 es $\sigma_{CB} = 2.800 \text{ Kg/cm}^2$. Por tanto, el coeficiente de seguridad será el siguiente:

$$S_f = \frac{\sigma_{CB}}{\sigma_s} = \frac{2.800}{\sigma_s} \quad \text{que debe ser } \geq 1.5$$

14.10.- CÁLCULO DEL TIEMPO DE INFLADO

La soplante debe suministrar el aire de inflado a una presión superior a la máxima presión ejercida por el agua sobre la compuerta, cuando ésta esté vertiendo el máximo overtopping para el que está diseñada. Además, se deberán tener en cuenta las pérdidas de carga en las tuberías por rozamiento del aire con las paredes de los tubos y en los fittings (curvas, codos, tes, reducciones, etc.) Estas pérdidas de carga obviamente dependen de la distancia entre la compuerta y la soplante, del material de los tubos, de la sinuosidad de la conducción, etc.

Con estos datos se deberá seleccionar una soplante capaz de proporcionar el volumen de aire a la presión que necesita el cuerpo de goma para su correcto inflado.

En relación con la soplante, en el proyecto se deben indicar la marca, la referencia, el tipo y el número de soplantes, y se debe incluir en el proyecto la curva de trabajo indicando varios puntos de la misma.

- Tipo y Número de soplantes

- Máxima presión de descarga P_{MAX} en mbar
- Descarga en m^3/min a la presión máxima P_{MAX} anterior
- Descarga en m^3/min a la presión nominal de trabajo P_0
- Descarga en m^3/min a $P_0/3$
- Descarga Máxima

Para el cálculo del tiempo de inflado, es preciso calcular previamente el volumen del cuerpo de goma, lo cual se lleva a cabo calculando en primer lugar la longitud representativa del cuerpo de goma L utilizando la siguiente expresión:

$$L = L_0 + \mu H_R$$

siendo:

- L = Longitud representativa
 L_0 = Longitud a lo largo de la Datum Fixing Line
 H_R = Altura real de la compuerta
 μ = Depende de la inclinación del estribo. Se obtiene de la tabla siguiente:

V:H	1:0.00	1:0.30	1:0.50	1:1.00	1:1.50	1:2.00
μ	0.00	0.30	0.50	1.00	1.50	2.00

El volumen interno del cuerpo de goma se determina según la expresión siguiente:

$$V_0 = 0.97 \cdot H_R^2 \cdot L$$

El tiempo que tardará la soplante en inflar la compuerta depende de la capacidad de descarga y de la presión de trabajo de la compuerta, y se calcula según la expresión siguiente:

$$t = V_0 \cdot \frac{1,033 + P_0}{1,033} \cdot \frac{1}{Q_S \cdot K_q} \quad \text{min}$$

Donde:

- V_0 : Volumen interno del cuerpo de goma en m^3
 P_0 : Presión nominal de trabajo en kgf/cm^2
 Q_S : Capacidad de descarga de la soplante a P_0 en m^3/min .
 K_q : Pérdidas de carga en la conducción en kgf/cm^2

14.11.- CÁLCULO DEL TIEMPO DE DESINFLADO

En algunos proyectos, el pliego de condiciones concede un corto tiempo máximo para el desinflado de la compuerta que a veces no llega a 5 minutos; por ejemplo, en el caso de ríos que sufren importantes y repentinas variaciones de caudal.

En tales casos, cualquier avenida puede inundar rápidamente terrenos aledaños al lugar en que está ubicada la compuerta si ésta permanece inflada; y por ello, es necesario que la compuerta sea capaz de desinflarse en un tiempo record. En tales casos se debe comprobar si el sistema definido al estudiar el tiempo de inflado cumple

con el requerimiento del proyecto en cuanto a desinflado. En caso negativo, se deberá aumentar el diámetro de los tubos y se estudiará cuidadosamente el layout de la tubería, la velocidad del aire en su interior y las pérdidas de carga, de forma que el sistema pueda realizar la operación de desinflado en el tiempo que requiere el proyectista.

Sin embargo, en otros proyectos es preciso alargar el tiempo de desinflado por el peligro que puede generar aguas abajo una súbita laminación de un importante volumen de agua. En tales casos se instala un sistema de tuberías como para un desinflado estándar y se recurre a obturar parcialmente la salida de aire de desinflado mediante una válvula manual de mariposa con enclavamiento. En sucesivos ensayos se desenclava la válvula, se mueve hacia otra posición y se vuelve a enclavar nuevamente, desinflado la compuerta y controlando el tiempo que emplea en la operación; volviendo a mover la válvula y realizando nuevamente la operación hasta obtener el tiempo de desinflado requerido. Obviamente, mientras se hacen estos y cualesquiera otros ensayos con la compuerta con agua real, se debe siempre tomar todas las precauciones de seguridad pertinentes.

Por tanto, el tiempo que necesita una compuerta para desinflarse puede ser un parámetro crítico, y en muchos proyectos será necesario implementar cambios en el piping para conseguir el objetivo de alargar o acortar el tiempo de desinflado fuera del estándar normal inferior a 30 minutos.

Finalmente debemos indicar aquí que este parámetro del tiempo de desinflado carece de significación en las compuertas que están dotadas de un sistema de control tipo USWLCS; ya que este sistema mantiene la cota del nivel de agua del embalse, y el desinflado de la compuerta se hace gradualmente, por etapas. Además, el overtopping es progresivamente creciente solo en la medida en que el río lo demanda. Esto impide la inundación de predios cercanos (mantiene el nivel del agua constante) y no genera más daños aguas abajo que los que generaría el propio río si no estuviera instalada la compuerta; ya que el overtopping que suelta el USWLCS es como máximo igual al caudal que trae el río. Por tanto, el estudio del tiempo de desinflado no tiene interés en una compuerta en el caso de encontrarse instalado un sistema tipo USWLCS.

Sin embargo, aunque la compuerta tenga instalado un sistema USWLCS, puede ocurrir que un corte en el suministro de electricidad obligue al MADS a desinflar la compuerta. Es en esta circunstancia extraordinaria en la que el tiempo de desinflado puede tener una importancia decisiva, y vamos a examinarlo.

El tiempo que necesita una compuerta neumática para desinflarse depende de la presión del aire en el interior de su cuerpo de goma. En los casos en que la descarga del río ocupe toda la sección útil de la compuerta, la presión interior se mantendría al 100% de su presión nominal; pero esto es extremadamente raro. Lo habitual es que el incremento de descarga del río sea mucho más reducido que la sección útil del cauce ocupada por la compuerta, y que cualquier desinflado determine una bajada en el nivel de agua represada y por tanto una bajada en la presión del aire en el interior del cuerpo de goma.

La presión del aire al comenzar el desinflado será:

$$P_d = H_R \text{ (Altura Real) } + h_u \text{ (overtopping)}$$

La presión media del aire durante el desinflado se calcula según la fórmula siguiente:

$$P_{av} = 0.2 \times P_d \times g$$

La velocidad media del aire de desinflado en m/seg se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{av}}{\rho \left(1 + \lambda \cdot \frac{L_2}{d} + \sum \xi \right)}}$$

Donde:

- P_{av} : Presión media del aire durante el desinflado en $\text{Kgf/m}^2 \cdot \text{m/seg}^2$)
- ρ : Peso específico del aire de salida (= 1.2 Kgf/m^3)
- λ : Coeficiente de fricción según tipo de tubo
- L_2 : Longitud de los tubos en metros
- d : Diámetro de los tubos en metros
- $\sum \xi$: Coeficiente de pérdida de carga por los fitting instalados

El volumen de aire a evacuar del interior del cuerpo de goma, aplicando la ecuación de estado de los gases perfectos, adopta la expresión siguiente:

$$V = V_0 \cdot \frac{1,033 + P_0}{1,033} \text{ m}^3$$

El tiempo necesario para el desinflado se calcula según sigue:

$$t = \frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u \cdot 60} \text{ min}$$

14.12.- COMPROBACIONES EN LOS CORNERS

Los cálculos que hemos expuesto sirven para el cálculo de los anclajes de la losa y estribos en cualquier punto de la compuerta, salvo en los corners.

Esto es así porque en el último metro horizontal de losa, junto a la intersección del plano del estribo con el plano horizontal de la losa, la última placa embebida y la última clamping siempre deben tener los tornillos de anclaje situados a unas dimensiones especiales, para poder ajustarse a la longitud del riverbed que marca el proyecto. Esta es la parte de la compuerta que está sometida a sollicitaciones más peligrosas.

Cuando los cálculos realizados para cualquier posición (excepto el corner) cumplen holgadamente con los coeficientes de seguridad estipulados, no es imperativo revisar qué ocurre con la última clamping o con el hormigón junto al estribo. Pero si los

resultados están ajustados, se deberá repetir el cálculo para la última placa horizontal del datum level, una vez que se conozcan las distancias reales entre los ejes de los tornillos de anclaje de esas placas.

CAPÍTULO 15

DESARROLLO DEL PROYECTO

15.1.- PLAZO DE ENTREGA

SPARE puede suministrar una compuerta neumática a prácticamente cualquier obra en un plazo de entre 6 y 9 meses de fabricación; lo cual quiere decir que, para colocar en posición FOB puerto europeo una compuerta neumática necesitamos un plazo mínimo de 6 meses contados a partir de que se encuentren cumplidas las dos condiciones siguientes:

- Que se encuentre definido con precisión absoluta el equipo que debemos suministrar, con sus especificaciones claramente expuestas y aprobadas y los dibujos correspondientes sellados y firmados por todas las partes intervinientes en el proyecto.
- Que esté aprobada la instrumentación financiera de la operación, y abierto y operativo el correspondiente crédito documentario.

15.2.- EXPEDICIÓN DE LOS EQUIPOS

En el interior de Europa se hace en camión, y dada la libre circulación de mercancías del espacio común europeo, no es necesario despachar de aduanas el equipo ni se paga arancel alguno. Normalmente se realizan dos envíos.

- En el primero se remite el material de anclaje que va embebido en el hormigón, los fittings del cuerpo de goma, las estructuras (frames) que soportan las placas y fittings de los estribos y parte del equipo auxiliar de la caseta de control.
- En el segundo envío se remite el cuerpo de goma con todo su equipamiento interior y exterior, las placas clamping de cierre y el resto de los equipos de la cámara de control.

Los equipos en el momento en que se entregan en las instalaciones que determina el contratista son ya de su propiedad y deben permanecer almacenados en condiciones adecuadas bajo su responsabilidad (por su cuenta y a su guarda y custodia) en las instalaciones elegidas por él, y transportados y descargados luego por él hasta la obra para su montaje según un calendario que marcaremos de común acuerdo.

El tiempo necesario para el transporte desde el embarque en Alemania hasta su entrega en el sur de Europa suele ser del orden de una semana.

15.3.- EL MONTAJE

Se sale de los límites de este pequeño informe relatar y explicar una por una todas y cada una de las operaciones que hay que realizar para llevar a cabo el montaje de una compuerta neumática. Por tanto nos limitaremos a agruparlas por fases dando una pequeña explicación de los trabajos que incluye cada una de ellas.

Las principales fases del montaje de cualquier compuerta neumática son las siguientes:

1.- Preparación de la obra y creación de condiciones

Normalmente se necesita un contenedor de 20´ o un espacio similar cubierto y cerrado para el almacenamiento de la herramienta, dotado de llave y ubicado dentro de la obra o en algún lugar muy cercano a ella. Es conveniente disponer de un banco de trabajo.

El lugar debe estar conectado a la red o a un grupo electrógeno y tener una potencia mínima disponible de 6 kw para pequeña herramienta eléctrica manual y para las máquinas de soldadura electrógena.

Se recomienda disponer también de un espacio bien ventilado al aire libre pero cubierto con un toldo o plástico para resguardarlo del sol y de la lluvia para su utilización como parque de materiales, tales como tubos de acero y PEAD, fittings, perfiles, llantas, etc. y para realizar pequeños trabajos de calderería, soldadura, pintura, ensamblajes elementales, etc.

2.- Instalación de las tuberías de aire y de los componentes de fijación

Según sea el espesor de la losa de anclaje, se trabaja sobre una buena capa de hormigón de limpieza o sobre la anteúltima fase del hormigonado de la losa, cuando la parte superior de la última tongada de hormigón ha llegado a 1 metro por debajo del Datum Level. Las armaduras de la losa se deben diseñar y proyectar de forma que las barras que están situadas por encima de esta cota se puedan montar después de instaladas las tuberías. Es preceptivo realizar una prueba de estanqueidad del sistema cuando está terminado el montaje.

Los componentes de fijación a que nos referimos son las placas embebidas y los pernos de anclaje, tanto los que se instalarán en la losa como los que se montarán en los estribos. Hay dos procedimientos para el montaje de las fijaciones: Instalarlas embebidas en el hormigón o montarlas con resina después de terminada de construir la parte horizontal de la losa.

En el primer caso, se monta todo el material de la losa al mismo tiempo: los anclajes embebidos en la losa, los que irán embebidos en los estribos, los soportes de la ataguía desmontable y el sistema de tuberías.

En el segundo caso, una vez montadas las tuberías, se montan los soportes de la ataguía desmontable (stop logs) y se termina de hormigonar la losa hasta la cota del Datum Level. Una vez terminada la parte horizontal de la losa se montan los estribos y se hormigonan.

Terminados de construir la losa y los estribos, se marcan las líneas de anclaje y se procede a perforar con broca hueca de cabeza de diamante los testigos de hormigón que alojarán los pernos de anclaje. Tanto en la redacción del proyecto como en la colocación de las armaduras se deberá prestar atención a la armadura de la parte superior de la losa, para que no resulte dañada por las perforaciones de los testigos.

Terminadas las perforaciones, se debe limpiar cuidadosamente la losa y secarla, especialmente las paredes y fondo de los agujeros practicados, montar las placas con sus pernos y recibirlas en los agujeros practicados, previamente rellenos con resina hasta la altura precisa.

3.- Trabajos previos a la instalación del cuerpo de goma

Antes de empezar las operaciones con el rollo de goma se deben realizar una serie de operaciones que detallamos a continuación:

- Desmontar los negativos instalados sobre los frames de los estribos e instalar las placas embebidas y sus pernos de anclaje.
- Eliminar las juntas del encofrado que aparezcan en las zonas de los estribos en que deberá apoyarse la lámina de goma, puliendo con una rebarbadora de diamante la superficie correspondiente.
- Limpiar cuidadosamente la losa, eliminando maderas, clavos, piedras, barras y restos de armaduras, encofrados y/o proyecciones de hormigón que puedan haberse depositado sobre la losa.
- Instalar la ataguía desmontable y comprobar que el canal de desvío funciona adecuadamente.
- Desenrollar y amarrar el cojín de caucho que se debe instalar bajo la parte de aguas abajo del footprint y bajo la lámina antiabrasión.
- Desenrollar y amarrar la lámina antiabrasión

4.- Desenrollado del cuerpo de goma

Según sea la disposición de los accesos para las grúas, se debe indicar previamente al constructor si el desenrollado se realizará desde la margen izquierda hacia la margen derecha o al revés, o si no tiene importancia la dirección del desenrollado porque el acceso es bueno en ambos lados del río.

5.- Fijación del cuerpo de goma y ensamblado interior

El cuerpo de goma se suministra solo con los agujeros de la primera línea de anclaje de la parte horizontal, pero sin perforar los primeros 5 agujeros junto a los corners, es decir, sin los cinco primeros y sin los últimos cinco agujeros de la parte horizontal. La primera acción consiste precisamente en taladrar estos agujeros de la parte horizontal de la primera línea de anclaje.

A continuación se debe perforar la parte horizontal de la segunda línea de anclaje (si la compuerta cuenta con ella), instalar las láminas de protección y montar las placas clamping, dándolas el primer apriete. Después se debe continuar con los anclajes de la segunda línea instalados en los estribos, montar las clamping correspondientes y darles también el primer apriete.

A continuación se deben perforar en la lámina inferior los anclajes de la primera línea de los estribos, alojar la compuerta en ellos y cortar el material sobrante. Una vez terminada esta operación se deben instalar los fittings de entrada y salida de aire, de toma de presión y de drenaje.

Con estas operaciones queda totalmente anclada la lámina inferior, y podemos proceder al montaje de los cojines interiores y de los tubos separadores.

Después de sucesivos aprietes en la segunda línea de anclaje, se amarra la lámina protectora sobre las clamping de la misma y se procede al cierre del cuerpo de goma.

6.- Cierre y apriete del cuerpo de goma

Se debe comprobar cuidadosamente que en el interior del cuerpo de goma no quedan basuras ni restos de ningún tipo tales como brochas, botes de los productos, de vulcanización en frío empleados, pedazos de lámina de goma, herramientas, etc. Eventualmente puede ser interesante retirar los restos de arena, barro, y suciedad de su interior mediante una aspiradora industrial.

Con la ayuda de una grúa principal y un camión con pluma se procede al cierre del cuerpo de goma. Se perforan los agujeros de la primera línea de anclaje de los estribos y se corta el material sobrante. A continuación se instalan las placas clamping de la primera línea de anclaje completa, dándoles el primer apriete. En días sucesivos, se deben dar sucesivos aprietes con la llave dinamométrica, hasta comprobar que las tuercas no ceden.

Durante este tiempo, se instalarán los deflectores de flujo. Después se deberá probar la compuerta en carga, inflándola hasta el 100% de la presión de trabajo y manteniéndola inflada durante 1 hora, comprobando y anotando la evolución de la presión interior, y examinando las dilataciones que sufre el cuerpo de goma. Después se desinflará parcialmente hasta el 70% de su presión nominal y se mantendrá inflada a tal presión durante 24 horas para comprobar su estanqueidad.

7.- Montaje de la caseta de control

El montaje de la caseta de control se debe realizar en dos fases.

- En primer lugar se debe avanzar con el montaje mecánico de las tuberías, válvulas y soplantes. Para ello se pueden aprovechar los tiempos muertos del montaje de los anclajes y del cuerpo de goma.
- Posteriormente se realizará el montaje eléctrico, con el cableado de los dispositivos, la instalación del software y los ensayos de la compuerta en carga real (con agua)

15.4.- EQUIPO TÉCNICO Y HUMANO NECESARIO

El equipo técnico necesario es el habitualmente utilizado por cualquier contratista general de obra civil. En general, no existe ningún elemento extraño o que no se pueda conseguir localmente de manera fácil y rápida.

Aunque el peso del rollo de goma raramente supera las 10 tons, para el desenrollado del cuerpo de goma y para el cierre, suele ser necesaria una grúa de 60 a 100 toneladas según los casos ya que debe trabajar con la pluma desplegada. Eventualmente puede que sea necesaria una pequeña grúa auxiliar y una jaula para trabajos en altura en las compuertas de más de dos metros de altura real.

El equipo humano siempre se puede reclutar localmente entre los trabajadores de la población en que estará emplazada la compuerta, al menos en Europa.

15.5.- DURACIÓN DEL MONTAJE

No podemos dar una estimación del tiempo necesario para llevar a cabo la construcción de todos los elementos de la obra civil de la losa, estribos, canal de desvío, escala de peces, etc. pues es muy variable dependiendo de las circunstancias particulares de cada proyecto.

La duración del montaje depende en buena medida de si existe o no una buena coordinación con el contratista de la obra civil. A modo de ejemplo, para una compuerta de 30 m de longitud, 2 metros de altura y **una sola línea de anclaje**, se deberían necesitar los trabajadores y tiempos de trabajo que se detallan en las tablas siguientes:

PERSONAL	CANTIDAD
Ingeniero Supervisor	1
Encargado Montador	1
Soldador homologado	1
Peones	2

ACTIVIDAD	DÍAS
Preparación de la obra y creación de condiciones	5
Instalación de las tuberías de aire y de los componentes de fijación	10
Trabajos previos a la instalación del cuerpo de goma	4
Desenrollado del cuerpo de goma	1
Fijación del cuerpo de goma y ensamblado interior	3
Cierre y apriete del cuerpo de goma	3
Montaje mecánico de la caseta de control	5
Montaje eléctrico de la caseta de control	3
Training del personal del cliente	1

El tiempo de aproximadamente 35 días de **trabajo efectivo** que facilitamos, se refiere a una compuerta neumática de una sola línea de anclaje y únicamente a las actividades específicas de su montaje. Están excluidos, por lo tanto, los tiempos necesarios para todos los trabajos civiles, tales como la construcción de ataguías, la colocación de tablestacas, la preparación de la cimentación, la construcción de los estribos, escolleras, accesos, canal de desvío, etc. También están excluidos los tiempos muertos (que en algunas obras se pueden aprovechar trabajando en la caseta de control) en los que debemos esperar a que el contratista complete determinadas fases de la obra civil para seguir nosotros con nuestra actividad.

15.8.- ESTIMACIÓN DEL PRECIO.

Para que les elaboremos un presupuesto, o para analizar la viabilidad de un proyecto, nos deberán remitir la información siguiente:

COORDENADAS DEL PROYECTO

- Nombre del proyecto y coordenadas Google Earth.
- Localización (río, población más cercana, etc.).
- Aplicación. Objetivo que se persigue con su instalación.
- Nombre y coordenadas del usuario y/o propietario final

DATOS DEL PETICIONARIO

- Nombre, apellidos y cargo
- Compañía, oficina, delegación y coordenadas completas
- En calidad de qué actúa: Ingeniería, contratista, inversionista, propietario, etc.

DATOS DEL PROYECTO

- Altura de la compuerta respecto de la cimentación o del azud existente
- Longitud total de la compuerta a lo largo de la cimentación.
- Número de vanos.
- Pendiente de los estribos en las riberas y en los pilares intermedios.

- Cota del cauce o de la coronación del azud donde será anclada la compuerta
- Cota que alcanzará el agua embalsada cuando comience a verter.
- Cota máxima que puede alcanzar el agua embalsada.
- Cota del agua aguas abajo de la compuerta.
- Características de la energía eléctrica de que se dispone para su operación.
- Distancia prevista desde el estribo hasta la caseta de control
- Margen en que estará situada la caseta de control
- Condición del lecho del río: arcilloso, rocoso, arenoso, etc
- Presencia y clase de sedimentos.
- Aclaración con respecto al tipo de agua en la que se va a colocar la presa, si está limpia, si es salada o si está contaminada, y en tal caso, qué tipo de contaminación tiene y su ph.
- Existencia de canales, aliviaderos etc. margen del río en que están situados, dimensiones de los mismos, detalles constructivos etc.

INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

- Caudal de avenida con un período de retorno de 25 años.
- Caudal de avenida con un período de retorno de 100 años.
- Caudal de avenida con un período de retorno de 500 años.
- Tabla de distribución de caudales anuales detallando cada caudal y los días al año que el río presenta tales flujos

INFORMACIÓN ADICIONAL

- Pendiente del cauce 100 m. upstream y 1.000 m. down stream
- Accesos al lugar previsto para su emplazamiento
- Croquis explicativo del lugar y alrededores
- Condición de la superficie de amarre (antiguo azud, solera de nueva construcción, recrecimiento en presa ya existente etc.)

Esta información deberán enviarla a:

SPARE, S.A.

Parque Tecnológico - Edificio 207 B 1

Tel.: + 34 – 94 – 452.32.00

Fax: + 34 – 94 – 452.30.30

E-mail: javier.ayala@spare.es

E - 48.170 ZAMUDIO (Bizkaia)