

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“ Tuberías Forzadas de la Hidroeléctrica de Machupicchu ”

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO

JAVIER OCTAVIO OVIEDO CORNEJO

PROMOCION: 1983 - 2

LIMA • PERU • 1989

I N D I C E

P R O L O G O	1
---------------	---

C A P I T U L O 1

I N T R O D U C C I O N

1.1 Generalidades	5
1.2 Justificación	8
1.3 Objetivos	9

C A P I T U L O 2

C R I T E R I O S Y C O N D I C I O N E S P R E L I M I N A R E S

2.1 Perfil del terreno natural	14
2.2 Composición del terreno, aspectos geológicos, determinación de fallas	15
2.2.1 Zona superior	18
2.2.2 Zona intermedia	18
2.2.3 Zona baja	18
2.3 Alternativas del trazado de la tubería	19

C A P I T U L O 3

D I S E Ñ O

3.1 Trazo definitivo	21
3.2 Conjunto de la tubería forzada	23
3.3 Perfil longitudinal de la tubería	24
3.4 Estudio del golpe de ariete	25
3.4.1 Parámetros del estudio	28
3.4.2 Datos mecánicos e hidráulicos	32
3.4.3 Métodos de cálculo	35
3.5 Cálculo de la tubería	64
3.5.1 Diámetro de la tubería	64
3.5.2 Pérdida de carga en tuberías forzadas	70
3.5.3 Espesor de chapa	77
3.5.4 Determinación y cálculo de apoyos	99
3.5.5 Cálculo de las juntas de dilatación	118
3.5.6 Chimenea de equilibrio o pozo piezométrico, cámara de carga, respiradero o válvula de ingreso y salida de aire	124
3.5.7 Accesorios y dispositivos complementarios	130

C A P I T U L O 4

F A B R I C A C I O N

4.1 Conocimiento de condiciones previas para inicio de la fabri- cación	134
4.1.1 Datos de diseño	134
4.1.2 Datos limitantes por transporte y montaje	134

4.2	Elementos de la tubería forzada	135
4.3	Tolerancias de fabricación	136
4.3.1	Diferencia de la forma circular	137
4.3.2	Desencaje de soldaduras oblongas	137
4.3.3	Desencaje de soldaduras circunferenciales	138
4.3.4	Saliente de soldadura	138
4.3.5	Doblegamiento de la soldadura	139
4.3.6	Forma circular	139
4.3.7	Diferencia de la longitud desarrollada	140
4.3.8	Rectitud de los tubos	140
4.3.9	Espesor de paredes	140
4.3.10	Tolerancia de diámetro	140
4.4	Fabricación propia	140
4.4.1	Calderería	141
4.4.2	Rolado	141
4.4.3	Soldadura	141
4.4.4	Pruebas realizadas durante la fabricación	146
4.4.5	Fundición	155
4.5	Transporte de taller a obra	156

C A P I T U L O 5

M O N T A J E

5.1	Formas de unión de partes de la tubería	158
5.1.1	Chaflandes para soldaduras circulares en los extre- mos de los tubos	158
5.2	Transporte de partes de la tubería	161
5.2.1	Equipos y maquinaria utilizada	162

5.2.2 Diagramas de flujo de los recorridos a utilizar	165
5.3 Procedimiento de montaje	167
5.3.1 Implantación, anclaje y ajuste de tubos	167
5.3.2 Proceso de soldadura	168
5.3.3 Hormigonado	175
5.3.4 Inyecciones	177
5.3.5 Protección de la tubería contra la corrosión	178
5.3.6 Diversos casos de montajes de tuberías	190
5.3.7 Montaje de las juntas de dilatación	192
5.3.8 Montaje de la válvula mariposa	192
5.4 Indices de montaje	193
5.4.1 Montaje de tubos por día, semana o mes	198
5.4.2 Montaje de peso de tubería por horas hombre	198
5.4.3 Rendimiento de soldadores	200

C A P I T U L O 6

P R U E B A S

6.1 Chequeo de soldaduras	202
6.1.1 Ultrasonido	205
6.1.2 Rayos X	234
6.1.3 Líquidos penetrantes	239
6.2 Chequeos topográficos de posicionamiento de tubos	257
6.2.1 Chequeo en galería horizontal	258
6.2.2 Chequeo en pique vertical	258
6.2.3 Chequeo en tramo aéreo	261
6.3 Control del espesor de pintura	264

6.4 Pruebas hidráulicas	265
6.4.1 Pruebas en la tubería	266
6.4.2 Pruebas en la válvula mariposa	273
6.5 Pruebas de puesta en funcionamiento	275
6.6 Cálculo de inversión	278
CONCLUSIONES	284
BIBLIOGRAFIA	286
PLANOS	
APENDICES	

P R O L O G O

Cuanto más progresa la humanidad en sus conocimientos, más nos damos cuenta de lo mucho que nos falta saber. Con esta rápida ampliación de nuestra ignorancia, se presenta la necesidad de activar nuestros procesos de educación.

Estos procesos deben ser lo más amplios posibles, es decir se a de utilizar todos los medios que de una u otra forma contribuyan a ampliar nuestros conocimientos, tanto de cultura general como los específicamente técnicos de la profesión a la que uno pertenece.

Dichas actividades pueden clasificarse en los aprendizajes teórico prácticos de la universidad, las consultas bibliográficas siempre necesarias y el aprendizaje netamente práctico durante el ejercicio profesional; dependiendo éste último del área en la cual uno se desarrolla.

Dado que en la etapa universitaria es necesario adquirir el máximo de conocimientos y conocida la importancia de la parte práctica para la mejor formación de los profesionales, es necesaria entonces la abundancia de trabajos y bibliografía que nexen el aspecto teórico con el práctico, cualidad que se pretende dar a la presente tesis.

Difícil es el determinar el área en la que se encuentre enmarcada la presente tesis, pues por sus características abarca áreas, como: diseño, procesos de manufactura, materiales de fabricación, energía y montaje; que en conjunto dan un trabajo con las características teórico-prácticas buscadas.

El tema se refiere a tuberías forzadas en centrales hidroeléctricas de características similares a las que se tiene en el Perú, abarcando desde la concepción como proyecto hasta su puesta en funcionamiento, teniendo su aplicación práctica en la tubería forzada de la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu.

El primer capítulo que es la introducción, trata de las generalidades referentes al tema, como son entre otras: el impulso hidroenergético existente en el mundo, el gran potencial de nuestro país en este rubro, el ámbito geográfico en el que se desarrolla el proyecto de Machupicchu, además de la justificación y objetivos perseguidos por el trabajo.

En el segundo capítulo se presentan las condiciones previas, que deben conocerse antes de iniciar el desarrollo ejecutivo del proyecto, para el caso específico de las tuberías forzadas. Estas condiciones son dadas en los estudios de pre-factibilidad y factibilidad, refiriéndose generalmente al terreno, en cuanto a su forma, composición y alternativas de trazo.

El capítulo tres es dedicado al diseño de la tubería, donde se ve el estudio del golpe de ariete, los cálculos de las características de la tubería en sí, como son: el trazo definitivo, diámetro, espesor de chapa, juntas de dilatación, apoyos y anclajes. Concluido el

capítulo se tienen las características y datos necesarios para iniciar la fabricación.

El cuarto capítulo es iniciado con un resumen de condiciones iniciales para la fabricación, que son las de diseño y todas aquellas otras que influyen en los procesos fabriles, como los referidos a montaje y transporte. A continuación se trata de las tolerancias requeridas, de los procesos de fabricación, de las pruebas realizadas, finalizando con el transporte desde talleres a obra.

En el capítulo cinco se plasman todos los procesos de montaje que se dan en todas las partes componentes de la tubería, cuya información se refiere a la parte descriptiva, como a la evaluación estadística, que dan como resultado índices de montaje a usarse como guía en proyectos similares.

El capítulo seis está constituido por la lista y descripción de todas las pruebas, que se realizan durante el montaje y que entre otras son conformadas, por los chequeos de posicionamiento, control de las soldaduras en sus diversas formas, pruebas hidráulicas, así como la puesta en funcionamiento que está ligada a la operación en conjunto de la central.

Es necesario indicar que en toda la tesis se trata primero los aspectos teóricos referidos a cualquier tubería forzada y posteriormente su aplicación práctica en la tubería de Machupicchu.

A continuación se detallan una serie de conclusiones, que son consecuencia de la elaboración del trabajo y que reflejan los usos, de éste para proyectos similares.

A continuación se tiene la lista de la bibliografía utilizada, que servirá como guía para quién desee investigar más sobre cualquier punto específico.

Por último se colocan una serie de planos , que sirven para visualizar mejor los conceptos vertidos, acompañados por los apéndices que contienen: tablas, cuadros, fórmulas, gráficos y otros que permiten una mejor comprensión de los puntos tratados.

C A P I T U L O 1

I N R O D U C C I O N

1.1 Generalidades

El potencial hidroenergético mundial es muy grande y está solo parcialmente explotado, tal como lo establecen las tablas referentes a los ríos más importantes del mundo, al potencial hidroeléctrico bruto mundial, al potencial hidroeléctrico técnico y su utilización. (Ver apéndice A).

Es además conocido el aumento de la energía eléctrica en todos los países del mundo, como consecuencia del crecimiento demográfico y también como indicador del crecimiento económico, que es buscado por todos ellos; aumentando en muchos la energía hidroeléctrica, generalmente por el aumento del costo de las otras fuentes de energía, como son principalmente los combustibles fósiles. En general se puede decir que en todos los países existe la tendencia a explotar al máximo los recursos hidráulicos, con unidades estandarizadas y automatizadas, con microcentrales, ampliando centrales ya existentes e instalando turbinas en presas construidas para otros fines. (Ver apéndice B).

En el caso del Perú, lo anterior es totalmente válido, pues tenemos un gran potencial hidroenergético que está parcialmente

explotado, como se puede verificar en los cuadros del apéndice C que son datos del balance nacional de energía.

Como consecuencia de la diferencia existente entre la energía hidroeléctrica como potencial y la energía hidroeléctrica como producción actual, se verifica el gran impulso y el apoyo que debe brindarse, en el corto, mediano y largo plazo, al desarrollo del aprovechamiento hidroenergético; tanto como respuesta al desarrollo económico que se necesita, como también para satisfacer las necesidades propias del crecimiento poblacional, apoyado todo ésto con la entrada y/o ahorro de divisas, al restar el consumo de combustibles fósiles, pudiendo vender los excedentes.

Debe mencionarse también que se debe acompañar con los trabajos de interconexión nacional, de toda la red de energía eléctrica, que traerá como consecuencia la mejor utilización de los recursos con que se cuenta.

Como ya se a dicho en el prólogo, la aplicación práctica del presente trabajo, se refiere a la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu, en cuanto a su tubería forzada cuya ubicación geográfica es:

* Departamento	Cusco
* Provincia	Urubamba
* Distrito	Machupicchu
* Coordenadas :	13° 30' Latitud Sur
	72° 00' Longitud Oeste
* Altitud	1700-2050 m.s.n.m

Es necesario además tener conocimiento de algunas pautas del

proyecto general:

Su objetivo principal es el de satisfacer la demanda de energía eléctrica de los centros productivos en operación y sus ampliaciones futuras, así como de los nuevos proyectos que se desarrollen en la región, principalmente los del campo minero. Demás está decir que se persigue también, cubrir las necesidades relacionadas con el crecimiento poblacional de la zona urbana y rural atendidas y de las que se consideraba necesario ampliar para elevar el nivel socioeconómico.

El sistema existente con anterioridad, estaba conformado por la primera etapa de la hidroeléctrica de Machupicchu, con una potencia instalada de 40 MW, interconectada con la central térmica de Dolorespata (Cusco), con una potencia de 15,1 MW, mediante una línea de transmisión a 138 Kv, simple terna y 91,5 Km de longitud, teniéndose sobre la misma a 78 Km de la C.H.M.P, una subestación de 138/6,9 Kv y 40 MVA denominada de Cachimayo. Sistema éste que atendía en forma limitada y no garantizaba la demanda de la fábrica de Cachimayo y pueblos aledaños.

Con el fin de lograr una solución integral a las demandas, del futuro sistema regional del Cusco (SERC), el Ministerio de Energía y Minas en el año de 1973 elaboró el documento denominado: " Estudio de pre-factibilidad de electrificación del departamento del Cusco y centros mineros de Tintaya, Ferrobamba y Chalcobamba", en el que quedo establecido la conveniencia de establecer un sistema que contribuyera a un armónico desarrollo económico y social de la región.

En el año de 1976 Electroperu encargo al INIE, la elaboración del " Estudio de factibilidad de electrificación del Cusco y de los centros mineros de Tintaya, Ferrobamba y Chalcobamba", delineándose un plan de obras en dos etapas.

La primera etapa incluía:

- Ejecución de un nuevo desarenador. (1)
- Construcción de una nueva tubería de presión. (1)
- Utilización del túnel existente. (1)
- Construcción de casa de máquinas en caverna, para 3 turbinas Pelton de eje vertical, acopladas a generadores de 23,3 MW. (1)
- Tendido de 102 Km de línea de transmisión, a 138Kv, simple terna y subestaciones en Cachimayo, Quencoro y Dolorespata. (1)
- Tendido de 200 Km de línea de transmisión a 138 Kv, simple terna y subestaciones en Combapata (2) y Tintaya (1).

La segunda etapa incluye:

- Central Hidroeléctrica de Quishuarani, de 100 MW. (3)
- Línea de transmisión a 138 Kv, Quencoro-Bamba, con 81,5 Km.
- Electrificación rural del valle del Vilcanota (1), valle de la Convención y Pampa de Anta (3).

Los estudios definitivos a nivel licitación, fueron elaborados por POLYTECHNIA HYDROPROJECT de Checoslovaquia, bajo la supervisión del INIE.

1.2 Justificación

Como se puede interpretar de lo expresado en las generalidades

y en el prólogo, el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica a nivel mundial y particularmente en el Perú, es de vital importancia para el desarrollo, como lo es también la existencia de bibliografía adecuada, para la buena formación de los profesionales en sus respectivas ramas. El último punto cuando se refiere a temas específicos es pequeña su existencia y se ve reducida aún más si se trata de vincular el aspecto teórico con el práctico, motivo que me a llevado a desarrollar el presente trabajo, que si bien es cierto es tan sólo una parte de todo aquello que comprende un proyecto hidroenergético, brinda información amplia sobre la parte tratada, pudiéndose completar con trabajos similares sobre las demás partes de un proyecto hidroeléctrico.

Es además necesario de conocimiento que profesionalmente deseo desarrollarme en el campo de la energía hidroeléctrica, lo que se a visto iniciado con los trabajos de la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu, los mismos que me han permitido conocer de cerca todo lo relacionado con el montaje, diseño, pruebas, supervisión de trabajos, así como los problemas y soluciones dadas en este tipo de obras.

.3 Objetivos

Lo que se espera alcanzar con el presente trabajo se puede resumir en lo siguiente:

- Contribuir a la existencia de bibliografía sobre el tema, con un trabajo en el cual se toque con más amplitud y particularidad, el aspecto teórico-práctico de las tuberías forzadas con características muy similares a las existentes en nuestro país.

- Encontrar algunos nuevos hechos, que fundamenten las técnicas, principios y normas ya existentes, en este tipo de obras, como es el caso de algunos índices de montaje.

- (1) Realizado a la fecha.
- (2) En ejecución.
- (3) A nivel estudio.

C A P I T U L O 2

C R I T E R I O S Y C O N D I C I O N E S P R E L I M I N A R E S

Antes del inicio de cualquier trabajo serio, como es el diseño y ejecución de los equipos y elementos constitutivos de una central hidroeléctrica y particularmente del conducto o conductos forzados, es necesario el conocimiento de las condiciones de operación, así como de todos aquellos aspectos que influirán en las decisiones que se tomen durante las diferentes etapas del proyecto.

Para el conocimiento de las condiciones de operación y otros aspectos, es necesario realizar estudios tales como:

- * Estudios climatológicos.
- * Estudios hidrológicos.
- * Estudio de concentración de sólidos.
- * Estudio de composición química del agua.
- * Estudio del modelo hidráulico del desarenador.
- * Estudios geológicos.

La influencia de los resultados de estos estudios en los criterios a tomar sobre la tubería son:

- Los estudios climatológicos son usados en la decisión de tipo de protección a utilizar.
- Los estudios hidrológicos son usados en la determinación del cau-

dal, lo que se relaciona con el tamaño de tubería.

- Los resultados del estudio de concentración de sólidos y del modelo hidráulico del desarenador (que dará la eficiencia del mismo), servirán para determinar el tamaño de partículas que arrastrará el agua a través de la tubería, lo que permitirá tomar en cuenta el desgaste por abrasión.
- Los resultados de la composición química del agua, servirán para tomar en cuenta la protección interior de la tubería.
- Los estudios geológicos son necesarios en el trazo de la tubería y en el diseño de la implantación y cimentación de la misma.

A continuación se muestran los resultados de los estudios, para el caso de la aplicación práctica de éste trabajo:

CUADRO Nº 1

ESTUDIO CLIMATOLOGICO

Clima	Subtropical
Altura.....	1700-2000 m.s.n.m
Temperatura máxima. (Enero)...	28,2° C
Temperatura mínima. (Agosto)...	0,6 ° C
Humedad relativa media anual..	84,9 %
Humedad relativa máxima.....	100 %
Humedad relativa mínima.....	32,0 %

Fuente: Estudio definitivo INIE

CUADRO Nº 2

ESTUDIO HIDROLOGICO

Caudal anual medio.....	124,3 m /s
Coefficiente de variación.....	0,216
Caudal mínimo observado.....	25,6 m ³ /s
Caudal máximo observado.....	790,0 m ³ /s
Caudal máximo registrado c/año..	500,0 m ³ /s
Caudal de ocurrencia 0,01 prob.	1500,0 m ³ /s
Caudal en año promedio(95% t) ..	32,0 m /s
que fija potencia garantizada.	

Fuente: Estudio definitivo INIE

* Estaciones de aforo:

CHILCA: 8762 Km² 1964-1971/1953-1957

KM 105: 9160 Km² 1958-1975

La concentración de sólidos (1) se resume de la siguiente manera:

Concentración más alta (averiguada 1 vez en 10 años) = 8 gr/l

Análisis mineralógico = 80% cuarzo con cantos agudos.

Análisis demostró la participación de granos muy finos, de \varnothing menores a 0,05 mm

CUADRO Nº 3

COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA

PH (Unidades).....	7,3-7,4
Conductividad específica (a 20° C).....	528-664 mg/l
CO ₂ libre.....	6,6 mg/l
CO ₂ ligado.....	48,4-50,6 mg/l
Oxibilidad (mg O ₂ /l).....	1,8-2,96 "
Residuo seco (105 °C)	406-512 mg/l
Dureza total (grados alemanes).....	13,2-13,6 gr
Dureza temporal.....	6,2-6,4 gr
Dureza permanente.....	7,0-7,2 gr
Alcalinidad.....	0,15-76,7 mg/l
Cloruros.....	57,2-76,7 mg/l
Sulfatos.....	128,6-137 mg/l
Amoniaco salino.....	0,0
Calcio.....	67,3-71,6 mg/l
Magnesio.....	15,6-16,5 mg/l

Fuente: Estudio definitivo INIE

CONCLUSION: Agua de reacción moderadamente básica, de dureza mediana y de comprobado elevado contenido de sulfato.

Del análisis de los resultados de los estudios podemos decir:

- Por tener un clima tropical con humedad alta, se a de observar una buena protección para la tubería al aire libre.
- Por ser el agua casi neutra y más bién de naturaleza básica no se prevee corrosión química.
- Teniendo gran eficiencia el desarenador, se prevee que en epocas de avenida, el agua arrastre gran cantidad de granos finos.

- El caudal total para la potencia nominal fue determinado en 23,2 m³/s.

2.1 Perfil del terreno natural

Innegable es que cada central hidroeléctrica, constituye un proyecto distinto de los demás, por lo que cada uno de ellos se a de adaptar a la configuración del terreno y a las características que ofrece el salto en la naturaleza.

La configuración natural del terreno es uno de los factores importantes en el costo final de la obra, ya que de sus características se desprenden las obras a realizar.

La toma de datos del perfil natural, es un trabajo netamente topográfico, que se debe plasmar finalmente a planos; debiendo a barcar el estudio a toda la zona donde es posible realizar variantes del trazo de la tubería. Estas se ven limitadas generalmente a números pequeños, ya sea por las características propias de terreno que se tiene o como es el caso de la central tratada, en que al ser ampliación, tenía desde el inicio la utilización de varias obras y servicios en común, con la antigua central.

Así tenemos:

- * La presa.
- * El túnel de derivación.
- * La cámara de carga.
- * Utilización de grúa puente del taller y funicular.

Esto daba un margen escaso, sobre el cual se podía hacer vari

aciones del trazo, ya que el inicio estaba dado por la cámara de carga existente y el final es decir la casa de máquinas, debería estar cercana a la antigua, por facilidad de operación; agregándose a esto, la existencia de un funicular que podía permitir el acceso a cualquier parte de la nueva tubería, si el trazo fuera cercano a la línea de éste.

El perfil natural del terreno es mostrado en el plano N^o 1 .

2.2 Composición del terreno, aspectos geológicos, determinación de fallas

Cualquier estructura, ya sea un edificio, un puente, una presa, una tubería forzada etc, debe descansar sobre el suelo o escolleras (2), siendo la elección de una cimentación satisfactoria a uno de los primeros problemas en los proyectos de construcción.

Como la mayoría de las estructuras descansan sobre tierra, el papel del suelo como material de cimentación y de construcción, ha sido siempre de notoria importancia, como es el caso de las tuberías forzadas, ya que dada su envergadura, la cimentación es siempre muy importante.

Algunas veces se puede hacer la elección del suelo, como es el caso de una presa de tierra, cuya composición exacta del suelo es elegida durante el diseño, pero más frecuentemente, el terreno debe ser tomado tal como se presenta en el lugar escogido.

Este último caso se presenta generalmente en las centrales hidroeléctricas y muy particularmente en la Central de Machupicchu donde los puntos en común con la antigua central, obligaba por a

sí decirlo a elegir un cierto trazo.

Sin embargo si las características del subsuelo no son totalmente satisfactorias, ocasionalmente puede ser posible mejorarlo por medio de la inyección de algunas sustancias, para obtener una mejor consolidación y comportamiento del suelo.

Se a de tener en cuenta que no es tanto la naturaleza variable de los suelos, lo que en general conduce a problemas complejos, sino la naturaleza variable del suelo en el sitio de construcción, por más pequeño que éste sea.

Todo ésto lleva a la necesidad de realizar investigaciones en el subsuelo, cuyo propósito es el de determinar la extensión y naturaleza de la capa principal del suelo, determinar la profundidad de la capa freática y además el de obtener muestras de los varios suelos encontrados, para ser identificados. Adicionalmente las muestras tomadas, son llevadas a laboratorio, determinando las propiedades físicas del terreno tratado.

Todos los datos encontrados son mostrados en el " Perfil Estratográfico", más comúnmente conocido como "Perfil del suelo" .

Las exploraciones del subsuelo se dividen en dos clases:

- * Reconocimiento o investigación preliminar.
- * Exploración detallada.

La investigación preliminar es necesario realizarla, en todos aquellos lugares, en donde se planea realizar la construcción de una estructura importante, obteniéndose con ésto un perfil del suelo que generalmente es bastante crudo y cuya informa

ción relativa a la naturaleza del suelo es incompleta; sin embargo dará la información necesaria para iniciar el diseño en casi todos los casos, así mismo mostrará las dificultades que existan en un lugar determinado, realizándose con posterioridad las investigaciones detalladas, si el diseño así lo requiere. Los métodos de exploración y muestreo subterráneo se detallan en el apéndice D.

Además de los métodos de muestreo y perforación, existen las investigaciones geofísicas, basadas en la resistencia eléctrica o en métodos sismográficos, que cuando son comparados satisfactoriamente con algunas perforaciones, resultan rápidas y económicamente rentables. Es bueno señalar que se consideran valiosos pues frecuentemente localizan, fallas del suelo, canales subterráneos y otras irregularidades, que no son ubicadas con la perforación.

Las tuberías forzadas son siempre estructuras importantes, lo que obliga a tener información sobre las características del suelo donde va a ser implantada y cimentada, debiendo realizar las investigaciones más detalladas en cuanto más importante sea el conducto.

Refiriéndonos ahora al caso de nuestra aplicación práctica, diremos que la exploración geológica se concentró en la parte superior de la pendiente, desde la cámara de carga en la cota 2052 m.s.n.m hasta el punto de nivelación V.3 en la cota 1907 m.s.n.m. Las partes más bajas de la ladera, fueron eliminadas de las exploraciones detalladas, después de haberse determinado y compro-

bado, que construir la tubería en dicho lugar sería muy difícil y costoso, debido a la morfología del terreno. Se pudo identificar en la parte superior del terreno:

2.2.1 Zona superior

Desde la cota 2052 hasta la cota 1986 m.s.n.m aproximadamente, se tiene una formación rocosa de granito, que presentaba tan sólo un pequeño intemperismo⁽³⁾ superficial. La inclinación de la superficie de la base rocosa, correspondía a la inclinación de las grietas de exfoliación⁽⁴⁾ locales, es decir entre los límites de 50 a 65°.

2.2.2 Zona intermedia

Dentro de los límites de las cotas 1986 y 1970 m.s.n.m, se presentaba junto a la superficie las rocas inconsolidables⁽⁵⁾, cuyo espesor máximo era de 3,5 m y la mayor acumulación se encontraba entre las cotas 1972 y 1975. La velocidad de las ondas sísmicas en este material de recubrimiento, fue de 550 m/s.

2.2.3 Zona baja

Dentro de los límites de las cotas 1967 y 1956 m.s.n.m, se observa junto a la superficie las rocas inconsolidables y un pequeño afloramiento entre las cotas 1967 y 1970. El espesor de los sedimentos es de 2,9 m hasta 3,6, determinado entre las cotas 1960 y 1965. Su velocidad sísmica entre

570 y 750 m/s.

2.3 Alternativas del trazado de la tubería

En todo proyecto hidroeléctrico es necesario hacer el estudio, de todas las alternativas del trazado de la tubería, que se dan luego de conocer el perfil del terreno, en la zona del salto; evaluando finalmente la alternativa que brinde el mayor beneficio técnico económico.

Se a de tener en cuenta las diferentes alternativas, están siempre en función de las necesidades de las otras partes del proyecto, como por ejemplo el inicio (cámara de carga), que necesita ciertas condiciones para su ubicación, igual sucede con la casa de máquinas y el canal o túnel de descarga. Deslindadas estas dependencias, generalmente no quedan más de 2 ó 3 posibles trazos, eligiendo el que brinde mejores condiciones.

Para el caso de Machupicchu, las alternativas del trazo de la tubería, según la ubicación de los servicios en común con la antigua central y viendo el perfil del terreno se reducen a dos, que son:

- * Trazado netamente exterior, siguiendo el perfil del terreno y paralelo a la tubería existente.
- * Trazado mixto, con parte de tubería al aire libre y parte empotrada en un pique vertical.

La primera alternativa es desechada, dado lo difícil de las condiciones para el montaje, la gran cantidad de obras civiles, por la fuerte pendiente, además de las características geológi-

cas citadas anteriormente, teniendo también que la posición de la casa de máquinas sería inadecuada, dada la estrechez del valle.

Tomada la alternativa dos como la más viable, queda por determinar el punto exacto donde debe comenzar la tubería empotrada, lo que se verá en el trazo definitivo.

- (1) **Suspensión de sólidos:** Dato a utilizar en el diseño del desarenador, y si no hubiera, se a de tener en cuenta en el desgaste por erosión, producido en tubería y turbinas.
- (2) **Escollera:** Conjunto de piedras arrojadas al agua o colocadas sobre el terreno sin ningún orden, bien para formar un dique o para servir de cimiento a un muelle o estructura similar.
- (3) **Intemperismo:** Relativo a intemperie, es decir a cielo abierto.
- (4) **Exfoliación:** Despegue de dos capas o paquetes sucesivos de la corteza terrestre.
- (5) **Inconsolidable:** Que no se puede consolidar, porque segun su estructura es imposible, pues un trabajo de consolidación ocasionaría fragmentación.

C A P Í T U L O 3

D I S E Ñ O

.1 Trazo definitivo

El diseño del conducto forzado, comienza después de haberse de terminado el trazo definitivo, cuya decisión es tomada luego de a nalizar y ver la alternativa que brinda un equilibrio entre la po tencia aprovechada, el costo de la obra y las condiciones técni- cas de su construcción, teniendo en cuenta para ello lo siguiente:

* Caudal total

* Número de grupos

* Número de tuberías. (Depende primordialmente de la indepen-
dencia que se quiera dar en el funcionamiento de los grupos
ya que a igualdad de caudal y pérdida de carga, una sóla tu
bería pesa y cuesta menos que varias tuberías).

* Condiciones del terreno. (Importante su conocimiento, para
decidir la cimentación a usar, para saber las condiciones
de montaje, costear los trabajos a realizar, según los difere
ntes trazos).

Realizado el estudio de las alternativas, vinculando los cua-
tro puntos anteriores, se decide por la alternativa que brinde me
jores condiciones.

Para el caso de Machupicchu se tiene los siguientes datos:

* Caudal total: A potencia nominal = $23,22 \text{ m}^3/\text{s}$

A potencia máxima = $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$

* Número de grupos: 3

* Número de tuberías: Alternativa de 3 tuberías.

Alternativa de tubería única.

* Condiciones del terreno: Indicadas en punto 2.2 .

Habiendo verificado las condiciones del terreno, como se tiene indicado en los items 2.2 y 2.3, se tiene la segunda alternativa de trazo como la más conveniente; quedando por determinar el inicio de la parte empotrada y el número de tuberías.

Referente al número de tuberías se elige una sola, teniéndose en cuenta la existencia de la central antigua, que tenía su propia tubería, con lo cual se puede alcanzar cierta independencia entre los 70 MW de la nueva central y los 40 MW de la antigua, y además teniendo en cuenta el menor costo con tubería única.

Dada la posición de la casa de máquinas elegida de acuerdo a las características del terreno, se decide por iniciar la parte empotrada a la altura del punto denominado BA3, mediante un túnel vertical de 180 m, para luego continuar con una galería horizontal hasta conectarse en la casa de máquinas a los respectivos grupos. Por lo tanto el trazo definitivo es en esencia , paralelo al funicular existente, hasta el punto BA3 y al aire libre, para continuar con la parte empotrada descrita líneas arriba. Este trazo definitivo es mostrado en el plano N° 2.

3.2 Conjunto de la tubería forzada

Después de haber decidido el trazo definitivo, es necesario realizar el estudio geofísico detallado de la pendiente en donde estará alojada la tubería al aire libre, de cuyo resultado se elaborará una proposición previa del espesor de chapa. Para el caso de las tuberías empotradas el primer cálculo se a de realizar con las investigaciones preliminares y en base a estadísticas anteriores de obras similares, para luego tomar en cuenta las investigaciones detalladas que se realizan durante la excavación de las galerías.

Además del espesor de chapa, es necesario realizar un bosquejo de los cambios de dirección, de los apoyos y anclajes, del equipamiento de piezas de dilatación etc. Para el caso de la tubería de Machupicchu las características se ciñen a las siguiente descripción:

La tubería está alojada en la parte superior, en la longitud aproximada de 240 m, en la superficie de una pendiente con inclinación cercana a los 45° , teniendo en los lugares de cambio de dirección (codos), bloques de anclaje (en número de tres). Entre dichos bloques que conforman dos tramos, está equipada con juntas de dilatación y respectivos apoyos, teniendo que las fuerzas perpendiculares al eje de la tubería, se transmiten por zapatas a los bloques de soporte.

En la parte siguiente, la tubería pasa al plano vertical, la misma que se encuentra empotrada en la roca en una longitud aproximada de 180 m, siguiendo después con la ayuda de un codo por u

na galería horizontal, la cual termina en la casa de máquinas en una tubería de distribución, con las respectivas ramificaciones a las turbinas de los grupos N^{os} G-3; G-4; G-5 (llamados así para seguir el orden correlativo de los dos grupos antiguos). El conjunto de la tubería es mostrado en el plano N^o 2. Se a de indicar que en las tuberías empotradas donde se toma en cuenta la colaboración de la roca, se toma un 40% como promedio.

3.3 Perfil longitudinal de la tubería

Aquí se debe mostrar y describir el perfil de la tubería, con las medidas y partes componentes de la misma.

Para el caso de Machupicchu, tenemos que en la parte al aire libre se inicia con la conexión a la cámara de carga (construcción realizada en la etapa anterior), para lo que fue necesario remover la brida ciega de \varnothing 3000 mm existente; seguidamente se tiene un manguito, luego la válvula mariposa, seguida de un tramo pequeño donde se instala el respiradero, que conecta a la tubería a la atmósfera y cuya función se explicará oportunamente.

A continuación se ingresa al primer codo en el cual cambia de dirección desde el ángulo con la horizontal aproximadamente igual a $6,5^\circ$ hasta los $47,25^\circ$, correspondiente al primer bloque de anclaje llamado BA1; bajando luego por la pendiente, en un tramo aproximado de 85 m, para llegar a otro bloque de anclaje que establece también otro cambio de dirección, atenuando la pendiente hasta formar un ángulo con la horizontal igual a $37,5^\circ$, bloque llamado BA2. Entre estos dos bloques de anclaje se tiene 4 blo-

ques soportes o bloques de apoyo, cada 18 m aproximadamente.

La tubería sigue bajando con la pendiente nueva en un tramo a proximado de 185 m hasta llegar al BA3 (Bloque de anclaje N^o 3), el cual le cambia la dirección hasta llevarla a la pendiente infinita (90° con horizontal), introduciéndose después en el pique vertical. Se tienen 7 bloques de apoyo entre el BA2 y BA3.

Se a de indicar también que entre el BA1-BA2 y BA2-BA3, existen las respectivas juntas de dilatación, para atenuar los esfuerzos debidos a los cambios de temperatura.

En el pique vertical la tubería es recubierta con concreto, en espesor aproximado de 30 cm, colocándose armaduras de acero, en las partes que por fallas geológicas así lo requiera, de tal manera a asegurar la premisa de que el concreto asumirá el 40 % del trabajo por presión interna. El pique termina en un codo , llamado V-4, el que cambia la dirección hasta desembocar en la galería horizontal, blindada también por concreto en su extensión aproximada de 50 m, terminando en la casa de máquinas en la tubería de distribución que es blindada con concreto armado, la misma que al unirse con la galería, tiene un tramo descubierto, cuya chapa es de espesor mayor, pues resiste el 100% de trabajo y su diseño se debe a requisitos de montaje.

3.4 Estudio del golpe de ariete

Golpe de ariete se puede definir, como la serie de choques de sonido semejantes al de golpes de martillo, producidos por la detención o amortiguación súbita de la corriente de agua en un tu-

bo y en este caso en la tubería forzada.

El golpe de ariete se manifiesta como la sobrepresión o depresión dentro de la tubería, siendo más apropiado hablar de ondas de presión con el entendimiento de que pueden ser positivas o negativas, además para significar que se trata de una propagación de efectos de un extremo a otro de la tubería, así como su superposición y transmisión.

Los cambios de presión interior de la tubería, son fruto de las variaciones de carga en las turbinas, debido a la acción de los reguladores, permitiendo el cierre o abertura del distribuidor, inyector etc. según sea el tipo de turbina; motivando con esto, variaciones en el caudal y por consiguiente en la velocidad del agua.

El caso más extremo es cuando un grupo pasa de carga cero a carga máxima o viceversa, motivando la sobrepresión o depresión respectivamente. Reciben también los nombres de golpe de ariete positivo o golpe de ariete negativo.

Al cerrar de improviso una válvula, la energía cinética de la columna de agua se gasta (de no haber dispositivos de alivio), en comprimir el agua y en dilatar las paredes del tubo o tubería. La energía cinética se transforma entonces en energía vibratoria ondulatoria y en calor equivalentes, a la fuerza viva que a desparecido, originando un golpe de ariete positivo en la tubería, que dará lugar a una serie de sobrepresiones decrecientes, desde el distribuidor al origen en la embocadura de la conducción. Es-

ta distribución de sobrepresión, se asume para facilidad sea rectilinea, oscila en una posición simétrica, tal como se muestra en la figura N^o 1, luego debido a los rozamientos, torbellinos y cambios de dirección de los filetes líquidos, se va amortiguando en una serie de oscilaciones de sobrepresión y depresión.

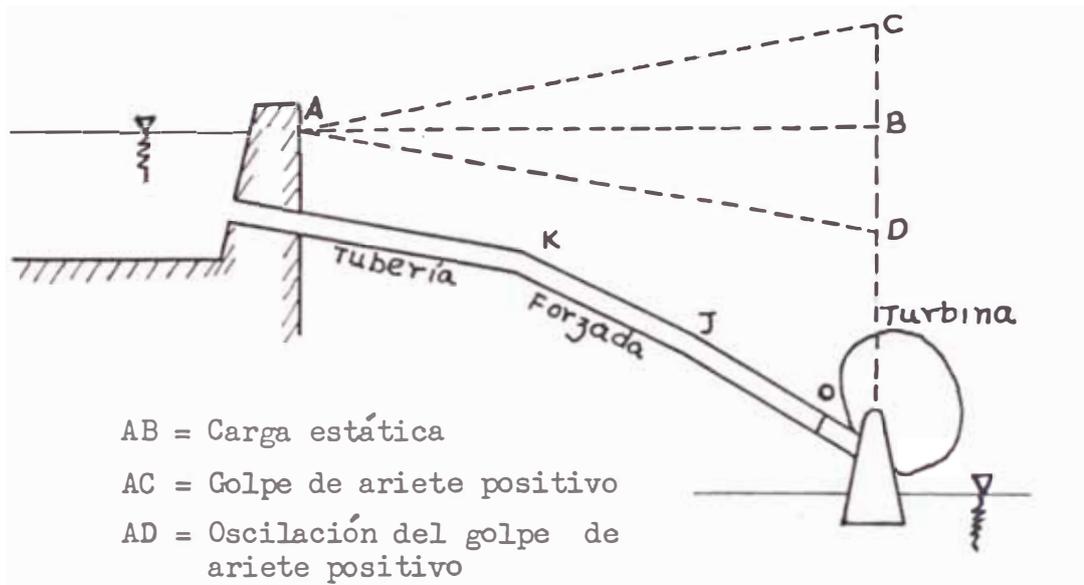


FIG. N^o 1 Golpe de ariete positivo

En el caso de la apertura del distribuidor, válvula, inyector etc, la tubería sufrirá un golpe de ariete negativo (ver figura N^o 2).

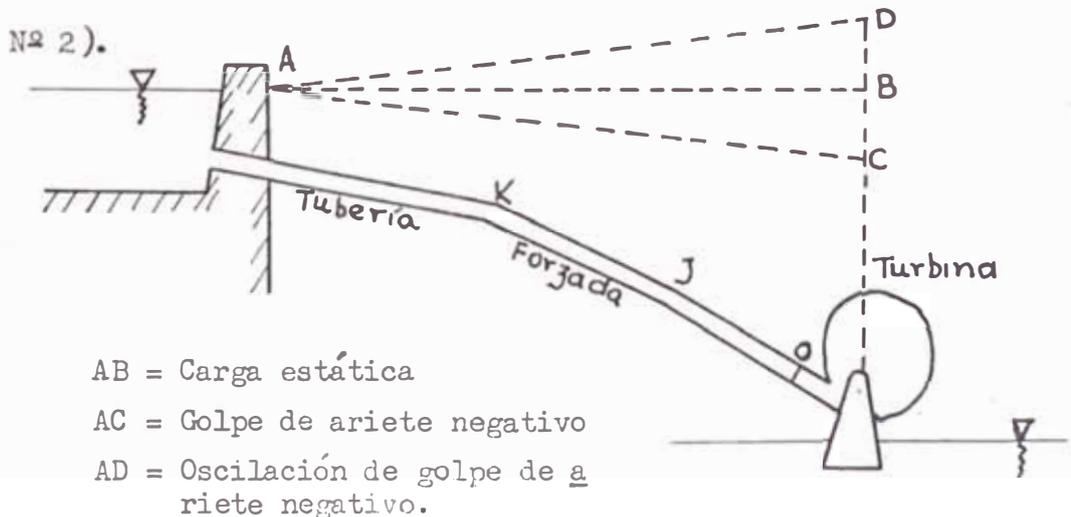


FIG. N^o 2 Golpe de ariete negativo.

En el trazo de la tubería , se a de tener en cuenta que las líneas de depresión , en ambos golpes de ariete queden por debajo de dicho trazo, pues sino se producirán vacíos parciales dentro de la tubería, que de no poder soportarlos daría como resultado el aplastamiento de la misma.

El golpe de ariete aceptado en las tuberías forzadas, se da como un porcentaje de la presión estática, cuyo rango está generalmente enmarcado entre 15 a 30%, pudiendo ser mayor, pero siempre menor al 50%. Sin embargo de acuerdo a la experiencia se tiene por norma el de evitar variaciones de presión que excedan el 40% de elevación y el 25% de descenso o caída.

Desde el punto de vista técnico, se a de tener en cuenta que para cada tubería debe de hacerse su propio estudio, pues no hay dos tuberías iguales y menos en su comportamiento.

3.4.1 Parámetros del estudio

Para el golpe de ariete producido dentro de la tubería se a de tener en cuenta:

- * Está en razón directa con la longitud de tubería.
- * Está en razón inversa al tiempo de cierre o abertura.

De lo anterior podemos deducir que el golpe de ariete , será más crítico en cuanto más larga sea la tubería o longitud en que viaja la onda de presión y menor sea el tiempo de maniobra de inyectores, válvulas, álabes , etc.

Desde el punto de vista técnico, lo que realmente suce-

de en una central cuando bruscamente se queda sin carga , ya sea por mala maniobra, por corto circuito en la linea , etc, es que si se cerracen lentamente los álabes directrices o inyectores (según turbina), el grupo se embalaría, o riginando por supuesto una seria avería mecánica, lo que se evitaría con un cierre rápido que a su vez origina una elevada magnitud del golpe de ariete, teniendo una tubería de gran espesor y elevado costo.

Para solucionar dicho problema, se utiliza en las turbinas Francis el "orificio compensador" y en las turbinas Pelton la "pantalla deflectora" o "deflector", y en ambas la chimenea de equilibrio o respiradero.

Los dos primeros dispositivos tienen por finalidad, desviar el flujo del agua cuando así se lo requiera, pasando al canal de descarga sin pasar por el rodete en el primer caso y desviando el chorro en el segundo, evitando de ésta manera el embalamiento del grupo y permitiendo realizar el cierre de los dispositivos reguladores, en un tiempo mayor lo que se refleja en un golpe de ariete menor.

El tercer dispositivo tiene por finalidad, conectar la tubería a la atmósfera, para que en caso de una abertura demasiado brusca, que pueda comprometer vacios internos , ingrese aire dentro de la tubería para igualar las presiones interna y externa, evitándose el aplastamiento. También tiene por función el de reflejar la onda de presión del golpe de ariete, disminuyendo de esta manera la longitud

de viaje de la onda y consecuentemente la magnitud del golpe de ariete. Se evita de esta manera que la onda de presión viaje a través del túnel de derivación, pudiendo entonces ser construido para menor presión.

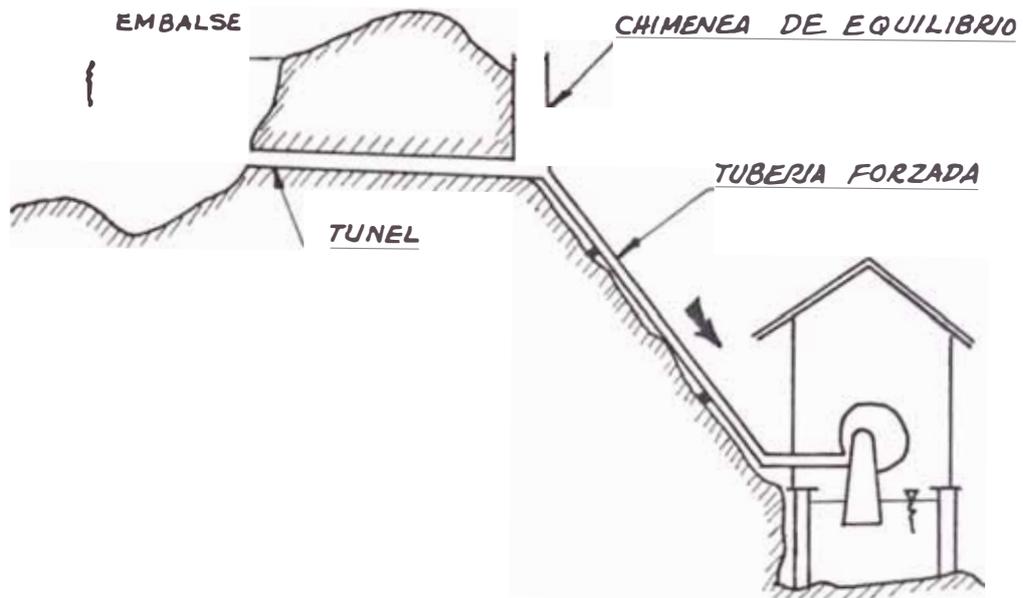


FIG. Nº 3 Posición de chimenea de equilibrio

Los parámetros del estudio se refieren principalmente a las características físicas de la tubería como son:

- * Diámetro de tubería a lo largo de ella.
- * Secciones a lo largo de la tubería.
- * Longitudes para cada diámetro.
- * Caudal que circula en cada punto de la tubería.
- * Celeridad de las ondas de presión (a). (Velocidad de ondas de presión dentro de la tubería).
- * Espesor de chapa.
- * Tiempo de apertura y cierre de los órganos de cierre.

Para el caso de nuestra aplicación práctica, se debe te

ner en cuenta que existía una cámara de carga, ejecutada con ocasión de la primera etapa y que se tenía previsto colocar un respiradero de conexión a la atmósfera, después de la válvula mariposa, tal como se muestra en la figura Nº 4.

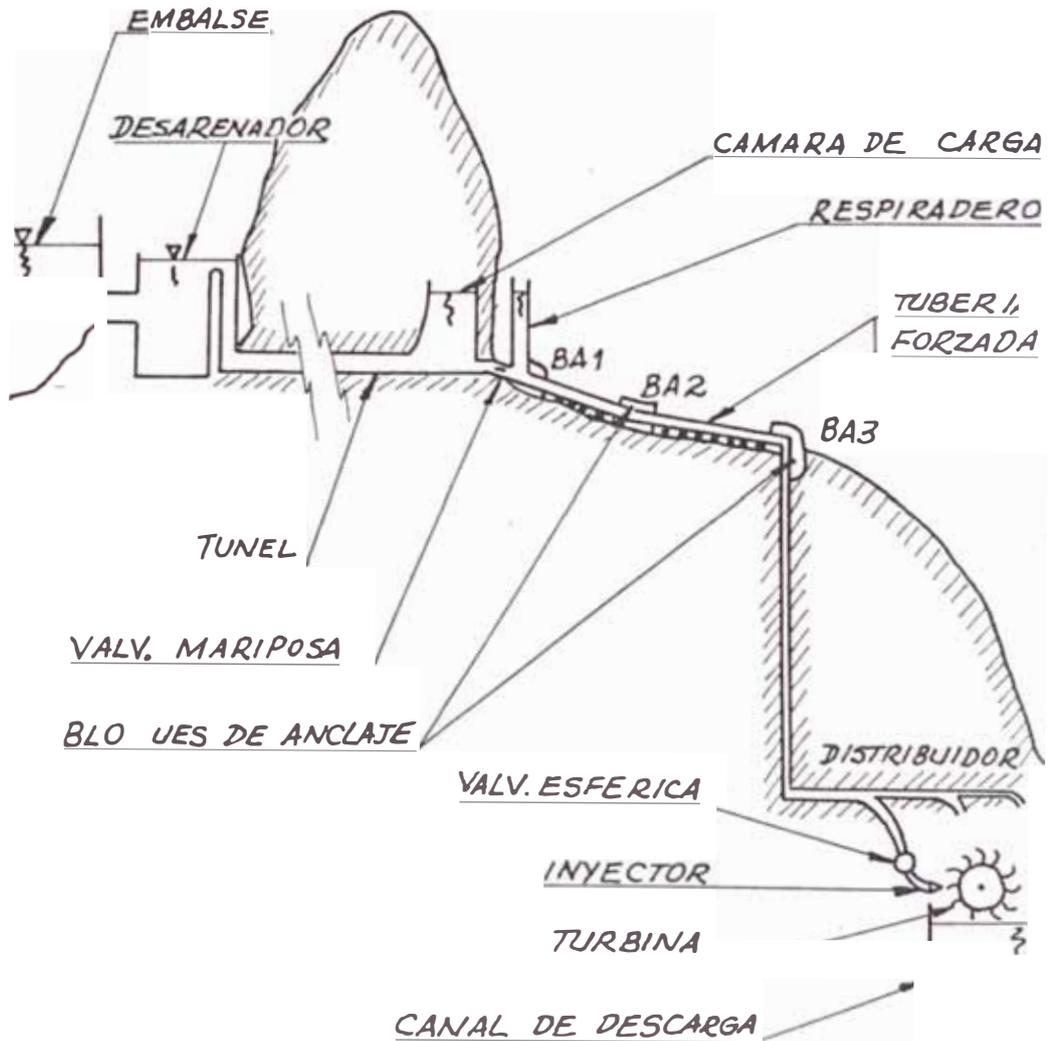


FIG. Nº 4 Disposición de las principales partes de la tubería forzada de la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu.

Como se puede apreciar en la figura Nº 4, el tipo de turbina utilizada es la Pelton, teniendo en consecuencia como dispositivos de cierre y abertura; la válvula maripo-

sa, la válvula esférica, los inyectores y deflectores. Los datos físicos se pueden resumir en el cuadro N° 4.

CUADRO N° 4

PARAMETROS DE CALCULO DE TUBERIA FORZADA DE MACHUPICCHU

TRAMO	DIAMETRO (D) m	SECCION (S) m ²	LONGITUD (L) m	CAUDAL Q *
Abocinamiento	4,50	15,904	20,0	Q
Tubería Ø 2920	2,92	6,696	90,5	Q
Tubería Ø 2680	2,68	5,641	135,8	
Tubería Ø 2340	2,34	4,300	190,9	Q
Tubería Ø 2160	2,16	3,664	93,25	Q
Ramificación Ø 1760	1,76	2,433	11,25	Q/2
Injerto Ø 1200	1,2	1,131	9,00	Q/3
Colector Ø 1070	1,07	0,899	5,60	4Q/15
Colector Ø 930	0,93	0,679	5,60	3Q/15
Inyector Ø 550	0,55	0,238	4,80	Q/15

* Q = Caudal total

Fuente: Documentos contractuales GHM- ELECTROPERU

La celeridad se calcula mediante fórmulas, donde interviene la velocidad del sonido y los parámetros físicos anteriores, lo que se verá en el punto 3.4.3 .

3.4.2 Datos mecánicos e hidráulicos

Los cálculos a realizar requieren los siguientes datos mecánicos e hidráulicos.

* Nivel aguas arriba en la tubería forzada.

* Nivel aguas abajo.

* Salto bruto.

* Salto neto.

* Número de turbinas.

* Longitud total de la tubería.

* Módulo de elasticidad del volumen de agua. (ϵ)

* Módulo de elasticidad del material de la tubería (E)

Los líquidos para efectos de estudiar el golpe de ariete, no pueden ser aceptados como incompresibles; ya en el año 1761 CANTOR, consiguió demostrar la compresibilidad de los líquidos, mediante un aparato conformado por un gran bulbo esférico y tubo capilar, obteniendo el coeficiente de compresibilidad del agua de $0,000046 \text{ cm}^2/\text{Kg}$, valor muy cercano al aceptado en nuestros días.

Debido a la idea de incompresibilidad de los líquidos, se dudaba que hubiera propagación de sonido en el agua, pero en 1762 J.E. COLLADON y STURN, hallaron la velocidad de 1437 m/s para el sonido en el lago Ginebra a 8° C . WERTHELM en 1848, KUNDT, LEHMANN y DUORAK más tarde, hallaron una velocidad del sonido bastante menor que la de COLLADON para tubos llenos de agua. Muy pronto en el mismo año, dio la explicación al fenómeno como la elasticidad del tubo y los efectos de resistencia al movimiento.

El cuadro N^o 5 muestra los valores de elasticidad de materiales para tuberías forzadas, teniendo en cuenta que el usado para el agua es de $2 \times 10^8 \text{ Kg/m}^2$.

El cuadro N^o 6 muestra la relación en término medio, de ϵ/E según el tipo de material que se use.

CUADRO Nº 5

MODULO DE ELASTICIDAD DE MATERIALES PARA TUBERIA FORZADA

MATERIAL	$E \times 10^6 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
Acero fundido	2,00
Acero laminado en frío	2,07
Acero inoxidable 18-8	1,94
Todos otros aceros	2,01-2,11
Fundición de hierro	0,949-1,47
Hierro maleable	1,66
Cobre	1,09
Latón 70-30	1,11
Latón fundido	1,02

Fuente: Tomado de pruebas de R.W. VOSE- Manual del Ingeniero Mecánico de MARKS- TOMO I pag. 428

CUADRO Nº 6

RELACION ϵ/E SEGUN EL MATERIAL

MATERIAL	ϵ/E
Acero fundido	0,01
Acero laminado en frío	0,0097
Acero inoxidable	0,0103
Otros aceros	0,0095-0,0094
Fundición de hierro	0,021-0,014
Hierro maleable	0,012
Cobre	0,0183
Latón	0,0180
Latón fundido	0,0196
Hormigón armado	0,10-0,15

Fuente: Elaboración propia

Los datos mecánicos e hidráulicos para el caso de la tubería de Machupicchu son:

- * Nivel aguas arriba..... 2059,2 m.s.n.m
- * Nivel aguas abajo..... 1707,8 m.s.n.m
- * Salto bruto..... 351,4 m
- * Salto neto: Para $23,22\text{m}^3/\text{s}$ 345,0 m 3 grup. }
- Para $15,59$ " 349,98m 2 grup. }
- Para $7,807$ " 351,05m(1 grup.)

- * Número de turbinas:..... 3 turbinas Pelton con 5 inyectores.
- * Longitud total de tubería..... 566,7 m
- * Material..... Acero laminado.

3.4.3 Métodos de cálculo

Desde hace más de un siglo, hubo ya estudiosos que se interesaron por el golpe de ariete, haciendo estudios experi-mentales, entre los que tenemos:

* En E.E.U.U

- J. W. NYSTROM (1884)
- E. B. WESTON (1885)
- R. C. CARPENTER (1894)

* En EUROPA

- GROMEKA (1883)
- STODOLA (1883-1884)
- BOUSSINEQ (1905)
- SPARRE (1903-1921)
- A.H. GIBSON (1908)
- NEESE (1910)

En forma analítica fue estudiado por muchos hidráulicos, destacando entre los iniciadores JOUKOWSKY y ALLIEVI, posteriormente otros presentaron ampliaciones, destacando SPARRE y JAEGER.

Los esfuerzos por resolver analíticamente las ondas de presión en conductos, teniendo en cuenta las condiciones cada vez más complejas, tanto en lo referente al sistema como

al modelo empleado para representar el líquido, dieron trabajos como el de SKALAK, quién amplió la teoría de JOUKOWSKY, hallando una segunda onda, que si bién poco afecta a los valores medios de sobrepresión y velocidad con que se propagan, tiene efectos secundarios no despreciables. Otro es el trabajo de WALKER-KIRKPATRICK-ROULEAU, sobre dispersión viscosa durante el golpe de ariete.

Después de los trabajos analíticos, se sucedieron dos hechos importantes en el desarrollo de métodos de cálculo. Tomaremos las palabras de PIERRE DANIEL, que indican el espíritu existente para avanzar en el conocimiento del golpe de ariete.

"El autor es de la opinión que en nuestro presente (1933) el conocimiento del golpe de ariete, incluyendo sus teorías y ecuaciones, debe considerarse básicamente correcto, sin embargo para ser exactas dichas teorías, debe avanzar se un poco más. Como es el caso de un simple tubo en una planta hidroeléctrica, debe siempre tenerse en cuenta el importante hecho, que el máximo golpe de ariete no resulta siempre al parar las máquinas, a partir de la plena carga."

".... es siempre necesario asegurarse, de cual maniobra de cierre va a producir el máximo golpe de ariete."

"En esta discusión puedo aparecer como partiendo pelos en cuatro, pero lo cierto es que errores tan grandes como 90 al 100% pueden ocurrir si no se tiene cuidado, al calcular el golpe de ariete y si las fórmulas existentes se usan sin cuidadoso estudio."

Los dos hechos mencionados fueron:

* El desarrollo gráfico del estudio del golpe de ariete, realizado por BERGERON, SCHNYDER, ANGUS, K. J. DE JUHAZ.

* La utilización de computadoras, dada por MACAGNO.

Podemos concluir que los métodos de cálculo se agrupan:

a) Métodos de cálculo analíticos

En estos estudiaremos los más importantes.

- Teoría de JOUKOWSKY

Dada por NICOLAS EGOROVICH JOUKOWSKY (1847-1921) profesor de mecánica de la escuela politécnica y universidad de Moscú. Basó su investigación técnica en experimentos realizados en instalaciones especiales, que montó en una planta de bombeo de Moscú. Consideraba que antes de él no se había relacionado el golpe de ariete con las ondas elásticas, porque las observaciones se habían hecho en tuberías muy cortas, lo que es entendible ya que en tuberías cortas, pareciera que el golpe de ariete ocurriera al mismo tiempo. Los resultados a sus estudios los resumio en cinco puntos:

- * El golpe de ariete se propaga a lo largo del conducto con velocidad independiente a la forma en que se a generado, dependiendo del material del tubo y de su relación espesor- diámetro.
- * La sobrepresión es proporcional a la variación de velocidad del líquido y a la velocidad de propagación de la onda elástica.
- * La periodicidad que adquiere el fenómeno, se debe a la reflexión de la onda en el otro extremo.

mo del conducto.

* Al entrar la onda en un tramo de menor diámetro, la sobrepresión se incrementa, y en el caso de cierre total de la tubería se duplica.

* El medio más simple de ponerse a cubierto del golpe de ariete, es el de reducir lentamente a cero el caudal.

Las fórmulas encontradas por él se pueden resumir.

$$(I) \Delta P = \rho c V \quad (\text{Para cierre instantáneo total de la válvula}).$$

$$(II) \Delta P = \rho c (V - V') \quad (\text{Para cierre instantáneo parcial}).$$

$$(III) c = (E_o / \rho)^{1/2} / (1 + (E_o D / E \delta)^{1/2})$$

Donde:

ΔP = Sobrepresión

ρ = Densidad

c = Celeridad de la onda o velocidad de propagación de la misma.

V = Velocidad del fluido

V' = Velocidad final del fluido

E_o = Módulo de elasticidad del volumen del fluido (Kg/m^2).

D = Diámetro de tubería (m).

δ = Espesor de tubería (m).

E = Módulo del material de tubería

Para el agua: $c_o = E_o / \rho = 1425 \text{ m/s}$

- Teoría de ALLIEVI

Se debe al Ing. LORENZO ALLIEVI (1846-1941), nacido en Italia, quién publicó su contribución teórica y varias más de aplicación a su método de cálculo.

La teoría de ALLIEVI, se puede resumir como la más elegante y fecunda, la más conocida y usada. Esta utiliza una serie de fórmulas con las que se halla el tiempo de cierre o abertura necesario, para una sobrepresión dada (como % de la presión estática), o encontrar la sobrepresión que se produce, teniendo un tiempo de cierre o abertura dado; para lo cual se usan los ábacos que ALLIEVI estableció durante sus experiencias y que se muestran en el apéndice E. El método usa las siguientes fórmulas:

$$(IV) \quad a = c / (1 + (\mathcal{E}/E)(D/e))$$

$$(V) \quad a_m = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) / (L_1/a_1 + L_2/a_2 + \dots + L_n/a_n)$$

$$(VI) \quad \mu = 2L/a$$

$$(VII) \quad g^2_{\text{máx}} = P_t/P_e$$

$$(VIII) \quad \rho = (a V_p) / (2gH)$$

$$(IX) \quad T_r = (2 L \theta) / a$$

Donde:

a = Celeridad (m/s)

c = Velocidad del sonido en el agua (m/s)

\mathcal{E} = Módulo de elasticidad del agua. (Kg/m²)

E = Módulo de elasticidad de material tubería. (Kg/m²)

D = Diámetro de tubería. (m)

e = Espesor de tubería. (m)

μ = Tiempo crítico. (1)

L = Longitud de tubería.

P_t = Presión total con golpe de ariete. (2)

(1) Tiempo o intervalo necesario para que la onda de presión recorra un ciclo completo.

(2) Se toman como premisas según el caso, para el cálculo.

- ξ^2 P_e = Presión estática.
 ξ^2 máx = Relación P_t/P_e . (2)
V = Velocidad promedio del agua.
g = Gravedad.
H = Presión estática en m de agua.
 θ = Factor del diagrama de allievi
 T_r = Tiempo de cierre o abertura. (2)

La fórmula (V) se utilizará cuando haya variación de material, espesor, diámetro a lo largo de la tubería.

- Fórmula de SPARRE para cierre de válvulas

Para el incremento de presión, después del cierre, siendo exactas para sobrepresiones menores al 50% de la presión inicial, que en general comprende la mayoría de los casos prácticos.

- (X) $h = a V/g$ Para $K < 1$ y $N < 1$
 $h = a V/g(N+K(N-1))$ Para $K < 1$ y $N > 1$
 $h = a V/g(2N-K)$ Para $K > 1$ y $N > 1$

$$K = aV/(2gH)$$

$$N = aT/(2L)$$

Previamente se calcula:

$$a = 1420/(1 + (D/100t))^{1/2}$$

Donde:

- D = Diámetro de tubería en cm.
t = Espesor de tubería en cm.
a = Celeridad (m/s)
V = Velocidad del agua (m/s)
L = Longitud de tubería (m)

H = Carga estática antes del cierre (m de agua.)

T = Tiempo de cierre. (3)

g = Gravedad (m/s^2)

- Fórmula de S. LOGAN KERR, para abertura completa.

El cálculo de la caída de presión en m de agua es igual:

$$(XI) \quad h = (aV/g)((-K+(K^2 + N^2)^{1/2})/(N^2))$$

Para: $T \geq 2L/a$

b) Método gráfico (4)

Como consecuencia del deseo de conocer mejor el comportamiento del golpe de ariete, muchos personajes se dedicaron a estudiar un método gráfico, entre los que destacó el creado por BERGERON, que utilizaremos en el presente trabajo. Previo a la descripción del tratamiento de un problema real, veremos los principios de construcción del método.

Este consiste en vincular las curvas del plano Velocidad-Presión con el plano Espacio-Tiempo (ver figura N° 5).

- (3) Para cierre total en plena carga, puede tomarse $T=85\%$ del tiempo total de recorrido o carrera de los álabes, para dejar un margen para movimiento no uniforme de éstos.
- (4) Para más información consultar: "Ondas de presión en conductos" y "Aplicaciones del método de Bergeron" -E. IZO O MACAGNO.

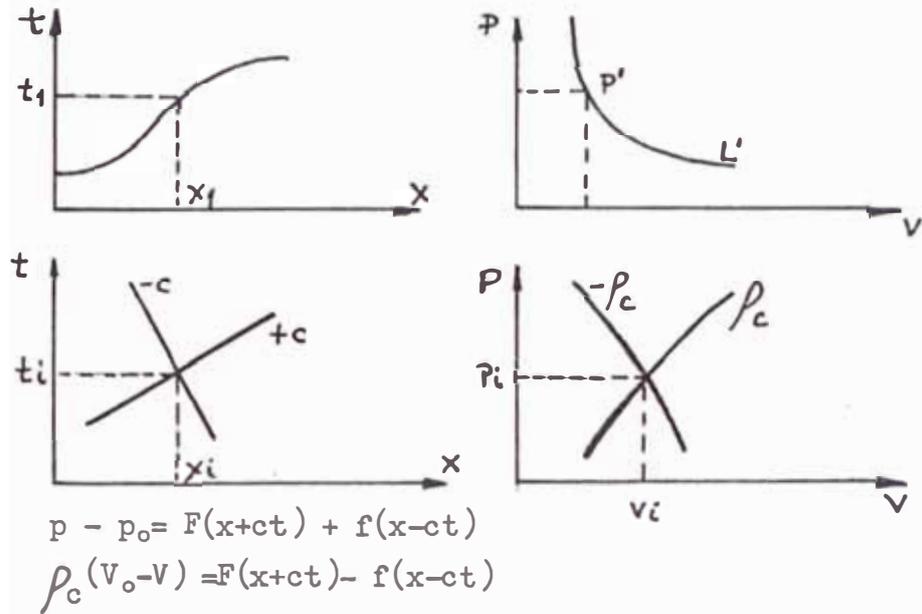


FIG. N^o 5 Curvas Velocidad-Presión y Espacio-Tiempo

Supongamos ahora que son conocidas en dos secciones A y B de un conducto, las presiones p_1 y p_2 y las velocidades medias V_1 y V_2 , para los instantes t_1 y t_2 respectivamente (ver figura N^o 6). Las abscisas de A y B sean x_1 y x_2 , conocemos pues los puntos p_1 y p_2 en el plano x, t y sus correspondientes p'_1 y p'_2 en el plano v, p .

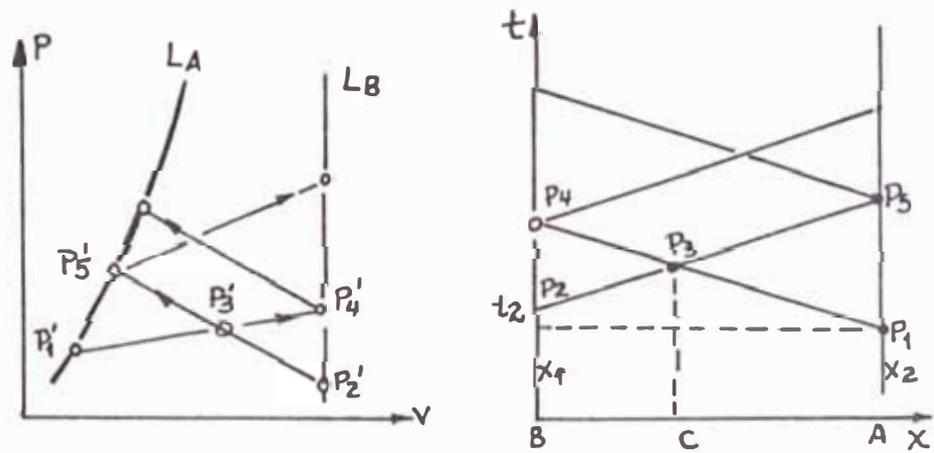


FIG. N^o 6 Curvas Velocidad-Presión y Espacio-Tiempo

Con este conocimiento mínimo podemos determinar la presión y velocidad en una cierta sección intermedia en

tre A-B. Para ello trazamos por p_1 una recta de inclinación c y por p_2 otra de inclinación $-c$, lo cual determina p_3 con absisa x_3 , t_3 llamada sección C. Se puede hallar entonces V y p en C para el instante t_3 . Para esto basta trazar en el plano V, p las imágenes de la línea p_1p_3 y p_2p_3 cuya intersección determina p'_3 , dándonos V y p mediante sus coordenadas. Para determinar más valores de V y p necesitamos más información sobre lo que ocurre en las secciones A y B, información que puede consistir por ejemplo en que la V en B es constante mientras V_a depende de la presión. La condición en B, queda gráficamente expresada como recta paralela a p y la condición en A puede estar definida por cualquier curva como L_A .

Trazando en x, t las rectas p_3p_4 y p_3p_5 con pendiente igual a c y $-c$, trazamos sus imágenes en plano V, p obteniendo p'_4 y p'_5 .

Refiriéndonos a un caso real, tal como se muestra en la figura N^o 7, que presenta las partes conformantes de una central hidroeléctrica, para el caso del golpe de ariete tendremos.

Según el dibujo se ve que aparece un tercer tubo I-A pero que es tan corto comparado con los otros dos J-C y D-K, que se lo debe tratar como si fuera un depósito de nivel variable.

Para resolver el problema se a de usar el concepto

de bifurcación, más las dos ecuaciones siguientes:

$$(XII) \quad P_I = P_J = P_K$$

$$(XIII) \quad Q_K = Q_I + Q_J$$

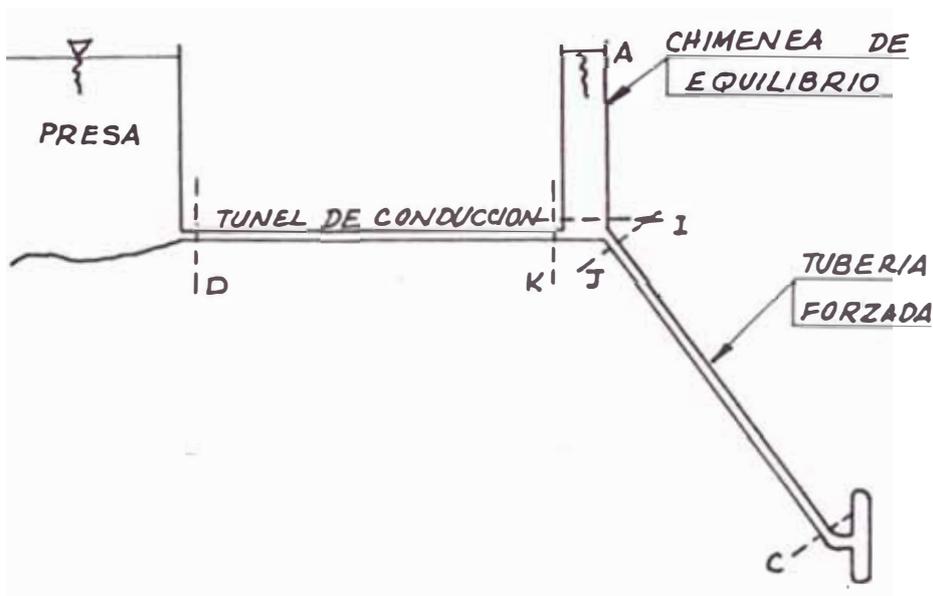


FIG. N^o 7 Partes de central hidroeléctrica para estudio del golpe de ariete.

Q_I provoca movimiento ascendente y descendente en la chimenea, supondremos que la presión en la bifurcación está ligada simplemente a la profundidad a la que se halla de la superficie libre en la chimenea. Despreciando la elasticidad del agua en la chimenea de equilibrio y aplicando a ella las reglas de fluidos incompresibles, nos referiremos a la carga h en lugar de la presión, ($p = \gamma h$) (variaciones de γ son muy pequeñas). En la base de la chimenea tendremos una carga variable h_I , la que representa la profundidad del agua con respecto a la superficie libre.

Sea $Q_I(t)$ el caudal de agua que entra a la chimenea en el instante t y $Q_I(t + \Delta t)$ el que entra en el instante $(t + \Delta t)$, suponiendo Δt suficientemente pequeño, como para tener una variación prácticamente lineal durante su transcurso, podremos escribir:

$$(XIV) A_S(h_I(t + \Delta t) - h_I(t)) = (Q_I(t + \Delta t) + Q_I(t))/2$$

Despejando:

$$(XV) h_I(t + \Delta t) = (\Delta t / 2A_S)Q(t + \Delta t) - Q(t) + h_I(t)$$

Esta es la ecuación de una recta en el plano $Q-h$ (ver figura N^o 8), cuya pendiente es $(\Delta t / 2A_S)$. Se puede trazar la recta con pendiente negativa hasta cortar h , con lo que se obtiene también tal recta, teniendo que la h sea semejante a la característica de onda que fuera desde la sección I a A y volviera en tiempo t .

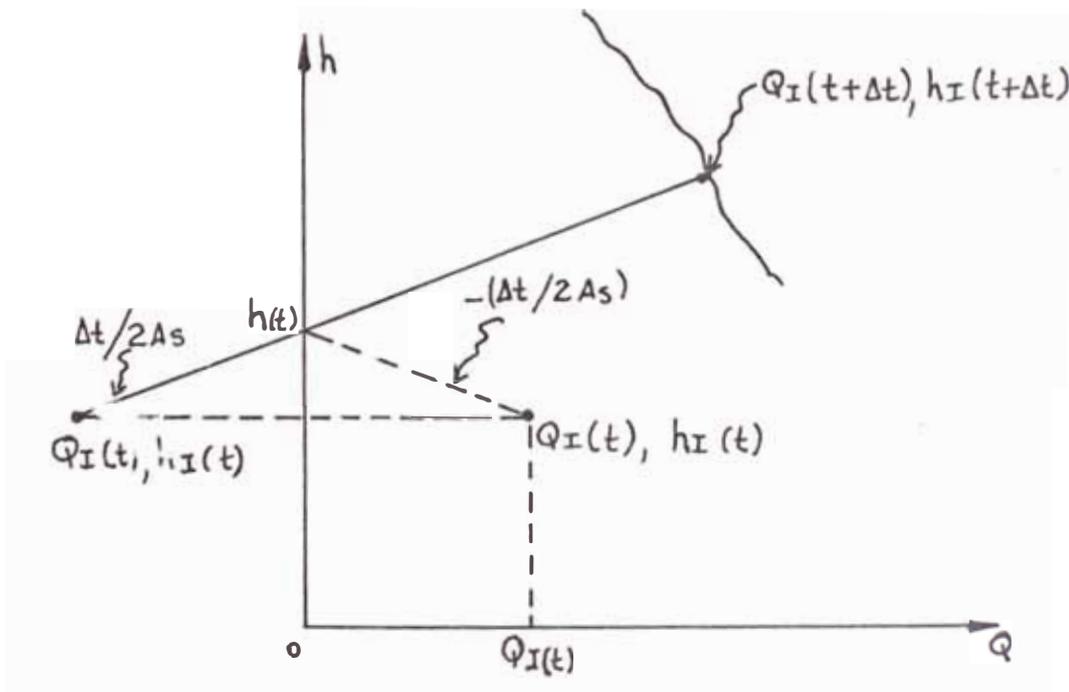


FIG. N^o 8 Comienzo de construcción gráfica

Conocida una condición para $h_1(t + \Delta t)$, basta hallar la que imponen las características de onda que vienen de otros puntos del sistema y arriban a la bifurcación en el instante $(t + \Delta t)$, la intersección determina el punto deseado es decir el par Q, h . En la figura N° 8 se da el comienzo de la construcción gráfica que permite determinar las oscilaciones de carga y caudal, originadas por el cierre gradual del mecanismo de ingreso a la turbina, representado por un orificio que se cierra, mediante una familia de líneas acotadas con la variable (t) .

En el cálculo se a supuesto que las longitudes y otras características de los tramos D-K y J-C son las mismas para los dos tramos, tomándose como unidad de tiempo el que emplea en recorrer un tramo. La figura N° 9 representa la construcción gráfica, la misma que comienza con J_0 , desde donde se parte para determinar C_1 volviendo a la chimenea para determinar J_2 . El observador de la chimenea sale de I_0 , va a A_1 y vuelve empleando en el viaje el tiempo $2L/c$ " a propósito", pues en realidad no tiene celeridad determinada.

Otro observador partió de K en el instante cero, fue hasta D($t=1$) y volvió a K para ($t=2$). Se marcan entre paréntesis los puntos I_2, K_2, J_2 , antes de determinarlos sobre las rectas en las cuales sabemos deben caer.

Las rectas inclinadas de trazos en el plano H,Q para D-K, resultan como antes de sumar $Q_1 + Q_j$ a fin de veri-

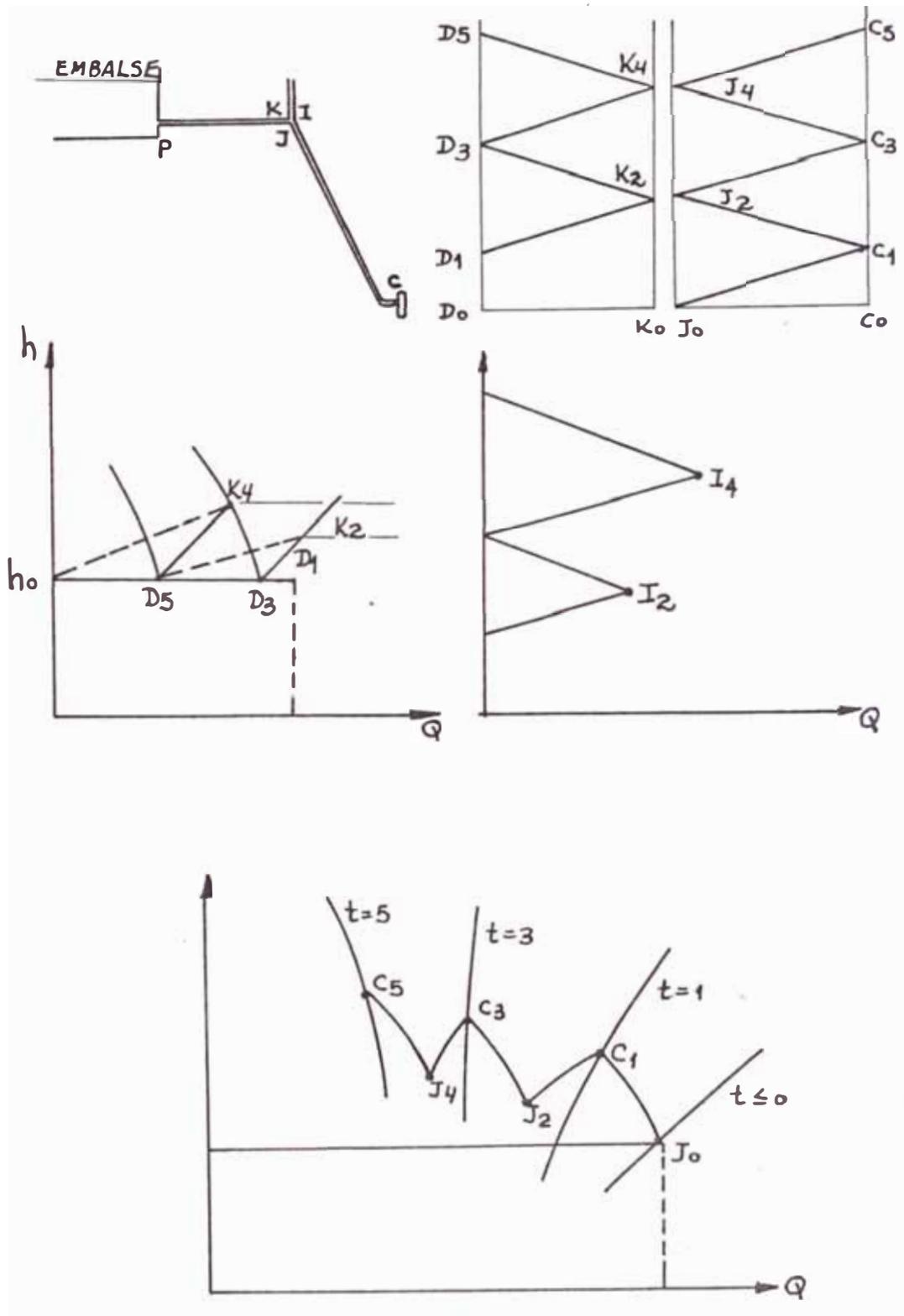


FIG. Nº 9 Curvas del método gráfico del golpe de ariete

ficar la ecuación XIII, sus pendientes son iguales a la suma de las pendientes $(c/gA) + (\Delta t/2A_S)$.

Como $g = \gamma$ y $\Delta t = 2L/c$ se tiene: $(c/gA) + (L/cA_S)$, teniendo a continuación como lo indicado en la parte introductoria. En la figura N^o9 se a exagerado la pendiente (L/cA_S) , para ilustrar más claramente el procedimiento.

Cabe hacer notar que una aproximación clásica del problema de la chimenea de equilibrio, consiste en considerar el agua incompresible en tramos D-K e I-A, limitando el estudio del golpe de ariete al tramo J-C; en el presente se a extendido el viaje de las ondas a través del tramo D-K, en la práctica las ondas de presión no viajan en este tramo, que corresponde al túnel de derivación.

El procedimiento podría uniformizarse y considerar el agua compresible en todas las partes, lo cual puede dar gran trabajo si se aplica el método gráfico, siendo más factible realizarlo con computadoras.

c) Método computacional (5)

El método analítico unidimensional de MACAGNO, consiste en escribir el sistema de ecuaciones algebraicas que representan las construcciones gráficas, del método de BERGERON y en resolver tales ecuaciones mediante computadora. A la gran flexibilidad del método de BER-

GERON se agregan así una extrema rapidez y precisión.

A fin de explicar la conversión del método geométrico en algebraico, tomaremos un caso simple, como el de apertura paulativa de una válvula. El sistema es el de depósito (cámara de carga), tubería o conducto (tubería forzada), y órgano regulador de caudal (inyector, álabes), suponiendo que en la sección A del órgano regulador se impone una ley para el caudal dada por:

$$(XVI) \quad Q_A = F(t)(P_A)^{1/2}$$

Donde:

$F(t)$ depende del tiempo t y representa el efecto de una apertura variable de la válvula.

La ecuación XVI representa la familia de parábolas, que dan las condiciones en el límite A, para todo tiempo t mayor a cero. Para $t \leq 0$ la válvula se halla cerrada y $Q_A = 0$. La condición en el límite B del conducto se considerará representada simplemente por $P=P_0$. Para simplificar supondremos despreciable la pérdida de energía de la corriente.

La figura N° 10 muestra algunos pasos de la solución gráfica del problema. Se puede ver que se cumplen las ecuaciones algebraicas siguientes:

$$(XVII) \quad P_{A3} - P_{R2} = -f_c (Q_{A3} - Q_{R2})$$

- (5) Para más información consultar: " Ondas de Presión en Conductos" de ENZO O. MACAGNO- Cap. V

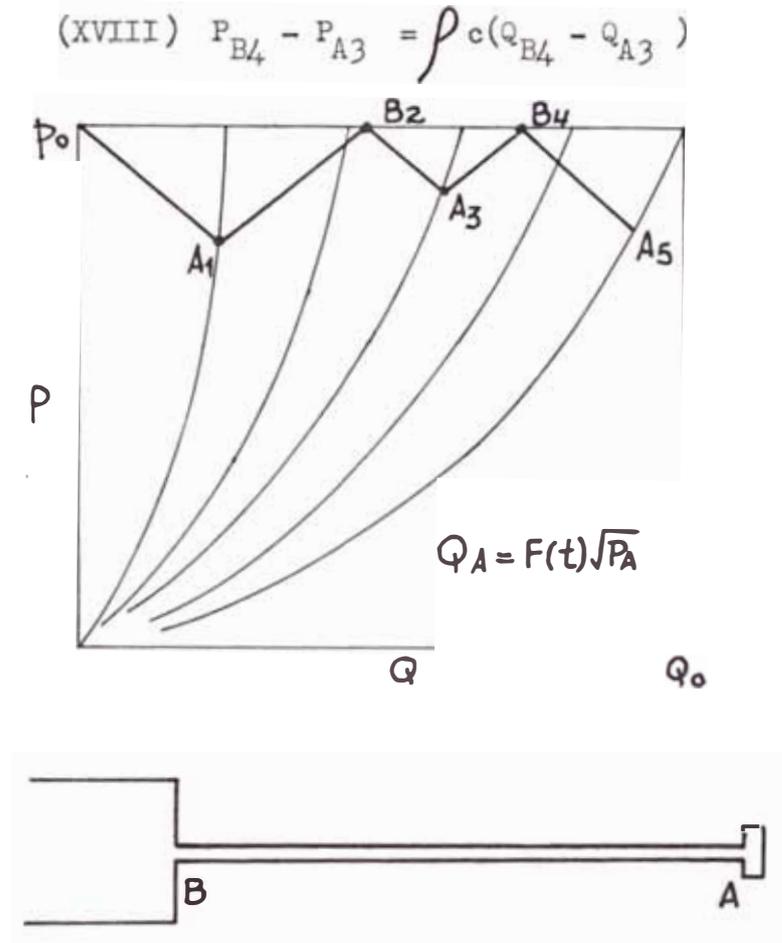


FIG. N° 10 Solución gráfica del sistema depósito-tubería y órgano de regulación

Habiendo puesto en ecuaciones las líneas del diagrama de BERGERON, las operaciones gráficas pueden ahora realizarse numéricamente, resolviendo el sistema de dos ecuaciones en una sucesión adecuada. Naturalmente conviene dar a las ecuaciones XVII y XVIII una forma mas general introduciendo la variable t y el tiempo $\tau = L/c$ empleado por la onda para ir de un extremo a otro del conducto, teniendo:

$$(XIX) \quad P_A(t + \tau) + P_B(t) = -c(Q_A(t + \tau) - Q_B(t))$$

$$(XX) \quad P_B(t + 2\tau) - P_A(t + \tau) = c(Q_B(t + 2\tau) - Q_A(t + \tau))$$

Luego de ésto se a de escribir el diagrama de flujo del programa, para posteriormente pasar al lenguaje de la computadora que se utilice.

A continuación se tendrá los cálculos por los tres métodos, para el caso de nuestra aplicación práctica. En los métodos analíticos, usaremos el más conocido que es el de ALLIEVI y para comparar utilizaremos las fórmulas de SPARRRE y S. LOGAN KERR. El método gráfico será el de BERGERON y el computacional el de MACAGNO.

Los cálculos se harán para los casos más críticos es decir para las tres turbinas a la vez, tanto para un golpe de ariete positivo en una descarga total, como para un golpe de ariete negativo en un arranque simultaneo y en ambos casos a nivel de inyectores y también de válvulas esféricas para verificar la diferencia.

Se tomarán los siguientes tiempos de accionamiento, de uso común y que son encontrados en el mercado internacional:

- * Para descarga: -Inyectores = 20 segundos.
 -Válv. esfér. = 60 segundos.
- * Para arranque: -Inyectores = 10 segundos.
 -Válv. esfér. = 60 segundos.

a) Método analítico

- Para descarga total- nivel inyectores

* Por ALLIEVI

Aplicando la fórmula (IV) se hallan los valores de la celeridad en los diversos tramos y luego con la fórmula (V) se encuentra la celeridad promedio.

$$\begin{array}{ll} a_0 = 380,80 \text{ m/s} & a_1 = 512,59 \text{ m/s} \\ a_2 = 580,96 \text{ m/s} & a_3 = 628,04 \text{ m/s} \\ a_4 = 743,08 \text{ m/s} & a_5 = 815,03 \text{ m/s} \\ a_6 = 1003,03 \text{ m/s} & a_7 = 1064,17 \text{ m/s} \\ a_8 = 1100,24 \text{ m/s} & a_9 = 1222,28 \text{ m/s} \end{array}$$

$$a_m = 609,79 \text{ m/s}$$

Hallamos luego las velocidades en los diversos tramos ($V = Q/A$), y luego la velocidad promedio:

$$\begin{array}{ll} V_0 = 1,397 \text{ m/s} & V_1 = 3,467 \text{ m/s} \\ V_2 = 4,116 \text{ m/s} & V_3 = 5,399 \text{ m/s} \\ V_4 = 6,336 \text{ m/s} & V_5 = 4,772 \text{ m/s} \\ V_6 = 6,843 \text{ m/s} & V_7 = 6,886 \text{ m/s} \\ V_8 = 6,836 \text{ m/s} & V_9 = 6,516 \text{ m/s} \end{array}$$

$$V_m = 4,844 \text{ m/s}$$

Con la fórmula (VI) hallamos el tiempo crítico:

$$\mu = 1,858 \text{ segundos.}$$

Utilizando las fórmulas (VIII y IX) se encuentra los valores de (θ) y (β) y luego entrando en el diagrama de ALLIEVI tenemos (β^2):

$$\theta = 10,76 \qquad \qquad \qquad = 0,437$$

$$\beta^2 = 1,06$$

Como $z^2 = (h + H)/H$ y $H = 345$ m para 3 turbin.
tenemos que:

$h = 20,7$ m de columna de agua, lo que
equivale al 6% de sobrepresión.

* Por fórmula de SPARRE

Utilizando $a = (1420) / ((1 + (d/100t))^{1/2})$ para:

$d =$ diámetro promedio = 248,9 cm

$t =$ espesor promedio = 1,91 cm

Tenemos: $a = 935,68$ m/s

Mediante la fórmula (X) para:

$H = 345$ m $g = 9,8$ m/s² $V_m = 4,84$ m/s

$L = 566,7$ m $T = 85\%$ de 20 segundos.

Tenemos:

$h = 20,309$ m de columna de agua lo
que equivale a una sobrepresión de 5,88% $(h/H) \times 100$.

- Para descarga total al nivel de válvulas esféricas

* Por ALLIEVI

Utilizamos los valores de celeridad y velocidad
para los cinco primeros tramos ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ y
 $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$), hallamos los valores promedios
correspondientes:

$a_m = 597,85$ m/s $V_m = 4,755$ m/s

Con (VI) hallamos el tiempo crítico $\mu = 1,812$

Utilizando VIII y IX se hallan los valores de θ y ρ tomando como tiempo de cierre 60 seg., luego se ingresa al ábaco de ALLIEVI y se obtiene ξ^2 .

$$\theta = 33,1$$

$$\rho = 0,420$$

$$\xi^2 = 1,03$$

Igualando ξ^2 a $(h + H)/H$, con $H = 345\text{m}$ obtenemos $h = 10,35\text{ m}$ de columna de agua, equivalente al 3% de sobrepresión.

* Por fórmula de SPARRE

Hallamos la celeridad, utilizando los valores de $d = 253,6\text{ cm}$ y $t = 1,87\text{ cm}$ (valores promedio):

$$a = 925,24\text{ m/s}$$

Luego mediante la fórmula X encontramos:

$h = 6,30\text{ m}$ de columna de agua, equivalente al 1,83% de sobrepresión.

- Para arranque simultaneo, nivel inyectoras

* Por ALLIEVI

Utilizando los valores $a = 609,79\text{ m/s}$, $\mu = 1,858$ y tomando el tiempo de abertura 10 segundos, con las fórmulas VIII; IX, encontramos:

$$\theta = 5,38$$

$$\rho = 0,436$$

Del ábaco de ALLIEVI:

$$\xi^2 = 0,83$$

Esto nos da un $h = - 58,65$ m de columna de agua que equivale a una depresión del 17%.

* Por fórmula de S. LOGAN KERR

Utilizando la fórmula XI y según los valores hallados para el caso de descarga total se obtiene:

$h = 31,39$ m de columna de agua, equivalente a una depresión del 9,1 % .

- Para arranque simultaneo, nivel válvulas esféricas

* Por ALLIEVI

Utilizando los valores de celeridad y tiempo crítico ($a = 597,85$ m/s; $\mu = 1,812$), hallados para el caso de descarga total, más las ecuaciones VIII y IX, con un tiempo de abertura de 60 segundos, se hallan θ y ρ , teniendo en cuenta los valores:

$$L = 541,7 \text{ m} \quad H = 345 \text{ m} \quad g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$V = 4,75 \text{ m/s}$$

$$\theta = 33,1$$

$$\rho = 0,420$$

Estos valores tienen su correspondiente ξ^2 , del ábaco de ALLIEVI igual a 0,94, el mismo que representa:

$h = -20,7$ m de columna de agua, equivalente al 6 por ciento de depresión.

* Por fórmula de S. LOGAN KERR

Utilizando la fórmula XI y los valores correspondientes, ya usados para el caso de descarga total, encontramos:

$h = 10,143$ m de columna de agua, equivalente a una depresión del 2,94%.

b) Método gráfico

- Nivel inyectores para descarga total y arranque repentino

Primeramente determinamos el sistema, teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- 1) Como la cámara de carga junto con el respiradero están conectados a la atmósfera, el túnel de derivación no será motivo del estudio, pues la onda de presión se refleja en la cámara de carga.
- 2) El respiradero por ser tan corto en comparación de la tubería, además de tener mucho menor diámetro se obviara del estudio.
- 3) Se considerará los diferentes tramos de tubería de acuerdo a su diámetro y espesor de chapa.
- 4) Se considerará la resistencia de la tubería para cada tramo como concentrada en el centro de la misma.
- 5) Consideraremos las bifurcaciones a cada turbina.

La figura N^o 11 muestra el sistema hidráulico correspondiente.

- Nivel válvulas esféricas para descarga total y arranque repentino

Por ser el sistema hidráulico igual al punto anterior, pero recortado en longitud que nos dará una menor sobrepresión, tal como se verifica en los cálculos del método analítico, no será motivo de este método.

Las figuras N^{os} 12 y 13 muestran los desarrollos del método gráfico correspondiente al nivel de inyectores, los mismos que dan los resultados siguientes:

* Descarga total :

$$\text{Sobrepresión} = (397 \text{ m de H}_2\text{O} - 351,4 \text{ m de H}_2\text{O})$$

$$\text{Sobrepresión} = 45,6 \text{ m de H}_2\text{O} = 12,97 \%$$

* Arranque repentino :

$$\text{Depresión} = (297,5 \text{ m de H}_2\text{O} - 351,4 \text{ m de H}_2\text{O})$$

$$\text{Depresión} = - 53,9 \text{ m de H}_2\text{O} = 15,34 \%$$

c) Método computacional

Presentaremos aquí el cálculo correspondiente al desenganche y arranque simultáneo de las tres turbinas, en los gráficos N^{os} 14 y 15 .

Presentamos a continuación los resultados del método computacional, para el desenganche y arranque simultáneo o de las tres turbinas a la vez, al nivel de los inyector, por ser los puntos más críticos. Dichos gráficos son resultados de la corrida de un programa, realizado por la compañía Neyrpic de Francia, constructora de la tubería.

De dichos gráficos se concluye:

$$* \text{ Sobrepresión máxima} = (377 - 345) = 32 \text{ m} = 9,3 \%$$

$$* \text{ Depresión máxima} = (293 - 345) = - 52 \text{ m} = 15,1 \%$$

Comparando los tres métodos utilizados se saca en claro:

- Para el arranque simultáneo, los 3 métodos dan resultados similares, siendo más conservador el analítico.
- En la parada de los 3 grupos en forma paralela se nota diferencia en los resultados, siendo menor en el caso del método analítico, sin embargo como se comprueba en las mediciones reales de sobrepresión, el valor más cercano al real es el del método analítico.
- Siendo mayor el valor en el caso de la depresión (17%) se a de tomar a la hora del diseño de la tubería dicho valor como mínimo tanto para el arranque, como para el desenganche simultáneo. En el caso de muestra tubería dicho valor es inferior al tomado (20%), por lo que se garantiza el buen comportamiento de la tubería ante el fenómeno del golpe de ariete.

3.5 Cálculo de la tubería

3.5.1 Diámetro de la tubería

La determinación del diámetro de la tubería durante el diseño de la misma, es de suma importancia pues permite seguir adelante con el diseño.

Dicha dimensión puede ser constante a lo largo de toda la tubería o decreciente de arriba hacia abajo, considerando en primer término el valor constante para luego estudiar las soluciones con diámetro variable. Se a de tener en cuenta las siguientes apreciaciones:

- * Si se trata de saltos de poca altura, donde el espesor es casi constante en toda la longitud, resulta mejor decidir por diámetro constante.
- * Cuando los saltos son de regular o gran altura, conviene construir la tubería con diámetros decrecientes en tramos respectivos y sucesivos.

Sintetizando diremos que fundamentalmente, la determinación de esta magnitud, es un problema económico dependiente de dos valores:

- * La velocidad del agua.
- * La pérdida de carga.

La velocidad en las tuberías, para el caudal máximo, resulta en la práctica comprendida entre 4 y 6 metros por segundo.

Para entrar al cálculo en sí, se a de seguir las recomen
daciones de líneas atrás, utilizando para ello las fórmulas
siguientes:

$$(6) \quad (XXI) \quad d = ((12 \times 10^3 \eta \beta K Q^3 N C_3) / (\gamma^p c t))^{1/7}$$

$$(XXII) \quad d_{ec.} = (5,2 (Q^3 / H))^{1/7}$$

Donde:

$d = d_{ec.}$ = Diámetro económico. (m)

η = Eficiencia o rendimiento complejo del grupo
(Turbina-Generador).

β = 0,0020 para tuberías soldadas y 0,0025 para
tuberías roblonadas.

K = Coeficiente de trabajo del material. (Kg/mm^2)

Q = Caudal en m^3/s

N = Número de horas de trabajo al año.

C_3 = Costo de energía en $\$/Kw-hora$.

γ = Peso específico del material. (Kg/m^3)

p = Presión media en m de agua, considerando so-
brepresión.

c = Costo en $\$/Kg$ del material.

t = % anual por interés + amortización del impor-
te de la tubería. Ej. 50%..... $t=0,5$

H = Carga total en m de agua. Estática más sobre
presión.

La expresión XXII es la llamada fórmula de BONDSHU. En
ambas expresiones debe usarse priméramente H y p como valo-

(6) Para mayor información ver. " Centrales hidroeléctricas " Cap. 2
de GAUDENCIO ZOPPETTI JUDEZ.

res medios, de manera a obtener en primera instancia un diámetro económico medio, para después en función del tipo de tubería, tomar diferentes H y así obtener la variación del diámetro a lo largo de la longitud de la tubería.

Para determinar los diferentes diámetros, se divide la tubería en tramos, dados generalmente por la topografía del terreno, usando un mismo diámetro para cada longitud de igual pendiente, pudiendo subdividir en tramos si esta longitud fuera muy larga.

La forma de calcular el diámetro para cada tramo, consiste en utilizar en las fórmulas XXI y XXII el H mayor correspondiente a cada tramo, tal como se muestra en la figura Nº 16.

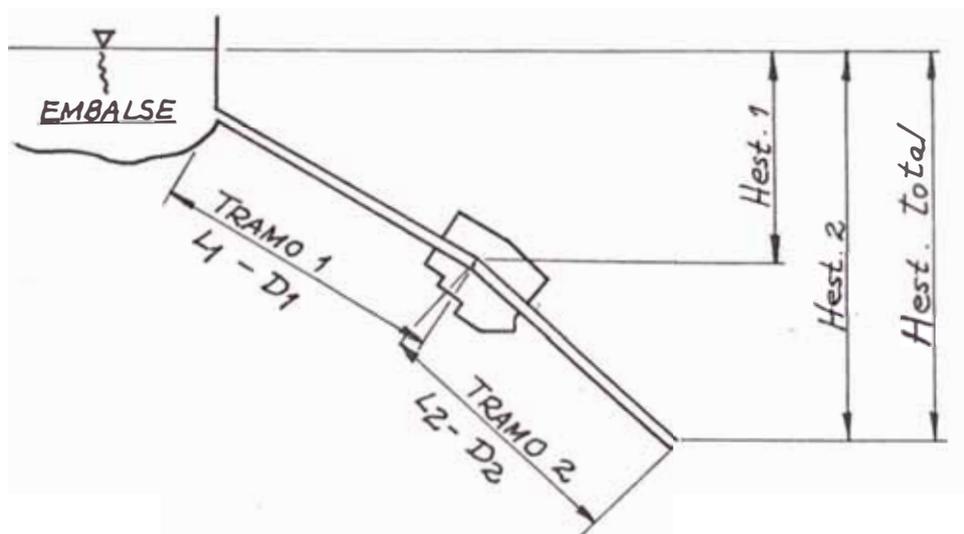


FIG. Nº 16 División en tramos de la tubería para el cálculo del diámetro.

Para el caso de nuestra aplicación práctica tenemos los resultados correspondientes a los datos siguientes:

$$\begin{aligned} \eta &= 0,85 \quad (0,9 \text{ de turbina por } 0,95 \text{ de generador}). \\ K &= 11 \text{ Kg/mm}^2 & Q &= 23,22 \text{ m}^3/\text{s} & N &= 8760 \text{ hor.} \\ \beta &= 0,0020 & C_3 &= 0,0325 \text{ \$/Kw-hora} \\ \gamma &= 7800 \text{ Kg/m}^3 & p &= 210 \text{ m} & c &= 3,02 \text{ \$/Kg} \\ t &= 0,30 & H &= 210 \text{ m} \end{aligned}$$

Aplicando XXI tenemos un d_{ec} = de 2,46 m y según BOND-SHU el d_{ec} = 2,27 m. De acuerdo a estos resultados vemos que el diámetro económico debe estar entre ambos valores , sin embargo tomaremos el valor de 2,46 m ,ya que para su cálculo se han utilizado valores reales y no BOND-SHU, en el cual se tiene predeterminado constantes para un cierto material y costos específicos, sin embargo podrá servir para una primera aproximación.

Dada las características del salto y del trazo de tubería como se ve en la figura N° 17, es más conveniente tener diámetros diferentes por tramos, en función de los cambios de dirección.

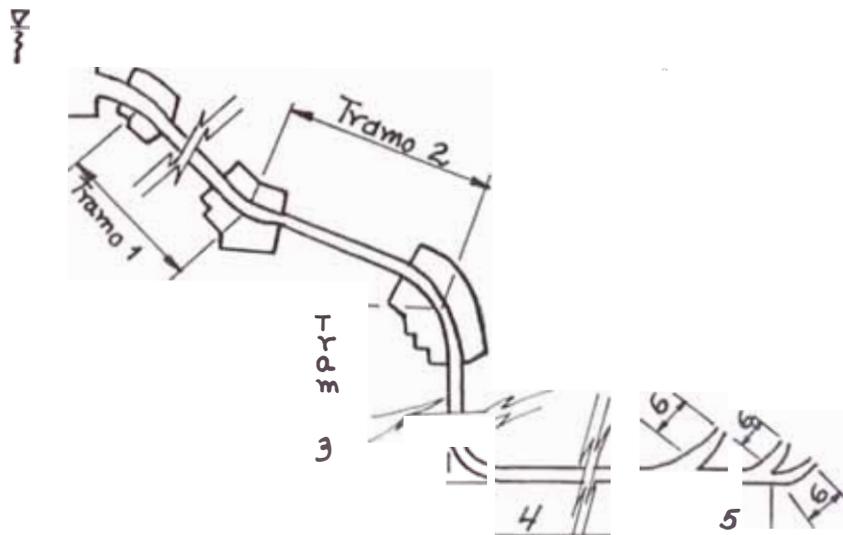


FIG. N° 17 Tubería de Machupicchu-División en tramos

A continuación realizamos los cálculos para los diversos tramos, teniendo en cuenta, que al inicio del proyecto se tiene construida la cámara de carga con el abocinamiento de \varnothing 4,5 m y 20 m de longitud, terminado todo en una brida ciega de \varnothing 3000 mm.

Utilizaremos la fórmula XXI y los valores indicados anteriormente con la siguiente salvedad:

* p = Presión correspondiente a la parte más inferior del tramo.

* K = Función del material, pudiendo ser de valores distintos en los tramos diversos.

Tramo 1 (BA1-BA2)

$$H_1 = (2059,2 - 1990) = 69,2 \text{ m} \quad Q = 23,22 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$p_1 = H_1 \times 1,2 = 83,04 \text{ m de agua.} \quad K = 16 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_1 = 2,92 \text{ m} = 2920 \text{ mm}$$

Tramo 2 (BA2-BA3)

$$H_2 = (2059,2 - 1899,612) = 159,6 \text{ m} \quad Q = 23,22 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$p_2 = H_2 \times 1,2 = 191,5 \text{ m de agua.} \quad K = 15 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_2 = 2,68 \text{ m} = 2680 \text{ mm}$$

Tramo 3 (BA3-codo 4)

$$H_3 = (2059,2 - 1718,2) = 341 \text{ m} \quad Q = 23,22 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$p_3 = 409,2 \text{ m} = H_3 \times 1,2 \quad K = 12,5 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_3 = 2,34 \text{ m} = 2340 \text{ mm}$$

Tramo 4 (Codo 4- tubería de distribución)

$$H_4 = (2059,2 - 1707,2) = 352\text{m} \quad Q = 23,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_4 = H_4 \times 1,2 = 422,4 \text{ m} \quad K = 7,5 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_4 = 2,16 \text{ m} = 2160 \text{ mm}$$

Tramo 5 (Primera división tubería de distribución)

$$H_5 = (2059,2 - 1707,2) = 352\text{m} \quad Q = 15,48 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_5 = H_5 \times 1,2 = 422,4 \text{ m} \quad K = 7 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_5 = 1,76 \text{ m} = 1760 \text{ mm}$$

Tramo 6 (Conexiones a los grupos)

$$H_6 = (2059,2 - 1707,2) = 352\text{m} \quad Q = 7,74 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_6 = H_6 \times 1,2 = 422,4 \text{ m} \quad K = 4,5 \text{ Kg/mm}^2$$

$$d_6 = 1,2 \text{ m} = 1200 \text{ mm}$$

Con esto tenemos determinados los diferentes diámetros para los tramos en que se a subdividido la tubería, y aunque en primera impresión parezca que el material escogido estaría trabajando a un esfuerzo mucho menor del que realmente puede soportar, más adelante cuando realizemos los cálculos de espesor y tensiones a que esta sometida la tubería, veremos que los requerimientos de esfuerzos serán mayores.

Los materiales escogidos en primer término, como una primera aproximación, ya que deben ser verificados con los cálculos de tensiones son:

ACERO E 24-4 (A 284 gr B) con límite elástico de 235N/mm^2 ó 24 Kg/mm^2 (Para tubería al aire libre- parte superior).

ACERO E 355 IIR (A441-4) con límite elástico de 355 N/mm^2 ó 36 Kg/mm^2 . (Para tubería restante).

En base a estos materiales se han tomado los diferentes valores de K, mostrandose en el apéndice F sus características y nomenclatura, ya que arriba estan en función de la AFNOR (Normas francesas) y ASTM entre paréntesis.

3.5.2 Pérdida de carga en las tuberías forzadas

El salto neto o caída útil aprovechable, para su transformación en energía mecánica y posteriormente en eléctrica, es siempre menor que el salto real o bruto, es decir el medido entre la superficie del agua en la cámara de carga y la del nivel del socaz, en el extremo inferior junto al cause del río.

La diferencia existente se debe a las pérdidas de carga que se suscitan a lo largo de la tubería y que se deben a la fricción, a los cambios de dirección, a los remolinos que se producen, etc. Todas estas pérdidas podemos clasificarlas de la siguiente manera:

a) Pérdida debida a la entrada de agua en la tubería

$$(XXIII) \quad h_1 = V^2/2g$$

$$(XXIV) \quad h_2 = 1,06 V^2/2g$$

De diversas experiencias sobre el particular se desprende que el valor medio que a de aplicarse, como coeficiente para $(h_1 + h_2)$ es igual a 1,65.

b) Pérdida a causa del rozamiento con las paredes de la tubería

$$(XXV) \quad \lambda = (4V^2 L)/(c^2 d) \text{ (Fórmula de BAZIN)}$$

$$(XXVI) \quad h_3 = (\lambda Q^2 L)/d^5 \text{ (Fórmula de DARCY)}$$

c) Pérdida de carga en los codos y ángulos

- Codos en ángulo vivo:

$$(XXVII) \quad h_4 = \xi v^2/2g \text{ (valor de } \xi \text{ ver en apéndice G)}$$

- Para curvas de arco circular:

$$(XXVIII) \quad h_4 = (\alpha/90^\circ)(\xi v^2/2g) \text{ (Valores de } \xi \text{ ver apéndice G).}$$

- Para bifurcaciones en tubería de distribución

$$(XXIX) \quad h_5 = (V_a^2 - v^2)/2g + KV_a^2/2g \text{ (Valores de K ver apéndice G).}$$

d) Pérdida de carga en los cambios de sección

$$(XXX) \quad h_6 = ((V_o - v)^2/2g)(\text{sen } \theta/2) \text{ (Para ensanchamiento gradual).}$$

$$(XXXI) \quad h_6 = (V_o - v)^2/2g \text{ (Para aumento brusco de sección).}$$

$$(XXXII) \quad h_7 = (V_o^2/2g) \cdot (1 - A/A_o)^2 \quad (\text{Fórmula de WE-} \\ \text{ISBACH- Ver apéndice G}).$$

e) Pérdidas de carga en las válvulas

$$(XXXIII) \quad h_g = KV^2/2g \quad (\text{ver apéndice G}) \quad (\text{Para válvula} \\ \text{de compuerta rectangular}).$$

$$(XXXIV) \quad h_g = KV^2/2g \quad (\text{Ver apéndice G})(\text{Para válvula} \\ \text{de compuerta circular}).$$

$$(XXXV) \quad h_g = KV^2/2g \quad (\text{Ver apéndice G})(\text{para válvula} \\ \text{de husillo- Esférica}).$$

$$(XXXVI) \quad h_g = KV^2/2g \quad (\text{Ver apéndice G})(\text{Para válvula} \\ \text{Mariposa}).$$

f) Pérdida de carga a la salida del agua al socaz

Cuando sale el agua del tubo de aspiración para reintegrarse al río, precisa que esté animada de cierta velocidad y exige para crearla una determinada columna de agua, que se pierde en su totalidad.

$$(XXXVII) \quad h_9 = V^2/2g$$

Todas estas fórmulas tienen los parámetros:

V = Velocidad del agua (m/s)

d = Diámetro de tubería (m)

g = Gravedad (9,8 m/s²)

L = Longitud de tubería (m)

Q = Caudal (m³/s)

c = Coeficiente de rugosidad de BAZIN, depende de la rugosidad interior y del diámetro medio. (Ver apéndice G).

$\beta = 0,0020$ para tuberías soldadas y $0,0025$ para tuberías roblonadas.

θ = Angulo que forman las generatrices del cono.

A continuación hallaremos la pérdida de carga en la tubería de nuestra aplicación práctica, lo que nos permitiría conocer el salto neto correspondiente.

$$h_1 + h_2 = 0,162 \text{ m}$$

$$g = \text{m/s}^2$$

$V = 1,39 \text{ m/s}$ función de caudal y dimensiones de cuadro N° 4.

$$h_3 = 3,242 \text{ m (según BAZIN)}$$

$$V = 4,75 \text{ m/s}$$

$$L = 480,81 \text{ m}$$

$$d = 2,558 \text{ m}$$

$$c = 72,33$$

$$R = 0,622 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,16$$

$$h_3 = 4,734 \text{ m (según DARCY)}$$

$$Q = 23,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d = 2,558 \text{ m}$$

$$L = 480,81 \text{ m}$$

$$\beta = 0,0020$$

Para hallar un valor más adecuado tomamos el promedio de lo encontrado según BAZIN Y DARCY.

$$h_3 = 3,988 \text{ m de columna de agua.}$$

$$\begin{aligned}h_{4-1} &= 0,036 \text{ m (Para codo 1)} & \alpha &= 40,83^\circ \\ & & V &= 3,467 \text{ m/s} \\ & & R &= 16 \text{ m} \\ & & r &= 1,46 \text{ m} \\ & & \xi &= 0,130\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{4-2} &= 0,012 \text{ m (Para codo 2)} & \alpha &= 9,79^\circ \\ & & V &= 4,116 \text{ m/s} \\ & & R &= 25 \text{ m} \\ & & r &= 1,34 \text{ m} \\ & & \xi &= 0,127\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{4-3} &= 0,110 \text{ m (para codo 3)} & \alpha &= 52,35^\circ \\ & & V &= 5,399 \text{ m/s} \\ & & R &= 20 \text{ m} \\ & & r &= 1,17 \text{ m} \\ & & \xi &= 0,128\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{4-4} &= 0,267 \text{ m (Para codo 4)} & \alpha &= 89,71^\circ \\ & & V &= 6,336 \text{ m/s} \\ & & R &= 10 \text{ m} \\ & & r &= 1,08 \text{ m} \\ & & \xi &= 0,131\end{aligned}$$

Luego la pérdida total por consecuencia de codos es igual a la suma de los correspondientes a cada codo:

$$h_4 = h_{4-1} + h_{4-2} + h_{4-3} + h_{4-4} = 0,425 \text{ m de agua.}$$

$$h_{5-3} = 0,987 \text{ m (Ramificación 1,76 m}\phi\text{-Grupo N}^\circ\text{ 3)}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad V = 6,336 \text{ m/s}$$

$$V_a = 6,843 \text{ m/s} \quad D_a/D = 0,55$$

$$Q_a/Q = 0,33 \quad \delta = 50^\circ$$

$$K = 0,27$$

$$h_{5-4} = 0,791 \text{ m (Ramificación 1,2m }\phi\text{-Grupo N}^\circ\text{ 4)}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad V = 6,362 \text{ m/s}$$

$$V_a = 6,843 \text{ m/s} \quad D_a/D = 0,68$$

$$Q_a/Q = 0,5 \quad \delta = 50^\circ$$

$$K = 0,196$$

$$h_{5-5} = 0,172 \text{ m (Ramificación 1,2m }\phi\text{-Grupo N}^\circ\text{ 5)}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad V = 6,84 \text{ m/s}$$

$$R = 6,648 \text{ m} \quad r = 0,6 \text{ m}$$

$$\alpha = 50^\circ \quad \xi = 0,130$$

En esta última pérdida la evaluación a sido por pérdida en arco circular.

La pérdida total será:

$$h_5 = h_{5-3} + h_{5-4} + h_{5-5} = 1,95 \text{ m de columna de agua.}$$

$$h_{8-V.E.} = 0 \text{ m (pérdida en válvula esférica- totalmente abierta).}$$

$$h_{8-V.M.} = 0 \text{ m (pérdida en válvula mariposa-abertura total)}$$

La pérdida total en válvulas es 0 m.

$$h_9 = 0 \text{ m (Por ser turbinas Pelton).}$$

Teniendo en cuenta que una turbina Pelton posibilita posibilita entre el 90 al 95 % de la energía pérdida a la entrada de la tubería, es que en nuestro caso tomaremos el valor medio, es decir el 92,5%.

$$\text{Energía recuperada} = 0,925 \times (h_1 + h_2) = 0,150 \text{ m}$$

Por consiguiente la pérdida de energía total será:

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 - \text{Energía recuperada}$$

$$h_T = 6,375 \text{ m de columna de agua.}$$

Luego el salto neto sera:

$$H_{\text{neto}} = H_{\text{bruto}} - h_T = (2059,2 - 1707,8) - 6,375$$

$$H_{\text{neto}} = 345,025 \text{ m}$$

La pérdida de carga a lo largo de la longitud de la tubería es conveniente graficarla, sobre el perfil longitudinal, mediante la denominada " LINEA PIEZOMETRICA", lo cual permite encontrar la pérdida de carga para cualquier punto de la tubería y además visualizar que no existan puntos de la tubería que se encuentren encima de esta linea, lo cual significaría presencia de presión negativa en ellos.

Si en el trazo de alguna tubería no hubiera solución megor que evite el caso mencionado, es necesario colocar en dichos puntos culminantes, válvulas de entrada y salida de aire.

En el trazo de la tubería se debe tener en cuenta lo siguiente:

- * Evitar un primer tramo de escasa pendiente.
- * Evitar que en el trazo exista algún tramo con razante casi horizontal, seguido de otro de gran pendiente. Esto para evitar vacío interior al acelerarse más el tramo de mayor pendiente, cuando la turbina requiera mayor caudal para contrarestar la exigencia de carga.

Para el caso de nuestra aplicación, la línea piezométrica queda por encima del trazo, como se verifica en el plano N^o 2

3.5.3 Espesor de chapa

El presente cálculo es quizás el más importante, pues el espesor escogido, que es función del material, deberá resistir todos los esfuerzos que se presenten y serán indicados mas adelante.

Para el cálculo de espesor, así como para la determinación de esfuerzos, se deben tener en cuenta las siguientes pautas y parámetros.

- 1) La presión hidrostática existe en cada tubo.
- 2) La máxima sobrepresión debida al golpe de ariete.
- 3) El trabajo de la plancha debido al peso propio y al del agua que contiene.
- 4) Los esfuerzos a que dan origen las variaciones de temperatura.
- 5) Los empujes o esfuerzos de compresión y tensión debidos a la posición inclinada de la tubería.

- 6) Los esfuerzos por roce en los apoyos.
- 7) Los estrechamientos del diámetro.
- 8) La presencia de juntas de dilatación.
- 9) Las tensiones debidas a seísmos⁽⁷⁾ transversal y vertical, principalmente en nuestro país que se encuentra en una zona sísmica.
- 10) El tipo de tubería, si es empotrada o al aire libre.
- 11) Conocer la presión interna como también la externa.
- 12) Para este cálculo se tiene en cuenta que la presión medida en m de columna de agua, se mantiene constante en una sección transversal de la tubería, siempre y cuando $p > 5d$ (d = diámetro en m).

La determinación del espesor de plancha, por lo que se refiere a la presión interna reinante es:

$$(XXXVIII) \quad e = (p d)/(2 K)$$

e = Espesor de plancha. (mm)

p = Presión total interior considerando la debida al ariete. (m de agua).

K = Coeficiente de trabajo del material de la tubería.

Los valores de K utilizados como primera aproximación antes de conocer exactamente el material a utilizar son:

K = 15 Kg/mm².... Para tubos fabricados por sistema MANESMANN (carga de rotura 55/65 Kg/mm²)

K = 9,5 Kg/mm²... Para tubos soldados de planchas de acero extradulce. (38/45 Kg/mm²).

(7) Seísmo= Sísmo

$K = 10,5 \text{ Kg/mm}^2$ Para tubos con cubrejuntas dobles.

$K = 8,5 \text{ Kg/mm}^2$ Para tubos soldados con gas. Con planch de acero extradulce. ($35/40 \text{ Kg/l}$).

$K = 12 \text{ Kg/mm}^2$ Para tubos soldados eléctricamente ($55/65 \text{ Kg/mm}^2$).

También es posible determinar el espesor de chapa, en forma gráfica, tal como se indica en la figura Nº 18.

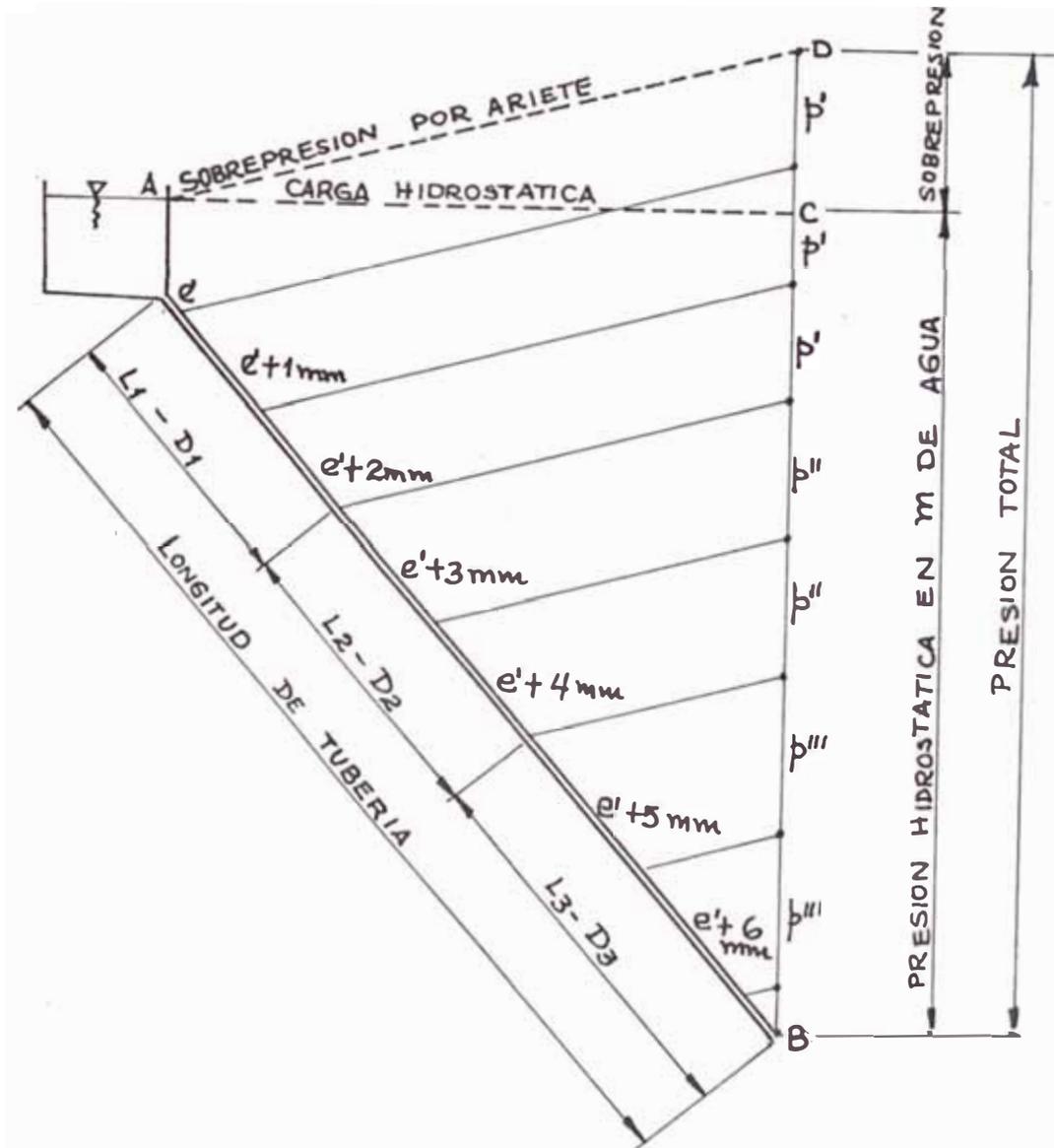


FIG. Nº 18 Determinación de espesor en forma gráfica

En la figura N^o18, se traza la línea AC correspondiente a la presión hidrostática, además también la línea AD en la que se toma en cuenta la presión debida al golpe de ariete. BD es la vertical que une con el final de la tubería.

Previamente utilizando la fórmula XXXVIII para los diversos diámetros se calcula la presión total en columna de agua correspondiente a 1 mm de espesor. Después sobre la vertical BD se divide en tramos los valores de p, según se tenga los tramos en función de diámetros. A continuación se trazan paralelas a la recta AD, comenzando de arriba hacia abajo, teniendo en cuenta que para cada nuevo p, se va agregando 1 mm y así sucesivamente, verificando que los espesores de plancha no sean menores de 4 a 5 mm.

Todo este cálculo es previo a la determinación final de la plancha, pues se deberá verificar dicho valor cuando se calcule los esfuerzos a que está sometida la tubería, habiendo la posibilidad de hacer modificaciones.

Los esfuerzos a que están sometidas las tuberías son diversos, tales como circunferenciales, longitudinales, en zona de refuerzo de apoyo, zona sin refuerzo, etc; además de si es tubería empotrada o al aire libre. Las fórmulas utilizadas en estos cálculos se dan en el apéndice H.

Para el caso de nuestra aplicación práctica, es decir la tubería de Machupicchu, tenemos los siguientes cálculos referentes al espesor de chapa.

Previamente se tiene en cuenta las siguientes premisas:

- 1) La presión interior máxima es igual a 420 m de columna de agua, en el extremo aguas abajo del conducto de repartición, teniendo en cuenta 20% de sobrepresión debido al golpe de ariete.

$$P_{\text{trab.}} = 350 \text{ m} \times 1,2 = 420 \text{ m de agua.}$$

- 2) La presión exterior máxima posible es igual a una altura de 350 m de agua. (8)
- 3) La presión de prueba del conducto de repartición y de la tubería, deberá ser por lo menos de 1,3 veces la presión máxima de trabajo.
- 4) Para la tubería al aire libre y el conducto de repartición, sometidos a la presión total de trabajo en funcionamiento normal, las tensiones unidireccionales no deberán exceder el 50% del límite elástico del acero empleado.
- 5) Las tensiones anteriores aumentadas en los efectos sísmicos no deberán sobrepasar el 65% del límite elástico del acero.
- 6) Las tensiones compuestas (Calculadas de acuerdo al criterio de VON MISES KENCKY), teniendo en cuenta los esfuerzos longitudinales, no superarán el 80% del límite elástico.
- 7) Para el blindaje en pozo vertical y galería horizontal, se admite que la roca alrededor del mismo toma un 40% de la presión interior.

(8) Caso de filtración desde túnel hasta galería horizontal.

- 8) Las tensiones en la chapa del blindaje a una presión igual al 60% de la presión total no deberá exceder el 50 % del límite elástico en tensiones unidireccionales. (9)
- 9) La resistencia al pandeo bajo la presión exterior, debe ser verificada de acuerdo a la fórmula de AMSTUTZ. La holgura relativa entre el hormigón y la chapa será igual a: $\epsilon/R = 0,00045$
- 10) Para la tubería al aire libre se tienen previstos, anillos de refuerzo soldados al exterior, de modo que ésta resista el pandeo bajo la presión atmosférica exterior en caso de vacío interior.
- 11) El coeficiente de seguridad, resultante de la relación de la presión crítica de pandeo a la presión atmosférica, se toma igual a 2 como mínimo.

A continuación se tiene el cálculo completo para un tramo de la tubería. Se refiere al tramo N° 1 según la figura N° 17 (Tramo BA1-BA2), que tiene las siguientes características:

Tramo 1

- BA1. a BA2
- Tubería al aire libre.
- Material: Acero E 24-4
- Presión máxima de trabajo = 83,04 m de agua.
- Presión de prueba = 107,95 m de agua.
- Diámetro = 2920 mm
- Factor K = 12 Kg/mm² (como primera aproximación).

(9) 65% si hay seísmos y 80% en tensiones equivalentes.

Aplicando primeramente la fórmula XXXVIII, tenemos una primera aproximación del espesor de chapa, que debe ser corroborado con el cálculo de tensiones.

$$e = (83,04 \times 2,92)/(2 \times 12) = 10 \text{ mm}$$

Aplicando las fórmulas de la sección A del apéndice H, referentes a las tuberías al aire libre tenemos:

a) Tensiones circunferenciales

a.1) En la chapa por fuera de los refuerzos (σ_1)

• En servicio:

$$\sigma_1 = (0,08304 \times 2920)/(2 \times 10) = 12,12 \text{ Kg/mm}^2$$

Pero: $12,12 > 0,5 \times 24$; por lo que aumentamos el espesor a $e = 12 \text{ mm}$

$$\sigma_1 = 10,1 \text{ Kg/mm}^2 < 0,5 \times 24 \quad \text{OK!}$$

• En prueba:

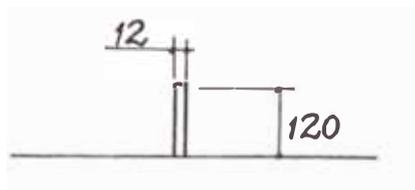
$$\sigma_1 = (0,10795 \times 2920)/(2 \times 12) = 13,13 \text{ Kg/mm}^2$$

Donde: $13,13/24 = 0,547$ del límite elástico

OK!

a.2) En la chapa bajo un refuerzo que no es un apoyo (σ_2)

Corresponde al caso N° 2, dadas las características del refuerzo.



$$A = 120 \times 12 = 1440 \text{ mm}^2$$

$$B = 1,285 / (12 \times 2920)^{1/2} = 6,86 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$$

$$\bar{\sigma}_{15} = \pm 5,96 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (ver párrafo b.10)}$$

$$\psi = 1 \quad \nabla = 0,3 \quad \mathcal{Q} = -3,846 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (ver c.5)}$$

$$m = (1440 \times 6,86 \times 10^{-3} (1+1)) / 4 \times 12 = 0,4116$$

En servicio:

$$\bar{\sigma}_2 = (0,08304 \times 1460) / (12(1+0,4116)) + (0,3 \times 1,85 \times 0,4116) / (1+0,4116) + 0,3 \times 5,96$$

$$\bar{\sigma}_2 = 9,1 \text{ Kg/mm}^2 < 0,5 \times 24 \quad \text{OK!}$$

En prueba:

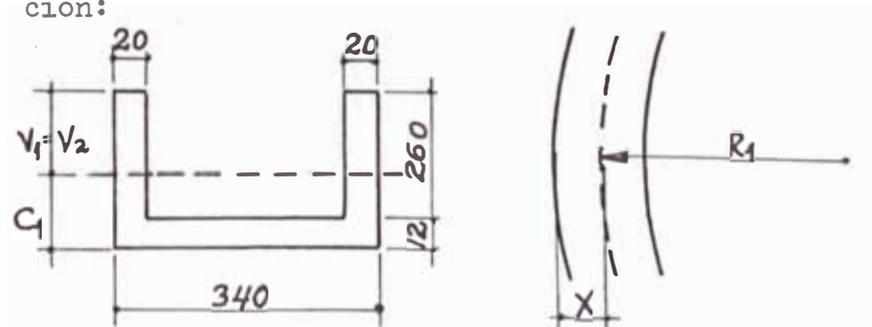
$$\bar{\sigma}_2 = (11,25 \text{ Kg/mm}^2)$$

Donde: $11,25 / 24 = 0,4689$ de límite elástico.

OK!

a.3) En la chapa bajo un refuerzo de apoyo ($\bar{\sigma}_3$)

Aplicando las fórmulas correspondientes para el refuerzo cuyas dimensiones se muestran a continuación:



$$Q = 92382,9 \text{ Kg} \text{ (Peso agua + peso tubería) } \cos 47,21^\circ$$

$$R = 1460 \text{ mm} \quad R_1 = 1575,7 \text{ mm} \quad X = 20,55 \text{ mm}$$

$$S = 14480 \text{ mm}^2 \quad I_1 = 268488107 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 89611235,67 \text{ mm}^4 \quad v_1 = v_2 = 168,33 \text{ mm}$$

$$B = 0,8330 \quad K = 0,4352 \quad \bar{V} = 0,3$$

$$L = 18000 \text{ mm} \quad Q_s = 10499,08 \text{ Kg}$$

$K_1; K_2; K_3; K_4$ de tabla para diferentes ángulos.

$$\sigma_2 = \pm 1,1694 \text{ (para } 60^\circ \text{ y } 120^\circ)$$

$$\sigma_2' = \pm 0,2975 \text{ (para } 90^\circ)$$

$$\sigma_2'' = \pm 0,9226 \text{ (para } 0^\circ \text{ y } 180^\circ)$$

$$\sigma_2''' = \pm 1,595 \text{ (para } 90^\circ)$$

$$\sigma_2'''' = \pm 0,8294 \text{ (para } 60^\circ \text{ y } 120^\circ)$$

$$\sigma_2'''''' = \pm 0,165 \text{ (para } 0^\circ \text{ y } 180^\circ)$$

Luego:

$$\sigma_3 = \pm 10,99 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 90^\circ)$$

$$\sigma_3 = \pm 11,09 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 60^\circ \text{ y } 120^\circ)$$

$$\sigma_3 = \pm 10,18 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 0^\circ \text{ y } 180^\circ)$$

$$\text{Donde: } 11,09 < 0,5 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

• En prueba:

$$\sigma_3 = 11,25 + 1,99 = 12,24 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Donde: } 12,24/24 = 0,51 \text{ de límite elástico OK!}$$

a.4.) En un refuerzo que no es de apoyo (σ_4)

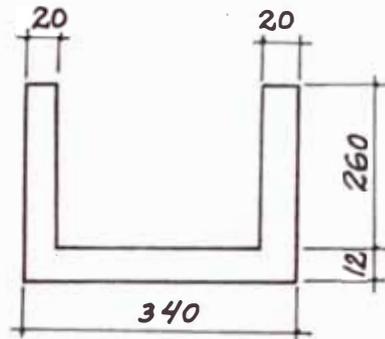
$$P = 83,04 \text{ m} \quad R = 1460 \text{ mm} \quad e = 12 \text{ mm}$$

$$m = 0,4116 \quad \sigma_\rho = -3846 \text{ Kg/mm}^2 \quad \bar{V} = 0,3$$

$$\sigma_4 = (0,08304 \times 1460) / 12 (1 + 0,4116) - (0,3 \times -3846) / (1 + 0,4116)$$

$$\sigma_4 = 7,97 \text{ Kg/mm}^2 < 0,5 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

a.5) En un refuerzo de apoyo (σ_5)



$$I_2 = 234150826,7 \text{ mm}^4$$

$$v_2 = 168,33$$

$$Q = 92383,9 \text{ Kg}$$

$$R_1 = 1575,7 \text{ mm}$$

$$X = 20,55$$

K_3 ; K_4 de tabla.

Se tiene:

$$\sigma_4' = \pm 0,352 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 90^\circ)$$

$$\sigma_4' = \pm 1,341 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 60^\circ \text{ y } 120^\circ)$$

$$\sigma_4' = \pm 1,057 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (para } 180^\circ \text{ y } 0^\circ)$$

Con los valores de σ_2'' de item a.3 obtenemos:

$$\sigma_5 = 10,14 \text{ Kg/mm}^2 < 0,5 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

b) Tensiones longitudinales

b.1) Tensión debida a flexión longitudinal entre apoyos

(σ_6).

$$J = (1 + 15,7 \times 12 / 1460) \times 10^{-6} = 1,129 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$$

$$L = 18000 \text{ mm} \quad x = 9000 \text{ mm} \quad \theta = 0^\circ \text{ y } 180^\circ$$

$$\alpha = 47,21^\circ$$

Luego:

$$\sigma_6 = (1,129 \times 10^{-6} \times 18000^2 / 12 \times 12) (1 - 6 \times 9000 / 18 \times 10^3 + 6 \times 9000^2 / 18000^2) \cos \theta \cos \alpha$$

$$\sigma_6 = \pm 0,86 \text{ Kg/mm}^2 < 0,5 \times 24 \quad \text{OK!}$$

b.2) Tensión debida al peso de la tubería (σ_7)

$$l_j = 66050 \text{ mm}$$

$e_j R_j$ se eliminan con eR por ser constantes en do el tramo.

$$\sigma_7 = - 0,3780 \text{ Kg/mm}^2$$

b.3) Tensión debida a efectos térmicos (σ_8)

Por tener el tramo valores constantes de e y R la expresión correspondiente se reduce a $0,232x \Delta\theta$

$$\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$$

Entonces:

$$\sigma_8 = 0,232 \times 20^\circ = 4,64 \text{ Kg/mm}^2$$

Todo este esfuerzo es absorbido por la junta de dilatación.

b.4) Tensión debida al efecto Poisson de la presión interna. (σ_9)

$$\nu = 0,3 \quad e = 12 \text{ mm} \quad R = 1460 \text{ mm}$$

$\sigma_j = 6,41 \text{ Kg/mm}^2$ correspondiente a 52,7 m de agua y e, R son constantes por lo tanto:

$$\sigma_9 = 0,3 \times 6,41 = 1,924 \text{ Kg/mm}^2$$

b.5) Tensión debida al roce de los apoyos. (σ_{10})

$$f = 0,3 \text{ (deslizamiento de acero sobre acero)}$$

$$\Sigma Q_j = 369531,6 \text{ (correspondiente a 4 apoyos).}$$

$$e = 12 \text{ mm} \quad R = 1460 \text{ mm} \quad \alpha = 47,21^\circ$$

Luego:

$$\sigma_{10} = \pm (0,3 \times 369531,6) / (2 \times 1460 \times 12) \cos 47,21^\circ$$

$$\sigma_{10} = \pm 0,684 \text{ Kg/mm}^2$$

b.6) Tensión debida a la presión sobre corona de la junta.

ta. (σ_{11})

$$e = 12 \text{ mm} \quad R = 1460 \text{ mm} \quad e_\alpha = 14,478 \text{ mm}$$

$$R_\alpha = 1477,65 \text{ mm} \quad P_\alpha = 76,14 \text{ m de agua.}$$

Luego:

$$\sigma_{11} = -(0,07614 \times 14,478 \times 1477,653) / (12 \times 1460)$$

$$\sigma_{11} = -0,092 \text{ Kg/mm}^2$$

b.7) Tensión debida al roce en la junta de dilatación.

(σ_{12})

$$P_d = 76,14 \text{ m} \quad m = 641,35 \text{ mm} \quad e = 12 \text{ mm}$$

$$R_d = 1477,653 \text{ mm} \quad R = 1460 \text{ mm}$$

Luego:

$$\sigma_{12} = \pm (0,6 \times 0,07614 \times 641,35 \times 1477,653) / (12 \times 1460)$$

$$\sigma_{12} = \pm 2,47 \text{ Kg/mm}^2$$

b.9) Tensión debida a tobera en tubería con junta de di-

latación. (σ_{14})

Aplicando el caso N° 1.

$$R_1 = 1460 \text{ mm} \quad R_2 = 1340 \text{ mm} \quad e = 12 \text{ mm}$$

$$P_c = 76,14 \text{ m de agua.}$$

Luego:

$$\sigma_{14} = (0,07614(1460^2 - 1340^2))/(2 \times 12 \times 1340)$$

$$\sigma_{14} = -0,7954 \text{ Kg/mm}^2$$

b.10) Tensión debida a la flexión local de la chapa bajo los refuerzos. (σ_{15})

$$\psi = 1 \quad ; \quad \varphi = 1 \text{ (de gráficos) (apéndice H).}$$

$$m = 0,4116 \quad P = 83,04 \text{ m} \quad R = 1460$$

$$e = 12 \text{ mm} \quad \nabla = 0,3$$

$$\sigma_p = -4,42 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (ver item c).}$$

Luego:

$$\sigma_{15} = \pm (1,816(1+1)(0,4116)/(1+1)(1+0,4116)) \times ((0,07614 \times 1460/12) - 0,3(-4,42))$$

$$\sigma_{15} = \pm 5,96 \text{ Kg/mm}^2$$

c) Tensión de confrontación en la chapa (10)

Aplicando HENCKY VON MISES:

$$\sigma_{\text{conf.}} = (\sigma_c^2 + \sigma_L^2 - \sigma_c \sigma_L)^{1/2}$$

c.4) Tubería con juntas- chapa por fuera de los refuerzos.

$$\bar{\sigma}_c = - 4,42 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_l = \pm 0,378 \pm 0,684 - 0,092 \pm 2,47 - 0,7954$$

$$\bar{\sigma}_l = - 4,42 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (m\u00e1s cr\u00edtica).}$$

$$\bar{\sigma}_L = - 4,42 - 0,86 = - 5,28 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{\omega_1} = \pm 4,90 \text{ Kg/mm}^2$$

$$4,90 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

c.5) Tuber\u00eda con juntas-chapa bajo refuerzo que no es un refuerzo de apoyo

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_2 = 9,1 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_l = - 4,42 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_L = - 4,42 \pm 5,96 \pm 0,86 = - 11,24 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_{\omega_n} = \pm 17,64 \text{ Kg/mm}^2$$

$$17,64 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

c.6) Tuber\u00eda con juntas-chapa bajo refuerzo de apoyo

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\sigma}_3 = 11,09 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_l = - 4,42 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\bar{\sigma}_L = - 11,24 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (Idem caso anterior)}$$

$$\bar{\sigma}_{\omega} = \pm 19,34 \text{ Kg/mm}^2$$

Como $19,34 \text{ Kg/mm}^2$ es $>$ que $0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2$, es necesario aumentar el espesor de plancha o en su defecto mejorar el material, en nuestro caso cambiaremos el material para todos los apoyos por acero

(10) Los items que no aparecen se debe a que no intervienen en el caso tratado.

E-355 IIR, cuyo límite elástico es de 36 Kg/mm^2 entonces:

$$19,34 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 36 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

d) Tensiones debidas a seísmo transversal o vertical

Según las investigaciones geofísicas de la zona de Ma chupicchu, permitieron determinar los valores siguientes para los seísmos:

$$n_1 = 0,20 \text{ (seísmo transversal)}$$

$$n_2 = 0,12 \text{ (seísmo vertical)}$$

d.1) Tensión circunferencial en la chapa bajo un refuerzo de apoyo durante seísmo transversal. (σ_3')

$$R_1 = 1575,7 \text{ mm} \quad W = 1400 \text{ mm} \quad Q = 92383 \text{ Kg}$$

$$n_1 = 0,2 \quad K_5 = 0,079 \quad K_6 = \pm 0,250$$

$$S = 6480 \text{ mm}^2 \quad v_1 = 168,33 \text{ mm} \quad K_7 = \pm 0,318$$

$$I_1 = 268488107 \text{ mm}^4 \quad B_1 = 1,0669 \quad K = 0,4352$$

Luego:

$$\sigma_2'' = \pm 0,742 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_2' = \pm 5,496 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_3' = 11,09 \pm 6,238$$

$$\sigma_3 = 17,328 \text{ Kg/mm}^2$$

$$17,328 < 0,65 \times 36$$

OK!

d.2) Tensión circunferencial en un refuerzo de apoyo durante seísmo transversal. (σ_5')

$$\begin{aligned} n_1 &= 0,2 & Q &= 92382,9 \text{ Kg} & R_1 &= 1575,7 \text{ mm} \\ W &= 1400 \text{ mm} & K_5 &= 0,079 & K_6 &= \pm 0,250 \\ v_2 &= 168,33 \text{ mm} & I_2 &= 234159826,7 \end{aligned}$$

Luego:

$$C_5' = \pm 6,302 \text{ Kg/mm}^2$$

$$C_2'' = \pm 0,742 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_5 = 10,14 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_5' = 10,14 + (\pm 6,302 \pm 0,742) = 17,184 \text{ Kg/mm}^2$$

$$17,184 \text{ Kg/mm}^2 < 0,65 \times 36 \text{ Kg/mm}^2$$

El material de los refuerzos de apoyo deberá ser también acero E-355 IIR.

d.3) Tensión circunferencial en la chapa bajo un refuerzo de apoyo durante un seísmo vertical. (σ_3'')

$$\sigma_3'' = \sigma_2 + (\sigma_2' (1 + n_2) + \sigma_2'' (1 + n_2))$$

$$\sigma_3'' = 9,1 + (1,99(1 + 0,12))$$

$$\sigma_3'' = 11,33 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 11,33 \text{ Kg/mm}^2 < 0,65 \times 36 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

d.4) Tensión circunferencial en un refuerzo de apoyo durante seísmo vertical. (σ_5'')

$$\sigma_4 = 7,97 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_4' = \pm 1,341 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_2'' = \pm 0,8294 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_5'' = 7,97 + (1,341(1+0,12) + 0,8294(1+0,12))$$

$$\sigma_5'' = 10,40 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 10,40 \text{ Kg/mm}^2 < 0,65 \times 36 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

d.5) Tensiones longitudinales

- Seísmo transversal:

$$\sigma_6 \text{ seísmo} = 0,2 \times 0,86 = \pm 0,172 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_7 \text{ seísmo} = -0,3780 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{10} \text{ seísmo} = \pm 0,684 \text{ Kg/mm}^2$$

- Seísmo vertical:

$$\sigma_6 \text{ seísmo} = 0,86(1+0,12) = \pm 0,9632 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_7 \text{ seísmo} = -0,3780(1+0,12) = -0,4332 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{10} \text{ seísmo} = \pm 0,684(1+0,12) = \pm 0,7661 \text{ Kg/mm}^2$$

d.6) Tensiones equivalentes

- Tubería con juntas- chapa por fuera de los refuerzos

o Seísmo transversal

$$\sigma_r = \sigma_l = -4,42 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_L = -4,42 \pm 0,172 = -4,592 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{con} = \pm 4,50 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 4,50 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

◦ Seísmo vertical

$$\sigma = \sigma_l = - 4,55 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_L = - 4,55 - 0,9632 = - 5,51 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{conf} = \pm 5,1 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 5,1 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

- Tubería con juntas-chapa bajo refuerzo que no es un refuerzo de apoyo

◦ Seísmo transversal

$$\sigma_c = \sigma_2 = 9,1 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_l = - 4,42 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_L = - 10,55 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{co} = \pm 17,03 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 17,03 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

◦ Seísmo vertical

$$\sigma_c = \sigma_2 = 9,1 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_l = - 4,55 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_L = - 11,47 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{co} = \pm 17,85 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } 17,85 < 0,8 \times 24 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

- Tubería con juntas-chapa bajo refuerzo de apoyo

◦ Seísmo transversal

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \sigma_3 = 11,09 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_l &= - 4,42 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_L &= - 10,55 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_{con} &= \pm 18,74 \text{ Kg/mm}^2\end{aligned}$$

$$\text{Como: } 18,74 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 36 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

° Seísmo vertical

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \sigma_3 = 11,09 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_l &= - 4,55 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_L &= - 11,47 \text{ Kg/mm}^2 \\ \sigma_{conf} &= \pm 19,54 \text{ Kg/mm}^2\end{aligned}$$

$$\text{Como: } 19,54 \text{ Kg/mm}^2 < 0,8 \times 36 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{OK!}$$

Con ésto concluye los cálculos para el primer tramo y de igual forma se procede para los otros tramos de tubería obteniendo finalmente las siguientes conclusiones:

Tramo 1 (BA1-BA2)

- Espesor de chapa en todo el tramo igual a 12 mm (según cálculo), sin embargo se agregará los 2 mm de sobreespe sor por corrosión, tal como se sustenta en el item co rrespondiente (5.3.5). Entonces el espesor real en todo el tramo es de 14 mm
- El material para todo el tramo es E-24-4, excepto los refuerzos de apoyo y la plancha de las virolas que lle van los refuerzos de apoyo que serán de acero E 355IIR.

Tramo 2 (BA2-BA3)

- El material utilizado para todo el tramo es acero, según norma francesa E 355IIR.
- El espesor incluyendo los 2 mm por corrosión es:
 - * 14 mm desde la señal tubo 65 hasta el tubo señal 87 , excepto las virolas en las que se encuentran los refuerzos de apoyo en que el espesor es de 16 mm.
 - * 16 mm desde señal tubo 56 hasta tubo señal 64.

Tramo 3 (Pique vertical)

- El material en todo el tramo es acero E 355IIR.
- El espesor incluyendo los 2 mm por corrosión, es igual a 18 mm en todo el tramo, es decir desde señal tubo 23 hasta señal tubo 55. (En este tramo se tiene en cuenta el 40 % de colaboración de la roca).

Tramo 4 (Galería horizontal)

- El material en todo el tramo es acero E 355IIR.
- El espesor incluyendo los 2 mm por corrosión es:
 - * 18 mm desde tubo señal 12 a tubo señal 22.
 - * 20 mm para tubo señal 11.
 - * 24 mm para tubo señal 10.
 - * 28 mm para tubos señal , 8 y 8bis. (11)

(11) Las señales 8 y 8bis son desnudas teniéndose hasta la virola 12 un decremento progresivo del espesor.

Tramo 5 (Distribuidor \varnothing 1760 mm)

- El material utilizado es acero E 355IIR.
- El espesor incluyendo los 2 mm de sobreespesor por corrosión es igual a 24 mm.

Tramo 6 (Distribuidor \varnothing 1200 mm)

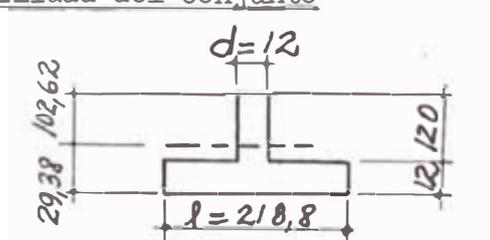
- El material utilizado es acero E 355IIR.
- El espesor incluyendo los 2 mm de sobreespesor por corrosión es de 16 mm.

Para el tramo N° 1 considerado en el cálculo, haremos la comprobación de su buen trabajo, bajo la presión exterior que en el caso de tuberías al aire libre, es la presión atmosférica. (Según sección C de apéndice H).

c) Tubería provista de atiesador

c.1) Tubería fuera del suelo o en galería libre

- Estabilidad del conjunto



$$L = 6400 \text{ mm} \quad E = 21000 \text{ Kg/mm}^2$$

$$l = 1,556(1472 \times 12)^{1/2} + 12 = 218,8 \text{ mm}$$

$$R_o = 1460 + 29,38 = 1489,38 \text{ mm}$$

$$I_1 = 931898,8 \text{ mm}^4 \quad I_2 = 3560371,2 \text{ mm}^4$$

$$I_t = I_1 + I_2 = 12879360 \text{ mm}^4$$

Luego:

$$P_{cr.} = (3 \times 21000 \times 12879360) / (6400(1489,38)^3)$$

$$P_{cr.} = 0,03837 \text{ Kg/mm}^2$$

$$P_{atm.} = 1 \text{ bar} = 0,010198 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } (0,03837/0,010198) = 3,76 > 2 \quad \text{OK!}$$

- Estabilidad de la chapa entre los atiesadores

$$E = 21000 \text{ Kg/mm}^2 \quad e = 12 \text{ mm} \quad R = 1472 \text{ mm}$$

$$K = 20,09, \text{ de gráficos para: } L/R = 6400/1472 = 4,35$$

$$D/e = 1472 \times 2 / 12 = 245,3$$

Luego:

$$P_{cr.} = (20,09 \times 21000) (12/2 \times 1472)^3$$

$$P_{cr.} = 0,0286 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{Como: } P_{cr.}/P_{atm.} = 0,0286/0,010198 = 2,8 > 2 \quad \text{OK!}$$

- Estabilidad del atiesador.

$$A = ((1120 \times 12) + (12 \times 218,8)) = 4065,6 \text{ mm}^2$$

$$B = 1,285 / (1472 \times 12)^{1/2} = 0,00967$$

$$D = 1 \text{ (para } a = 0) \quad e = 12 \text{ mm}$$

$$m = (4065,6 \times 0,00967(1+1)) / (4 \times 12) = 1,6381$$

$$E = 21000 \text{ Kg/mm}^2 \quad R_o = 1489,38 \text{ mm}$$

$$I_1 = 9318988,8 \text{ mm}^4$$

Luego:

$$\sigma_{cr.} = (3 \times 21000 \times 9318988,8 \times 1,6381) / (1489,38^2 \times 4065,6 \times (1+1,6381)) = 65,1 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{cr.} = 65,1 \text{ Kg/mm}^2$$

Es necesario comprobar que: σ_{cr} es $> \sigma_1$

$$P_{atm.} = 0,010198 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_1 = (0,010198 \times 1472) / (12(1+1,6381))$$

$$\sigma_1 = 0,47 \text{ Kg/mm}^2$$

Como:

$$\sigma_{cr} \text{ es mucho mayor que } \sigma_1 \quad \text{OK!}$$

Con esto queda comprobado los espesores mencionados, para el tramo 1, realizando los cálculos respectivos para otros tramos.

3.5.4 Determinación y cálculo de apoyos

Las tuberías que son generalmente montadas al aire libre, deben estar apoyadas sobre macizos usualmente de hormigón en masa. El trazado de la tubería debe de hacerse de modo a tener en lo posible una sólo alineación; sin embargo no hay inconvenientes importantes al tener cambios de razante, los cuales se deben establecer en apoyos fijos llamados anclajes.

Los apoyos móviles cuya finalidad es la de soportar el peso de la tubería por tramos y la de permitir que ésta ,

pueda moverse sobre ellos por las variaciones de temperatura, con el menor esfuerzo de rozamiento posible.

Estos apoyos móviles pueden dividirse en dos clases o tipos; los que tienen una plancha en "U" empotrada en el macizo, sobre el cual descansa y se desplaza la tubería y los que llevan pies de palastro, soldados a la tubería y constituidos por viguetas de acero, que se mueven sobre una plancha de acero con apoyo lateral. (Ambos tipos de apoyos se pueden ver en las figuras N° 19 y 20)

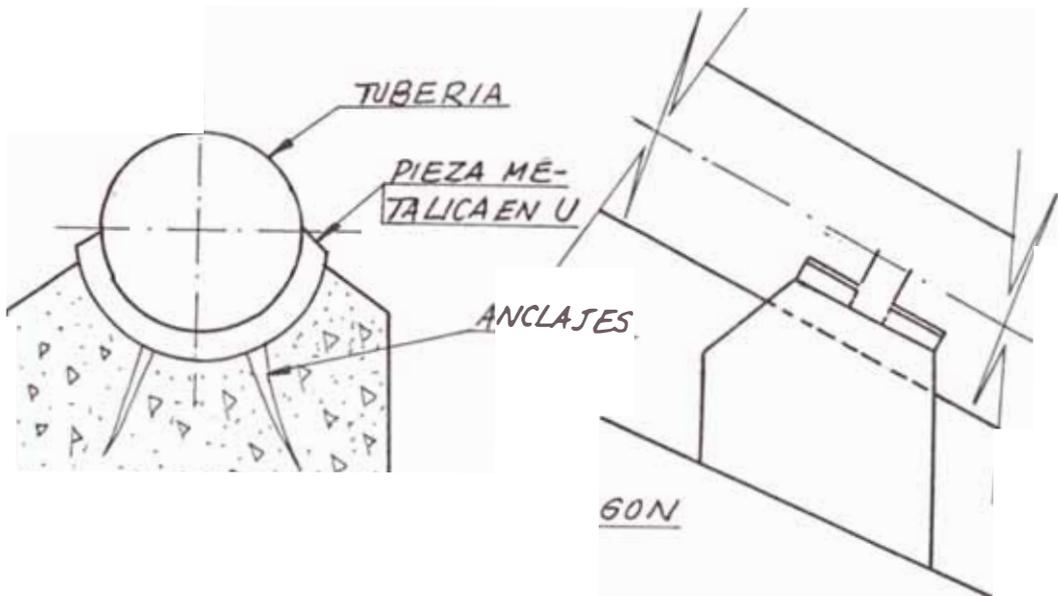


FIG. N° 19 Apoyo con tubo en "U"

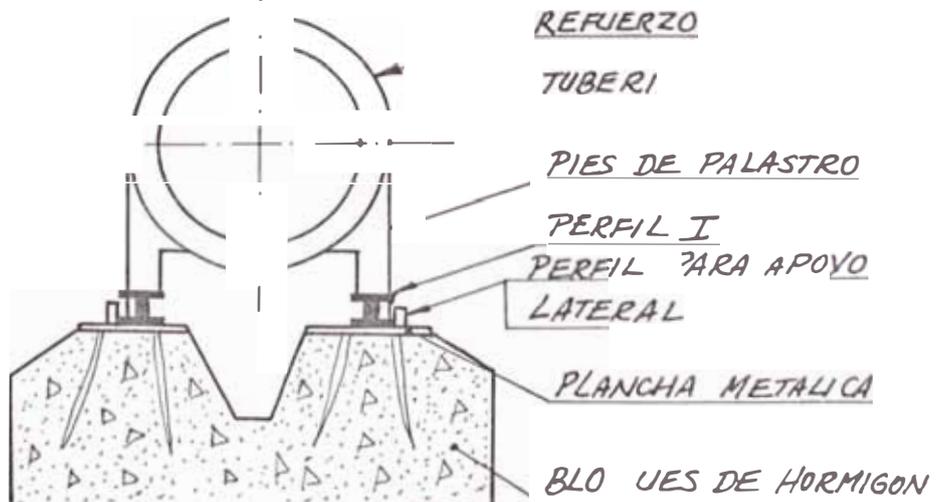


FIG. N° 20 Apoyo con pies de palastro

En el diseño de los apoyos se a de tener en cuenta los siguientes criterios:

- * Los pies derechos no deben tener menor altura a 0,5 m
- * Los apoyos deben estar sobre terreno consistente, es decir lo suficientemente consolidado para evitar asentamientos.
- * En los apoyos en "U", la plancha para el rozamiento a barca un ángulo de 120° .
- * La distancia a que deben estar situados los macizos , es aproximadamente el cuádruplo del diámetro de la tubería, valor a ser verificado con el cálculo de resistencia mecánica de los tubos. Este valor es una aproximación, pues puede ser mayor si el terreno lo exige y el material lo permite.

Los datos necesarios para el cálculo se enumeran a continuación y se muestran en la figura N^o 21.

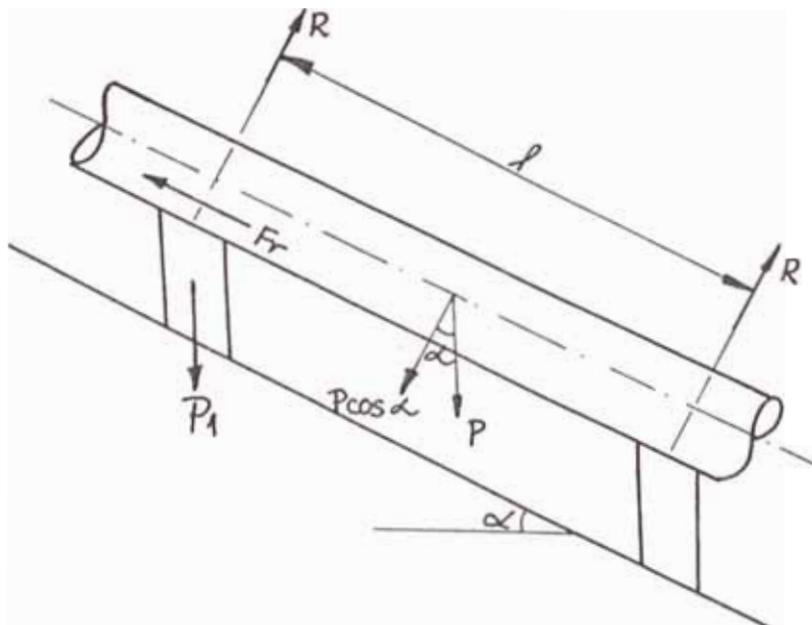


FIG. N^o 21 Datos para cálculo de macizo de apoyo

l = Longitud de tubería entre apoyos.

P = Peso de tubería en tramo l . (incluye el agua).

R = Reacciones. $((P \cos \alpha)/2)$.

F_r = Fuerza de rozamiento. $(R \mu)^{(12)}$

μ = Coeficiente de rozamiento. (0,2 para hierro contra hierro y 0,45 cuando se apoya directamente sobre la obra de fábrica.

P_1 = Peso del macizo

La comprobación de la estabilidad del macizo, se realiza primeramente componiendo las fuerzas R y P_1 , cuya resultante se compone con F_r y dicha resultante total debe estar comprendida en el tercio central de la base de apoyo. Si los esfuerzos actuantes fueran importantes y además la altura de los macizos, sería necesario armar éstos para su trabajo a la flexión.

Existen además los apoyos fijos o anclajes, colocados en los cambios de razante o cambios de sección, que sirven para contrarrestar los esfuerzos que se presenten en la tubería. Son generalmente de hormigón armado, cimentados en el terreno y cuya masa está de acuerdo a los esfuerzos a que son sometidos, sin embargo algunas veces para disminuir el volumen de concreto, se ancla en el suelo mediante pernos de anclaje, introducidos en el suelo longitudes tan grandes como 40 a 60 m, que permiten obtener anclajes de 250 y 500 TM.

La figura N^o 22 muestra un macizo de anclaje.

(12) F_r debe estar referida al centro de gravedad del conjunto.

L_1 = Longitud del codo a la junta de dilatación superior.

L_2 = Longitud del codo a la junta de dilatación inferior.

q_1 = Peso por metro longitudinal de tubería superior.

q_2 = Peso por metro longitudinal de tubería inferior.

α_1 = Angulo que forma el eje del tubo superior con horizontal.

α_2 = Angulo que forma el eje del tubo inferior con horizontal.

d_1 = Diámetro del tubo superior.

d_2 = Diámetro del tubo inferior.

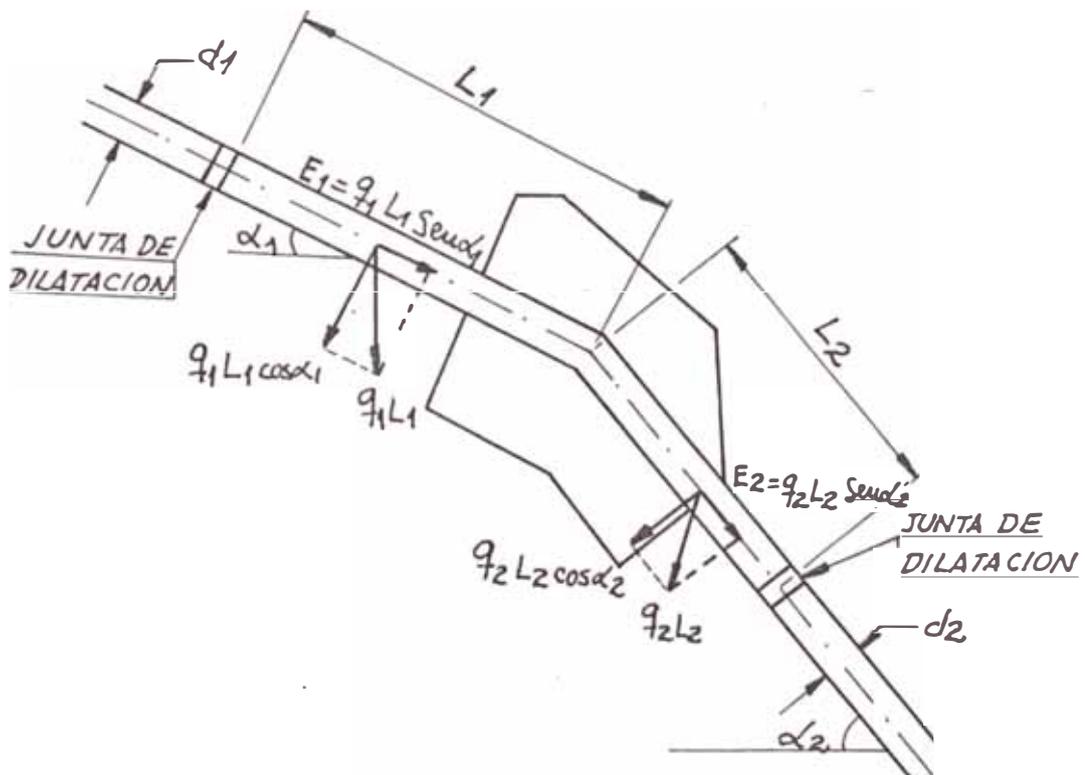


FIG. Nº 22 Macizo de anclaje

El macizo se encuentra sometido a diferentes esfuerzos, que se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$(XXXIX) E_1 = q_1 L_1 \sin \alpha_1 \text{ (Compresión tubo superior)}$$

(XL) $E_2 = q_2 L_2 \text{sen } \alpha_2$ (Tracción tubo inferior)

(XLI) $D_1 = L_1 q_1' \mu \text{cos} \alpha_1$ (Compresión por rozamiento en apoyos parte superior).

(XLII) $D_2 = L_2 q_2' \mu \text{cos} \alpha_2$ (Compresión por rozamiento en apoyos de parte inferior)

Donde:

q_1' = Peso de un metro de conducción superior, lleno de agua.

q_2' = Peso de un metro de conducción inferior, lleno de agua.

(XLIII) $N = 2 \cdot S \cdot h \gamma^A \text{sen} ((\alpha_2 - \alpha_1)/2)$ (Fuerza actuante sobre el macizo, resultante de la presión hidrostática de la tubería superior e inferior) (13)

Donde:

S = Sección transversal de tubería superior. (m^2)

γ^A = Peso específico del agua. (Kg/m^3)

h = Altura entre el centro de gravedad de la sección comprimida y el nivel superior del agua en la cámara de presión o cámara de carga.

(XLIV) $B = (\pi/4)(h)(1000)(d_1^2 - d_2^2)$ (Resultante de la presión hidrostática axial del tubo superior e inferior).

(13) Si $(\alpha_2 - \alpha_1)$ es positivo, N tiene sentido hacia arriba y si es negativo, hacia abajo.

$$(XLV) \quad F_{a1} = (16 \times 10^3 Q^2 L_1) / (c^2 \pi d_1^3) \quad (\text{Fuerza de arrastre del tubo superior debida al rozamiento del agua con las paredes})$$

$$(XLVI) \quad F_{a2} = (16 \times 10^3 Q^2 L_2) / (c^2 \pi d_2^3) \quad (\text{Fuerza de arrastre del tubo inferior})$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal que circula (m}^3/\text{s)}$$

$$c = 87 / (1 + \lambda / (R)^{1/2})$$

$$R = \text{Radio hidr\u00e1ulico} = d/4$$

$$\lambda = \text{Coeficiente de rugosidad, generalmente } 0,16$$

En resumen se tiene que las fuerzas actuantes en la direcci\u00f3n del eje superior e inferior son:

$$(XLVII) \quad E_1 + D_1 + B + F_{a1}$$

$$q_1 L_1 \text{sen} \alpha_1 + q_1 L_1 \mu \text{cos} \alpha_1 + \pi \times 10^3 (d_1^2 - d_2^2) / 4 + 16 q^2 L_1 \times 10^3 / c^2 \pi d_1^3$$

$$(XLVIII) \quad E_2 - D_2 + F_{a2}$$

$$q_2 L_2 \text{sen} \alpha_2 - q_2 L_2 \mu \text{cos} \alpha_2 + 16 q^2 L_2 \times 10^3 / c^2 \pi d_2^3$$

La fuerza N actuar\u00e1 en la direcci\u00f3n de la bisectriz de las dos alineaciones que forman el codo.

Adem\u00e1s se tiene los esfuerzos siguientes, que por no influir en los resultados son generalmente no tomados en cuenta.

$$(XLIX) \quad C_1 = (8000 / g \rho a_2^2) \text{sen}((\alpha_2 - \alpha_1) / 2) \times Q^2 \quad (\text{Esfuerzo por fuerza centrífuga, debido a circulación de agua por el codo})$$

$$(L) \quad A = (3 \times 10^3 \text{ l } Q / gT) \text{sen}((\alpha_2 - \alpha_1) / 2) \quad (\text{Esfuerzo por golpe de ariete positivo}) \quad (14)$$

Donde:

T = Tiempo de cierre.

l = Longitud desde extremo superior del tubo hasta anclaje correspondiente más la mitad de la longitud del tramo inferior hasta anclaje inferior.

$$(LI) \quad F_t = \alpha \Delta t \times E \times S_h \quad (\text{Esfuerzo por falta de junta de dilatación})$$

Donde:

α = Coeficiente de dilatación del acero = 1/82000

Δt = Cambio de temperatura en °C.

E = Módulo de elasticidad

S_h = Sección transversal del hierro.

Hallada todas las fuerzas actuantes, se han de componer con la representativa del peso del macizo, lo que dara una resultante R_M , que debe caer dentro del tercio central de la base del macizo, para no producir esfuerzos de extensión.

Los coeficientes de trabajo en los bordes de la fundaci

(14) Este esfuerzo que podría adquirir valores de importancia no se tiene en cuenta en el cálculo del macizo.

ón del macizo están dados por:

$$(LII) \quad (R_M/b.d)(1 \pm 6X/b) \quad (15)$$

Donde:

b = Ancho del macizo

d = Longitud del macizo

X = excentricidad de la carga.

Para lograr que todo el macizo contribuya a contrarrestar, los esfuerzos producidos por la tubería, será necesario anclar convenientemente por medio de pernos y bridas, la parte superior e inferior del bloque, introduciendo para ello en el terreno dichos pernos, disminuyendo de esta manera en parte el peso del bloque.

Para el caso de muestra aplicación práctica, tenemos según la figura N° 23, tres apoyos fijos o anclajes denominados BA1, BA2, BA3, en los respectivos cambios de razante; entre cada uno de ellos se tienen apoyos móviles cuyo tipo y número se tendrá a continuación.

Tramo BA1 - BA2

Tomando una primera aproximación del número de apoyos móviles tenemos:

$$N^{\circ} \text{ apoyos} = (L_{\text{tramo}}/4d) - 1 = (74,523/4 \times 2,92) - 1 = 5$$

(15) El factor 6 corresponde a la sección rectangular, sobre la que se apoya el macizo sobre el terreno.

La primera aproximación nos da 5 apoyos, distanciados a 12,42 m ; sin embargo podemos tomar 4 dada la luz y ratificando con la resistencia del material para dichas condiciones.

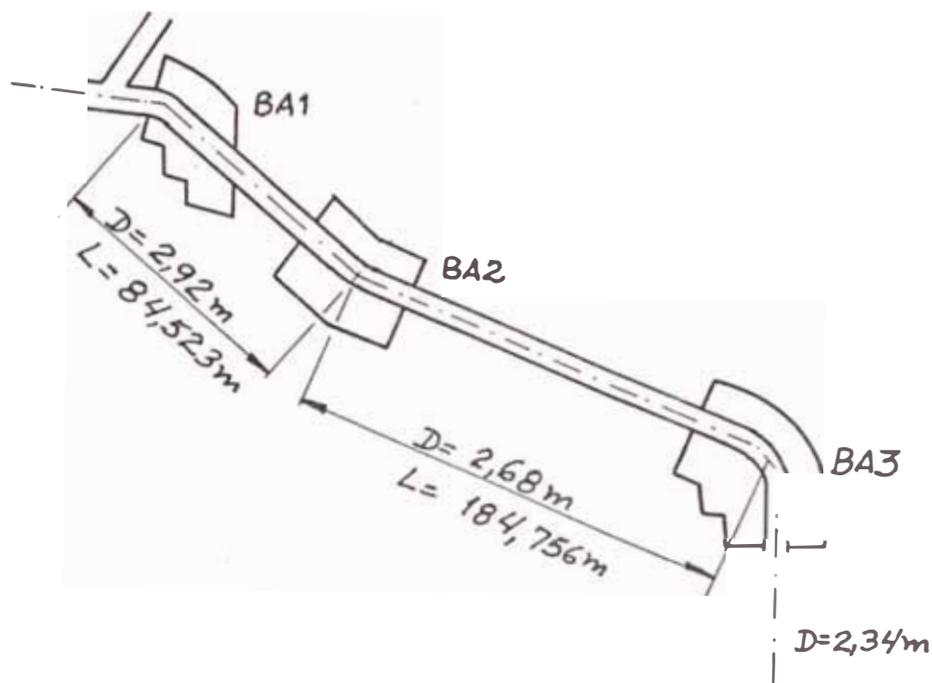


FIG. N° 23 Macizos de anclaje en la tubería de Machupicchu

Tramo BA2-BA3

$$N^{\circ} \text{ apoyos} = (169,756/11) - 1 = 14,4 \text{ apoyos.}$$

Esta aproximación nos da 14 apoyos separados una distancia de 11,31 m, sin embargo dadas las características del material utilizado, se puede tener distancias entre apoyos similares a la del tramo BA1-BA2 (18m), permitiendo tener sólo 7 apoyos , distancia verificada en el ítem espesor de

chapa.

Haremos un cálculo de bloque de apoyo correspondiente , al tramo BA1-BA2 cuyas características y dimensiones se muestran en la figura N^o 24.

$$\text{Volumen de concreto primera fase} = 47,67 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de concreto primera fase} = 114432 \text{ Kg.}$$

$$\text{Volumen de concreto segunda fase} = 2,063 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de concreto segunda fase} = 4951,2 \text{ Kg.}$$

P_1 = Peso total del macizo = 119383,2 Kg, aplicado en el punto G, que es el centro de gravedad del macizo , cuyas coordenadas son: (-1350,-1440)mm.

P = Peso del tramo entre 2 apoyos = 138570,47 Kg , teniendo en cuenta l = 18 m y peso de agua y material.

$$R = 138570,47 \times \cos 47,21^\circ = 47066,4 \text{ Kg}$$

R_t = Reacción total en el macizo igual a 2R (una corresponde al tramo superior y la otra al inferior).

$$R_t = 2 \times 47066,4 = 94132,8 \text{ Kg.}$$

$$F_r = R_t \times f = 94132,8 \times 0,2 = 18826,6 \text{ Kg.}$$

El peso del macizo se compone con la resultante R, dando R_1 y a su vez R_1 se compone con F_r , obteniéndose $R_T = 205285,2 \text{ Kg}$. Esta corta a la recta ab en el punto c, el cual pertenece al tercio central de la base, con una excentricidad de 150 mm. (Ver figura N^o 25).

Descomponiendo R_T tenemos F_1 y F_2 .

$$F = 205285,2 \times \cos 62,5^\circ = 108784,6 \text{ Kg}$$

$$F_2 = 205285,2 \times \text{sen } 62,5^\circ = 174091,7 \text{ Kg}$$

Calculamos a continuación los esfuerzos a que está sometido el terreno.

$$\text{Esfuerzo en la base} = (108784,6/260 \times 395)(1 \pm 6 \times 15/260)$$

$$\text{Esfuerzo en la base} = 1,43 \text{ a } 0,69 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo en la perpendicular a la base} &= 0,85 \text{ a } 0,60 \\ &= (174091,7/605 \times 395)(1 \pm 6 \times 17,5/605). \end{aligned}$$

Como se puede apreciar de los resultados de los esfuerzos, los mismos se encuentran dentro de límites adecuados de resistencia del terreno. (16)

De igual forma al cálculo hecho se puede verificar para cada uno de los macizos de apoyo entre BA1-BA2 y BA2 y BA3.

Refiriéndonos al cálculo de los macizos de anclaje, haremos el respectivo para el bloque de anclaje 2 BA2, cuyas características y dimensiones se tienen en la figura N°26.

Según las fórmulas XXXIX a XLVIII:

$$\begin{aligned} E_1 &= 51733,71 \text{ Kg} \quad \text{Para: } L_1 = 70,374 \text{ m} \\ &\quad \alpha_1 = 47,21^\circ \\ &\quad q_1 = 1001,74 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_2 &= 6846,65 \text{ Kg} \quad \text{Para: } L_2 = 12,255 \text{ m} \\ &\quad \alpha_2 = 37,42^\circ \\ &\quad q_2 = 919,14 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

$$D_1 = 73605,45 \text{ Kg} \quad \text{Para: } q_1' = 7698,35 \text{ Kg/m}$$

$$D_2 = 12770,51 \text{ Kg} \quad q_2' = 6560,45 \text{ Kg/m}$$

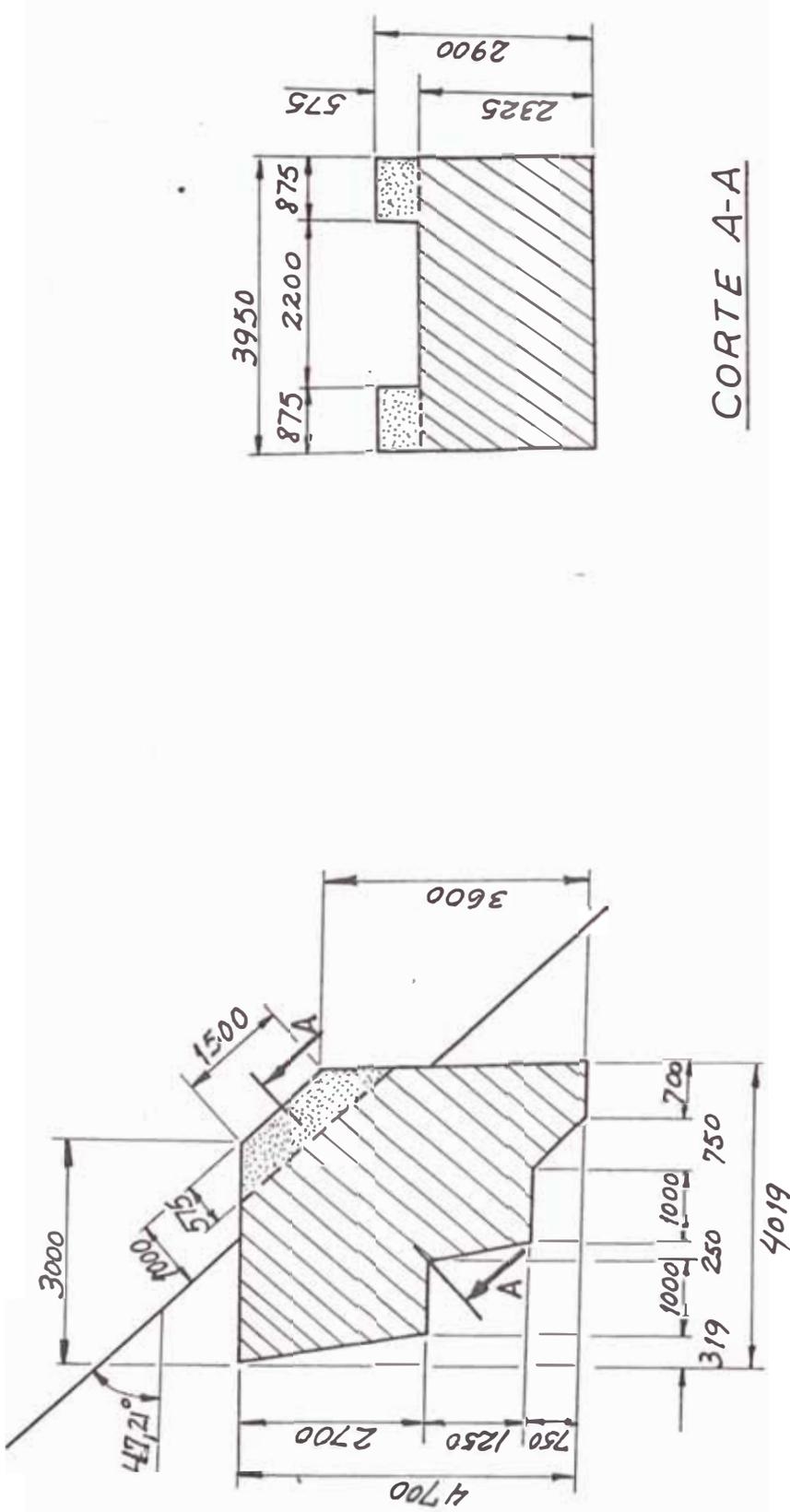
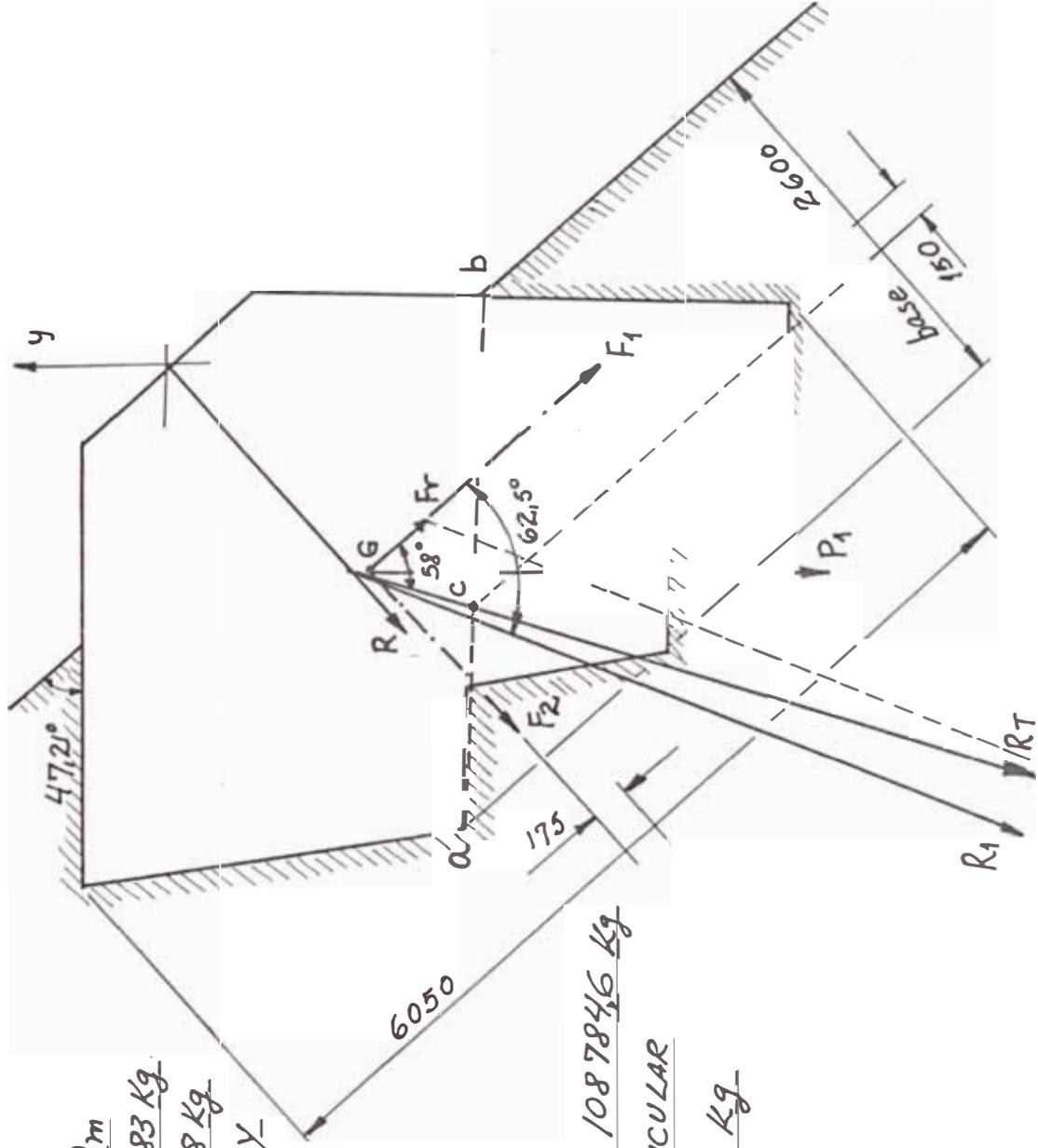


FIG. Nº 24 Dimensiones del bloque de apoyo



G: c.g del macizo (-1,35, -1,44)m
P1= PESO DEL MACIZO - 119383 Kg
R= REACCION TOTAL = 94132,8 Kg
R1 = RESULTANTE DE PESO Y

REACCION TOTAL

RT= RESULTANTE TOTAL
= 205285,2 Kg.

Fr= FUERZA DE FRICCION
= 18826,56 Kg

F1= FUERZA SOBRE LA BASE = 108784,6 Kg
F2= FUERZA SOBRE PERPENDICULAR

A LA BASE = 174091,7 Kg.

$R + P_1 - R_1$
 $R_1 + F_r - R_T$

FIG. N° 25 Solución gráfica del bloque de apoyo

$$= 0,2$$

$$N = (2\pi \times 2,68^2 / 4) (69,5) 1000 \text{ sen}((37,42 - 47,21) / 2)$$

$$N = - 66907,67 \text{ Kg (Hacia abajo por el signo negativo).}$$

$$B = (\pi / 4) (69,5) (1000) (2,92^2 - 2,68^2) = 73362,47 \text{ Kg}$$

$$F_{a1} = (16000 \times 23,22^2 \times 70,374) / (c_1^2 \pi \times 2,92^3) = 1445,4 \text{ Kg}$$

$$F_{a2} = (16000 \times 23,22^2 \times 12,255) / (c_2^2 \pi \times 2,68^3) = 330,14 \text{ Kg}$$

Donde:

$$\begin{aligned} h &= 69,5 \text{ m} & \gamma &= 1000 \text{ Kg/m}^3 & d_2 &= 2,68 \text{ m} \\ d_1 &= 2,92 \text{ m} & Q &= 23,22 \text{ m}^3/\text{s} \\ c_1 &= 73,28 & c_2 &= 72,77 \end{aligned}$$

La fuerza resultante en el eje superior es:

$$E_1 + D_1 + B + F_{a1} = 200147,03 \text{ Kg}$$

Y en el eje inferior:

$$E_2 + D_2 + F_{a2} = - 5593,72 \text{ Kg.}$$

Estas dos fuerzas se componen con la fuerza N, lo que permite obtener la resultante $R_2 = 211454,62 \text{ Kg}$, que forma el ángulo de $114,08^\circ$ con la horizontal y actúa en el punto del codo que se determina como origen de coordenadas. (Ver figura N° 27).

Encontramos luego el peso del macizo de concreto, que actuará en el centro de gravedad del macizo y que se compone con la resultante R_2 .

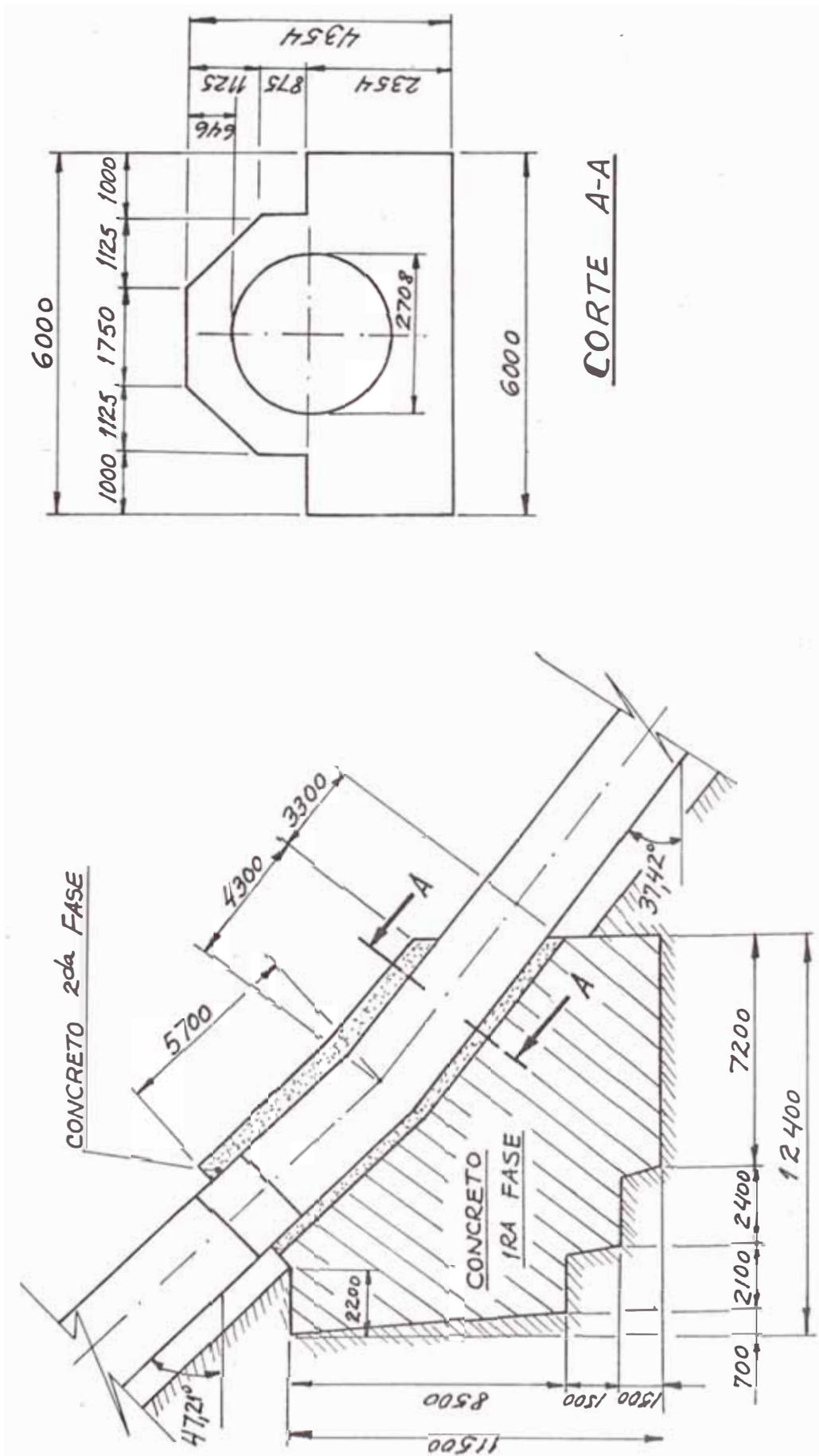


FIG. Nº 26 Dimensiones del bloque de anclaje BA2

Volumen total del concreto = $640,52 \text{ m}^3$

Peso total del macizo = $640,52 \times 2400 = 1537260 \text{ Kg}$

Sumada esta última fuerza con R_2 , nos da la resultante total $R_M = 1730000 \text{ Kg}$ formando un ángulo de 3° con la vertical. Prolongamos R_M y verificamos que corta en el punto c a la recta ab (ver figura N° 27), que corresponde al tercio central de la base. (cumpliendo con dicho requisito).

Los valores de la resultante tanto en la dirección del eje inferior (soportada por la base), y perpendicular al terreno son F'_1 y F'_2 cuyos valores son:

$$F'_1 = 1730000 \times \cos 49,58^\circ = 1121707 \text{ Kg}$$

$$F'_2 = 1730000 \times \sin 49,58^\circ = 1317070 \text{ Kg}$$

Encontrando los esfuerzos sobre el terreno:

$$\text{Esfuerzo en la base} = \left(\frac{1121707}{665 \times 600} \right) \left(1 \pm \frac{6 \times 3}{665} \right) = 2,89 \text{ Kg/cm}^2$$

a 2,74 Kg/cm

Esfuerzo en la perpendicular a la base = 3,27 a -0,65

$$\text{Kg/cm}^2 = \frac{1317070}{1680 \times 600} \left(1 \pm \frac{6 \times 420}{1680} \right)$$

Como se puede ver de los resultados, los esfuerzos a los que está sometido el terreno, son bastante comunes en cuanto a valores de resistencia del terreno⁽¹⁶⁾, aunque en el segundo caso existe un tramo sometido a tracción, pudiendo mejorar con pernos de anclaje .

(16) La resistencia del terreno esta relacionada con la capacidad portante, la que se puede incrementar con la consolidación.

$R_2 = 211454,62 \text{ Kg}$

$\alpha = 24,08^\circ \text{ con vertical}$

$P_1 = \text{PESO TOTAL DEL MACIZO} = 1537260 \text{ Kg}$

$R_M = \text{RESULTANTE TOTAL} = 1730000 \text{ Kg}$

$\alpha = 3^\circ \text{ con vertical}$

$A_S = \text{ANCLAJE SUPERIOR} = 500000 \text{ Kg}$

$A_I = \text{ANCLAJE INFERIOR} = 1000000 \text{ Kg}$

$R_E = 210000 \text{ Kg}$

$R_F = \text{RESULTANTE FINAL} =$

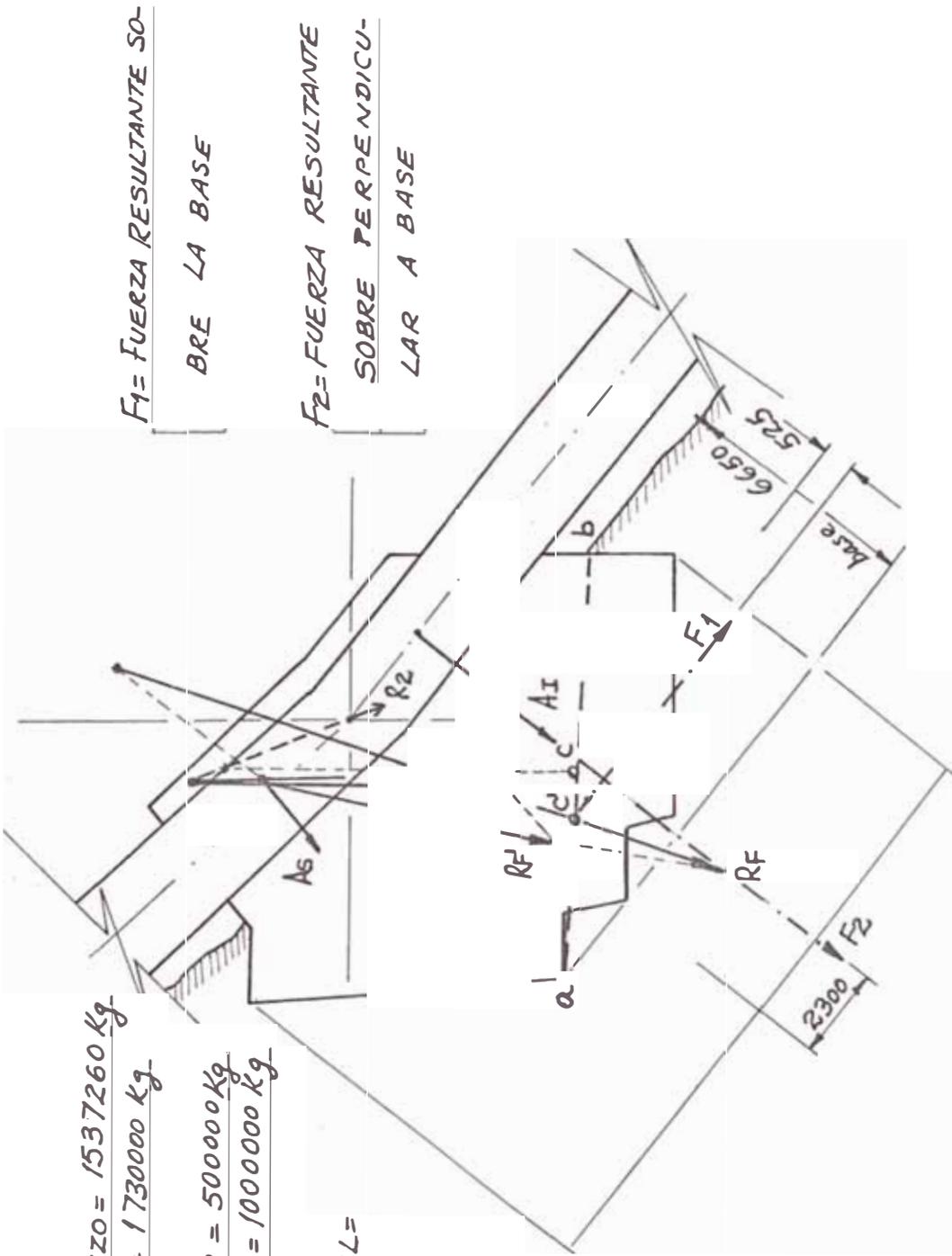
3000000 Kg

$\alpha = 18^\circ \text{ con vertical}$

$R_2 + P_1 = R_M$

$R_M + A_S = R_F'$

$R_F' + A_I = R_F$



$F_1 = \text{FUERZA RESULTANTE SOBRE LA BASE}$

$F_2 = \text{FUERZA RESULTANTE SOBRE PERPENDICULAR A BASE}$

FIG. Nº 27 Solución gráfica del macizo de anclaje BA2

En la parte superior del macizo se tienen 2 anclajes de 250 TM cada uno y en la parte inferior 4 anclajes de 250 TM cada uno. Estas fuerzas correspondientes se suman a R_M dando como resultado R_F (resultante final), cuyo resultado es 3000000 Kg y forma un ángulo de 18° con la vertical. (ver figura N^o 27).

Prolongando R_F vemos que corta a la recta ab en c', estando situada en el tercio central de la base, con una excentricidad de 525 mm.

Los valores de F_1 y F_2 son:

$$F_1 = 3000000x \cos 55,42^\circ = 1702669 \text{ Kg.}$$

$$F_2 = 3000000x \sin 55,42^\circ = 2470003 \text{ Kg.}$$

Teniendo los esfuerzos sobre el terreno siguientes:

$$\text{Esfuerzo en la base} = 6,2 \text{ Kg/cm}^2 \text{ a } 2,2 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo en perpendicular} = 4,4 \text{ Kg/cm}^2 \text{ a } 0,44 \text{ Kg/cm}^2.$$

Estos valores muestran compresión en la base y en la perpendicular a la base, con valores comunes al tipo de roca que se tiene en la zona, sin embargo se puede consolidar el terreno suelto que pudiera existir y además realizar inyecciones de cemento, agua y bentonita, para asegurar el trabajo adecuado del terreno.

De igual forma se calcula para los bloques de anclaje BA1 y BA3, donde se tienen 6 anclajes de 250 TM y 8 anclajes de 500 TM c/u respectivamente.

3.5.5 Cálculo de las juntas de dilatación

La colocación de juntas de dilatación son generalmente necesarias para poder absorber con cuidado, la expansión y contracción que se produce en las tuberías expuestas o al aire libre, debido a los cambios de temperatura. Se evita de esta manera que los anclajes sean diseñados para absorber esfuerzos muy grandes.

La ubicación de las juntas de expansión se realiza bajo los siguientes criterios:

- * Si el trazo de la tubería es horizontal o casi horizontal, las juntas de expansión o dilatación, deben usualmente colocarse en medio o la mitad de la longitud de los anclajes, de manera a reducir el movimiento de la tubería sobre los apoyos, al mínimo.
- * En pendientes e inclinaciones grandes, es usual sea mucho más dificultoso la instalación del anclaje superior o de cabecera, que el pie o inferior, por lo que en estos casos es bastante provechoso, localizar la junta de dilatación cerca del anclaje superior, transmitiendo de este modo toda la fricción sobre los apoyos, al anclaje inferior.

Esto último también beneficia y facilita la erección o montaje de la tubería, ya que es usualmente dificultoso en tuberías de acero, erigir la porción entre la junta de dilatación y el anclaje superior, teniendo en cuenta que la tube

ría tiende a deslizarse hacia abajo.

- * Si la distancia entre los anclajes es tan grande que el movimiento de la tubería, debido a temperaturas ex tr e m a s, es mayor que la que una junta de expansión co m u n o simple puede absorber, se requiere entonces jun tas adicionales de expansión.
- * Es necesario colocar una junta de expansión por lo me nos, en cada cambio de razante.
- * Para tuberías cortas con curvas frecuentes, son a veces consideradas lo suficientemente flexibles, para el propósito de absorber los efectos de dilatación o contracción, usándose algunas otras formas de juntas.
- * El uso de juntas de expansión para tuberías empotradas son raramente necesarias, ya que tales tuberías no están expuestas a temperaturas extremas; sin embargo si la tubería esta sólidamente anclada en cada ex tr e m i d a d, no tiene curvas para acomodarse al movimiento y tiene in ad e c u a d a d o s un i o n e s circunferenciales, la omisión de juntas de dilatación puede causar fallas.

La utilización de juntas de expansión, permite también el uso de juntas circunferenciales más ligeras, al disminuir la magnitud del esfuerzo longitudinal.

Las juntas de expansión pueden dividirse en dos tipos generales:

- Junta de deslizamiento: Mostrada en la figura N° 28, don

de la empaquetadura de la caja de estopa, puede estar satisfactoriamente dada con trenza cuadrada de cáñamo, o empaquetadura de lino impregnado con grafito. Las juntas de este tipo cuando están propiamente montadas y empaquetadas, conceden entera satisfacción y tienen insignificantes fugas.

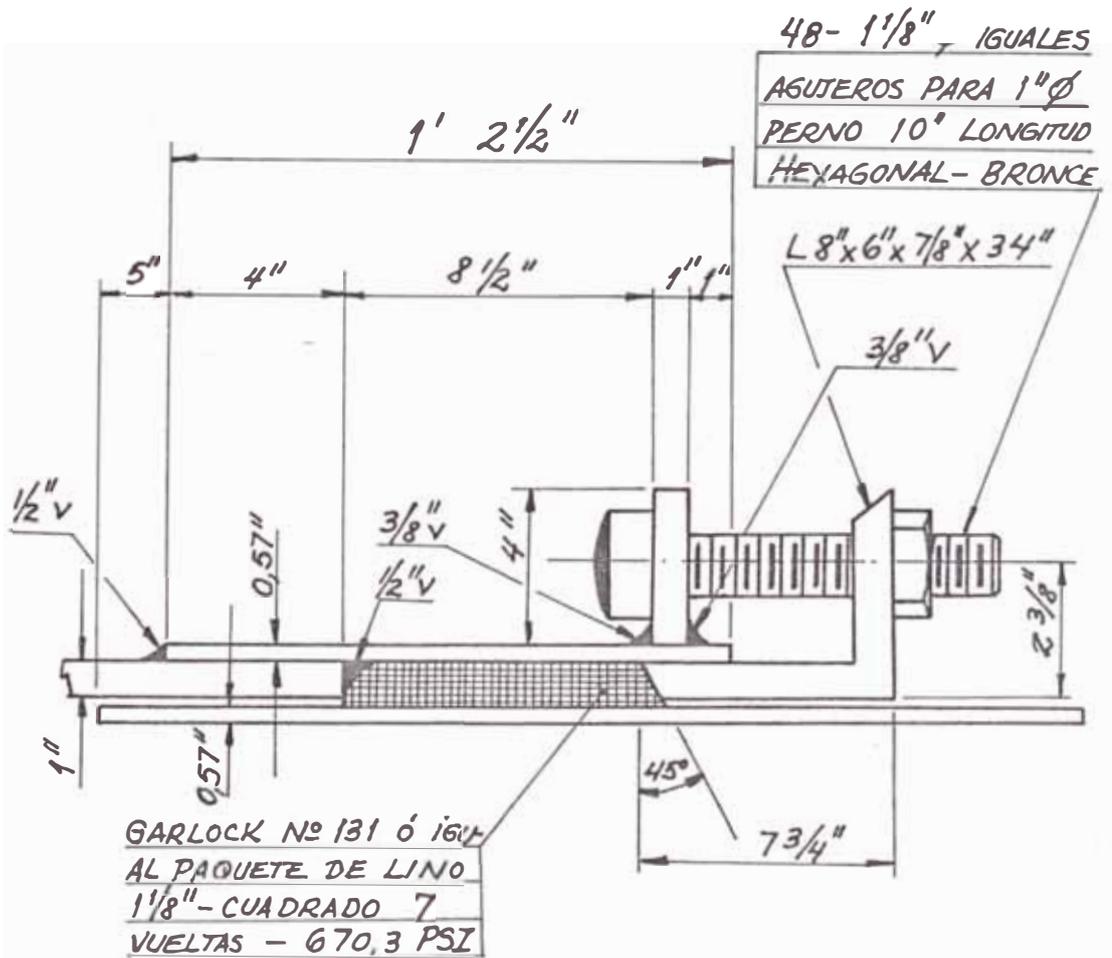


FIG. Nº 28 Junta de deslizamiento

- Junta de diafragma: Mostrada en la figura Nº 29, la misma que tiene las características siguientes:

- * Son de ligero movimiento y baja carga o altura.
- * El movimiento de la tubería está dado por la flexibilidad del acero en la junta.
- * En climas muy fríos deberán estar encajonadas o resguardadas, para prevenir el congelamiento.
- * No son recomendables para alturas mayores a los 60 m , pese a poseer rigidez necesaria pero carecer de la suficiente flexibilidad.

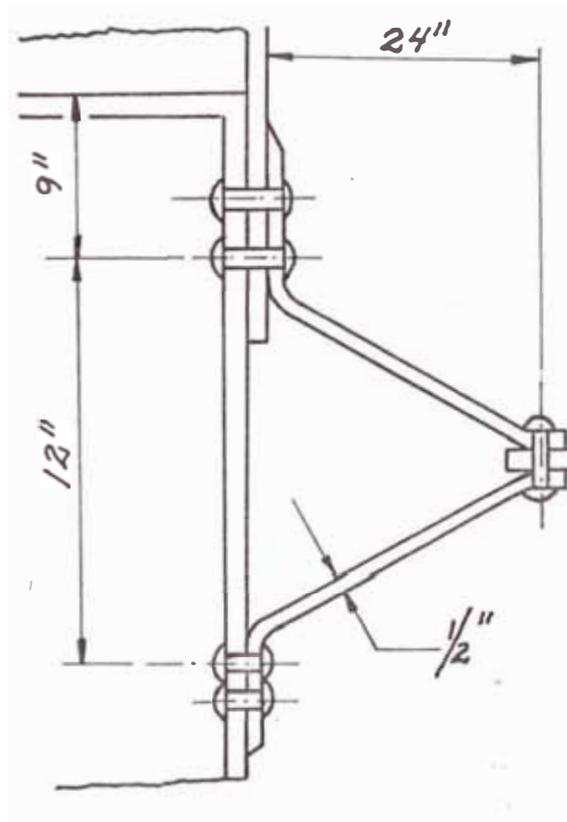


FIG. N° 29 Junta de diafragma

Se a de tener en cuenta que la expansión y contracción de la tubería de presión, debido a los cambios de temperatura, es mayor cuando ésta se encuentra vacía y sabiendo que es propensa a quedar así durante el periodo de montaje y prueba, es necesario prever tal situación.

Para el caso práctico de la tubería de Machupicchu, tenemos dos tramos, que por estar al aire libre y dada sus longitudes, deben llevar juntas de dilatación; siendo dichos tramos el BA1-BA2 y BA2-BA3, para los cuales se tiene a continuación los cálculos respectivos.

Tramo BA1- BA2

- Por tener el tramo una inclinación de $47,21^\circ$ con la horizontal (que es bastante pronunciada), tomamos en cuenta el criterio de colocar la junta de dilatación, más cercana del bloque superior es decir del BA1. (a 72523 mm del codo inferior y a 12000 mm del superior).
- Calculamos la longitud que se dilata la tubería, para verificar si es suficiente con una sólo junta:

$$(LIII) \quad L = L \times \alpha \times \Delta t$$

Donde:

L = Longitud de tramo = 74,1 m

α = Coeficiente de dilatación del acero = 0,000012
m/(m-°C)

Δt = Delta de temperatura = 40°C (17)

L = Dilatación de la tubería.

Reemplazando:

$L = 3,56 \times 10^{-2} \text{ m} = 3,56 \text{ cm}$ (Puede ser absorbida por una sólo junta de dilatación).

(17) Condición desfavorable, tubería vacía y día soleado.

- Calculamos a continuación la presión a la que se encuentra sometida la junta.

Presión estática = 17,6 m de agua

Presión de trabajo = $17,6 \times 1,2 = 21,12$ m de agua (teniendo en cuenta el golpe de ariete).

Luego el número de vueltas de estopas necesarias es:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{vueltas} \dots\dots\dots 670,3 \text{ PSI} \dots\dots\dots 472,22 \text{ m H}_2\text{O} \\ \text{cañamo o lino cuadra} \\ \text{do de } (1 \frac{1}{8}) \text{ pulg.} \end{array} \right.$

X $\dots\dots\dots$ 21,12 m H₂O

X = 0,31 vueltas.

Tomamos 1 vuelta de estopa.

Tramo BA2-BA3

- La inclinación de pendiente es de $37,42^\circ$, por lo que colocamos la junta más cercana del BA2. (a 11500 mm del anclaje superior y 137254 mm del BA3).

- Calculamos con fórmula LIII la longitud a dilatarse la tubería en el tramo:

$$L = L \times \alpha \times \Delta t = 130,27 \times 0,00012 \times 40 = 6,25 \times 10^{-2} \text{ m} = 6,25 \text{ cm}$$

(Puede ser absorbida por una sola junta de dilatación)

- La presión a que está sometida es:

Presión estática = 76,14 m de agua

Presión de trabajo = $76,14 \times 1,2 = 91,4$ m de agua

Luego el número de vueltas de estopa será:

7 vueltas	670,3 PSI.....	472,22 m
X		91,4 m

X = 1,35 vueltas.

Tomamos 2 vueltas de estopa de cañamo o lino cuadrado de $1 \frac{1}{8}$ pulg.

Con los datos anteriores obtenidos de los cálculos respectivos, se tiene determinadas las dos juntas de dilatación, las mismas que serán del tipo de deslizamiento, cuyas dimensiones y características se tiene en la parte correspondiente a planos.

3.5.6 Chimenea de equilibrio o pozo piezométrico, cámara de carga, respiradero o válvula de ingreso y salida de aire

Una central hidráulica debido a los cambios de carga que está sometida, produce variaciones en el caudal en forma instantánea y también como se vio en el ítem del golpe de ariete, éste depende de la longitud de la tubería, por lo que a de procurarse disminuir dicha magnitud.

Para garantizar el buen funcionamiento de la central y en forma particular de la tubería forzada, teniendo en cuenta el párrafo anterior, se han de instalar los dispositivos indicados en el título del ítem presente.

- Chimenea de equilibrio

Llamada también pozo piezométrico, es básicamente un cuerpo vertical en forma de recipiente o tubería, situado por encima del nivel de la captación, situada al finalizar el túnel de derivación y antes de la tubería forzada, cuya forma y capacidad deben ser los necesarios, para compensar en forma instantánea los requerimientos de caudal y reflejar como ya se dijo la onda de presión, evitando que viaje a través del túnel.

Como se tiene implícitamente en el párrafo anterior, se la utiliza en centrales cuyo túnel de derivación trabaja a presión o pelo lleno.

La alteración del régimen del movimiento del agua, en la chimenea de equilibrio se provoca una serie de oscilaciones positivas a negativas del nivel estático, las mismas que son decrecientes debido al rozamiento y otras fuerzas de amortiguamiento; dicha oscilación es sinusoidal y viene representada por:

$$(LIV) \quad T = 2\pi((L.F)/(g. f. \text{sen}\alpha))^{1/2}$$

Donde:

T = Periodo de oscilación.

L = Longitud de la galería de presión

F = Sección del pozo piezométrico.

f = Sección de la galería.

α = Angulo de inclinación de chimenea de equil.

Para calcular la altura de la chimenea de equilibrio, se a de igualar la energía cinética con la energía potencial en la misma, suponiendo que no existe pérdidas de carga a causa de la circulación del agua.

$$(LV) \quad L \cdot f \left(\frac{\Delta V^2}{2g} \right) = Z \left(\frac{F}{\text{sen} \alpha} \right) \left(\frac{Z}{2} \right)$$

Donde:

ΔV = Variación de la velocidad del agua en galería de presión. (m/s)

Z = Variación vertical del nivel de agua en chimenea de equilibrio (con respecto al nivel estático del embalse alimentador). (m)

Existen diversos tipos de chimeneas de equilibrio, como vertical simple, inclinada, con cámara de expansión, con doble cámara de expansión, diferencial, con vertedero, etc; donde cada cual tiene su fórmula LV correspondiente⁽¹⁸⁾, pudiendose calcular sus dimensiones y respectivo comportamiento.

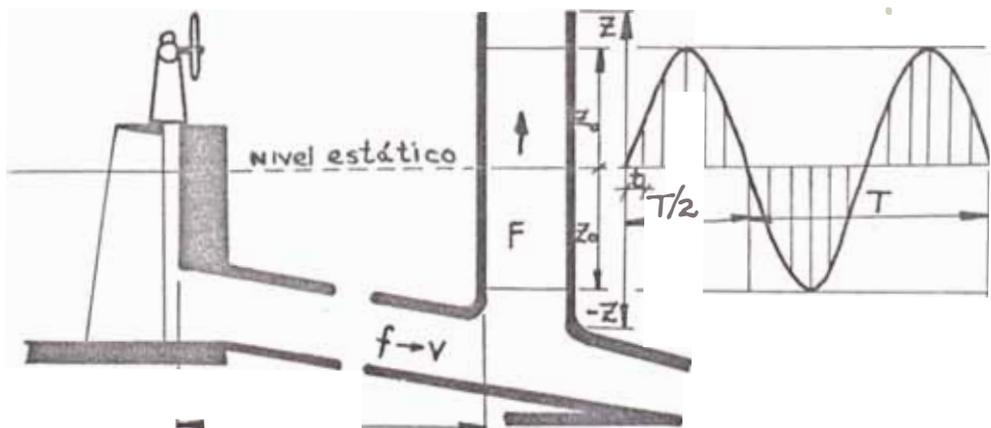


FIG. Nº 30 Pozo piezométrico vertical

- Cámara de carga (18)

Se le utiliza en centrales donde el canal o túnel de derivación trabaja a pelo libre, y viene a ser un ensanchamiento del canal, en la misma posición de la chimenea de equilibrio, cumpliendo con los requisitos de compensación instantánea de caudal y reflejo de la onda de presión.

Deberá contar con un rebose que permita sacar el excedente de agua en algunas situaciones de desordenación con la presa de derivación o embalse. También es necesario la presencia de un canal o tubería de purga en la parte más profunda, para realizar las operaciones de limpieza de lodos en forma periódica, evitándose el paso de éstos a través de tubería y turbinas.

El cálculo principal será su capacidad, que es función del tipo y tiempo de compensación, el cual puede ser total o parcial y generalmente en régimen de 24 horas al día. Se utiliza las fórmulas siguientes:

$$(LVI) \quad J = 150 t(24-t)q_a$$

$$(LVII) \quad t = 24 \cdot q/q_a$$

Donde:

$$J = \text{Capacidad de cámara de carga (m}^3\text{)}$$

- (18) Para más información consultar "Centrales hidroeléctricas" de G. Zoppetti y "Manual del ingeniero" de Hütte en Cap. II y Cap. XII-Tomo III respectivamente.

t = Tiempo que dura la punta del consumo (horas)

q = Caudal de instalación de la central (m^3/s)

q = Caudal afluyente (m^3/s)

- Respiradero o válvula de ingreso y salida de aire

La tubería forzada en situaciones como golpe de ariete negativo, en salida de central con cierre de la válvula mariposa, puede quedar con una depresión interior que aplastaría la tubería si ésta no es calculada para tal situación o en todo caso elevará el costo de la misma.

La contingencia anterior puede resolverse si se hace ingresar aire a la tubería de tal manera a igualar la presión interior con la atmosférica exterior. Esto se obtiene con la instalación del respiradero o la válvula de ingreso y salida de aire.

La salida de aire será necesaria en el llenado de la tubería. La posición del respiradero o válvula de ingreso y salida de aire es inmediatamente después de la válvula mariposa y lo que queda es determinar el diámetro de tal tubo, que en general se encuentra entre 0,3 a 0,4 veces el diámetro de la tubería en el lugar de la conexión.

En el caso de la tubería de Machupicchu se tiene los siguientes dispositivos:

- Dado que el túnel de derivación es a pelo libre, se desecha la utilización de chimenea de equilibrio y se tiene cámara de carga y respiradero. (19)

Cámara de carga

- Dado que el túnel de derivación es corto (3000 m), el tiempo que demora en llegar el agua desde la presa de derivación hasta la cámara de carga es de aproximadamente 10 minutos, tiempo suficiente para pedir el envío del agua.
- El caudal que utilizaremos será el correspondiente a 5 MW es decir de $1,78 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que la carga de punta no sube tan de golpe sino poco a poco y además considerando que es una central de aguas corrientes.

Entonces aplicando LVI:

$$J = 150(10/60)(24 - (10/60)) \times 1,78 = 1060,6 \text{ m}^3$$

OK! dado que la capacidad real es de 1089 m^3

Respiradero

- El diámetro del respiradero lo tomaremos en 1 m, el cual se encuentra en el rango establecido. ($1/2,92 = 0,34$)
- El caudal de aire será el mismo que el del agua, es decir de $23,22 \text{ m}^3/\text{s}$ a presión atmosférica.
- La posición del respiradero se muestra en los planos.

(19) Construida y proyectado con ocasión de la primera etapa.

3.5.7 Accesorios y dispositivos complementarios

Existen otros elementos constitutivos de la tubería, que sirven para su buen funcionamiento y su mantenimiento adecuado. Entre éstos tenemos:

- Rejas finas

Es conveniente colocar rejas finas o barrotes al ingreso de la tubería forzada, con la finalidad de atrapar elementos gruesos (palos, rocas), que pudieran ingresar al canal o túnel de derivación o que pudieran desprenderse de este.

Las rejillas pueden ser de diferente sección (rectangular, circular o con características hidrodinámicas), se colocan con una inclinación de aproximadamente de 60° a 75° con la horizontal, dejando una luz entre reja y reja de 2,5 a 5 cm.

- Válvula mariposa

Consiste en un disco con un eje central sobre el cual gira, es accionada por un servomotor y trabaja completamente abierta o cerrada.

Se la utiliza para centrales de gran caudal y poca altura o como en el caso de nuestras centrales, al comienzo de la tubería forzada. No es totalmente estanca.

Su acción es la de cerrarse cuando exista una contingencia importante, como la rotura de la tubería, la inundación de la casa de máquinas, así como para realizar algunos trabajos rápidos de mantenimiento, aguas abajo de ella. Posee un by-pass para el llenado de la tubería y así poder hacer la abertura de la válvula a igualdad de presión, aguas abajo y aguas arriba.

Su selección se hará en función del diámetro, presión de trabajo, tiempo de accionamiento y grado de estanqueidad.

- Detector de sobrevelocidad

Es un dispositivo colocado inmediatamente después de la válvula mariposa, con la finalidad de accionar ésta, cuando se detecte una sobrevelocidad en el flujo de agua por rotura de la tubería. El accionamiento se realiza alrededor del 20% de sobrevelocidad respecto de la nominal.

- Agujero de hombre

Como su nombre lo indica son agujeros con dimensiones suficientes para el ingreso de un hombre y herramientas, colocadas en lugares convenientes de la tubería, con el propósito de realizar inspecciones y trabajos de mantenimiento en ella cuando las circunstancias lo requieran.

Durante el trabajo normal de la tubería, los agujeros

son sellados con tapas embridadas, calculadas según el criterio de placas planas o curvas, dependiendo del caso y forma. La norma ASME -SECCION VII- Subsección A -parte UG-46, tiene en cuenta los criterios a tomar sobre los a g u j e r o s de hombre.

- Válvulas de drenaje

Es necesario colocar válvulas que permitan desaguar la tubería en ciertas circunstancias, como es la inspección de la misma para el mantenimiento preventivo o correctivo. Se instalan en la parte más baja de la tubería de modo a asegurar el desagüe completo, cuando así se re q u i e r a r a. El agua desaguada va directamente al canal de descarga.

Las válvulas son especificadas en función de la presión de servicio (normalmente se toma un % mayor a ésta), y de su diámetro que es función del caudal y a su vez el tiempo requerido para desaguar la tubería. Los diámetros usuales de las válvulas están en el rango de 3 a 8 p u l g a s.

En las tuberías importantes se colocan dos válvulas en serie, siendo una de ellas de compuerta y la otra de globo. Se coloca aguas arriba la de globo y aguas abajo la de compuerta, con el propósito de abrir y cerrar principalmente la válvula de globo en igualdad de presiones. (Se puede obviar si se cuenta con By-pass).

Para el caso de Machupicchu tenemos:

- Se tienen rejas finas al ingreso de la tubería, de sección rectangular (1,25 cm x 5 cm x 6720 mm), inclinación de 75° y material acero inoxidable.
- La válvula mariposa seleccionada es de \varnothing 3000 mm, presión de trabajo igual a 7,2 m de agua, accionamiento hidráulico para la abertura y contrapeso al cierre. (ver sección planos).
- Se tiene detector de velocidad de paleta situado después de válvula mariposa, en señal tubo N° 119, de accionamiento a 4,15 m/seg. (20% de sobrevelocidad).
- Se tiene 5 agujeros de hombre, uno después de válvula mariposa, otro al inicio del pique vertical y 3 en los colectores de los grupos. (1 en cada grupo). (ver planos).
- Al nivel del agujero de hombre del pique vertical se soldaron 2 orejas, de modo que sirvieran de soporte durante las inspecciones y trabajos de mantenimiento del pique vertical. (ver planos).
- Se seleccionaron dos válvulas de desagüe:
 - * 1 válvula de globo, marca SERGEG, en acero y con bridas- PN = 64 bar ; DN= 150 mm (3)
 - * 1 válvula de compuerta, marca MUNZING, acero y con bridas- PN = 64 bar ; DN = 150 mm (3)

(3) El diámetro nominal escogido corresponde a una descarga promedio de 0,0113 m³/s y tiempo de desagüe 65 horas. (Las características de las válvulas se encuentran en el apéndice N).

C A P I T U L O 4

F A B R I C A C I O N

4.1 Conocimiento de condiciones previas para inicio de la fabricación

Previo al inicio de la parte operativa de la fabricación de cualquier pieza y en este caso de la tubería forzada, se deben tener definidos todos los parámetros que intervienen en dicha operación, lo que corresponde a los siguientes datos.

4.1.1 Datos de diseño

Se refieren a :

- El material a utilizarse en las diferentes partes de la tubería.
- Dimensiones finales para cada parte, incluyendo diámetros, espesores, longitudes, etc, en cuya determinación intervienen las limitantes por transporte y montaje.

4.1.2 Datos limitantes por transporte y montaje

Tenemos:

- Longitud máxima

- Altura máxima.
- Ancho máximo.
- Peso máximo.

Estos datos son fruto de las características físicas y geográficas para el transporte, así como las técnicas operativas para el montaje, factores que hacen se toman ciertos limitantes a la magnitud de ciertas características.

Para la tubería de Machupicchu las dimensiones de las tuberías o virolas componentes, se encuentran especificadas en los planos. Dichas dimensiones son fruto de los siguientes limitantes:

- Longitud máxima = 6000 mm
- Altura máxima = 3600 mm
- Ancho máximo = 3600 mm
- Peso máximo = 10 TM.

Estos limitantes son debidos principalmente, al uso durante el montaje de instalaciones y equipos de la antigua central (caso del puente grúa del taller, funicular con su winche), el uso también de ambientes ya construídos (cámara de carga, edificio de mandos), así como también el uso del unico transporte para llegar hasta la central, cual es el ferrocarril (que es de trocha angosta).

4.2 Elementos de la tubería forzada

Los elementos de la tubería forzada no son otra cosa que las

diferentes partes de que está conformada y es fruto del diseño ejecutivo, desarrollado en forma previa a la fabricación, en base al cual los diferentes talleres que tienen a su cargo esta operación, proceden a la fabricación de dichas partes.

Todo este diseño ejecutivo en el que se basa la fabricación, debe estar plasmado en planos, donde se indiquen todas las medidas, acabados, formas, agujeros, etc.

Para Machupicchu las características de las diferentes partes de la tubería son mostradas en los planos correspondientes.

4.3 Tolerancias de fabricación

Tolerancia es, el margen o diferencia de lo real con lo teórico, que se conciente en la cantidad o calidad de las cosas o de las obras que se contratan. En el caso que tratamos aquí, se refiere a la tolerancia en la fabricación de las partes de la tubería, siendo las que se toman en cuenta en forma general las siguientes:

- a) Diferencia de la forma circular.
- b) Desencaje de las soldaduras oblongas.
- c) Desencaje de las soldaduras circunferenciales.
- d) Medición de saliente de soldadura.
- e) Doblegamiento de la soldadura.
- f) Tolerancia de la forma circular.
- g) Diferencia de la longitud desarrollada.
- h) Rectitud de los tubos.

- i) Espesor de paredes.
- j) Tolerancia de diámetro.

Todas estas tolerancias se encuentran normadas internacionalmente, teniendo normas conocidas como ASME, AFNOR⁽¹⁾, DIN⁽²⁾.

Las normas ASME que se utilizan estan contenidas en la SECCION VII- Subsección A-Parte UG ; Subsección B-Parte UW; Subsección C- Parte UCS y UHA.

En el caso práctico de la tubería forzada de la ampliación de central hidroeléctrica de Machupicchu, para la fabricación se adoptaron las normas de la ASME. A continuación tenemos las ecuaciones en función de la cual se verificarón las tolerancias.

4.3.1 Diferencia de la forma circular (Ver figura Nº 31)

$$\Delta h \leq \pm (2r/1000 + 20/e + 0,5) \dots\dots (LVIII)$$

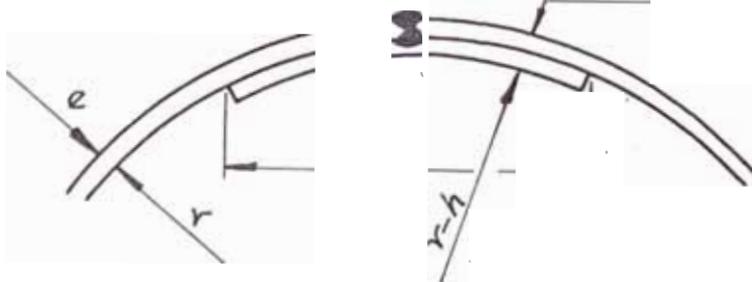


FIG. Nº 31

4.3.2 Desencaje de las soldaduras oblongas (ver figura Nº 32)

$$\text{CLASE I } ^{(3)} \quad \Delta \leq e/50 + 1 + \Delta e/2 \dots (LIX)$$

(1) Normas francesas.
 (2) Normas alemanas.

CLASE II⁽³⁾ $\Delta \leq e/30 + 1 + \Delta e/2 \dots\dots(LX)$

Δe = Diferencia de los espesores reales en el lugar de contacto.

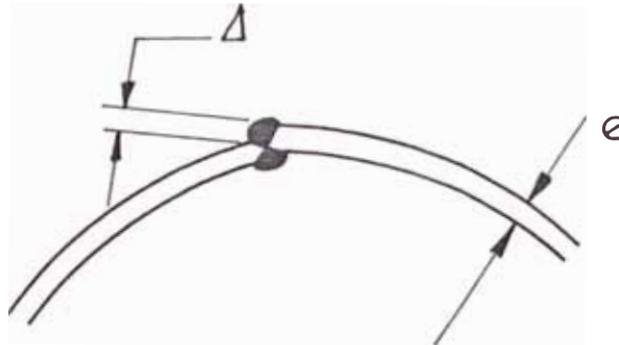


FIG. Nº 32

4.3.3 Desencaje de las soldaduras circunferenciales (ver fig. 33)

CLASE I⁽³⁾ $\Delta \leq e/50 + 2 + \Delta e/2 + \Delta P/2 \dots(LXI)$

CLASE II⁽³⁾ $\Delta \leq e/30 + 2 + \Delta e/2 + \Delta P/2 \dots(LXII)$

ΔP = Tolerancia del perímetro, según ecuación de diferencia de longitud desarrollada.



FIG. Nº 33

4.3.4 Saliente de soldadura (ver figura Nº 34)

(3) Referente a la soldadura, explicado en 4.4.3 .

CLASE I $\delta \leq 1 + (3/100)(e + i) \dots (\text{LXIII})$

CLASE II $\delta \leq 2 + (e + i)/20 \dots (\text{LXIV})$

i = Intersticio teórico entre las aristas de márgenes de las chapas.

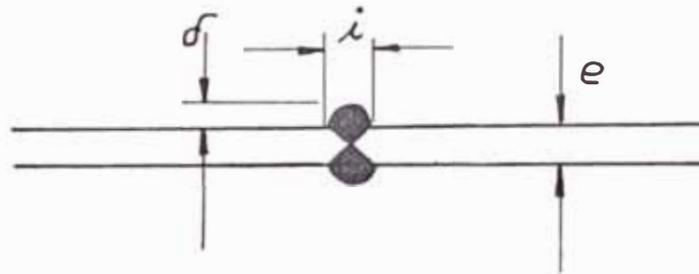


FIG. Nº 34

4.3.5 Doblegamiento de la soldadura (ver figura Nº 35)

CLASE I $\delta \leq (e + i)/100 \dots (\text{LXV})$

CLASE II $\delta \leq (e + i)/50 \dots (\text{LXVI})$

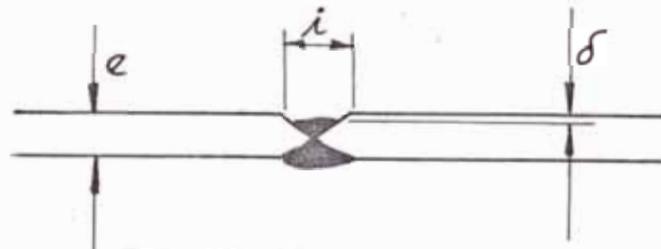


FIG. Nº 35

4.3.6 Forma circular (ver figura Nº 36)

$h \leq (2r/1000 + 20/e + 0,5) \dots (\text{LXVII})$

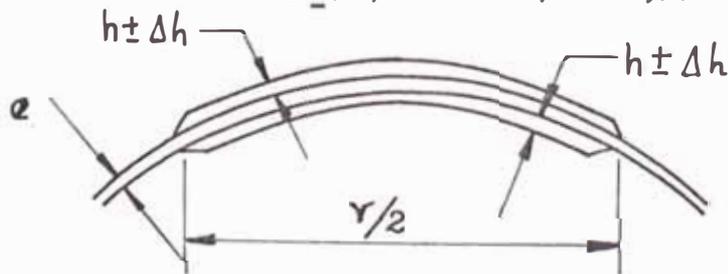


FIG. Nº 36

4.3.7 Diferencia de la longitud desarrollada

$$\Delta P \leq (2\gamma/1000 + 2\pi(e_{\text{real}} - e_{\text{teórico}}) + 4) \dots(\text{LXVIII})$$

4.3.8 Rectitud de los tubos (ver figura N° 37)

$$\Delta f \leq 2L/1000 \dots \dots \dots (\text{LXIX})$$

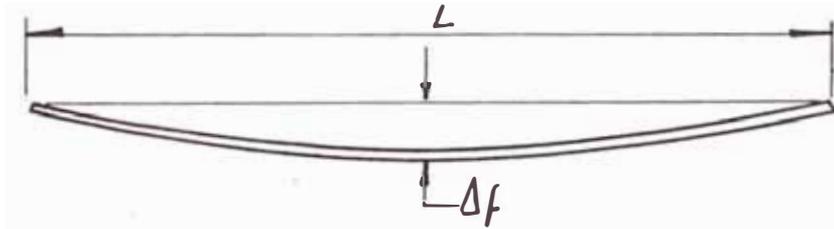


FIG. N° 37

4.3.9 Espesor de paredes

Según tolerancia de la fábrica metalúrgica.

4.3.10 Tolerancia de diámetro

Según la tolerancia de la forma circular y desencaje.

4.4 Fabricación propia

Es la real fabricación de la tubería en las diferentes piezas o partes en que se la diseño, refiriéndose específicamente a todas las actividades que se dan en los talleres.

Se debe tener en cuenta que entre las piezas a fabricar, dadas sus características, habrá las que se hacen a partir de planchas de acero y las que necesariamente son por fundición.

4.4.1 Calderería

Es la parte de la fabricación en que se realiza sobre las planchas provenientes de la metalurgia, el trazo y el corte de las mismas, de acuerdo al desarrollo de las piezas tubulares, de manera a conformar las diferentes partes de la tubería.

Se han de tener en cuenta los procesos posteriores, el tipo de soldadura a utilizar, algún tipo de unión especial etc, de manera a obtener la pieza, con la forma y tolerancias deseadas e indicadas.

4.4.2 Rolado

Proceso posterior a la calderería que se caracteriza , por la dación de la curvatura deseada a las planchas de acero, de manera a unir mediante soldadura (tanto longitudinal como transversal), obteniendo la parte de tubería deseada.

Todo este proceso se realiza en la máquina llamada, Rola o roladora, cuya determinación de tamaño es función del espesor de plancha a tratar y del diámetro de tubería a conformar.

4.4.3 Soldadura

Proceso en la fabricación mediante el cual se unen las planchas ya roladas, para darles la forma definitiva y per

manente, es decir la tubular con las dimensiones deseadas. También se aplican puntos o cordones de soldadura , en la fijación de otros elementos de los tubos, como son las bridas, refuerzos fijos, refuerzos para transporte, perfiles de apoyo, etc.

A pesar de existir otros tipos de uniones (remaches, embridado), las excelentes características de la soldadura han desplazado a estas otras formas de unión casi en su totalidad, utilizándose el embridado sólo en las partes donde se desee realizar desmontajes periódicos.

Para lograr buenas soldaduras, es decir aquellas que posean uniformidad, seguridad y excelencia, la mayor parte de tuberías es diseñada, fabricada e instalada, así como probada, bajo uno o más códigos establecidos por sociedades, asociaciones y normas internacionales, tales como:

- * Instituto Americano de Petróleo (API).
- * Instituto de Normas de los E.E.U.U de América (USASI).
- * Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).
- * Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM).
- * Sociedad Americana de Soldadura (AWS).
- * Asociación Francesa de Normas (AFNOR).
- * Instituto de Normas Alemanas (DIN)

Para realizar una soldadura, debe en primer lugar indicarse la norma o normas bajo la que se esté trabajando. Dichas normas establecen normalmente los siguientes requisi-

tos:

Primero: Debe especificarse el procedimiento exacto de la soldadura, que incluya:

- Material a ser soldado.
- Tipo y tamaño de los electrodos.
- Contorno y grado de bisel en los bordes.
- Dirección de la soldadura.
- Cantidad de corriente (Amperios), si es necesario.
- Tipo de corriente (corriente alterna C.A; corriente directa C.d; corriente directa polaridad normal C.d.p.n).
- Respaldos o anillos de enfriamiento cuando son necesarios.
- Temperatura del material en la vecindad de la unión a soldar.
- Tratamiento térmico después de soldar, cuando es necesario.

Segundo: Conciérne al soldador en sí mismo, una vez que el fabricante o contratista a establecido, experimentado y aprobado el procedimiento, usando uno de los códigos existentes o su propia variación.

Cada soldador debe calificar demostrando su habilidad para ejecutar soldaduras aceptables, usando el mismo sistema descrito en las normas del procedimiento de calificación. Sólo entonces es el soldador certificado para hacer soldaduras en los materiales y en la posición indicadas en el procedimiento de calificación.

Existe la tendencia a aceptar el término de "soldador certificado", a aquel que puede realizar soldadura, en cualquier material soldable, de cualquier grueso y en cualquier posición. Esto es incorrecto pues un soldador certificado es aquel que a sido encontrado hábil, para efectuar soldaduras específicas bajo condiciones prescritas.

La responsabilidad por la ejecución de la tubería, posición, colocación de las soldaduras y la respectiva técnica de ejecución, es siempre del proveedor.

Tercero: El conocimiento del régimen de distribución de esfuerzos y del valor de los mismos en los respectivos lugares, determina la clase y las características de los empalmes soldados.

La tubería de distribución, las piezas formadas, las partes sometidas al estado tensional, biaxial, triaxial y las partes donde no se puede determinar las tensiones con la precisión necesaria, pertenecen a la CLASE I; y las partes donde el material está determinado con precisión, el control de la producción está debidamente ejecutado, pertenecen a la CLASE II.

Las tuberías forzadas generalmente están incluidas dentro de estas dos clases de soldadura. La selección de la calidad de las soldaduras depende de:

* Modo de cálculo.

* Calidad del material empleado.

* Ejecución de la soldadura.

En el caso de las tuberías forzadas, hay que tener especial atención en las soldaduras longitudinales y circunferenciales, ya que transmiten las mismas cargas que la construcción fundamental, por lo que generalmente se exigen para las soldaduras los mismos valores de seguridad que para el material básico.

En general las características del metal de la soldadura, tienen que corresponder en las soldaduras longitudinales por lo menos a las características del material básico y para las circunferenciales cuya tensión principal se efectúa a lo largo de la soldadura, con alargamiento unitario mayor que el usado en el material básico, puede tener el límite de fluencia y la resistencia a la ruptura un poco inferior. Los valores de resiliencia de la última capa y de la raíz de la soldadura corresponde a la del material básico.

La forma y ejecución de las aristas para la unión de la soldadura, está condicionada por el espesor de la chapa, condiciones de funcionamiento, agrupamiento de talleres, así como por el proceso aprobado para realizar la soldadura.

La unión de elementos de espesor desigual, será realizada preferentemente en talleres, las transiciones serán graduales y la inclinación no será mayor al 20%.

La preparación de las aristas para la soldadura, debe

realizarse por corte a máquina, con llama o cizallamiento, arreglando finalmente por afilado.

Para el caso de nuestra aplicación práctica se han tenido en cuenta las siguientes normas:

- * NF-A 81-309 " Electrodo^s metálicos para soldadura eléctrica manual por arco".
- * NF-A 88-010 " Posiciones fundamentales de ejecución de soldadura y definición de ángulos de rotación e inclinación para soldaduras rectilíneas ".
- * NF-A 88-110 " Calificación de soldadores y de operadores ".
- * ASME sección IX

4.4.4 Pruebas realizadas durante la fabricación

Se a de tener en cuenta que durante la fabricación, se tienen pruebas que van dirigidas al proceso mismo, como es el caso de las pruebas realizadas a las soldaduras, pero hay aquellas previas a la fabricación y se refieren a los materiales.

El material necesario para iniciar la fabricación debe ser de buena soldabilidad, por lo que deberá ser limitado el contenido de carbono y la correlación entre manganeso y carbono.

La prueba de tracción mínima para la barra de prueba de la muestra ⁽⁴⁾, tomada a través de dirección de laminación, se recomienda según el acero no menor de 17 a 22 %. El ensayo de resiliencia según el ensayo Charpy V a -10°C, no debe ser menor a 6 Kg/cm² ⁽⁴⁾. El contenido máximo de fósforo y azufre no debe ser mayor a 0,04%. ⁽⁴⁾

a) Ensayos de material

Para la determinación y verificación de las características del material de chapas, son controlados los valores del material empleado, según normas utilizadas.

a.1) Análisis químico

Se refiere al contenido máximo de C, Si, Mn, P, S y eventualmente los demás elementos de aleación en el caso de aceros aleados, tanto para cada colada como para muestras tomadas de las chapas.

a.2) Características mecánicas

Se verifica:

- Límite de resistencia máxima de tracción.
- Límite de deslizamiento para cada espesor de material utilizado.

(4) La barra de tracción tiene diferentes dimensiones según la norma utilizada. En ensayo Charpy tiene sus equivalentes en las diferentes normas. El contenido de fósforo y azufre máximo es según AFNOR y ASTM.

- Tracción.
- Resilencia.
- Valores de la prueba de flexión con cordón de soldadura.
- Determinación eventual de la NDT temperatura. (NIL DUCTILITY TRANSITION).

Los ensayos del material se efectúan en las siderúrgias, en fábricas laminadoras y en los talleres del productor de la tubería. Se exige:

En fábricas laminadoras

- Ensayo de calidad y forma en superficie, dimensiones dentro de la tolerancia exigida por la norma.
- Ensayo por ultrasonido para descubrir los errores de la laminación y el redoblamiento de chapas en las de mayor espesor, dentro de los límites establecidos.
- Ensayo de composición química del material de la chapa, de todas las coladas, donde cada chapa deberá llevar el número de colada, número de chapa, marca del productor, señal de calidad y signo del inspector.

Cada uno de los productos laminados son sometidos a ensayos del material, tomando muestras de la cabeza y el pie de la añadidura laminadora.

Del centro de la parte de cabeza

- * Ensayo de tracción de una muestra aplastada, transver-

sal de la dirección de laminación.

- * 3 ensayos Charpy de la resiliencia Charpy V a - 20°C de una muestra tomada horizontalmente a la dirección de laminación.
- * Ensayos de tracción de una muestra con cordón de soldadura.

Del centro de la parte del pie

- * Ensayo de tracción igual que en la parte de cabeza.

En talleres del productor de la tubería

Los ensayos de control de las características químicas y mecánicas garantizadas, deben ser efectuadas para todos los espesores de chapas o por lo menos para cada 15 TM de chapas. Deben ser realizados por lo menos los siguientes ensayos:

- Análisis químico.
- Ensayo de tracción de muestra tomada perpendicularmente a la dirección de laminación de la chapa en el estado de entrega.
- 3 ensayos de resiliencia Charpy V en el estado recibido a - 20°C de muestra tomada en dirección de laminación.
- 3 ensayos de resiliencia DVM⁽⁵⁾, en el estado después del envejecimiento (10%, 250°C, 30 minutos), a 0°C.
- Ensayo de flexión de muestra tomada perpendicularmente a

(5) Usadas normalmente en Alemania y Hungría.

dirección de laminación.

- Diagrama del descenso de la resiliencia en función de la temperatura, de la muestra DVM.
- Diagrama de descenso de la resiliencia al impacto en función de la muestra Charpy V.
- Ensayo de flexión con cordón de soldadura o ensayo NDT , para las chapas de 20 mm de espesor y mayores.

Para el caso de muestra aplicación práctica, se han utilizado las normas siguientes:

- * NF-A 35-501 " Acero de construcción para uso general- Composición y calidades "
- * NF-A 36-201 " Productos Siderúrgico- Tuberías en aceros de alta elasticidad, para la construcción soldada- Composición y Calidad ".

b) Ensayos de la soldadura

Los ensayos deben ser ejecutados para los diferentes espesores de chapas, calidades del material básico y adicional y proceso utilizado.

b.1) Control de material básico

Para CLASE I y CLASE II, según los ensayos de material anteriormente descritos.

b.2) Control de soldadura

- Control del proceso, número de ensayos, aprobación del proceso de soldadura.

* CLASE I: 1 EC⁽⁶⁾
* CLASE II: 1 EN⁽⁶⁾

- Control de la producción, número de ensayos.

* CLASE I: 1 ensayo para 150 m de longitud de soldadura.

* CLASE II: 1 ensayo para 300 m de longitud de soldadura.

b.3) Ensayos por rayos X y por ultrasonido

- Alcance mínimo del control a lo largo de la soldadura (si es posible), en caso de uso de ultrasonido se añade ensayo por rayos X, para x % de longitud de soldadura.

* CLASE I: 100% x = 20%⁽⁷⁾
* CLASE II: 20% x = 5%⁽⁷⁾

- Resultados.

° Grietas o soldaduras imperfectas:

* CLASE I: Prohibido.
* CLASE II: Prohibido.

(6) Ver EC (ensayos completos y EN (ensayos normales)

(7) Valores no se refieren a los controles después de retoques. Si son frecuentes los defectos, aumenta el alcance del control, en caso no sea verificado ningún defecto en control, el alcance propuesto puede reducirse al 50%.

° Permeabilidad:

* CLASE I: Prohibida.

* CLASE II: Prohibida.

° Otros defectos (inclusiones, redoblamientos, burbujas, etc).

Tanto para Clase I y Clase II, según las normas acordadas y aceptadas con anticipación.

Para el caso de nuestra aplicación práctica se han utilizado las siguientes normas:

* ASME- SECCION VII- Subsección B (UW-51; UW-52; UW-18 UW-36; UW-17; UW-37; UW-35; UW-38; UW-31; UW-11; UW-53), Apéndice XII (U).

* NF-A 04-305 " Ultrasonido "

b.4) Ensayos de características mecánicas de la soldadura.

- Límite de fluencia y resistencia máxima:

Igual que para el material básico.

- Tracción:

Igual que para el material básico.

- Resiliencia:

La medida en piel y corazón por una parte y en la zona de transición por otra, será igual

para el mismo tipo de probeta, el valor mínimo presentado por el constructor, 20°C más bajo para el material de base en el estado de entrega.

b.5) Control del aspecto de soldadura

Según las tolerancias (Ver chequeo de soldaduras en el párrafo 6.1).

c) Ensayos mecánicos en soldaduras

c.1) EC- Ensayos completos (Muestra 400x900 mm)

- Ensayo del 100% por rayos X y ultrasonido.
- Ensayo de tracción, muestra con paredes paralelas.
- Ensayo de tracción, muestra recortada con diámetro circular.
- Ensayo ampliado de flexión con soldadura.
- Ensayo de tracción del metal de soldadura (muestra circular).
- Serie de ensayos para la determinación del descenso de la resistencia al impacto en la superficie y en el centro de la soldadura.
- Ensayo de la resistencia al impacto en la zona de transición de la soldadura y el material básico. (3 muestras).
- Variación de la dureza (metal básico, zona de la transición, soldadura).
- Análisis químico del metal de soldadura.

- Ensayos macroscópicos.
- Ensayos microscópicos (chapa, zona de transición, soldadura).
- Eventualmente los ensayos NDT.

c.2) EN- Ensayos normales (Muestra 400x900 mm)

- Ensayos del 100 % por rayos X y ultrasonidos.
- Ensayos de tracción, muestras con paredes paralelas.
- Ensayo de tracción, muestra recortada con diámetro circular.
- Ensayo ampliado de flexión con cordón de soldadura.
- Ensayos de la resistencia al impacto. (3 muestras de la superficie, 3 muestras del centro en cuanto el espesor de chapa lo permita, 3 muestras de zona de transición).
- Ensayo macroscópico. (Las muestras para los ensayos de la resistencia al impacto, se toman una sobre otra verticalmente a la superficie de la chapa, según la figura N° 38.

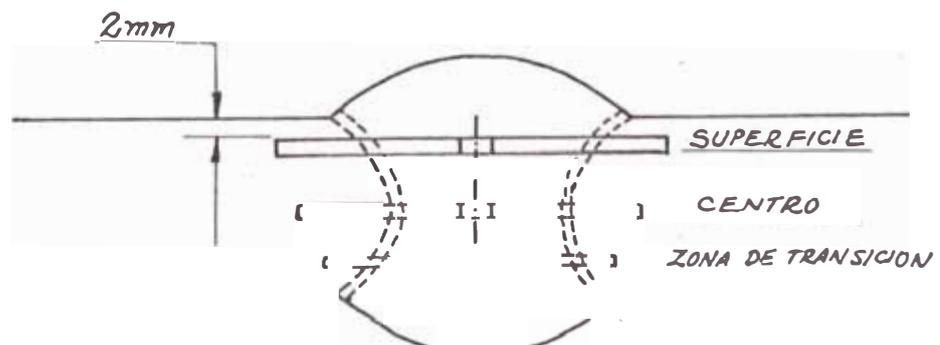


FIG. N° 38

En la tubería de Machupicchu se usaron:

- * NF-A 03-151 " Límite elástico aparente y límite elástico convencional".
- * ASME-SECCION-VII-Subsección A-Parte UG y Subsección B-Parte UW.

4.4.5 Fundición

En toda tubería forzada siempre existen piezas conformantes de ella, que deben necesariamente realizarse por el proceso de fundición, en razón de la forma y otras características de la pieza, como es el espesor.

Estas piezas son generalmente las que se encuentran desmenuadas en la casa de máquinas, los pantalones de distribuidor y los colectores o caracoles de las turbinas, además de algunas otras que son especiales.

Las tolerancias para las piezas realizadas por fundición son las mismas que las exigidas para las piezas realizadas a partir de piezas laminadas, pues el trabajo que realizan es el mismo y en algunos casos de mayor envergadura.

Igualmente las pruebas realizadas son las mismas:

- * Ultrasonido y rayos X en toda la superficie.
- * Ensayos de composición química para cada colada.
- * Ensayos mecánicos, etc.

Para el caso de Machupicchu, las piezas fabricadas por

fundición son:

Tubo señal 4, tubo señal (Pantalones de distribución a los grupos N^o 3 y 4).

* Manguitos de unión tubería de distribución a válvulas esféricas, en los tres grupos.

* Todas las piezas de los colectores de los grupos.

Las normas utilizadas para fabricación y pruebas son iguales a las utilizadas en el caso de piezas conformadas de planchas laminadas.

4.5 Transporte de taller a obra

El recorrido desde los talleres de fabricación hasta la obra misma, puede ser corto o largo, dependiendo de factores como envergadura de la obra, ubicación de talleres, ubicación de la central, etc.

Estos tres factores hacen por ejemplo que el taller esté ubicado en la misma central (por transporte o por la gran envergadura de la obra, como las grandes centrales del Brasil), o estar situado tan lejos como otro país o continente (debido principalmente al financiamiento externo con condiciones de contrato y a la no existencia del material, como Machupicchu, Charcani V etc).

El transporte desde siderurgia hasta talleres se realiza en forma de planchas, por lo que es de fácil conducción, sin embargo una vez realizada la tubería en los talleres, en unidades como virolas, tubos y algunas otras formas, el transporte a obra

se realiza en unidades automotrices, por barco, avión, ferrocarril, teniendo cuidado de cumplir ciertos requerimientos.

Las piezas que dado su fragilidad, tamaño, etc, como la válvula mariposa y las juntas de dilatación, deberán estar embaladas convenientemente de manera a garantizar, que a su llegada a obra no hayan sufrido deterioro.

Las virolas, tubos, que por su estructura no necesitan estar embaladas, deben ser transportadas colocando perfiles metálicos en sus extremos, de tal manera a garantizar su forma durante el transporte, evitando la posible ovalización. (ver figura Nº 39).

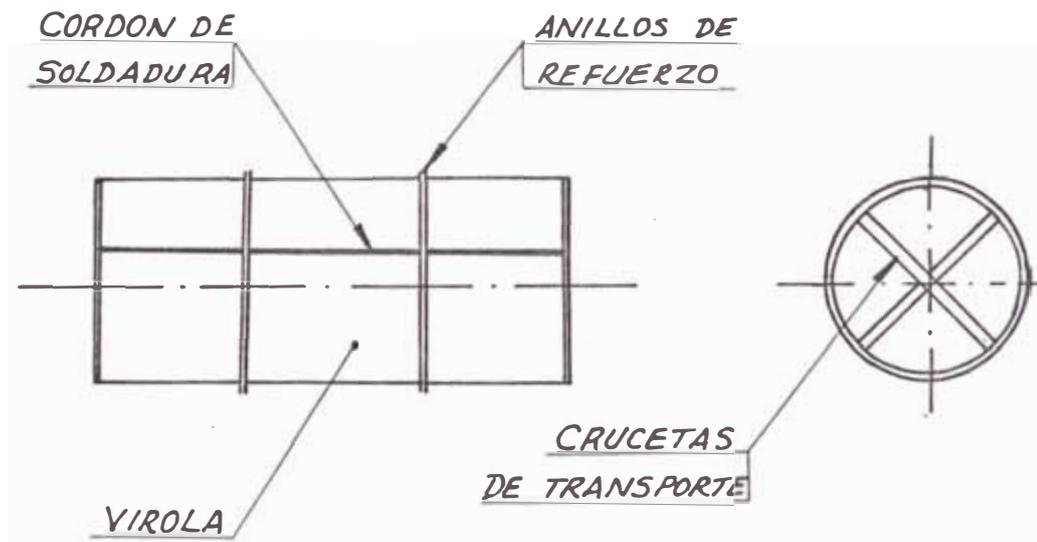


FIG. Nº 39 Refuerzos para el transporte

C A P I T U L O 5

M O N T A J E

5.1 Formas de unión de partes de la tubería

Las formas de unión más comunes son las siguientes:

5.1.1 Chaflanes para soldaduras circulares en los extremos de los tubos

- a) Chaflan tipo "V" : Utilizado generalmente para tubos del blindaje hormigonado horizontal. (ver figura Nº 40).

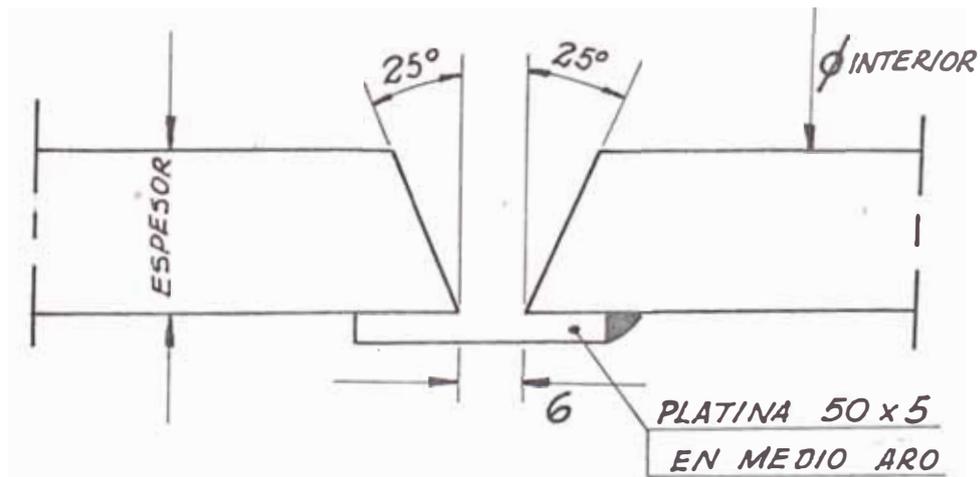


FIG. Nº 40

- b) Chaflan tipo "W" : Utilizado para los tubos del blindaje hormigonado vertical. (ver fi

gura N^o 41).

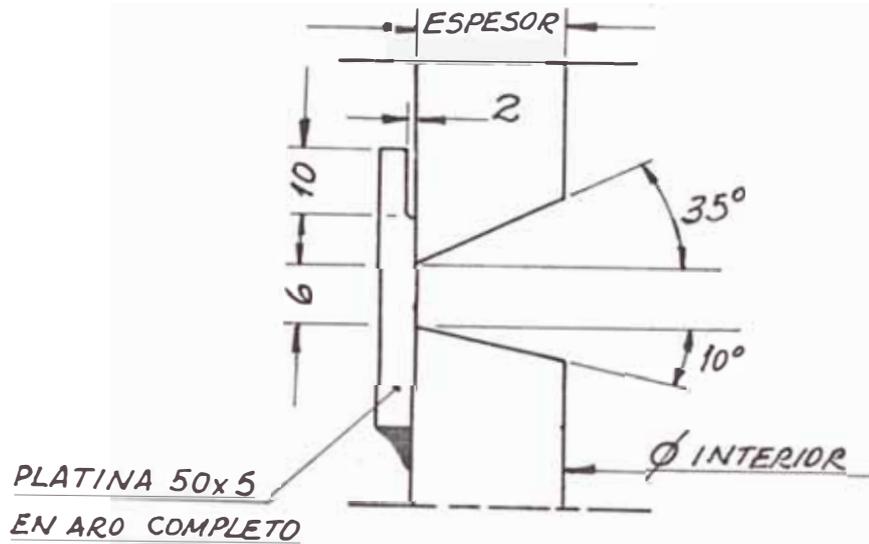


FIG. N^o 41

- c) Chaflán tipo " X " : Usado para tubería al aire libre.
(ver figura N^o 42)

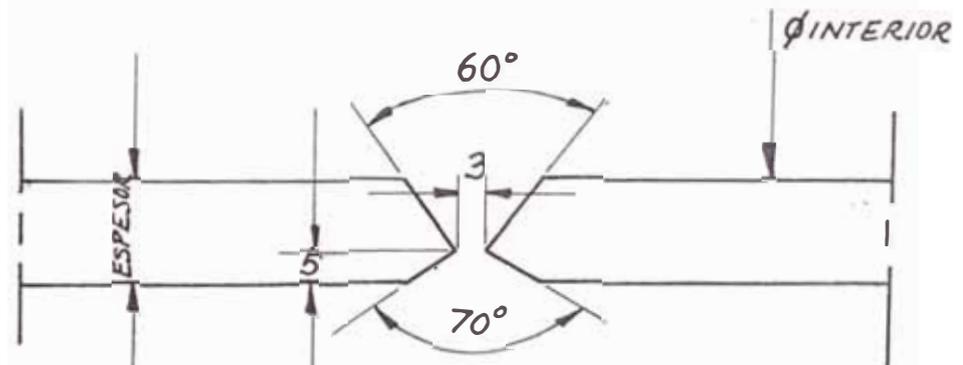


FIG. N^o 42

- d) Chaflán tipo " Y " : Usado en codos , cambios de dirección. (ver figura N^o 43).
- e) Chaflán tipo " Z " : Usado para los tubos de las tuberías de repartición. (ver figura N^o 44).

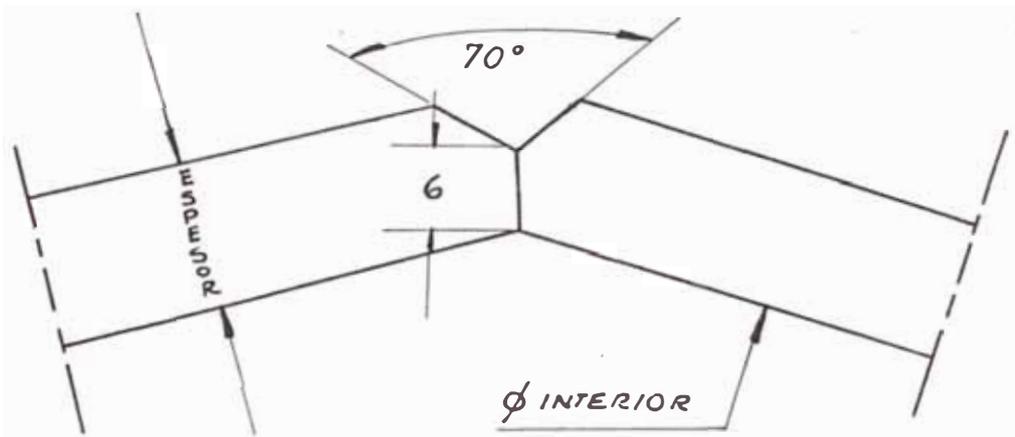


FIG. Nº 43

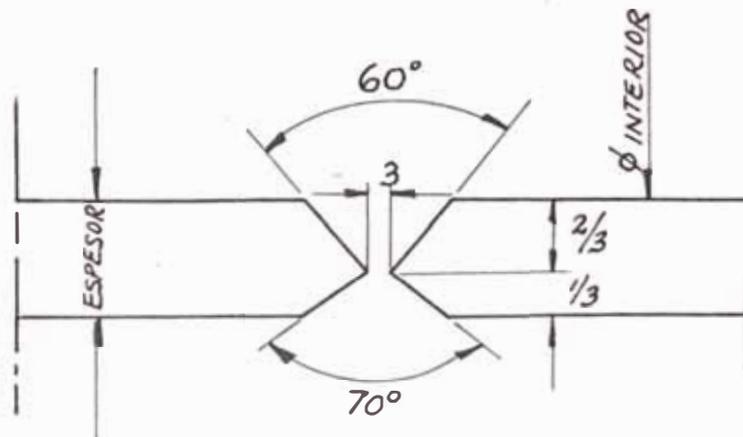


FIG. Nº 44

f) Detalle de soldadura de angulares de refuerzo. (ver figura Nº 45)

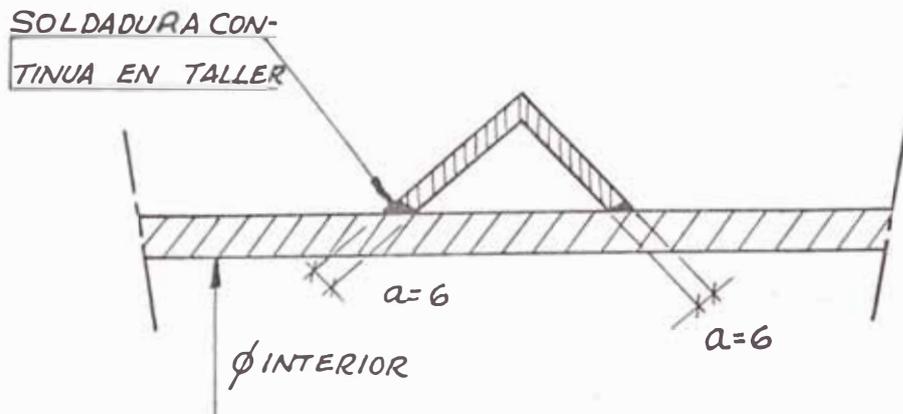


FIG. Nº 45

g) Detalle de embridado de juntas de dilatación (ver figura N^o 46).

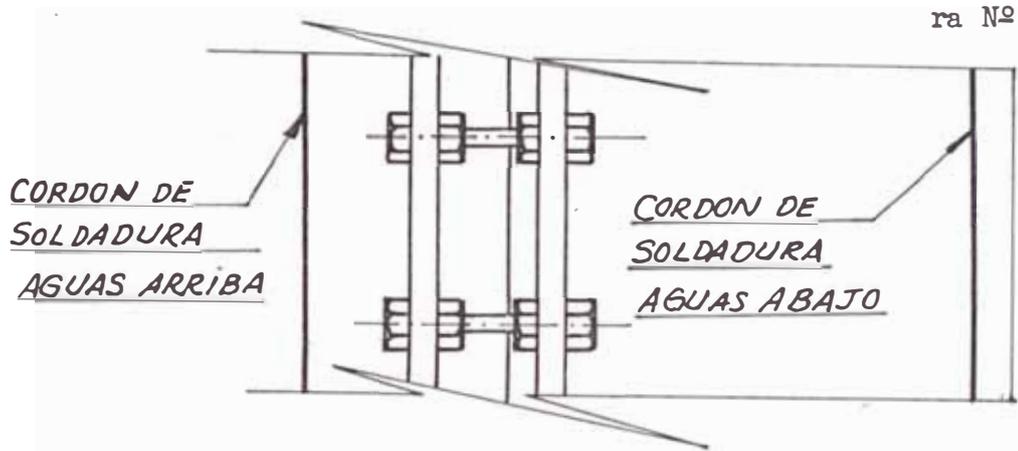


FIG. N^o 46

h) Detalle de embridado para desmontaje de válvula mariposa. (ver figura N^o 47)

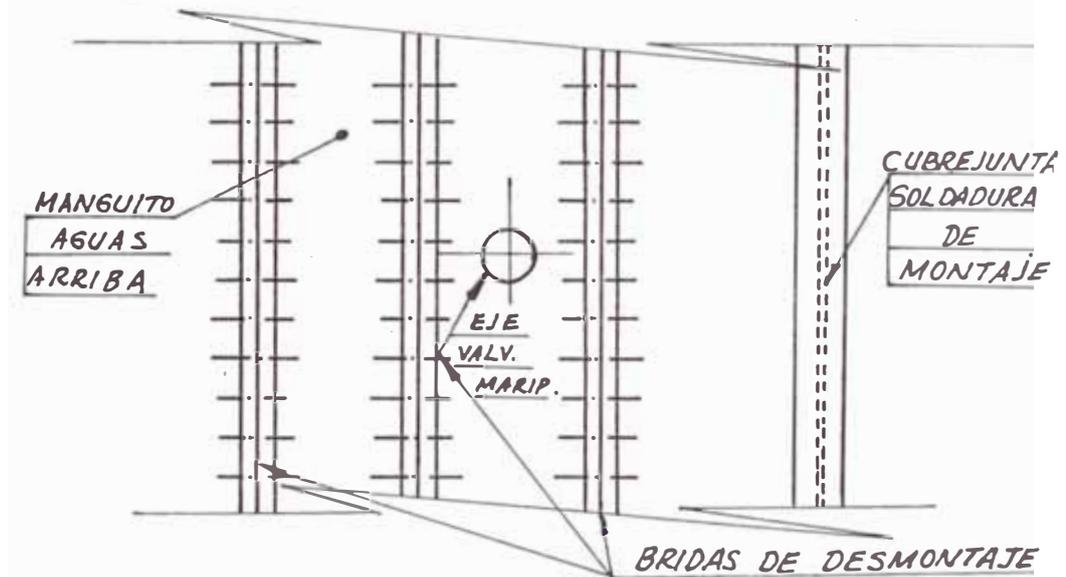


FIG. N^o 47

5.2 Transporte de partes de tubería

Aquí nos referimos a la forma en que se transporta, los diferentes tubos y equipos, desde el lugar de almacenamiento o taller en obra, hasta su emplazamiento final.

5.2.1 Equipos y maquinaria utilizada

Como cada proyecto es distinto de otro, la maquinaria y equipo utilizado durante el montaje de la tubería será distinto, sin embargo se puede enumerar alguna relación de equipo que con mayor frecuencia se utiliza:

- Para transporte horizontal se emplea generalmente un vehículo automotor, sobre ruedas neumáticas (camión) o ruedas metálicas sobre rieles (vagón).
- Para cargar y descargar de la plataforma del vehículo automotor, se necesita una grúa o pluma.
- Para el transporte vertical de gran altura se usa el cable y winche.
- Para el transporte inclinado de gran pendiente, se utiliza generalmente una combinación de vehículo automotor o no y un sistema cable-winche. (El cable winche debe tener sus respectivas poleas).

Para el caso de la tubería de Machupicchu, se utilizó el siguiente equipo:

- 1 grúa Modelo 20 PPM-fabricación francesa.
 - * Altura máxima= 18 m
 - * Capacidad = 20 TM
 - * Radio de acción máximo = 15 m
- 1 carro automotor sobre ruedas metálicas
 - * Marca: PATRICK

- * Capacidad = 20 TM
- * Ancho de vía = 914 mm
- * Velocidad máxima = 6 Km/hora
- * Dimensiones de plataforma = 2,30m x 6m

- 1 carro sobre ruedas metálicas (para pendientes), halado por un sistema cable-winche-poleas (FUNICULAR)

- * Capacidad máxima = 10 TM
- * Ancho de vía = 914 mm
- * Fabricación e implementación de la primera etapa de la Hidroeléctrica de Machupicchu.
- * Operación: Manual

- 1 carro de montaje sobre ruedas metálicas con gatas hidráulicas de nivelación.

- 1 sistema de viga-tecle, para colocar los tubos y piezas de carro funicular hasta carro de montaje.

- * Capacidad = 10 TM
- * Operación = Manual.

- 1 winche con sistema de poleas para bajar el carro de montaje con los tubos, hasta la posición final de los mismos.

- * Capacidad = 10 TM
- * Longitud de acción = 260 m

- 1 winche con poleas y pórtico para bajar los tubos hacia pique vertical.

* Capacidad= 10 TM

* Longitud o altura de acción = 190 m

- 1 puente grúa de taller de mantenimiento de antigüa central.

* Capacidad = 30 TM

* Luz = 9 m

* Longitud = 25 m

* Altura máxima = 30 m

- 1 carro con ruedas metálicas, halado por vehículo automotor (Montacargas), sobre rieles en galería horizontal de comunicación entre casa de máquinas nueva y antigüa.

* Capacidad = 20 TM

* Ancho de vía = 1340 mm

* Dimensiones de plataforma= 2,30 m x 4 m

- Sistema de rieles en:

* Galería horizontal, comunicación ambas casas de máquinas. (75 lb/yarda)

* En plano inclinado de funicular (75/yarda).

* En plano de trazo de la nueva tubería forzada, para bajar tubos sobre carro de montaje. (75 lb/yarda).

- 1 TIRFOR para halar carro en casos necesarios.

- 1 ascensor para transporte de personal en pique vertical.

* Capacidad = 4 personas

5.2.2 Diagramas de flujo de los recorridos a utilizar

En todo montaje de tubería forzada generalmente existen más de un camino de transporte o recorrido, para llevar tubos y piezas hasta el lugar de posicionamiento final, dependiendo en gran medida de la ubicación, del tamaño de esa pieza o por el mismo avance del trabajo.

Las diferentes partes de la tubería o posiciones de la misma, que indican generalmente los diferentes recorridos, son:

- Tubería al aire libre.
- Tubería empotrada en pique vertical.
- Tubería empotrada en galería horizontal.
- Tubería del distribuidor, etc.

Para el caso de Machupicchu los diferentes recorridos tomados en el montaje son:

a) Tubería al aire libre

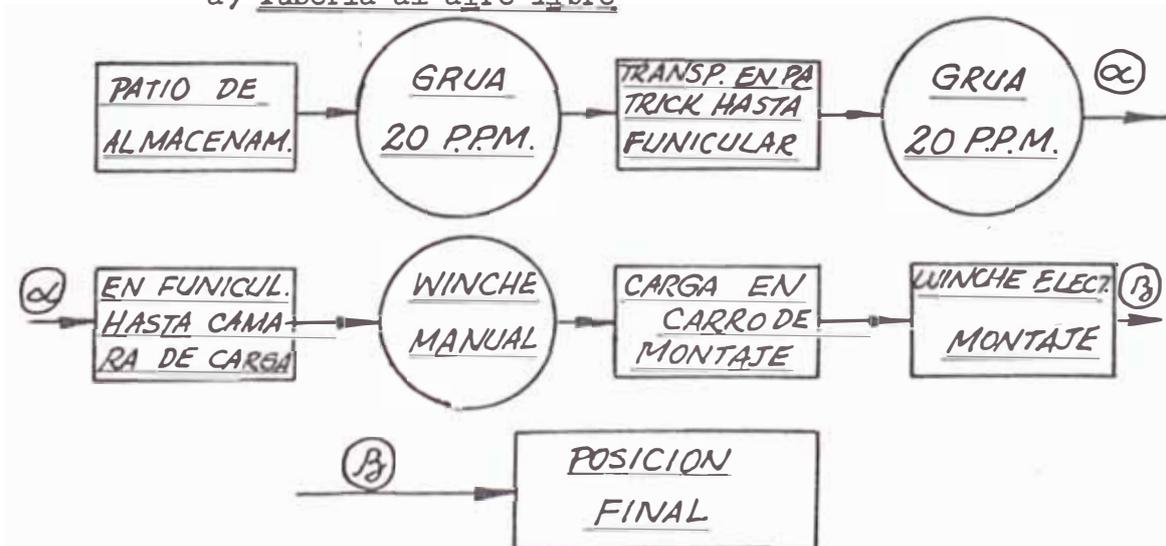


DIAGRAMA Nº 1

b) Tubería empotrada en pique vertical

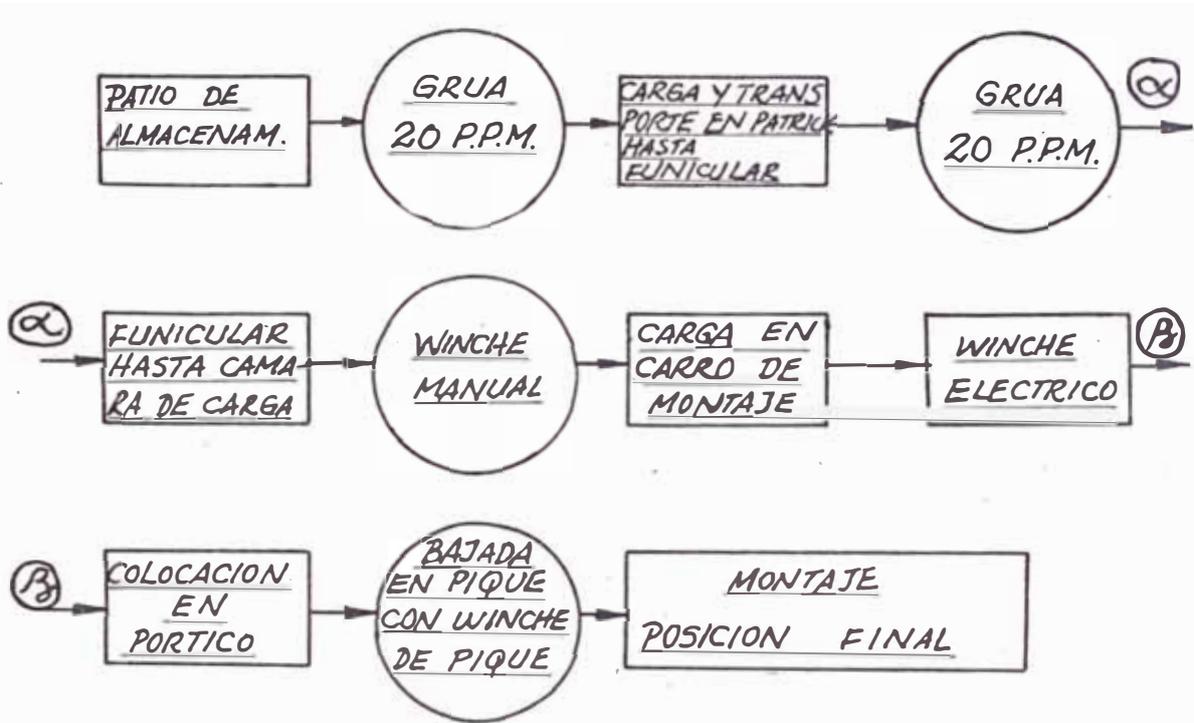


DIAGRAMA Nº 2

c) Tubería empotrada en galería horizontal

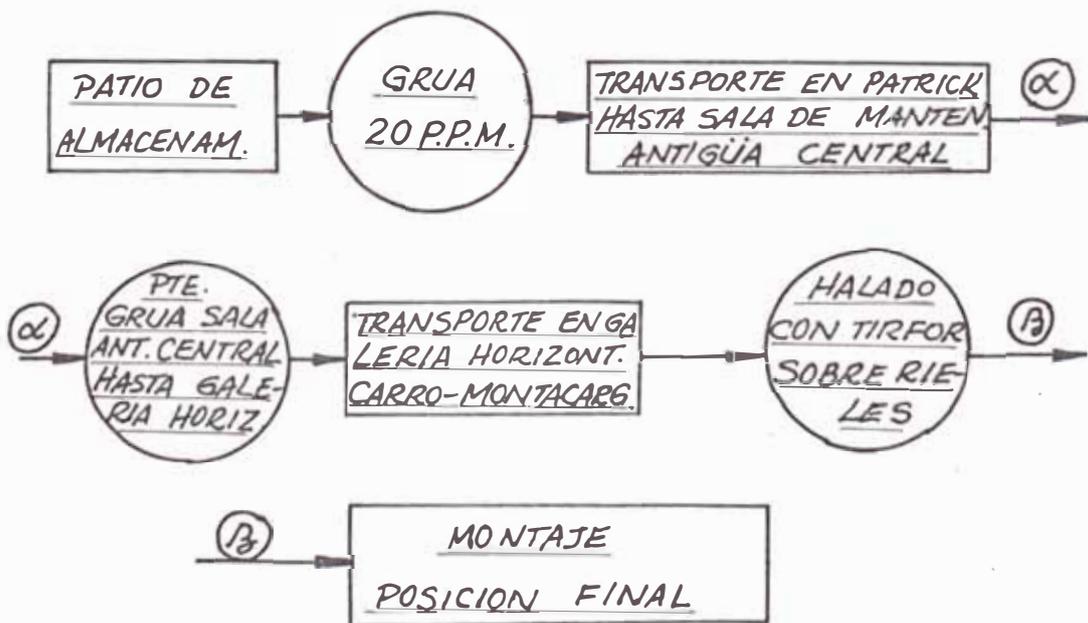


DIAGRAMA Nº 3

d) Tubería de distribuidor

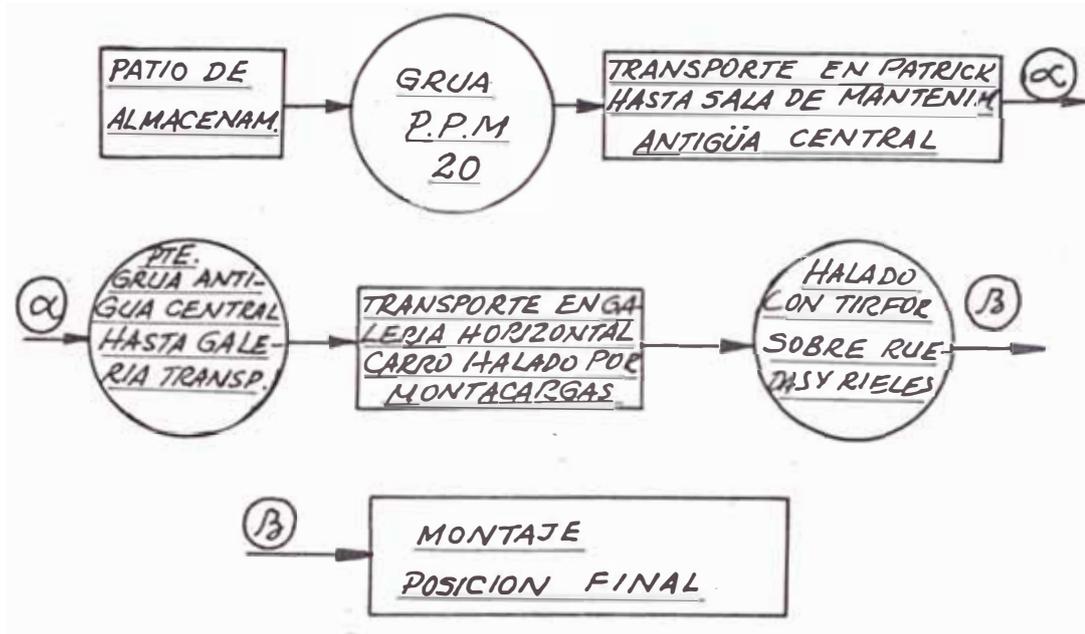


DIAGRAMA Nº 4

5.3 Procedimiento de montaje

5.3.1 Implantación, anclaje y ajuste de tubos

Después de tener el tubo en el lugar donde deberá ser su posición final, se a de proceder a situarlo con el equipo adecuado, de manera a que el tubo tenga su alineamiento adecuado. Esto es función del técnico montador.

Para nuestro caso práctico, luego de tenerlo en la posición final de los cuatro casos anteriores, se procede a situarlo en su posición adecuada, utilizando el carro de montaje (4 gatos hidráulicos independientes), con la ayuda de un teodolito que asegure la posición correcta.

Se debe tener en cuenta durante el montaje, que las marcas colocadas en los tubos coincidan, marcas que son realizadas en el taller con la finalidad de colocar adecuadamente los tubos con respecto a las soldaduras longitudinales.

Una vez que se está seguro de la posición en que debe quedar el tubo, se procede a inmovilizarlo en esa posición para lo que se utiliza, barras soldadas al anterior tubo y de igual forma con el piso.

Para el caso de las tuberías en el pique vertical, se utiliza el winche y cable de manera que el tubo quede sobre el anterior, alineado según las marcas y después se lo inmoviliza igual que el caso anterior.

5.3.2 Proceso de soldadura

El proceso de soldadura en obra, debe definir los productos de aportación, el almacenaje y estufado, la preparación y apareamiento, la limpieza de superficies, los refuerzos a colocar, la posición del soldado, el espesor de metal base, la preparación de las soldaduras y las características de la corriente eléctrica.

Además se debe indicar:

- * La clasificación de soldadores.
- * Las posiciones de soldeo.
- * Las planchas de calificación.
- * Los testigos de fabricación.

Para el caso de Machupicchu , el detalle del proceso de soldadura se describe a continuación:

a) Productos de aportación

CUADRO Nº 7

PRODUCTOS DE APORTACION

MATERIALES	ELECTRODOS	N.F.A 81-309	AWS
E 24-4 E 355IIR	Esab OK 48.10	E 51-5/4 B 120.20 BH	E-7018
E 460IIR	Commercy Unners 2M	E 51-5/4 20 BH	E-8015

b) Almacenaje y estufado

Los electrodos son del tipo con revestimiento básico y deben ser correctamente estufados y conservados en estufas portátiles cerradas, al alcance del soldador.

Los soldadores deben tomar los electrodos correspondientes a una jornada. Por la noche se deben sacar los electrodos restantes de la estufa portátil para colocarlos en la estufa de conservación.

El circuito de empleo de los electrodos es el mostrado en el diagrama Nº 5.

OK 48.10(E-7018) Estufado 300°C-2 horas

Unners 2M(E-7018) Estufado 300°C-2 horas

Conservación de ambos electrodos a 120°C.

* Según NF-A 81-309

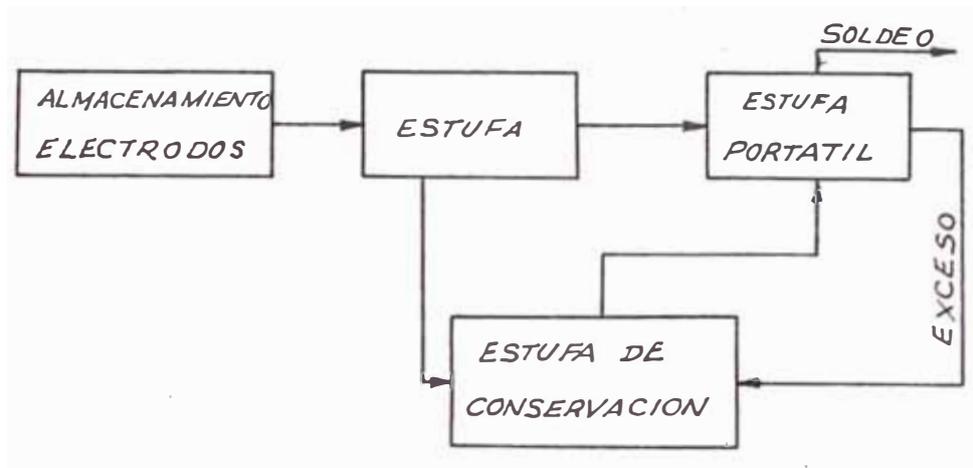


DIAGRAMA N° 5

c) Operaciones preliminares

Preparación y apareamiento: Los chaflanes se preparan por mecanizado o esmerilado o por oxicorte seguido de esmerilado o mecanizado, para obtener una superficie limpia y exenta de óxido. Antes de soldarse los bordes de las piezas a empalmar, deben ser alineados con la mayor precisión posible.

Limpieza de las superficies: Los bordes de las superficies de las piezas a soldar y las áreas adyacentes, se limpian con esmero debiendo quedar libres de toda marca de calamina, óxido, escorias, grasa, aceite o cualquier cuerpo extraño. Todo índice de humedad debe ser eliminado cuidadosamente por secado, con soplete de propano en caso de necesidad.

Instrucciones generales para el montaje y soldeo: En el lugar

de la obra se recibían virolas completas de largos distintos, algunas de las cuales fueron ensambladas de 2 en 2 en el patio de almacenamiento, colocándose allí el o los refuerzos al vacío correspondientes.

Apareamiento: El apareamiento se realiza con el eje horizontal, la alineación de las paredes se consigue con grapas exteriores y separación por planchas chicao. El soldeo por puntos se realiza cada 50 centímetros aproximadamente, teniendo que cada punto se compone de dos costuras superpuestas de 7 a 10 cm de largo.

Soldeo: Las soldaduras circulares de unión de las virolas se efectúan manualmente con electrodo revestido.

d) Soldadura de los refuerzos de resistencia al vacío

Primero se procede a ensamblar los sectores constitutivos del refuerzo, luego se sueldan todas las soldaduras radiales, (excepto una) con electrodo revestido, obteniéndose de esta forma un anillo no cerrado, cuyo diámetro interior es igual o algo superior al diámetro exterior de la virola.

La ubicación del refuerzo se traza en la virola y se limpia con cepillo metálico, luego se procede a soldar escuadras por puntos en las virolas de tal manera a soportar el refuerzo.

- La soldadura de la virola se realiza los primeros puntos de forma a dejar un huelgo regular entre refuerzo y virola.
- Terminado este trabajo se reforzaron los puntos ya soldados mediante costuras con $a=4\text{mm}$ y $L=100\text{ mm}$.
- El ángulo entre virola y refuerzo se limpio con escobilla metálica.
- Esta soldadura se efectuó manualmente.

e) Especificación para procedimiento de soldadura manual por arco, con electrodo revestido

Metales de base:

- * Acero E 24-4Según NF-A 35-501
- * Acero E 355-IIR..... " NF-A 36-201
- * Acero E 460-IIR..... " NF-A 36-201

La composición química y las características mecánicas están de acuerdo con las normas antes citadas.(Clasificación ASME P1-tabla QW422).

Metales de aportación: Los electrodos empleados se ajustan a las especificaciones AWS E-7018 y E-8015, clasificados en el grupo F4 de ASME QW 432.1.

Posición: La soldadura en el sitio de la obra se efectúa en cualquier posición. Las características de las uniones se verifican en la posición 3G(vertical ascendente- código ASME QW-405.2) con ésta posición se

califican todas las posiciones.

Pre calentamiento: Para los aceros E 24-4 y E 355IIR previamente al soldeo se calienta el metal a 50°C/70°C, hasta eliminar completamente la humedad. Esta temperatura se controla mediante lápices detectores de temperatura, manteniéndose durante todo el tiempo de soldeo por medio de sopletes de propano.

Procedimientos de soldaduras: Es el de soldadura manual eléctrica por arco.

Espesor del metal de base: Procedimientos previstos para espesores comprendidos entre 4,8 mm y el máximo espesor a soldar.

Características de la corriente eléctrica: Corriente empleada es directa (continua) con el polo positivo en el electrodo.

Técnica de soldadura de la unión: Los electrodos \varnothing 3,2 y 4 mm, se usan en cualquier posición y los electrodos de diámetro 5 mm en posición 1G.

La tensión en el arco utilizada puede ser de 22 a 26 voltios, con intensidades variables para posición horizontal:

- * Para \varnothing 3,2 mm 105 A aproximad.
- * Para \varnothing 4 mm..... 150 A aproximad.
- * Para \varnothing 5mm 185 A aproximad.

Limpieza: Luego de cada pasada se remueven las escorias por picado seguido de un cepillado, la pasada se examina visualmente, procediendo a eliminar todo defecto aparente por remoción del metal y esmerilado o simplemente por esmerilado, según la importancia del defecto antes de efectuar la pasada siguiente.

f) Calificación de los soldadores

Posiciones de soldeo: Los soldadores fueron calificados según las posiciones 2G, 3G, 4G, para cubrir todas las posiciones encontradas durante el montaje. (Código ASME QW-461.7; NF-A 88-110, NF-A 88-010)

Planchas de calificación: Las planchas usadas para la calificación de los soldadores, fueron de un espesor de 18 mm, de 400mm x 150 mm; inspeccionadas por radiografía y ultrasonido, en material E 24-4 y E 355IIR. (ASME QW-304-; NF-A 88-110)

g) Testigos de fabricación

Se tuvieron 2 testigos de producción:

- Testigo N° 1: En el pozo vertical al nivel soldadura 23-24
 - * Soldeo horizontal sobre plano vertical.
 - * Espesor = 18 mm
 - * Material= E 355IIR

- Testigo Nº 2: Parte aérea de la tubería forzada al nivel soldadura 101-102.

* Posición vertical ascendente (3G).

* Espesor = 14 mm

* Material = E 24/4

Estas planchas fueron sometidas a los mismos ensayos indicadas en párrafo 4.4.4.b.

5.3.3 Hormigonado

Es el proceso que sigue a la realización de la soldadura y sus respectivos chequeos. Dicho proceso se puede dividir en dos tipos que son función de la posición o tipo de tubería.

a) Hormigonado de parte aérea de tubería

Se tiene en cuenta el hormigonado de las siguientes partes:

- Hormigonado de los diferentes macizos o bloques de apoyo.
- Hormigonado de los diferentes bloques de anclaje.
- Hormigonado de la plataforma a lo largo del trazo, sobre la que se implantan rieles, sobre los que se desplaza el carrito de montaje.

b) Hormigonado de parte empotrada de tubería

Este pertenece tanto a las galerías horizontales co-

mo a las verticales y viene a ser el relleno con concreto de la luz que queda entre la roca viva y la chapa metálica de la tubería.

Para el caso de la tubería aérea se a de tener en cuenta, que con anterioridad al montaje de la tubería se tuvo ejecutado el concreto de primera fase, realizándose el hormigonado de segunda fase una vez concluido el montaje de la tubería en la zona, utilizando en estos casos generalmente aceleradores de fraguado, debido a la dilatación de tubería durante el día, que crea esfuerzos en los apoyos.

En el caso de la tubería empotrada se tiene en cuenta que existen partes que llevan armadura de acero, en función de la ubicación de fallas, para garantizar la colaboración de la roca.

En ambos casos se tuvo en cuenta que los vaceados se realicen en volúmenes adecuados, en tramos intercalados (por problemas de encofrado, por la temperatura que alcanza el concreto durante el fraguado, lo que puede provocar distorsiones térmicas). Se debe tener en cuenta el uso de retardantes de fraguado y segregación, para el caso de transporte de concreto distancias mayores a los 20 m (durante el bombeado del concreto).

De cada vaceado de concreto se toman las muestras , respectivas (briquetas-testigos de concreto), para reali

zar las pruebas de compresión (7,14,21,28 días), y de esta manera tener la certeza que el vaceado corresponde a la resistencia según la cual se le especificó.

5.3.4 Inyecciones

Proceso por el cual se inyecta un material de consistencia líquida (que fraguará después), a presión mediante el equipo de bombeo necesario, para rellenar los intersticios existentes en el suelo adyacente al trazo de la tubería, con la finalidad de lograr su mayor consistencia y rigidez garantizadora de la capacidad portante del terreno.

a) Inyecciones previas al montaje

Realizadas con anterioridad al montaje, sirven para mejorar el terreno.

b) Inyecciones después del montaje

Realizadas en la parte empotrada de la tubería, con posterioridad al montaje y hormigonado, que sirven para rellenar los intersticios entre roca y hormigón y hormigón-tubería, asegurando de esta manera el % de colaboración de la roca.

El equipo utilizado para las inyecciones es:

* 1 Mezcladora.

* 1 Bomba (generalmente neumática y de pistón).

* Mangueras y boquillas de inyección

La mezcla líquida está formada por Cemento, agua, y bentonita, en diferentes proporciones según sea el caso. Se comienza inyectando una mezcla bastante fluida, después de un tiempo se disminuye la fluidez, y así sucesivamente por 3 o 4 mezclas, en cantidades previamente especificadas.

Se debe tener en cuenta que la mezcla puede aflorar a la superficie en algunos casos a distancias tan grandes como 100 ó 200 m, por lo que si después de un tiempo prudencial de inyección, no se nota la saturación de intersticios (mediante la elevación de la presión), se debe ubicar el afloramiento a la superficie y después suspender la inyección.

5.3.5 Protección de la tubería contra la corrosión

Dado que la tubería está en permanente contacto con el agua (interiormente) y con el medio ambiente (exteriormente), lo cual necesariamente producirá corrosión en menor o mayor grado, según sea el caso, se hace necesaria la protección de la tubería para anular o disminuir el proceso de corrosión.

Sabido es que dicha protección se obtiene normalmente, mediante la aplicación de pinturas, que evitan el contacto directo entre metal y el agua o medio ambiente. Algunas veces se agrega un sobreespesor (para compensar la pérdida de material por corrosión) .

El proceso de pintado tiene generalmente 2 etapas, uno

que se realiza en talleres de fabricación y el segundo cuando se a terminado el montaje.

a) Pintado en talleres

Sopleteado por arena de las superficies

- Instalaciones: Necesita de un grupo de aire comprimido, con potencia necesaria y una presión de servicio de 4 a 6 Kg/cm². (Deberá contar con separador de humedad y aceite del aire comprimido usado.
- Material de sopleteado: El material es arena cuarzosa seca y limpia con una granulometría entre 0,5 a 2 mm.
- Sopleteado: Antes de realizar el sopleteado por arena se eliminan por pulido todas las irregularidades de la chapa así como la soldadura estará enrasada con la chapa.

Sólo se realiza el sopleteado cuando la temperatura de la chapa sobrepasa en aproximadamente 3°C la T de rocío y es superior a 0°C. Se realiza hasta eliminar todas las escamas, herrumbres y partículas ajenas. Después se eliminan el polvo, arena, con ayuda de escobillas, pinceles y aire seco.

Esta superficie sopleteada no debe tocarse con las manos, ni andar sobre ellas con calzado húmedo. La imprimación de pintura se hace dentro de las 6 horas siguientes.

Pintado de la tubería

- Tipos de pintura: El tipo de protección de la superficie interna y externa de la chapa, se determina de acuerdo con las condiciones climáticas del medio, el agua de suministro y las aguas subterráneas en el lugar de los empotrados y el material empleado para las chapas.

Se recomienda proteger la superficie interior, con una capa de zinc de espesor 100 micras, aplicada por llama y aire comprimido, y con dos capas de pintura de resina sintética.

Para la superficie exterior se recomienda, para la de contacto con el aire libre, una capa de zinc de 60 micras como mínimo, una primera mano de imprimación de aluminio con base de caucho clorado/resina sintética. Una mano final de 2 capas de caucho clorado/resina sintética.

- Ejecución de pinturas: Todas deben ser ejecutadas en medio seco ($T > a + 15^{\circ}\text{C}$ y $T > a + T$ de rocío), con la superficie limpia y seca.

La tolerancia es de aproximadamente + 50% a - 15% del espesor indicado, previendo que el valor medio sobrepase el valor acordado o indicado.

Todas las superficies exteriores deben ser pinta-

das por lo menos con una capa de pintura básica, antes de su salida de talleres, excluyendo los márgenes destinados a la soldadura.

Las superficies internas y externas de la tubería en una amplitud de 15 cm, medido de los márgenes de la pieza de las soldaduras ejecutadas, tendrán una capa de pintura de conservación o por aceite, para protección durante transporte y almacenamiento.

b) Pintura en obra

El suministrador debe tomar todas las medidas para proteger las superficies de las piezas producidas en el taller, durante el transporte y montaje.

Los espacios en el lugar de las soldaduras de montaje, provistos de la pintura de conservación, deben ser limpiados, así como los lugares deteriorados, de las superficies provistas con capa básica, deben ser retocados. (después de soldaduras, inyecciones, etc).

Todas las superficies de soldadura deben ser pulidas después de lo cual se ejecuta la primera capa básica. Luego en los lapsos indicados se ejecutan las demás capas de pintura, previamente aprobadas.

Es necesario que la superficie a ser pintada tenga el visto bueno del supervisor antes de ejecutar la pintura.

Garantía

En todo trabajo se exige un periodo de garantía, el cual es determinado en el contrato general y en el caso de las pinturas, el periodo es por lo general de 5 años.

Para el caso de Machupicchu se tiene:

- La superficie de la tubería se despojó de las impurezas, polvo, restos de pinturas, por medio de papel lija, sin enrase total de soldaduras.
- La superficie interior se protegió con una capa de Zn (zinc), con un espesor de 30 micras y con dos capas de epoxy de asfalto, con un espesor total de todas esas capas de 450 micras.
- La superficie exterior en el tramo al aire libre, fue protegida por una capa de zinc de 30 micras de espesor más una capa final de dos manos de pintura bituminosa asfáltica, siendo la última de color aluminio, con un espesor total de todas las capas de 450 micras.
- La ejecución se realizó en medio seco, con temperatura de superficie mayor a temperatura de rocío y con superficie limpia y seca.
- La tolerancia de espesores fue de + 50% a - 15 %, teniendo en cuenta que el espesor medio sobrepasó el valor contratado.

c) Sobreespesor de la tubería forzada

Consideraciones técnicas

La pérdida de espesor de una tubería de acero no protegido, se da por corrosión electroquímica en la superficie externa y por abrasión más corrosión en la superficie interna. En el caso de Machupicchu también la parte externa del tramo en roca, puede estar parcialmente sujeta a corrosión en zonas de contacto imperfecto con el hormigonado.

La acción electroquímica es combatida con embarnizado, más esa protección que no tiene duración indefinida con agua normal, no durará más con agua cargada con material abrasivo en la superficie interna.

Con agua normal es difícil evaluar la duración del barnizado, más como muchos protectores aceptan garantizar por 5 años la primera protección (no siempre sin reclamaciones al acabar el periodo), lleva a evaluar entre 5 a 10 años de un pintado perfecto, aparezcan superficies de algún monto sin barniz, con metal expuesto a la corrosión.

La corrosión no se da en forma uniforme, sino como cráteres más o menos profundos y difundidos.

Para prevenir daños los proyectistas acostumbran añadir un sobreespesor al espesor calculado por razones mecánicas. Esto encuentra mención explícita en publicaciones relativas a tuberías forzadas como:

- * "WATER GATE AND PENSTOCK ASSOCIATION"-Japón⁽¹⁾
- * " 1980 BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE"-ANSI;ASME
- * " AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION "- AWWA⁽¹⁾

Se debe hacer notar que este sobreespesor no debe tomarse como sustituto permanente del barnizado, siendo tan sólo una medida de precaución, contra una pérdida de barnizado prematura, no detectada y saneada en corto plazo. (Cráteres profundos de área limitada son difíciles de detectar, con examen externo sin inspección visual directa.

Es conveniente hacer notar que hoy en día los usuarios, se encuentran forzados a no respetar estrictamente los plazos de inspección, contra una pérdida de barnizado prematura y también del respectivo mantenimiento, debido a las implicaciones sociales y al costo de la pérdida de producción de energía.

También es bueno indicar que actualmente con ocasión de la modernización de las plantas, se sustituye equipos y grupos, utilizando la misma tubería, por lo que es necesario que tengan una mayor vida útil a pesar de un mantenimiento imperfecto.

No existen estadísticas generales que puedan ser aprovechadas para el cálculo de tasas de corrosión galvánica. El sobreespesor que se da a las tuberías es generalmente de 2 mm, pues encuentra justificativas (con

(1) Ver apéndice I

márgenes), en la observación práctica de la profundidad de cráteres que se encuentran después de los primeros ataques que llevan al desaparecimiento más rápido, de los grámulos anódicos superficiales (fenómeno incierto pues varía de plancha en plancha y de zona en zona).

Consideraciones económicas

La decisión por el sobreespesor de la tubería forzada es también función del costo, para lo cual se hará a continuación un cálculo que determine la justificación o no de agregar el sobreespesor a la tubería.

Un servicio de simple rebarnizado interno, básicamente se compone de:

- * Desagüe de tubería.
- * Puesta en servicio del equipo de inspección y trabajo.
- * Limpieza y preparación de la superficie.
- * Rebarnizado.
- * Inspección final
- * Retirada de equipo.
- * Cura de barnizado
- * Llenado de tubería.

Un cálculo del tiempo empleado en éste servicio se llega a los 60 días (caso de Machupicchu), tiempo durante el cual se deja de operar la central, con la pérdida consiguiente de venta de energía.

Dicha pérdida de energía representada en \$ U.S es calculada de la siguiente forma:

$$\text{Pérdida} = P.I \times f.p \times 24 \times t \times C_3 \dots\dots\dots(LXX)$$

Donde:

P.I = Potencia instalada (Kw) (75000 para nuestro caso)

f.p = Factor de planta (para cálculo 0,5)

t = Tiempo de interrupción de servicio= 60 días

C_3 = Costo (\$/Kw-hora) = 0,0325

$$\text{Pérdida} = 1755000 \text{ \$ U.S.}$$

El costo de la primera rebarnizada que incluye la mano de obra y el material, en conjunto para nuestro caso representa de 35000 a 40000 \$ U.S.

Luego:

$$\text{Costo total rebarnizado} = 1795000 \text{ \$ U.S}$$

Calculando ahora el costo que representa el adicionamiento de los 2 mm de espesor:

$$\text{Costo de sobreespesor} = A \times c \dots\dots\dots(LXXI)$$

Donde:

A = Peso adicional de tubería (Kg) (64730 Kg en el caso de Machupicchu)

c = Costo de material (\$U.S/Kg) = 3,02

Costo de sobreespesor = 195484,6 \$ U.S

Hay que agregar el costo de transporte en nuestro pa
ís.

Costo transporte = A x C_t(LXXII)

C_t = Costo transporte (\$/Kg) = 0,2

Costo por transporte = 12946 \$

Luego:

Costo adicional total por sobreespesor=208430,6 \$

Para determinar si es económicamente conveniente se a
de calcular utilizando:

B = CR((1 + i/100)ⁿ - 1)(LXXIII)

C = CS (1 + i/100)^{n'}(LXXIV)

Donde:

B = Beneficio económico obtenido por retrasar en
n años el rebarnizado, con i% de interes.

C = Costo que hubo con desembolso anticipado por
sobreespesor.

CR = Pérdida total

CS = Costo adicional de desembolso.

n' = M + P + n

M = Años entre la inversión y la puesta en servi
cio de la tubería.

P = Años de protección por el barnizado.

n = Años que las áreas sufrieron las pérdidas de barnizado, pudiendo resistir la corrosión sin que cráteres superen el sobreespesor.

i = Tasa de interes anual.

Para el caso práctico de Machupicchu:

$$n = 5 ; P = 7 ; M = 3 ; i = 10\% \text{ (2)}$$

Reemplazando:

$$B = 1795000((1 + 10/100)^5 - 1) = 1095865,5 \text{ \$ U.S}$$

$$C = 208430,6(1 + 10/100)^{3+7+5} = 870666,3 \text{ \$ U.S}$$

$$ER = B - C \dots\dots\dots(LXXV)$$

ER = Economía realizada con el postergar del primer rebarnizado

$$ER = 1095865,5 - 870666,3 = 225199,2 \text{ \$ U.S}$$

Con:

$$i = 8\% \dots\dots\dots ER = 181266,78 \text{ \$ U.S}$$

$$i = 12\% \dots\dots\dots ER = 227544,7 \text{ \$ U.S}$$

Manteniendo todos los factores invariados el plazo n (tiempo en años en que la corrosión puede ser enfrentada por el sobreespesor de 2 mm), que rinde el beneficio igual al costo es :

(2) i =10% (Se a tomado este valor por ser un valor común del interes cobrado en moneda extranjera, en algunos casos es todavía inferior.

$$n = (\log(CR/CS)) / (\log(1 + i/100)) - (\log((CR/CS) - (1 + i/100)^{M+P})) / (\log(1 + i/100)) \dots \dots \dots (LXXVI)$$

Para:

- i = 8% n=3,75 años
- i = 10% n=3,76 años
- i = 12% n=3,95 años

Manteniendo todos los otros factores invariables, la duración P de protección del barnizado necesario para que el beneficio sea igual al costo, viene dado por:

$$P = (\log((CR((1+i/100)^n - 1)) / (CS(1+i/100)^{M+n}))) / (\log(1 + i/100)) \dots \dots \dots (LXXVII)$$

Para:

- i = 8% P = 10,15 años
- i = 10% P = 9,41 años
- i = 12% P = 8,60 años

Como se puede ver de los resultados, es conveniente el agregar los 2 mm de sobreespesor a la tubería, tanto por las características técnicas indicadas, como por razones económicas, ya que la economía realizada es siempre positiva para diferentes tasas de interes, de igual forma se tiene un tiempo mayor a 3 años después de 12 años de operación de la central y se requeriría de + de 8 años de protección del barnizado (Lo que es difícil de obtener), para evitar deterioro en la tubería.

Se a adoptado la necesidad de aumentar dichos 2 mm al espesor de la tubería por efecto de corrosión, por lo que toda la tubería tiene 2 mm más que los requerimientos mecánicos, tal como se muestran en planos.

5.3.6 Diversos casos de montajes de tuberías

a) Tuberías al aire libre

El manejo de los tubos desde el almacenaje hasta el lugar definitivo, se hacen con el uso de maquinaria común (grúa, carro, winche, etc).

El proceso de montaje es generalmente el siguiente:

- Descarga de suministro en patio de almacenaje.
- Ensamble de tubos.
- Soldeo.
- Inspección de soldaduras.
- Colocación y soldeo sobre los tubos, de los angulares de anclaje y refuerzos contra vacío.
- Recuperacion de tubos y acarreo hasta lugar definitivo.
- Regulación, calce.
- Apareamiento, soldadura por puntos.
- Inspección de soldaduras.
- Regulación de los soportes.
- Montaje de respiradero.
- Montaje de las juntas de dilatación.

- Remoción de equipo de montaje.

b) Tuberías empotradas tanto en galerías horizontales como verticales

El proceso de montaje es el siguiente:

- Transporte hasta posición final.
- Puesta en posición, regulación, calce de secciones de codos.
- Apareamiento de secciones.
- Soldeo.
- Inspección de soldaduras.
- Hormigonado de codos.
- Colocación de tapones de inyección después de hormigonado.
- Puesta en posición de tubos de aguas arriba a a aguas abajo.
- Regulación, apareamiento.
- Soldeo
- Inspección de soldaduras.
- Hormigonado tubo por tubo, conforme vaya progresando el montaje.
- Puesta en posición y regulación del conducto de repartición.
- Apareamiento de secciones entre si.
- Soldeo.
- Inspección de soldaduras.
- Hormigonado

- Remoción de equipo de montaje.

Idem para galerías verticales.

5.3.7 Montaje de las juntas de dilatación

El montaje de las juntas de dilatación se hace en igual forma que cualquier tubo, teniendo cuidado en el siguiente aspecto.

Como una junta de dilatación está compuesta por dos tubos encajados (embonados), con libre movimiento de uno de ellos dentro del otro; previo al inicio del montaje se a de inmovilizar la junta en la posición sin dilatación, mediante el soldaje de planchas que aseguren dicha posición.

Después se procede a realizar la soldadura de aguas abajo, con el chequeo respectivo. Seguidamente se monta el tubo aguas arriba de la junta de dilatación, con sus soldaduras y chequeos y así sucesivamente hasta asegurar la tubería en el anclaje superior, después de lo cual se procede a desenclavar la junta de dilatación.

Además de esto, una vez puesta en servicio la tubería se deberá regular los pernos de los prensaestopas, a fin de evitar las fugas.

5.3.8 Montaje de la válvula mariposa

Después de montado el tramo inicial de la tubería, se realiza el montaje de la válvula, siguiendo el siguiente

proceso:

- Descarga y recuperación del suministro.
- Puesta en posición y soldeo del manguito aguas abajo.
- Puesta en posición de los bastidores del soporte de la válvula y del servomotor.
- Hormigonado segunda fase.
- Ensamble del cuerpo más disco por abulonado.
- Instalación de los servomotores.
- Instalación de la central oleohidráulica.
- Colocación y abulonado del manguito aguas arriba.
- Hormigonado del manguito.
- Instalación de la tubería.
- Montaje de accesorios.
 - * Válvulas y tuberías de By-pass
 - * Detector de sobrevelocidad
 - * Ventosa
- Ensayos en seco.

5.4 Indices de montaje

El montaje de una tubería a otra puede tener algunos puntos en común como son rendimientos, tiempos de ejecución, cronogramas y algunos otros aspectos que pueden ser usados para casos similares, por lo que en este ítem trataremos de estos aspectos útiles para lo cual usaremos algunos cuadros y gráficos.

Cuadro N° 8: Se refiere a la toma de datos de la temperatura que alcanzó el concreto durante el fraguado, referente

CUADRO N° 8

HORMIGONADO DEL DISTRIBUIDOR

DATOS DE TEMPERATURAS DE FRAGUADO- PRIMER TRAMO DEL DISTRIBUIDOR

Día: 23/8/84				Día: 27/8/84			
HORA	REGISTRO	T _{amb.}	T _{conc.}	HORA	REGISTRO	T _{amb.}	T _{conc.}
22:15	15'	19°C	21°C	08:30	15'	18 °C	41 °C
00:05	15'	19°C	21°C	10:20	15'	18 °C	40 °C
01:15	15'	19°C	21,5°C	11:50	15'	18 °C	40 °C
02:25	15'	19°C	22°C	14:30	15'	19 °C	39 °C
03:25	15'	19°C	23°C	17:30	15'	19 °C	39 °C
04:40	15'	19°C	24°C	20:05	15'	19 °C	39 °C
05:50	15'	19°C	25°C	21:30	15'	20 °C	39 °C
06:45	15'	19,5°C	27°C	23:15	15'	20 °C	39 °C
Día: 24/8/84				01:15	15'	20 °C	38,5°C
08:45	10'	20,5°C	29°C	03:25	18'	18,5°C	38 °C
09:50	18'	21 °C	31°C	04:45	15'	18 °C	37,5°C
11:05	15'	21°C	32°C	06:25	15'	18 °C	37,5°C
13:40	15'	20,5°C	33,5°C	Día: 28/8/84			
14:55	20'	21 °C	34°C	08:45	15'	18 °C	37 °C
15:50	15'	20 °C	35,5°C	10:30	15'	18 °C	37 °C
17:15	15'	18,5°C	37°C	11:45	15'	18,5°C	36,5°C
18:20	20'	18,5°C	37°C	14:30	15'	18,5°C	36,5°C
20:15	15'	18,5°C	38°C	17:20	15'	19 °C	36 °C
21:40	15'	18,5°C	39°C	18:45	15'	19 °C	36 °C
23:00	15'	18,5°C	40°C	20:00	15'	18,5°C	36°C
00:15	15'	18 °C	41°C	22:25	15'	18,5°C	35,5°C
01:45	15'	18 °C	42°C	23:40	15'	19 °C	35 °C
03:10	15'	18 °C	42°C	01:05	15'	19 °C	35 °C
05:00	15'	18 °C	43°C	02:20	15'	18 °C	35 °C
06:45	15'	18 °C	43°C	04:35	15'	18 °C	35 °C
Día: 25/8/84				06:40	15'	18 °C	34,5°C
08:15	15'	18 °C	43°C	Día: 29/8/84			
09:15	15'	18 °C	43,5°C	08:20	15'	18 °C	34 °C
10:17	15'	18,5°C	43,5°C	14:15	15'	20 °C	34 °C
11:10	20'	19 °C	43,5°C	22:45	15'	19 °C	33 °C
13:05	15'	19,5°C	44 °C	Día: 30/8/84			
14:26	15'	19,5°C	44 °C	10:25	15'	20 °C	32 °C
19:45	15'	19,5°C	44°C	20:00	15'	19,5°C	31 °C
21:15	15'	19 °C	44°C	Día: 31/8/84			
22:40	15'	19 °C	44°C	09:00	15'	19,5°C	29 °C
01:35	15'	18 °C	44°C	22:50	15'	19 °C	28 °C
03:45	15'	18 °C	44°C	01:05	15'	19 °C	28 °C
04:50	15'	18 °C	44°C				
06:30	15'	18 °C	44°C				

Fuente: Archivos Consorcio Novoa Hidroservice-Supervisión

a los tres tramos del distribuidor. (Se tiene para el primer tramo solamente ya que para los otros dos, se tiene temperaturas similares).

Lo anterior se puede ver con más claridad en las figuras N^{os} 48a , 48b , 48c, que representan las curvas de temperatura en hormigonado de los tres tramos del distribuidor.

Cuadro N^o 9: Aquí se tiene algunos datos de la temperatura alcanzada por el hormigón de la galería horizontal, durante el fraguado del mismo.

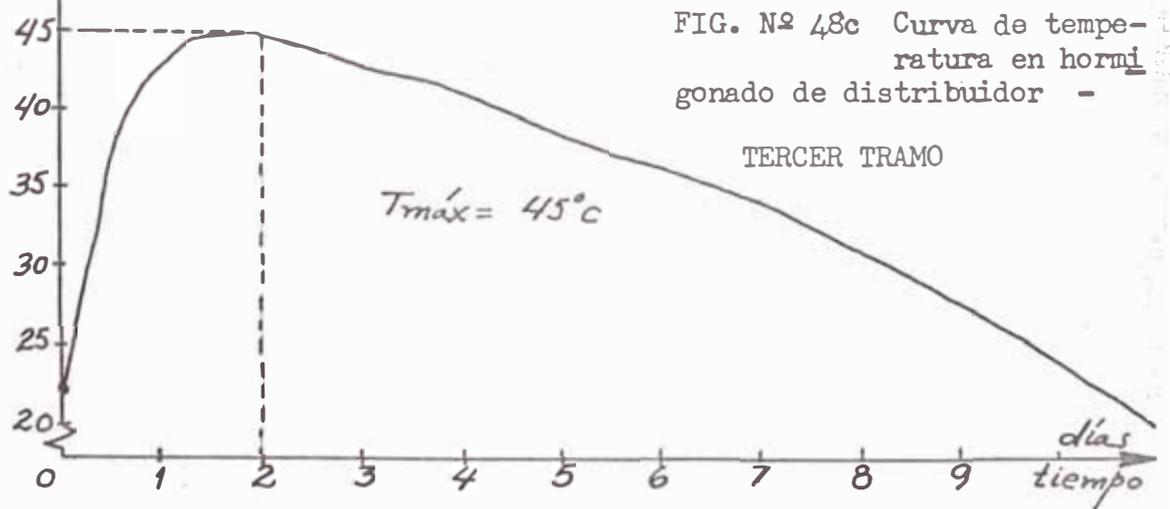
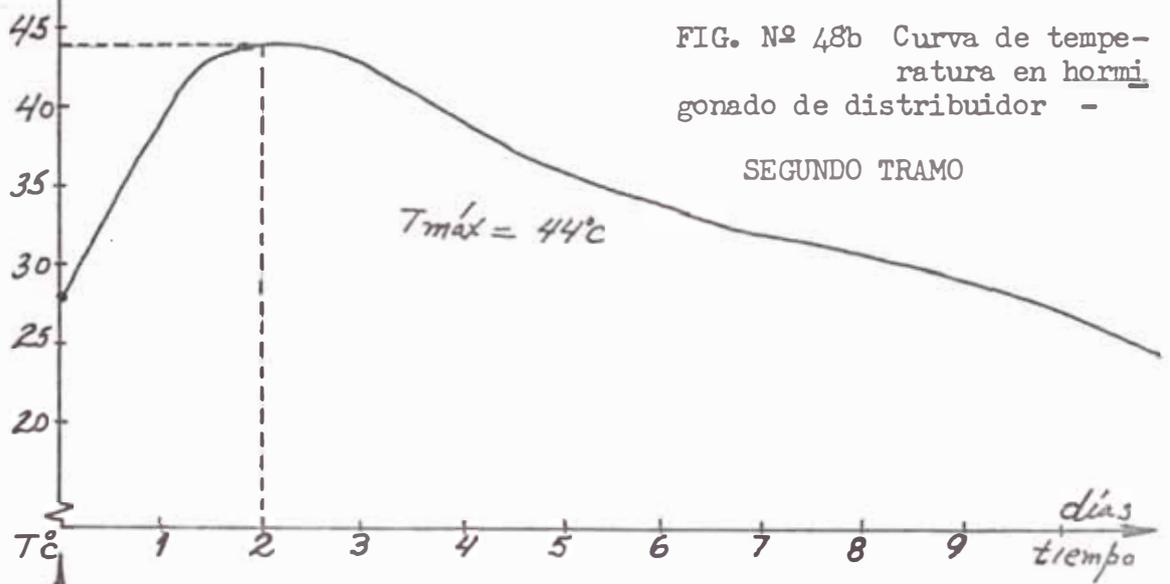
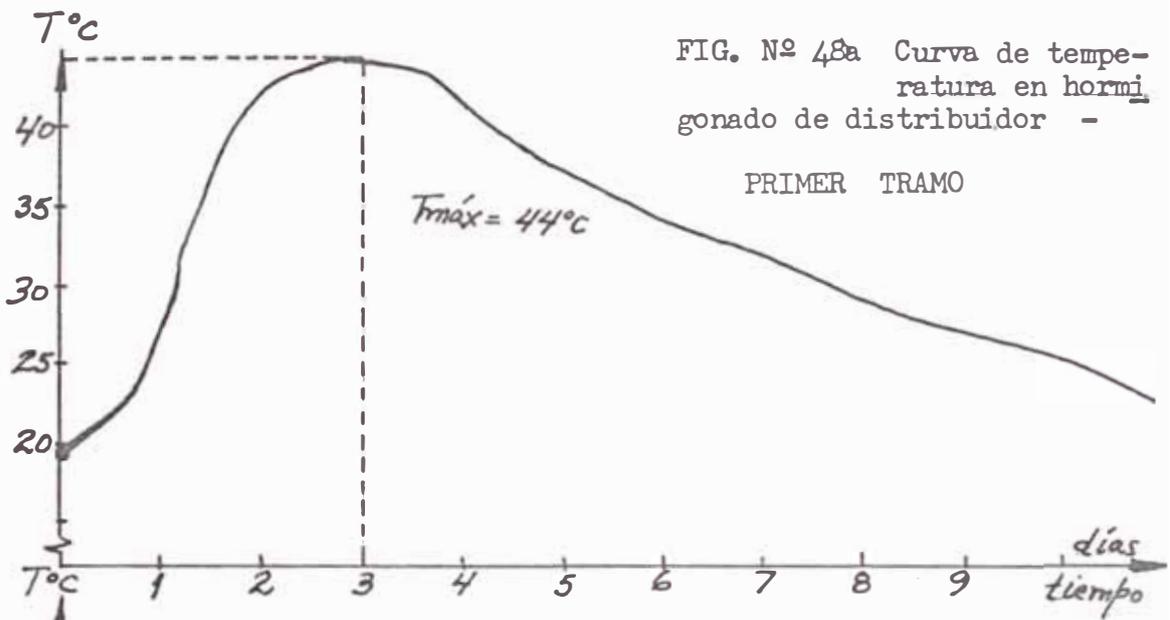
CUADRO N^o 9

TEMPERATURAS DE HORMIGONADO DE LA GALERIA HORIZONTAL

TOMA DE REGISTRO	HORA	ARRIBA	ABAJO	DERECHA	IZQUIERDA
Unión virolas 19-20 17/3/84	11:30	37,5°C	33,0°C	35,0°C	35,0 °C
	14:30	37,5°C	33,5°C	35,0°C	35,0 °C
	17:50	37,0°C	31,0°C	35,5°C	34,0 °C
Virola 18 17/3/84	11:39	38,0°C	34,5°C	37,0°C	36,0 °C
	14:40	38,0°C	35,0°C	38,0°C	38,0 °C
	18:13	40,0°C	35,0°C	38,0°C	37,0 °C
Virola 16 19/3/84	11:48	37,5°C	37,0°C	38,0°C	35,0 °C
	14:50	38,0°C	37,0°C	38,0°C	35,0 °C
	18:26	41,0°C	34,5°C	38,0°C	37,0 °C
Unión virolas 14-13 21/3/84	12:03	33,5°C	31,0°C	31,5°C	31,0 °C
	15:07	35,0°C	32,0°C	35,0°C	33,5 °C
	18:37	35,0°C	32,0°C	33,0°C	34,5 °C

Fuente: Archivo de Consorcio Novoa-Hidroservice
Supervisor de la obra.

El cuadro N^o 8, el cuadro N^o 9 y las figuras 48a,48b,48c, permiten conocer el comportamiento del fraguado del concreto, para un distribuidor y para una galería blindada con concreto, valores posibles de ser usados en obras similares.



En el Apéndice J se presentan un cuadro estadístico conteniendo, las fechas de realización de las diferentes etapas durante el proceso de montaje de la tubería, que permitirán sacar algunos índices de montaje. También se muestra un cronograma de actividades de montaje en base al cual se trabajó.

Se muestra también en este apéndice un cuadro donde se da diferentes valores a las diferentes partes de la tubería, en función de su peso, dificultad para el montaje ,etc, que permiten dar un valor ponderado a cada tubo, para las valorizaciones y para analizar el avance de montaje. Tal ponderación se a dado en función de las premisas indicadas en el cuadro N° 10.

CUADRO N° 10

PREMISAS PARA PONDERACION DE LOS ELEMENTOS DE TUBERIA FORZADA

MONTAJE (Actividad)	98%	%
- Preparación de tubos-Transporte hasta pie de obra o funicular.....		15
- Montaje		40
- Soldadura.....		20
- Control de soldadura y reparaciones.....		20
- Tapones de inyección y retoques.....		5
		100
PRUEBA	2%	
- Prueba del repartidor.....		40
- Prueba de la tubería.....		60
		100

En el último cuadro del apéndice se muestra el resumen de las valorizaciones de la tubería forzada, que eran un indicativo del avance de montaje.

5.4.1 Montaje de tubos por día, semana o mes

El conocer la cantidad de tubos que pueden montarse por unidad de tiempo, es de suma importancia para hacer un cronograma de actividades de montaje, teniendo en cuenta que a de tratarse de tuberías de similares características, tanto en las dimensiones como en la dificultad de montaje.

De ésta manera se elaboró el cuadro N° 11, en base a datos consignados en el apéndice J, para los diferentes tramos de tubería, obteniendo los resultados siguientes:

- Promedio de montaje de tubería total = 0,2697 tubos/día
= 8,144 tubos/día
- Rendimiento mayor: En tramos al aire libre (incrementando con la disminución de distancia de traslado)
- Rendimiento menor: En codos (por presencia de mayores dificultades).

5.4.2 Montaje de peso de tubería por horas-hombre

Este índice es más amplio que el anterior, pues las comparaciones que pueden hacerse son mayores, teniendo en cuenta que entre mayor es el diámetro, el rendimiento alcanzado sera mayor.

Para poder sacar el presente índice que se muestra en el cuadro N° 12, fue necesario la utilización de los cua-

dros (Montaje de tubería en peso y horas hombre de montaje) que se muestran en el apéndice J .

CUADRO N^o 11

MONTAJE DE TUBOS POR TIEMPO

TRAMO	N ^o Tubos	TIEMPO días	MONTAJE Tub/día	MONTAJE Tub/mes	PROMEDIO
Distrib	7	49	0,143	4,294	0,2697 Tubos/día 8,144 Tubos/mes
Gal.Hor	10	58	0,172	5,181	
Codo 4	4	156	0,026	0,770*	
Pique	28	93	0,301	9,030	
BA3	5	29	0,172	5,170	
BA3/BA2	29	70	0,410	12,450	
BA2	3	9	0,350	10,000	
BA2/BA1	27	70	0,380	11,590	
BA1	5	20	0,250	7,460	

* No representativo por problemas ajenos al montaje.

Fuente: Elaboración propia. (Ambos cuadros)

CUADRO N^o 12

MONTAJE DE PESO DE TUBERIA POR HORAS-HOMBRE

AÑO	MES	MONTAJE DE PESO Kg/hora-hombre	PROMEDIO	
1984	Marzo	76,1	69,23 Kg/Hora-hombre	
	Abril	91,0		
	Mayo	70,4		
	Junio	57,0		
	Julio	47,0		
	Agosto	103,0		
	Setiembre	87,2		
	Octubre	62,6		
	Noviembre	80,5		
	Diciembre	42,4		
	1985	Enero		72,5
		Febrero		81,5
Marzo		60,5		
Abril		51,4		
Mayo		55,3		

El valor obtenido es de 69,23 Kg/hora-hombre, el mismo que se encuentra dentro de los valores usuales de montaje mayor, lo que naturalmente evidencia el porque se logró finalizar los trabajos dentro de los plazos fijados, según el cronograma de actividades.

5.4.3 Rendimiento de soldadores

El conocer el rendimiento alcanzado por los soldadores, es de suma importancia para el montador y para el Ingeniero Supervisor, pues con ello se puede estimar el tiempo necesario para la finalización de determinada etapa de la tubería y también para el control de horas-hombre trabajadas cuando la obra es a destajo.

Para ésto se a incluido la figura N^o 49 que indica el rendimiento de soldadores, máximo y normal promedio en m de soldadura por hora, en función del espesor de chapa , gráfico que es consecuencia de la estadística experimental.

La apreciación del rendimiento de soldadores para Machu picchu se a realizado, mediante la elaboración del cuadro N^o 13, en base a los cuadros anteriores y de apéndice J . Se verifica en este cuadro que el rendimiento en la mayoría de los casos se encuentra un poco superior al normal promedio, excepto un tramo que se encuentra por debajo, el cual se puede deber a ser una de las primeras soldaduras realizadas en obra, así como al espesor de chapa.

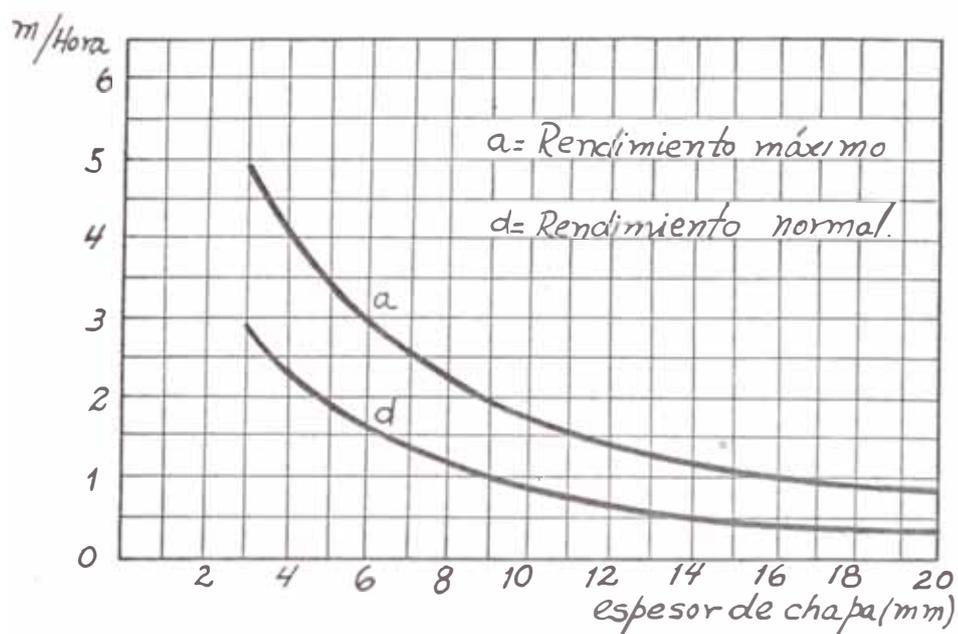


FIG. Nº 49 Rendimiento máximo y normal de soldadura por arco

Fuente: "Tratado general de soldadura" TOMO II-Cap. IX Fig. 514- Pag.431 de P.SCHIMPKE-H.A. HORN

CUADRO Nº 13

RENDIMIENTO DE SOLDADORES EN TUBERIA FORZADA DE MACHUPICCHU

TRAMO	ESPESOR mm	HORAS HOMB.	LONGITUD m	RENDIMIENTO m/h			APRECIAC.
				T.M *	T.N *	Real	
Distribuid.	16	18	11,3	1,10	0,50	0,63	Buena
Distribuid.	25	24	5,52	0,65	0,25	0,23	Bajo
Galería Hor	18	65	40,72	1,00	0,40	0,64	Buena
Pique Vert.	18	322	205,84	1,00	0,40	0,64	Buena
BA2-BA3	16	251	210,48	1,10	0,50	0,84	Buena
BA2-BA1	14	291	229,34	1,30	0,65	0,79	Buena
Codo BA3	18	60	36,75	1,00	0,40	0,61	Buena

* T.M = Teórico máximo (De figura Nº 49)

T.N = Teórico normal (De figura Nº 49)

Fuente: Elaboración propia.

C A P I T U L O 6

P R U E B A S

6.1 Chequeo de soldaduras

Se tiene el conocimiento que existen 4 clases de soldaduras, en el ensamble de soldaduras tradicionales y que generalmente en las tuberías forzadas, las soldaduras son de la clasificación 1 y 2, dada la envergadura y tipo de trabajo; excepcionalmente se tienen soldaduras de inferior calidad (CLASE 3 y CLASE 4), para tuberías de menor envergadura.

Dependiendo de la clase de soldadura, se tienen los tipos de controles a los que deben someterse, según las normas aceptadas y que sintéticamente se muestran en el Cuadro N^o 14.

De éste cuadro se desprende que los controles más importantes son:

- * Calificación de los soldadores, calificación del modo de operación.
- * Control de chaflanes (Visual y dimensiones), según las indicaciones del cuadro N^o 15
- * Control radiográfico y de ultrasonidos.
- * Control por tintes penetrantes.

CUADRO Nº 14

CONTROL DE SOLDADURA EN FUNCION DE LAS CLASES

CLASES CONTROLES	1	2	3	4
Calificación de soldadores	Obligatorio o de acuerdo a NF.028-310 ó ASME sección IX.			Eventualm.
Calificación del modo de operación de soldadura	Obligatorio de acuerdo a NF.028-320 ó ASME sección IX.			Eventualm.
Ensayos mecánicos	Eventual	Eventual	Eventual	No
Control de chaflanes.	Obligat.	Obligat.	Obligat.	No
Control de soldadura durante el soldo.	--	--	--	--
Control de soldadura después de terminadas.				
* Examen visual	Obligat.	Obligat.	Obligat.	Obligator.
* Control dimensión	Obligat.	Obligat.	Obligat.	Por sondaj.
* Control por radio o ultrasonidos.	100 %	Sondaje	No	No
* Control por tintes penetrantes y Magnetoscopia	Sobrepedido			
	Sobre soldadura en "T", los tintes penetrantes son obligatorios. Antes del tratamiento térmico sondaje, después del tratamiento al inicio del control.			

Fuente: "Proceso de soldadura en Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu"- Grupo Hidroeléctrico Machupicchu.

El chequeo de las soldaduras permite, certificar la calidad y buen funcionamiento en el futuro de todas las uniones soldadas, importante en las estructuras de envergadura cuya falla, representa ingentes pérdidas.

CUADRO Nº 15

CONTROL DE CHAFLANES

CLASES TIPO DE CONTROL	1	2	3
Dimensiones * Tolerancias de ángulo de chaflán * Cota de talón para soldadura.	± 10% ± 0,3	± 10% ± 0,3	± 10% —
Aspectos * Chaflán y bordes a soldar. - Defecto - Superficie - Rugosidad	Reparación obligatoria por soldadores calificados. Debe estar esmerilada en unos 20 mm. Ra = 12,5 micrones (ISO N 10-18LCA)		
Densidad * Metal de base acero fundido. - Líquidos penetrantes o magnetoscopia - Ultrasonidos - Radiografía * Metal de base, laminado y forja. - Líquidos penetrantes. - Ultrasonidos	Según CCH 70-2 Según CCH 70-2 Según ASTM E 7164 y E 186-65T Según ASME sección VIII obligatoria o para acero forjado y laminado e 80 mm Según NF-A 04-305 o según ASTM A-435		

Los controles correspondientes a aspecto visual, aspectos y dimensiones, para soldaduras tope a tope y soldaduras en ángulo se pueden observar en los cuadros correspondientes al apéndice K.

6.1.1 Ultrasonido

El control por ultrasonidos es un control no destructivo que se realiza con el objeto de buscar los defectos internos de las soldaduras, a fin de determinar si los mismos son aceptados o rechazados, dependiendo ésto de la clase de soldadura que se trate y de lo que dispongan las normas, como el caso de la ASME sección VIII u otra similar.

Para poder entender en forma adecuada este tipo de control, a de conocerse algo de su historia, las técnicas que se utilizan y otros aspectos.

El primero que utilizó los ultrasonidos para la detección de grietas fue SOKOLOV en el año de 1934, quién empleo un método convertidor de imagen simple, técnica burda y de poca aplicación práctica. No se desarrollo muchos progresos en este campo sino hasta el desarrollo de pulsos.

En general se utilizan ondas longitudinales y si es posible se emplea normalmente el método de eco de pulsos de sonda simple, el cual consiste en hacer pasar a través de la muestra un haz pulsado de ondas ultrasónicas, procedente de un transductor reversible colocado sobre una superficie, de tal manera que se refleje el haz desde la superficie opuesta o desde un defecto. Este método es adecuado si la muestra presenta la dos superficies paralelas y el defecto es lineal y aproximadamente paralelo a ellas, pero no se encuentra demasiado próximo a una superficie u otro defecto.

Para la detección de las grietas se utiliza normalmente un transductor cristalino, el que se coloca en una armazón adecuada, denominándose al dispositivo completo sonda.

El cristal se monta con un amortiguamiento energético, el que produce la propagación de pulsos cortos, con lo que se obtiene mayor exactitud en la localización de defectos y en la distinción de defectos próximos. Para evitar el desgaste entre las superficies del cristal y el material a ensayar, se protege frecuentemente al transductor en una cubierta de plástico (Perspex o PVC), que se acopla al cristal con aceite. Idealmente las impedancias de la sustancia constitutiva del transductor, el material de la cubierta protectora y el aceite deben ser similares.

Si un defecto no es paralelo a la superficie, es mejor utilizar una sonda angulada, que consiste en un transductor montado sobre una cuña, permitiendo que las ondas incidan normalmente al defecto y se logra un mayor grado de sensibilidad. La utilización de sondas de ángulo variable permite estimar las direcciones de los defectos e indican también las posiciones de grietas situadas en posición difícil de localizar, que podrían quedar sin ser detectadas por una sonda ordinaria.

Para la localización de defectos en muestras que presentan formas irregulares y para la detección de grietas a alturas o profundidades de orden igual o inferior a una longitud de pulso, se utilizan 2 sondas una actuando como emi

sora y la otra como receptora. Se debe tomar precauciones al objeto de asegurarse, que no se produzcan otros acoplamientos entre los transductores, más que a través del medio.

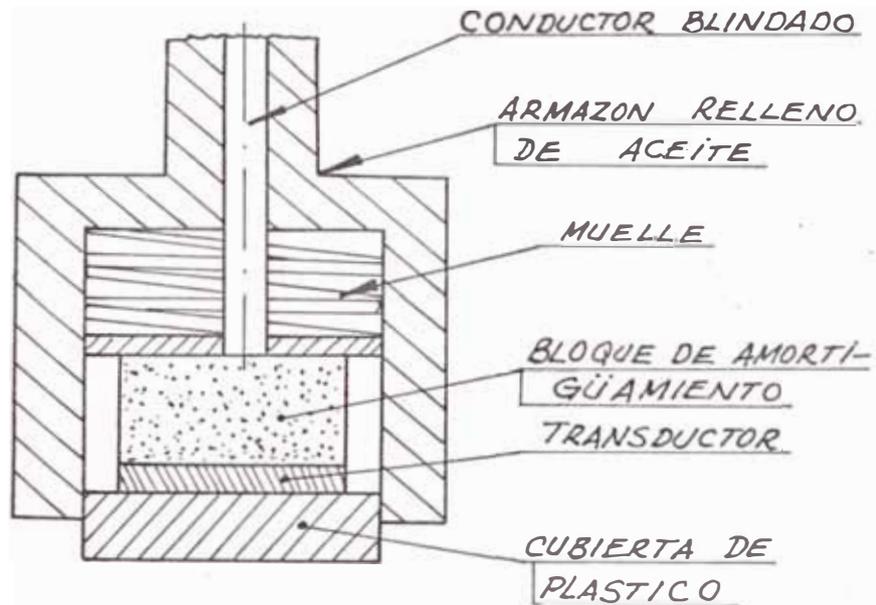


FIG. Nº 50 Diagrama esquemático de la sonda de onda longitudinal.

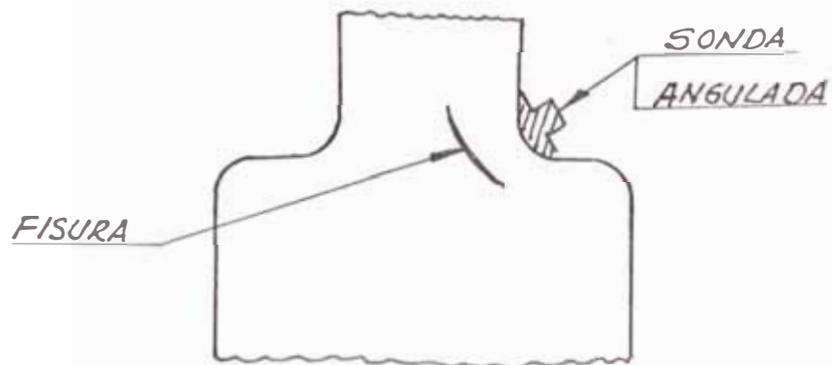


FIG. Nº 51 Localización mediante una sonda angulada de un defecto situado en posición difícil de determinar.

La detección de grietas mediante ultrasonidos, requiere de una destreza considerable por parte del operador, quién gracias a un adiestramiento adecuado, debe poder identificar diferentes tipos de defectos a partir de las configuraciones de las trazas de la pantalla del osciloscopio.

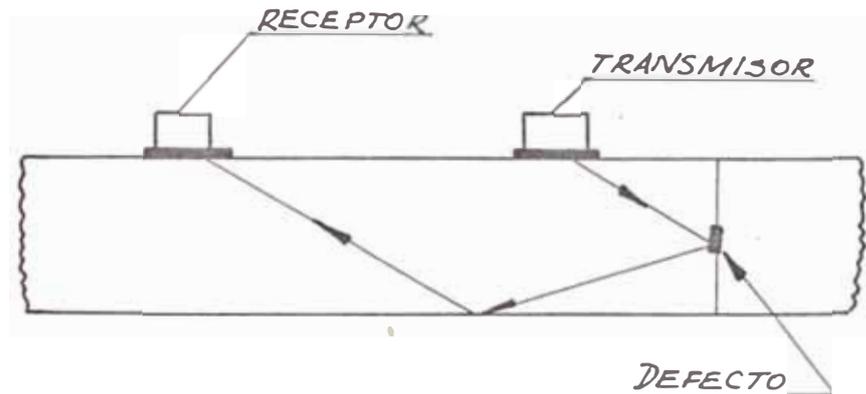


FIG. Nº 52 Utilización de sondas de onda transversal para localizar un defecto de una soldadura a tope.

Se debe tener cuidado de que una traza corresponde a un defecto real, ya que se pueden producir trazas espúreas, como resultado por ejemplo de la dispersión del haz y la reflexión en las caras de la muestra, acompañada de conversión de modos. También puede suceder que se produzca un defecto en una posición de mínima presión acústica con el resultado de que no aparece ninguna traza o solamente una pequeña traza.

a) Construcción de palpadores angulares

La variación de uniones soldadas hacen que los chequeos de las mismas se efectúen en la mayoría de los casos, mediante palpadores angulares. Dado que usualmente

no se elimina el sobreespesor de los cordones de soldadura, hay que desistir del empleo de palpadores normales de ondas longitudinales para realizar su examen, pues en la mayoría de los casos es imposible lograr un buen acoplamiento sobre la superficie del cordón, otras veces los defectos son de orientación inclinada (ver figura N^o 53), por lo que no constituyen buenos reflectores para ser detectados por medio de ondas longitudinales.

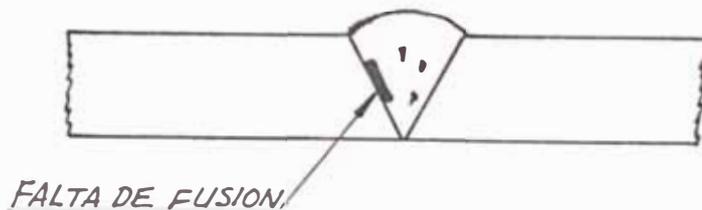


FIG. N^o 53 Defecto inclinado

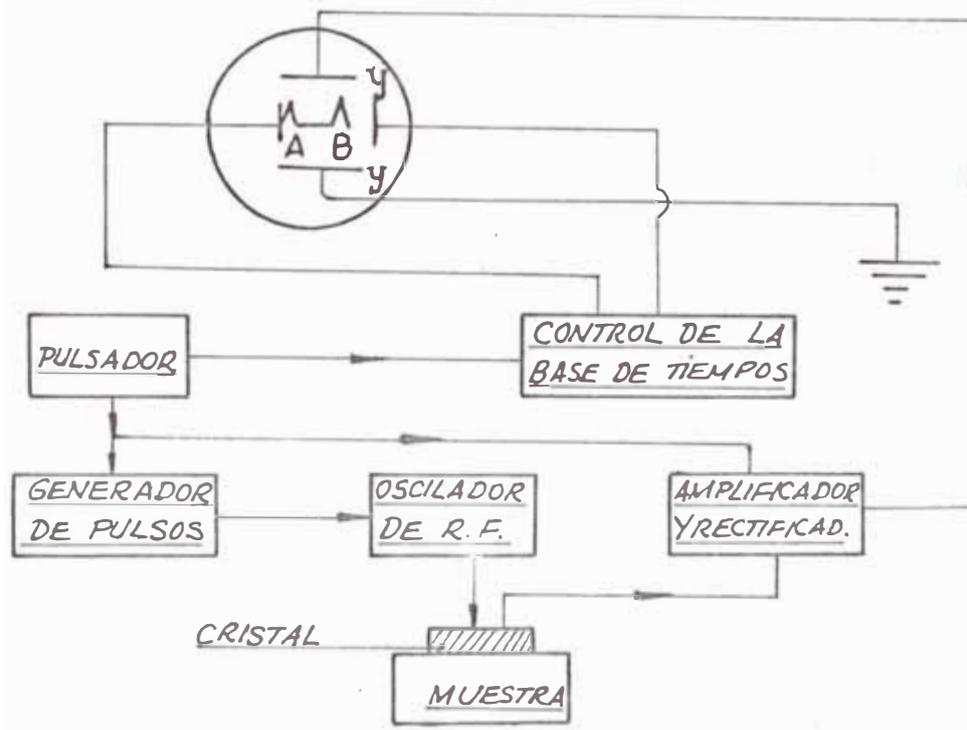


FIG. N^o 54 Diagrama esquemático simplificado del aparato utilizado en técnica de pulsos.

Los inconvenientes anteriormente citados, se evitan y utilizando palpadores angulares, los que emiten ondas longitudinales bajo un cierto ángulo, el haz de ondas sufre al llegar a la superficie de la pieza a verificar un "Cambio de modo", dando origen a un haz de ondas a través de la pieza (transversales). Este haz refractado recorre la chapa en zig-zag (ver figura N^o 55), pudiendo detectar defectos de inclinación cualquiera, eligiendo un ángulo de entrada conveniente.

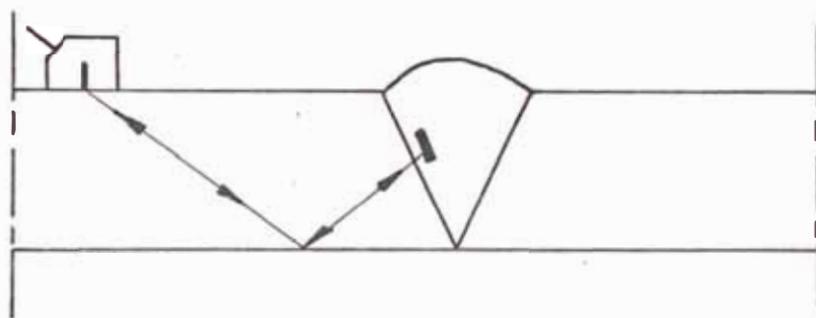


FIG. N^o 55 Recorrido del haz de ondas transversales

El ángulo que llevan los palpadores marcado en la cubierta, se refiere al de refracción de las ondas transversales en acero. Los palpadores son fabricados para ángulos de refracción en acero entre 35 a 80° .

La plaquita piezoeléctrica origina una onda longitudinal, que tras recorrer la cuña de plexiglas se refracta en la superficie límite, dando una onda transversal dentro del material a verificar, cuyo ángulo de refracción depende de la inclinación de la plaquita.

El sonido recorre previamente al material, la lámina de plexiglas, por lo que debido a la atenuación del sonido en esta cuña, se hace necesario emplear cristales de titanato de bario, cuya sensibilidad es elevada.

Los palpadores angulares normales cuya denominación es WB, llevan un cristal de 2 Mhz de frecuencia y tienen una superficie de $10 \times 20 \text{ mm}^2$, los palpadores angulares miniatura denominados MWB, llevan montados un cristal de 4 Mhz de frecuencia y $5 \times 10 \text{ mm}^2$ de superficie.

En el lado de la cuña puesto al cristal va alojado un elemento amortiguante, cuyo cometido es atenuar los haces sonoros, reflejados por la superficie del objeto sometido al control, los que podrían originar ecos molestos.

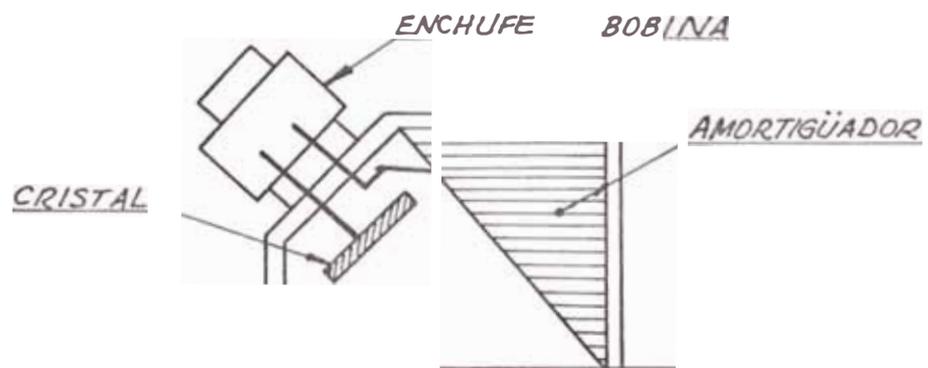


FIG. Nº 56 Esquema de un palpador angular.

b) Determinación del punto de salida del haz de un palpador angular

El punto de salida del haz de un palpador angular no

siempre coincide con el señalado en la carcasa por el constructor, lo cual se da por el desgaste de la suela del palpador, con el uso del mismo. El conocimiento del punto de salida exacto, es muy importante cuando el equipo se ajusta en recorrido de haz.

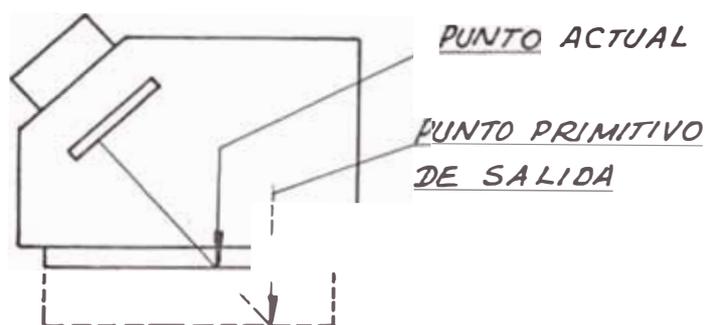


FIG. Nº 57 Incidencia del desgaste en la posición de salida del haz ultrasónico.

El punto exacto de salida de un palpador angular normal, se determina usando la pieza patrón V1 y para los palpadores angulares miniatura, utilizando la pieza patrón V1 ó V2.

Como ejemplo veremos la determinación del punto de salida del haz utilizando la pieza V1:

Una vez elegida una escala conveniente se situa el palpador sobre la pieza patrón como se ve en la figura Nº 58, desplazándolo hacia adelante y hacia atrás, hasta conseguir el eco de máxima altura en la pantalla, lo que se conseguirá cuando el punto de salida se encuentre situado sobre el centro del círculo de 100 mm de radio, el cual se halla en la ranura bilateral de la pie-

za patrón.

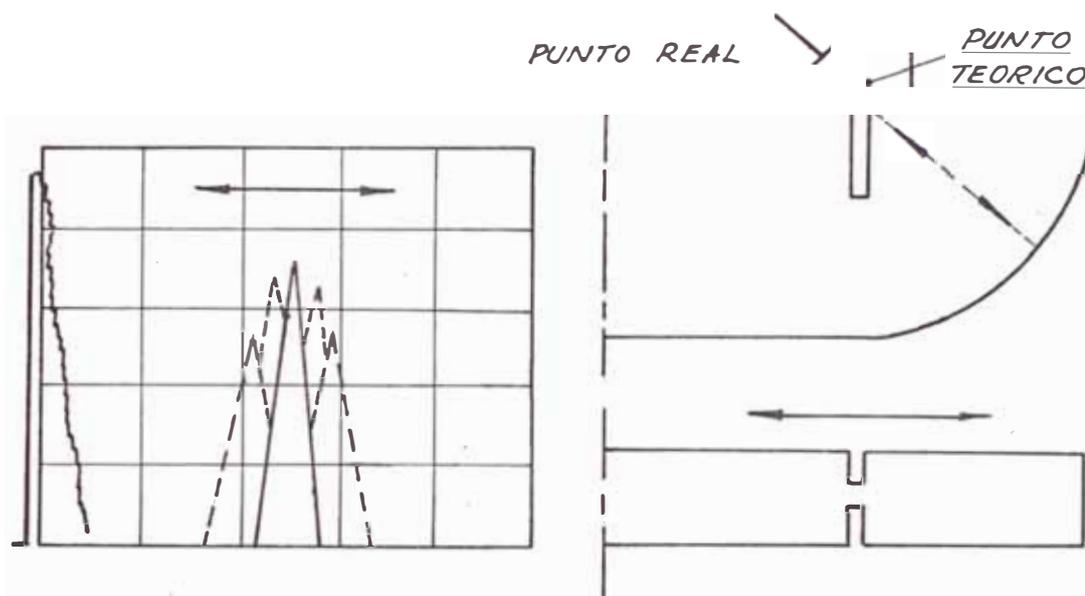


FIG. Nº 58 Determinación del punto de salida del haz de ultrasonidos utilizando la pieza patrón V1 .

c) Determinación del ángulo de salida del haz de un palpador angular

Aunque llevan marcado el ángulo de salida en la carcasa, muchas veces el verdadero ángulo de salida del palpador, no coincide con el señalado por el constructor debido generalmente al desgaste irregular de la suela del palpador, con el uso. (Ver figura Nº 59).

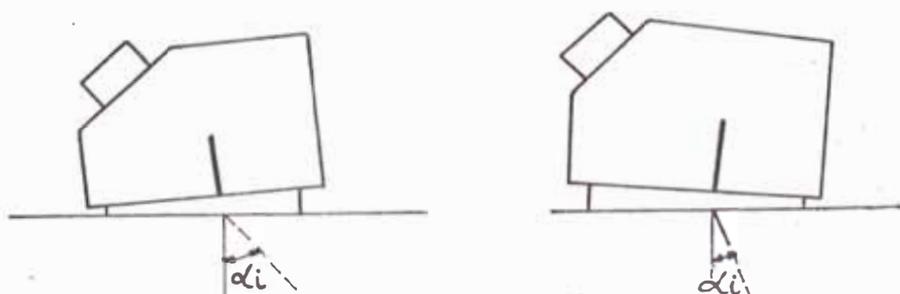


FIG. Nº 59 Desgaste de suela de palpador angular

La determinación del ángulo real se realiza con ayuda de la pieza patrón V1, de la siguiente forma:

Se apoya el palpador sobre la pieza buscando el eco de máxima altura, procedente del círculo de "metacrilato", que lleva dicha pieza (ver figura N^o 60). La máxima altura se logrará cuando la prolongación teórica del rayo central del haz, pase por el centro de dicho círculo, a continuación se baja una vertical desde el verdadero punto de salida, hasta la escala graduada de la pieza patrón, en la cual se podrá leer directamente el ángulo de salida.

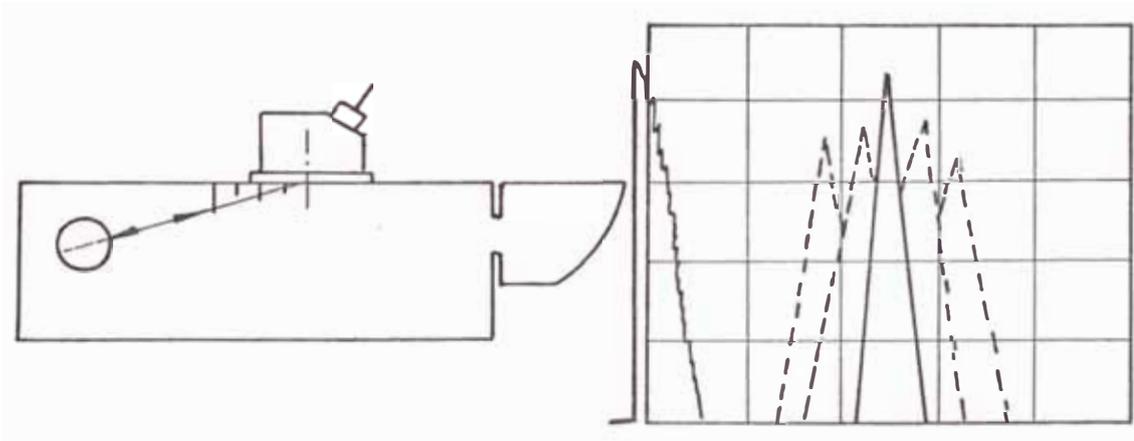


FIG. N^o 60 Determinación del verdadero ángulo de salida del haz ultrasónico.

d) Propagación de un haz de ondas transversales a través de una chapa

El haz se propaga en zig-zag a través de la chapa y si en su camino no encuentra ningún reflector de orien-

tación favorable, continuará su propagación a través de la chapa y en la pantalla no habrá indicación alguna. En cada reflexión la divergencia⁽¹⁾ del haz va haciéndose mayor, manteniendo el máximo de presión sonora en el centro del haz. (ver figura Nº 61).

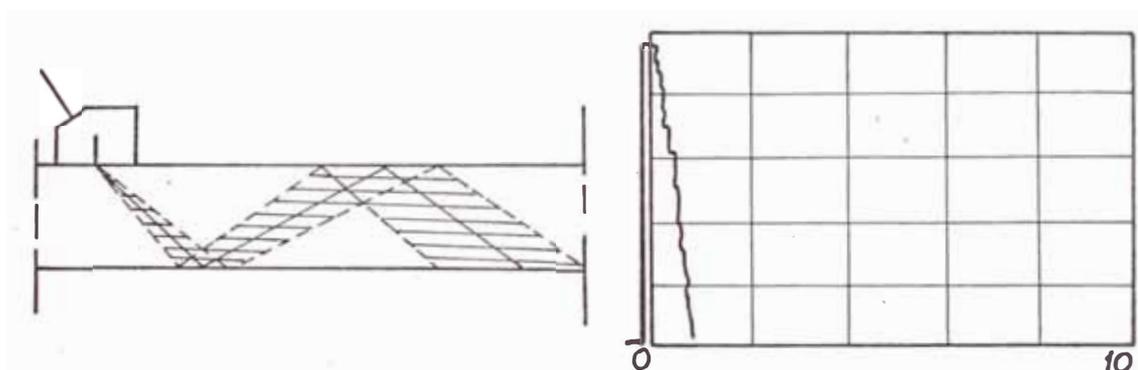


FIG. Nº 61 Recorrido del haz sonoro en chapa sin defectos ni obstáculos.

e) Reflexión en el borde de una chapa

Cuando el haz incide en los bordes de la chapa, aparecen ecos, correspondiendo el de mayor altura al centro del haz sobre el borde inferior. (ver figura Nº 62)

f) Barrido de la sección transversal de una chapa por un haz de ultrasonidos- salto y medio salto

La reflexión del haz en la esquina inferior se produce cuando el palpador se encuentra a $P/2$ entre el borde de la chapa y el punto de salida del haz y la reflexión

(1) La divergencia depende de la superficie del cristal piezoeléctrico y de la frecuencia con que se emite.

en la esquina superior se produce a una distancia P. (figura Nº 63).

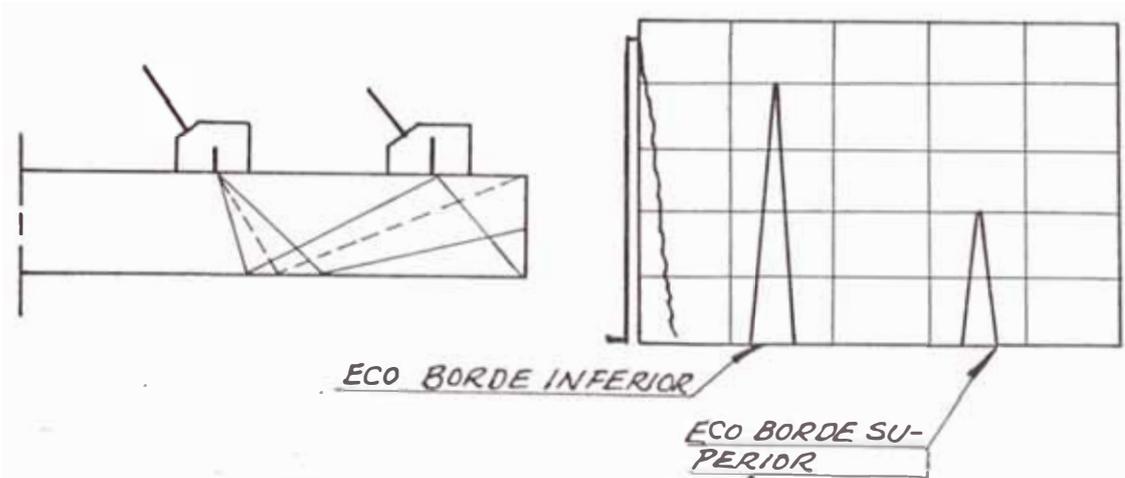


FIG. Nº 62 Ecos por reflexión en borde de chapa

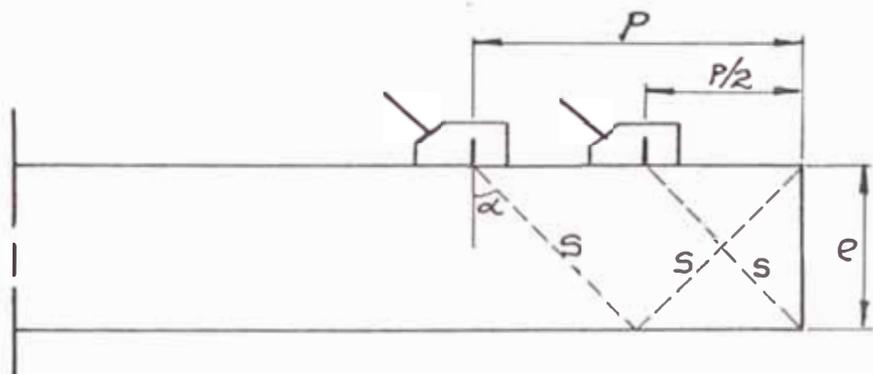


FIG. Nº 63 Distancias a que se producen la reflexión en borde superior e inferior de la chapa.

El haz entonces barre toda la sección de la chapa, al desplazar el palpador entre $P/2$ y P , denominándose a P como salto y a $P/2$ como medio salto.

Así conociendo el ángulo de incidencia y el espesor de la muestra, se podrá conocer P y $P/2$, mediante la ecuación: $P = 2 e \operatorname{Tg} \alpha$ (LXXVIII)

Donde:

e = Espesor de chapa

α = Angulo de incidencia. (real).

Los palpadores angulares llevan grabado para su angulo de entrada el factor $2 \operatorname{Tg} \alpha$, por lo que basta conocer e para tener el valor de P y $P/2$.

g) Determinación de la situación de un defecto en una chapa.

Supongamos que al verificar una chapa con palpador angular se detecte un defecto, que producirá un eco si la orientación es favorable. Si el equipo a sido calibrado en recorrido de haz, podremos conocer directamente la distancia S a la que se encuentra el defecto, leyendo doble la pantalla. (ver figura N° 64).

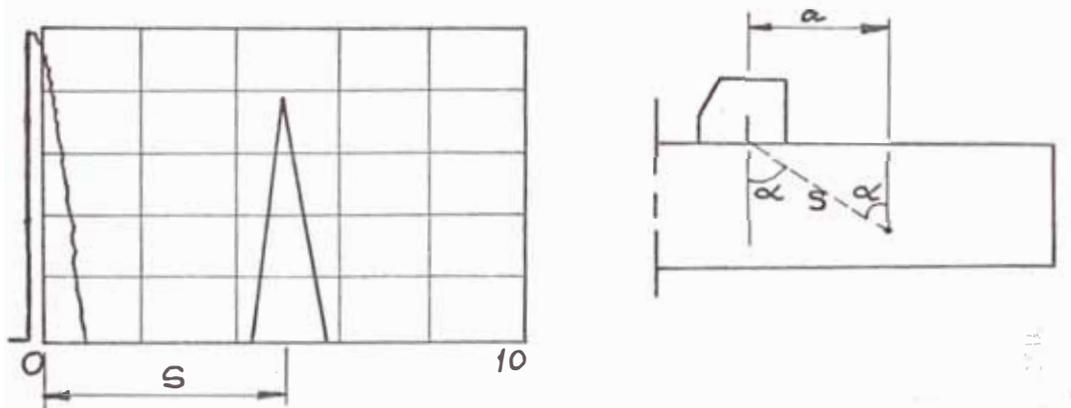


FIG. N° 64 Determinación de distancia a la que se encuentra el defecto.

Por sencillas expresiones de trigonometría:

$$a = S \operatorname{sen} \alpha \dots (\text{LXXIX}) \quad t = S \cos \alpha \dots (\text{LXXX})$$

Considerando que el defecto se localiza después de una reflexión del haz en la superficie inferior. (ver figura Nº 65).

$$a = (S_1 + S_2) \operatorname{sen} \alpha \dots (\text{LXXXI})$$

$$t = e - b; \quad b = t' - e; \quad t' = (S_1 + S_2) \cos \alpha (\text{LXXXII})$$

Donde:

$$S_1 + S_2 = S \text{ (lectura directa sobre pantalla).}$$

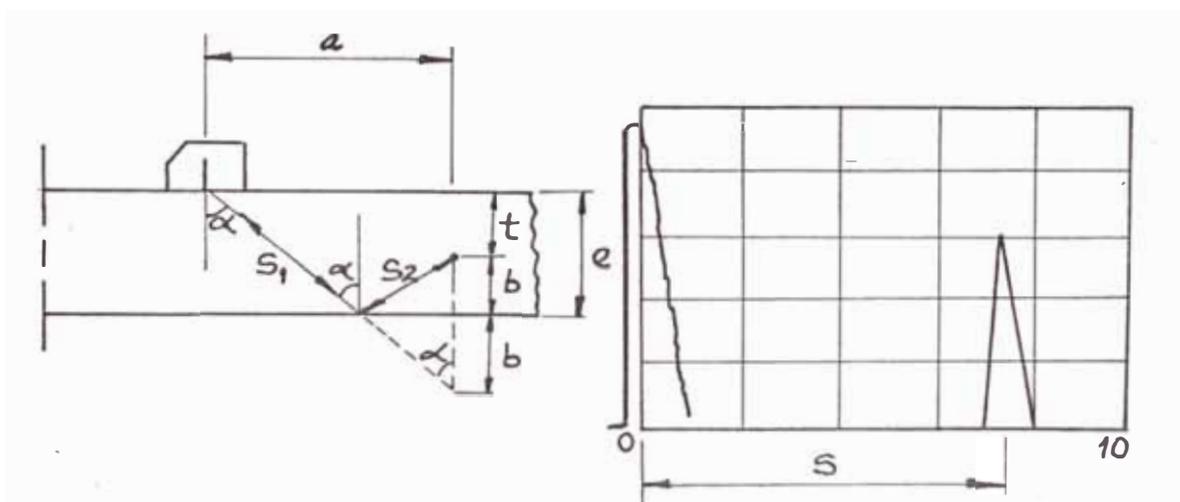


FIG. Nº 65 Defecto situado después de una reflexión del haz en la superficie inferior.

h) Requisitos anteriores al comienzo de un examen por ultrasonidos de un cordón de soldadura

Se debe de conocer:

- * Clase de material a examinar.
- * Espesor de chapa.
- * Preparación de bordes del cordón.
- * Procedimiento de soldadura utilizado.

* Si la soldadura a sufrido tratamiento térmico.

* Existencia de plato o anillo soporte en la raíz del cordón.

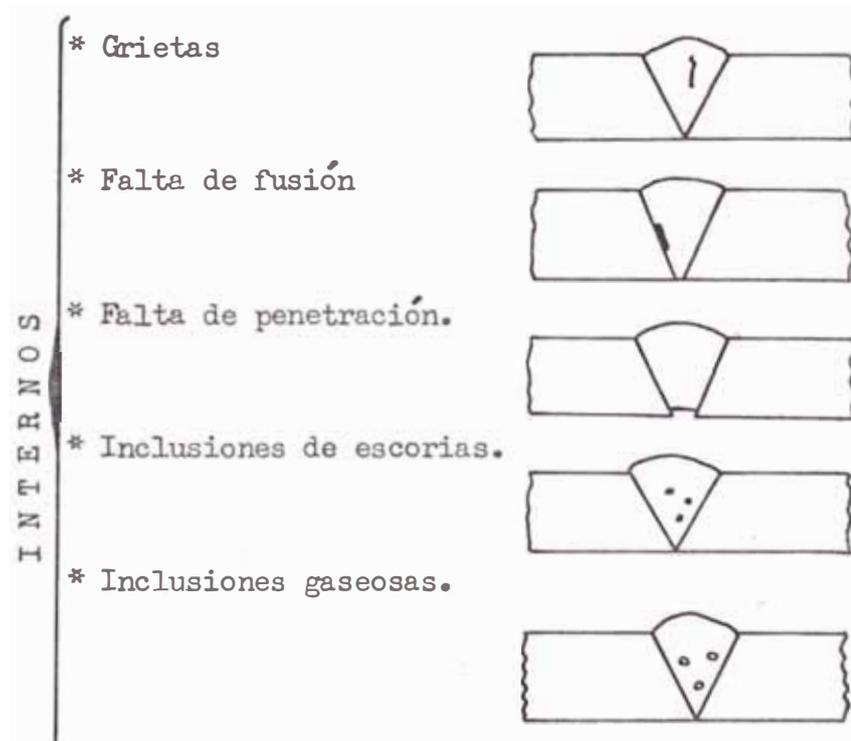
- Material a examinar: Conocer el tipo de material (ace ro dulce, aleado, inoxidable, y otros), ayuda a saber si en las zonas adyacentes se va a encontrar estructuras de grano grueso o fino, lo que determina la frecuencia a emplear.
- Espesor de chapa: Aparte de ayudar en la elección del ángulo a emplear, permite conocer las distancias de salto y medio salto.
- Preparación de bordes: Ayuda a determinar e interpretar los defectos, así por ejemplo si la preparación es en X, la posible falta de penetración que pudiera tener este cordón, se encontrará en el centro del mismo, es decir entre las pasadas de raíz de uno y otro lado.
- Procedimiento de soldadura: Es de gran importancia para determinar cuales son los defectos que con mayor seguridad se pueden encontrar, Así si el procedimiento es con CO₂ se sabe de antemano la no existencia de inclusiones de escoria.
- Tratamientos térmicos: A veces a ciertos tipos de cordones de soldadura, es necesario someterlos a tratamiento térmico, los cuales ori-

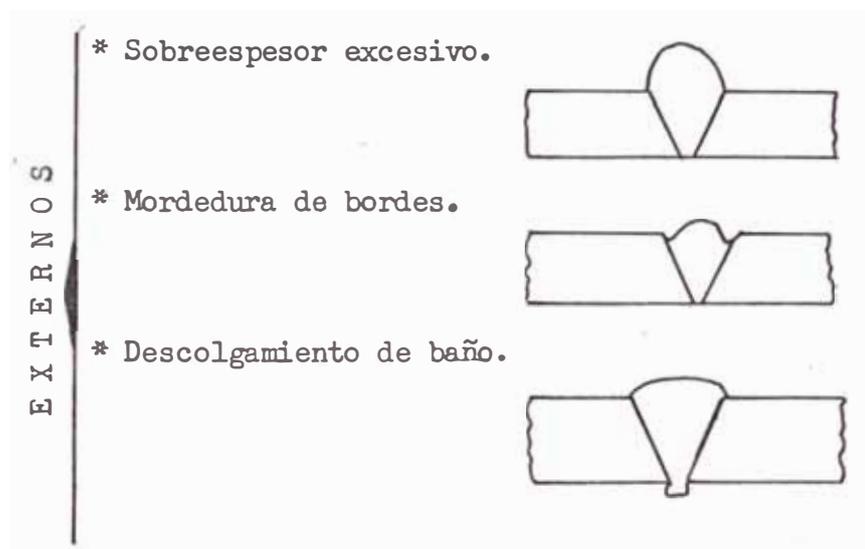
ginan cambios en la estructura de grano del cordón, lo que influye en la elección de la frecuencia.

- Existencia de plato o anillo soporte: En casos que se tengan se debe esperar con seguridad, ecos debidos a reflexiones en los mencionados platos o anillos, lo que a de tenerse en cuenta a la hora de dilucidar si el eco procedente de la raíz, se debe a la presencia de un defecto real o a la de los anillos.

i) Defectos típicos que se producen en soldadura

Desde el punto de vista del operario de ultrasonidos los defectos de soldadura pueden agruparse:





Estos defectos producidos en la soldadura, se deben algunos a la inexperiencia y descuido del soldador (posición incorrecta del electrodos, eliminación insuficiente de escorias, etc), otros son inherentes al procedimiento empleado, también se deben al mal ajuste de los parámetros de soldeo (intensidad inadecuada, velocidad de desplazamiento del arco demasiado elevada, etc) y luego tenemos los defectos por mal proyecto de unión (preparación inadecuada de bordes para el espesor de la chapa, etc).

j) Posibilidad de detección de defectos internos en soldadura, mediante ultrasonidos

Eligiendo la técnica del control por ultrasonidos adecuada en cada caso, puede afirmarse que casi la totalidad de los defectos internos inherentes a las soldaduras, pueden ponerse en evidencia. Cada defecto entraña un cierto tipo de dificultad como se indica a continuación.

- Grietas: Las grietas longitudinales son fáciles de detectar relativamente, pero las transversales requieren un mayor cuidado, siendo necesario buscarlas con el palpador situado casi en paralelo al cordón (según figura N° 66), sin embargo no es posible así algunas veces, por lo que se recurre al control mediante dos palpadores, conectados en paralelo (figura N° 67), funcionando ambos como emisores y receptores.

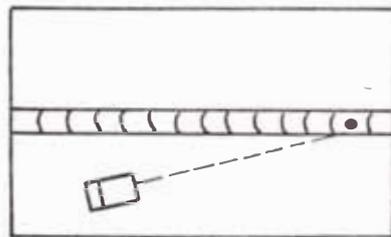


FIG. N° 66

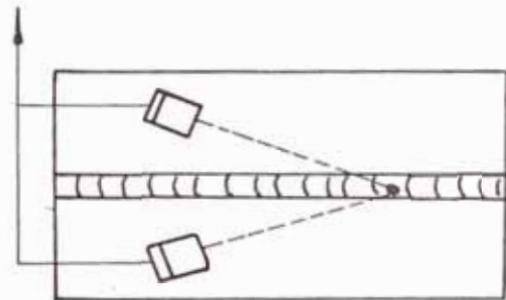


FIG. N° 67

- Faltas de penetración: Cuando la preparación de bordes de las chapas a soldar es en "V", la falta de penetración de existir se presenta en la raíz. Si el cordón lleva preparación en X o doble U, la falta de penetración suele producirse en el centro del mismo y si el ángulo del palpador es bajo (45 a 60°), debido a que las chapas son gruesas, puede ocurrir que al ser el defecto vertical y muy plano, no puede ser detectado con un sólo palpador, por lo que se utilizan 2 palpadores en serie, el primero emite y el segundo recibe. (ver figura N° 68).

- Faltas de fusión: Este defecto suele aparecer frecuentemente en los planos de los chaflanes de las chapas, produciéndose en ocasiones entre pasadas, por ejemplo en la unión de tubos por el procedimiento de CO_2 , su forma y orientación hacen que sea necesario un mayor cuidado en la localización mediante ultrasonidos.

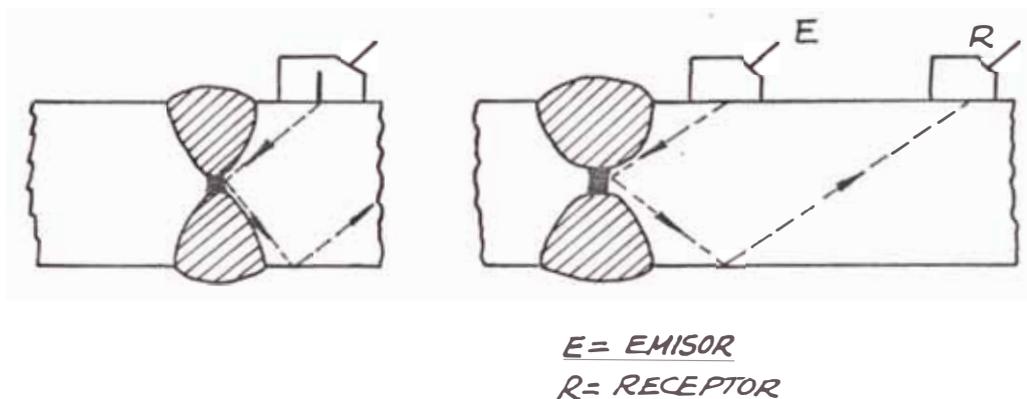


FIG. Nº 68 Falta de penetración

- Inclusiones de escoria: Es un defecto muy corriente en la soldadura eléctrica por arco manual, pudiéndose presentar en cualquier parte del cordón. Su detección normalmente no presenta problemas.
- Inclusiones gaseosas: Los más frecuentes de este tipo son los denominados poros; debido a que son reflectores esféricos muy pequeños, requieren un cuidadoso control. Cuando están agrupados su detección es más sencilla, así como cuando son vermiculares o son cavidades gaseosas grandes (que se encuentra en soldadura bajo CO_2).

k) Elección del ángulo del palpador

Se debe asegurar al elegir el ángulo del palpador , que el haz de sonidos recorra todo el cordón de soldadura, desplazándolo entre las distancias P y P/2. El cuadro N° 16 nos da los dominios de utilización de cada uno de los palpadores en función del espesor de chapa.

CUADRO N° 16

DOMINIO DE UTILIZACION DE PALPADORES

ESPESOR (mm)	ANGULO (°)	FACTOR(2 Tg α)
5 - 20	80	11
20 - 40	70	5,5
Sup. a 40	60	3,5
Sup. a 40	45	2,0

l) Localización de defectos en soldadura mediante palpador angular

Se a visto que para realizar la inspección de un cordón de soldadura, es necesario desplazar el palpador angular entre un salto y medio salto, no obstante a de saberse como realizar este movimiento, teniendo en cuenta que los defectos pueden tener una inclinación determinada, por lo cual hay que realizar el desplazamiento del palpador hacia adelante y atrás haciéndolo cabecear, de manera a obtener un movimiento en zig-zag (ver figura N° 69), con el fin de poder detectar todos los defectos inclinados además de los de orientación longitudinal.

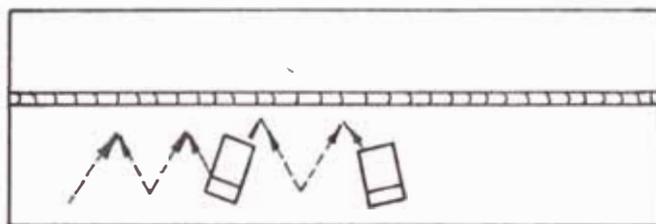


FIG. Nº 69

También hay que tener en cuenta que algunos defectos aparte de su inclinación respecto al eje del cordón, pueden tener una orientación tal que sólo constituyan buenos reflectores, desde un sólo lado del cordón, procurando entonces realizar la inspección desde ambos lados del cordón si es posible. (ver figura Nº 70)

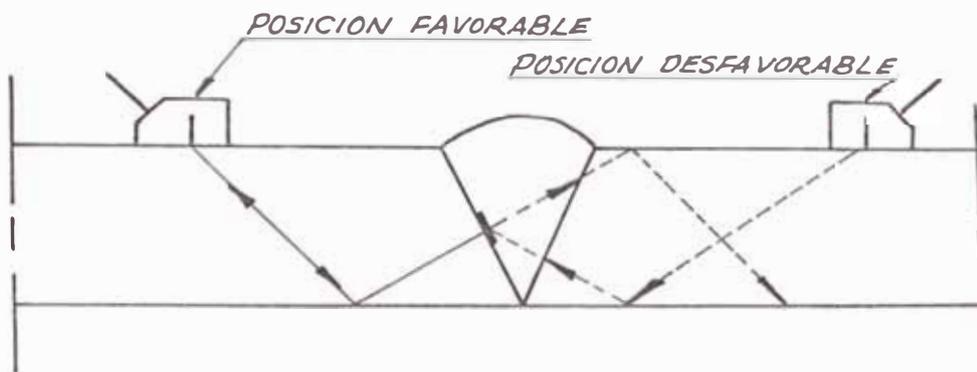


FIG. Nº 70

m) Ajuste de un equipo de ultrasonidos mediante palpadores angulares

Antes de realizar cualquier tipo de inspección por ultrasonidos, es necesario ajustar el equipo, teniendo en cuenta que para la calibración de dicho equipo son

necesarios 2 ecos de fondo, lo cual se consigue utilizando las piezas patrón V1 y V2.

- Ajuste con la pieza patrón V1: Se sitúa el palpador angular sobre la pieza V1, de manera que el punto teórico de salida del haz, coincida sobre la ranura de la pieza, dirigiendo el haz hacia el sector del círculo de radio 100 mm. Una vez en esta posición se desplaza el palpador hacia adelante y atrás, hasta conseguir el eco de máxima altura en la pantalla, lo que se dará cuando el punto real de salida coincida con la ranura de la pieza patrón que a su vez es el centro del círculo.

Si previamente se a elegido un campo de 200 y 250 mm y la amplificación es suficientemente amplia, se verá que en la pantalla aparecen 2 ecos; sin mover el palpador se trata de situar el primer eco en 100 mm y el segundo en 200 mm, lo que se consigue mediante los mandos de velocidad de desplazamiento y del punto cero del equipo.

El segundo eco es producto del sonido que no a ingresado al palpador después de la primera reflexión, retornando al sector circular por causa de las ranuras. El campo mínimo que se puede utilizar cuando se ajusta el equipo con palpador angular y pieza V1 es entonces de 200 mm. (ver figura N^o 71).

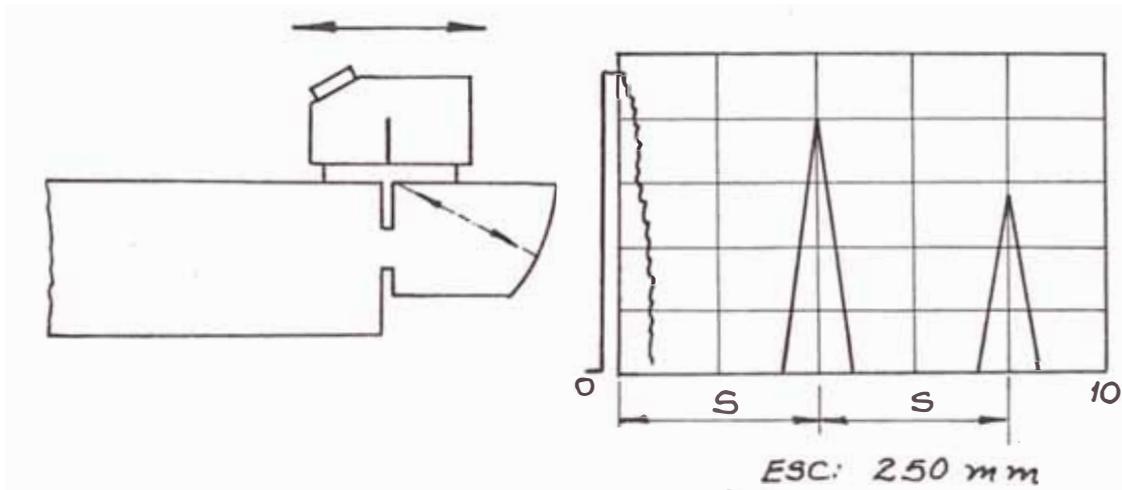


FIG. N° 71 Ajuste de equipo con pieza patrón V1

- Ajuste con pieza patrón V2 : Los palpadores angulares miniatura, pueden calibrarse además de la pieza patrón V1 con la pieza V2 . La pieza V2 tiene dos sectores de círculos, cuyos radios respectivos son de 25 y 50 mm. Existe por tanto la posibilidad de calibración, dirigiendo el haz de sonidos hacia el sector de radio 25 mm o bien hacia el de radio 50 mm. En el primer caso luego de haber obtenido el eco de máxima altura, producido cuando el punto de salida del haz se encuentra sobre el centro de los sectores, se sitúa el eco en la pantalla en 25 mm y el segundo eco en 100 mm, en el segundo caso la primera reflexión se sitúa a 50 mm y la segunda a 125 mm. (ver figura N° 72).

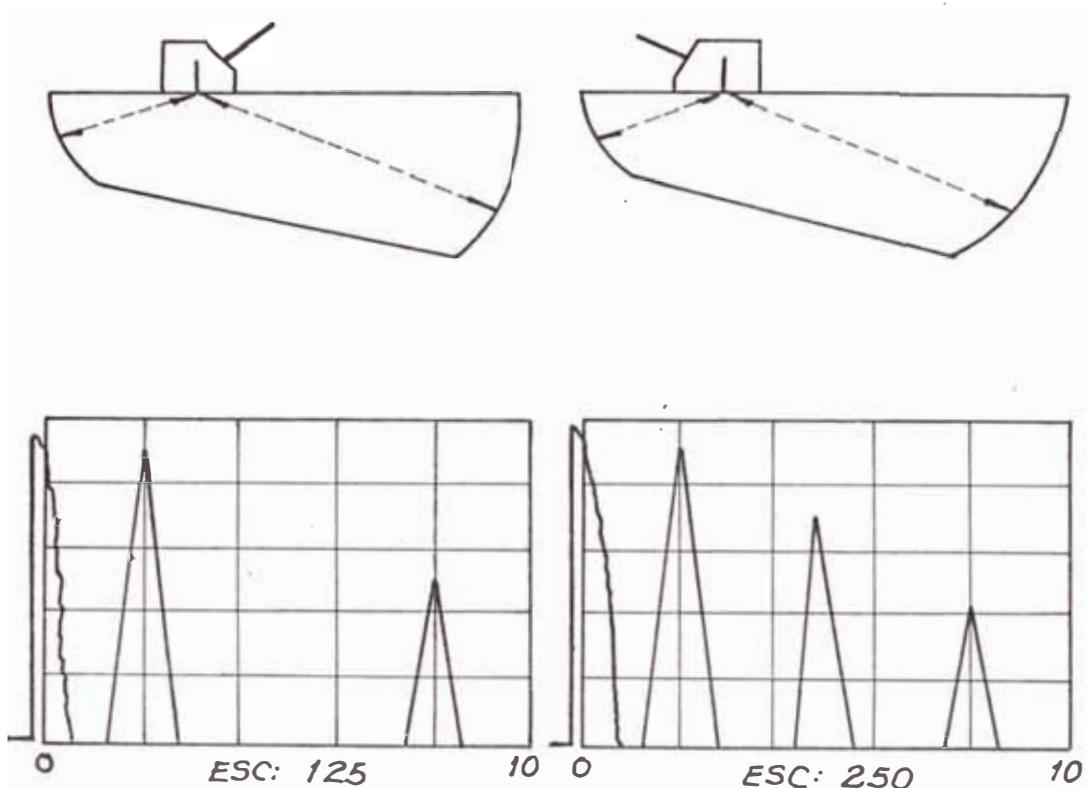


FIG. N^o 72 Ajuste de equipo con palpador angular y pieza patrón V2

n) Ajuste de un equipo en distancias de proyección mediante las piezas patrón V1 y V2

Como resulta incomodo el localizar el defecto cuando se a ajustado el equipo en distancias de recorrido, se usa el ajuste del equipo en distancias de proyección . Esto se hace de manera similar al caso anterior, sólo que los ecos no se sitúan en 100 y 200 mm ó 25 y 100 mm ó 50 y 125 mm, sino que ahora se colocan estas distancias proyectadas sobre la horizontal , es decir en el caso de la pieza patrón V1, sobre 100 sen y 200 sen . (ver figura N^o 73).

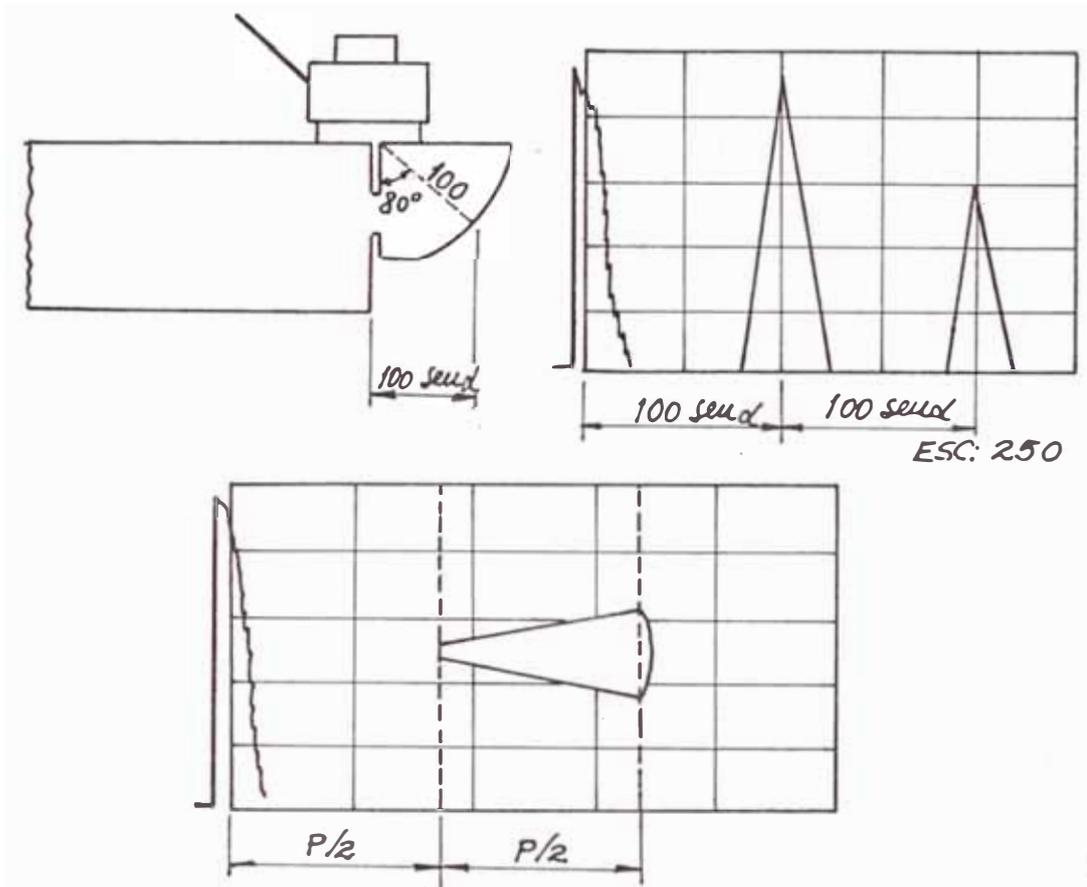


FIG. Nº 73 Ajuste en distancias de proyección

ñ) juste del equipo en distancias de proyección acortadas mediante el borde de la chapa

El ajuste del punto n, no requiere más que conocer el seno del ángulo del palpador, no obstante a veces resulta más comodo el ajuste en el borde de la chapa, para lo que se procede de la siguiente forma:

Se busca en la chapa en la cual está el cordón, un borde que esté cortado lo más escuadra posible o bien se recurre a una chapa del mismo material y espesor. Una vez elegida la escala conveniente (200 ó 250 mm), se dirige el haz hacia el borde de la chapa y se desplaza

el palpador hacia atrás, hasta que en la pantalla aparezca el eco debido a la reflexión en el borde inferior buscando el máximo eco, lo que sucede cuando el punto de salida esté a medio salto, anotando dicha distancia d_1 , se sigue desplazando el palpador hacia atrás buscando el segundo eco máximo, que se produce a la distancia d_2 o salto completo. (ver figura N^o 74)

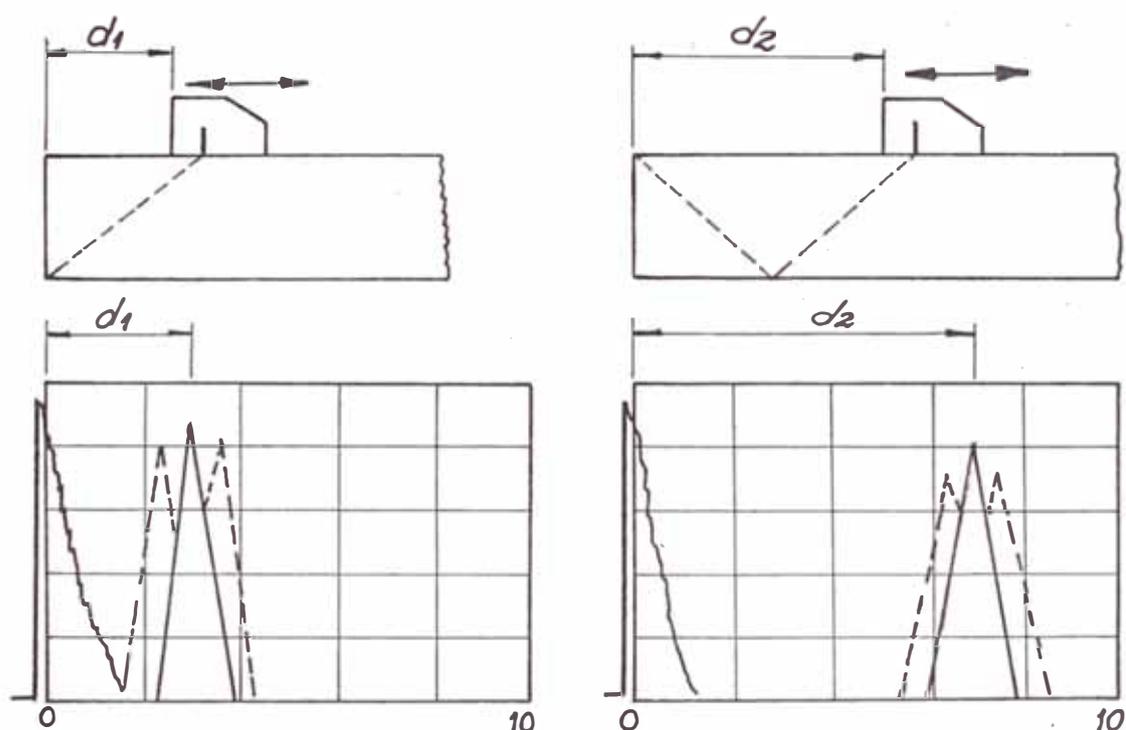


FIG. N^o 74 Ajuste en distancias de proyección acortadas mediante el borde de la chapa.

Este ajuste tiene la ventaja de que no precisa de algún cálculo, ni es necesario saber el punto exacto de salida del haz. No obstante no siempre es posible realizarlo, debido a que la chapa no posee borde o bien éste sea irregular.

o) Ventajas del control por ultrasonidos

- * Los espesores de pared pueden estar comprendidos entre amplios límites. (1 mm a 10 m).
- * El exámen es de rápida ejecución y los resultados son inmediatos.
- * El procedimiento es muy sensible por lo que puede detectarse defectos muy pequeños.
- * Los equipos son de fácil transporte.
- * Los operarios no están expuestos a ninguna clase de radiación.
- * El exámen resulta relativamente barato.

p) Inconvenientes del control por ultrasonidos

- * El resultado del control no puede ser documentado suficientemente.
- * La determinación de la clase de defectos es en ocasiones relativamente difícil.
- * El resultado del control depende del operario, por lo cual éste debe ser altamente calificado y responsable de su trabajo.
- * Los defectos que con más frecuencia se presentan en soldadura, se a determinado que son, inclusiones de escoria, falta de penetración, falta de fusión y grietas. Mediante el ensayo de ultrasonidos puede con seguridad detectarse los defectos graves (grietas, falta de fusión, falta de penetración e inclusiones grandes), pero los defectos pequeños como poros aislados y

pequeñas inclusiones (los cuales se a comprobado no influyen con su presencia en las características mecánicas del cordón), pueden pasar inadvertidos durante el control por ultrasonidos.

Para el caso específico de Machupicchu, a continuación se tiene la especificación del control de ultrasonidos:

Documento contractual

ASME sección VIII

Documentos de referencia

Planos indicando la situación de las soldaduras a controlar.

Condiciones del examen

- * Examen ejecutado inmediatamente después de ejecutada la soldadura.
- * Extensión del control: 100% de las juntas soldadas.
- * Preparación de la pieza: Para el control la superficie de la chapa debe estar libre de depósitos y bastante lisa para permitir el buen acoplamiento acústico palpador-pieza, en una anchura de 200 mm de cada lado de la soldadura.
- * Calificación del personal: Sólo serán habilitados para efectuar dicho control, los operadores calificados.
- * Equipo: Debe ser un equipo de tipo de impulsión, en per-

fecto estado y reciente desde el punto de vista técnico.

- * **Palpador:** Palpadores emisores y receptores de 70° y 2 a 4 MHz. El defecto se buscará con simple y doble salto, desde cada lado de la soldadura.
- * **Acoplador:** Goma celulósica.
- * **Método operatorio:** Ajuste del aparato sobre bloque patrón revestido de una capa termosoldable .
(vease ASME sección VIII - anexo U (apéndice XII)).
- * **Amplificación:** 6 db durante la búsqueda.

Interpretación de los resultados-criterios de aceptación

Las indicaciones se evalúan según los criterios del código ASME sección VIII- anexo U (apéndice XII).

- * Los defectos de tipo lineal no se aceptarán si la amplitud sobrepasa el nivel de referencia y si la longitud sobrepasa las siguientes dimensiones:

6,4 mm	para	$e < 19 \text{ mm}$
8,5 mm	para	$19 \text{ mm} \leq e < 57 \text{ mm}$
19 mm	para	$e \geq 57 \text{ mm}$

- * Los defectos asimilados a grietas, falta de fusión, penetración incompleta, no se aceptarán cualquiera sea su longitud.

Reparación de los defectos

- * Todos los defectos no aceptables según los anteriores indicativos, se repararán conforme al proceso previsto en la especificación del procedimiento de soldadura.

- * Se someterá la zona reparada a los mismos exámenes iniciales.

Informe del examen

Cada control debe ser objeto de un informe que mencionará lo siguiente:

- * Identificación de la obra, de la pieza y de las soldaduras controladas.
- * Amplitud del control.
- * Método operatorio empleado.
- * Resultados del examen y decisión de aceptación o no.
- * Apellido y firma del operador.

6.1.2 Rayos X

El control por rayos X o gamma, al igual que el realizado por ultrasonidos, tiene por finalidad el buscar los posibles defectos internos, los cuales se podrán admitir o rechazar, según las especificaciones correspondientes.

El método consiste en hacer pasar por la muestra un haz de rayos, provenientes de una fuente radioactiva, que usualmente es Cobalto 60 ó Iridio 192, rayos que al igual que una radiografía común se impregnan en una placa de film sensible, que es revelada por los procedimientos comunes, quedando de esta manera una placa del cordón de soldadura con los posibles defectos existentes.

Tanto el método por ultrasonidos como el de rayos X o gamma, tienen sus inconvenientes en cuanto a su aplicación pero se puede decir que ambos métodos se complementan; dado que las posibilidades de control de cada uno de ellos están bien definidos, no se puede sustituir fácilmente el uno por el otro.

a) Ventajas del control por rayos X o gamma

- * Se obtiene un documento gráfico en el que pueden observarse los defectos.
- * La determinación de los defectos no depende del operario.

b) Inconvenientes del control por rayos X o gamma

- * Los defectos cuya orientación no es favorable a la dirección de radiación, no son detectados.
- * No hay posibilidad de conocer la profundidad de un defecto, a no ser que se emplee el método estereométrico.
- * Las instalaciones son relativamente caras y difícilmente transportables.
- * El proceso de inspección es algo lento.
- * Los espesores de pared algo fuertes grandes limitan su empleo.
- * El personal puede sufrir radiación
- * El exámen es más bien caro.
- * Los defectos graves muchas veces no son detectados, so

bre todo algunas grietas y la mayoría de las faltas de fusión. En cambio defectos como poros e inclusiones gaseosas, dan origen a una impresión buena sobre la placa radiográfica.

Para el caso de Machupicchu se tiene a continuación la especificación del control radiográfico.

Documento contractual

Código ASME sección VIII.

Condiciones del examen

- * Debe ejecutarse inmediatamente después de concluir la soldadura.
- * Amplitud del control: 5% de las juntas soldadas. Ninguna radiografía será ejecutada en la parte vertical de la tubería. (pozo o pique).
- * Preparación de las piezas: Las soldaduras deben estar libres de materias extrañas, óxido y toda clase de irregularidades, capaces de perjudicar la interpretación.
- * Calificación del personal: Sólo deben ser habilitados para efectuar dichos controles los operadores calificados.

Método operatorio

- * Fuente: Iridio 192

* Tipo de film: Kodak 17X agfa- GEVAERT D7 o equivalente.

10 x 40 cmxcm

* Pantallas reforzadas de plomo de 0,2 mm

* Indicador de la calidad de imagen:

- Tipo AFNOR NFA 04-304 Hexagonal HA y HB

HA de 6,4 mm a 20 mm

HB de 16 mm a 50 mm

DIN 54109 10 ISO16 y 6 ISO12

10 ISO16 de 5 mm a 20 mm

6 ISO12 de 12,5 mm a 50 mm

* Densidad: De 2 a 3,5 . (Radio en simple film).

* Distancia fuente-film :

Huelgo geométrico $\leq 0,5$ mm , la localización se hace con letras de plomo.

Revelado manual entre 5 a 10 minutos, a 20 °C.

Criterios de aceptación

* Calidad del film: A adecuarse en las indicaciones y obligaciones del item fuente-film (distancia).

* Diámetro en mm del último hueco visible:

0,5 mm $10 < e < 16$

0,63 mm $16 < e < 25$

0,8 mm $25 < e < 32$

Calidad de soldadura

- * Resultan inaceptables las soldaduras en las cuales la radiografía revela grietas, hendiduras, zonas de fusión incompletas o zonas de falta de penetración.
- * Resultan inaceptables las soldaduras que presentan inclusiones de escorias o veteaduras, cuando la longitud de cualquier defecto es superior a $2/3$ de e. (espesor de la chapa soldada más delgada).

Cuando se alinean varios defectos cuyas dimensiones estan dentro de las tolerancias, se aceptarán las soldaduras con tal que la suma de las más grandes dimensiones de todos los defectos, quede inferior a e en una longitud de $6e$ (proporcionalmente para las soldaduras menores a $6e$), y con tal que los defectos más largos estén separados por una longitud de cordón de $3L$ por lo menos (L = longitud del defecto más largo).

La longitud máxima de un defecto tolerado es de 19 mm teniendo que cualquier defecto de este tipo inferior a 6 mm es tolerado cualquiera sea el espesor de chapa.

Reparación de los defectos

Todos los defectos no aceptables según los criterios anteriores y los indicados en el código ASME, se repararán según el proceso previsto en la especificación del procedimiento de soldadura.

- * Se someterá la zona reparada a los mismos exámenes iniciales.

* En caso de control por sondeo, cuando un film presente defectos inaceptables, toda la soldadura efectuada por el mismo soldador, con el mismo procedimiento, durante el mismo turno, se reputa mala.

Informe del exámen

Idem informe de exámen por ultrasonidos.

6.1.3 Líquidos penetrantes

El uso de líquidos penetrantes para la detección de defectos en las soldaduras, se da para aquellos que sean externos o los defectos internos que llegan a aflorar hasta la superficie externa.

El método consiste en la utilización de dos líquidos, uno de penetración y otro de contraste (rojo y blanco respectivamente).

Para aplicar el líquido rojo o de penetración, previamente se debe limpiar la superficie, dejándola libre de elementos como polvo, grasa, etc. Luego se aplica el líquido que generalmente viene en forma de spray, sobre la zona a chequear, esperándose por lo menos 1 minuto de manera que éste ingrese y se concentre en cualquier grieta existente. Después se aplica el líquido blanco, revelador o de contraste, el mismo que permite ver con facilidad el líquido rojo concentrado sobre algún defecto.

En el caso de Machupicchu se empleo este método de detección de defectos, aparte del de ultrasonidos y rayos X para las soldaduras de la galería horizontal.

Las pruebas realizadas a las soldaduras de la tubería forzada de Machupicchu, requirió la elaboración de planillas donde deberían quedar consignadas, la realización de las diferentes pruebas. Estos documentos se resumen en :

- * Planilla N° 1: Inspección de los elementos al momento del montaje
 - Verificación de chaflanes, respaldo, agujeros de inyección, refuerzos, geometría del elemento, estado de superficies.

- * Planilla N° 2: Inspección de montaje y soldadura de la tubería forzada.
 - Desviación de la posición teórica de la boca; verificación de conformidad de condiciones de obra civil, etc.

- * Planilla N° 3: Reporte de inspección por ultrasonido.

- * Planilla N° 4: Reporte de inspección radiográfica.

- * Certificado de calificación de soldador.

A continuación se tiene copias de las diferentes planillas , con sus respectivos ejemplos, así como las explicaciones e indicaciones:

Elemento _____ Planilla _____
Documento 41 1
Fecha... 25/Septiembre/1984

Neyrpic - VCF - SDEM
Electroperú - Ampliación Machupicchu
CONTROL DE CALIDAD TUBERIA AL MONTAJE
Supervisión - CNH (Consortio Novoa Hidroservice)

Planilla 1 : Inspección de los elementos al momento del Montaje

Elemento... Nº 41 Material... E 355 IR Espesores... 18 mm
Plano Fabricación.....
Plano tratamiento superficial.....
PV de recepción en fábrica Nº..... Fecha.....
1.- Verificar identificación elemento... OK!
2.- Verificación chanflanes: A. arriba... OK! A. abajo... OK!
3.- Verificación respaldo : A. arriba... OK! A. abajo... OK!
4.- Verificación agujeros inyección... OK!
5.- Verificación refuerzos aplicados en fábrica... OK!
6.- Conferencias de la geometría del elemento... OK!
7.- Verificación estado superficies: Interna... OK! Externa... OK!

Conclusión del examen:

Elemento aceptado para montaje SI NO

Elemento a ser recuperado con:

- a).....
- b).....
- c).....

Verificación después de la recuperación.....
.....


.....
Control SDEM


.....
Visto Supervisión CNH

NOTA: Verificación y revisión conforme "Notas a la planilla 1"

Fecha.....

Neyrpic - VCF - SDEM

Electroperú - Ampliación Machupicchu

CONTROL DE CALIDAD TUBERIA AL MONTAJE

Supervisión - CNH (Consortio Novoa Hidroservice)

otas a la planilla 1 (Planilla a ser emitida por cada elemento de la tubería)

ITEM

- 1 Verificar con base a los planos que la marcación de la pieza corresponde a su posición y a las características exigidas.
- 2 Los chanflanes deben encontrarse dentro de las normas Neyrpic 028.300 pág. 3 clase 2. En caso de duda o daño verificar.
- 3 Verificar que los aros de respaldo esten correctamente aplicados y no sufrieron daños en el transporte.
- 4 Verificar que los agujeros de inyección no hayan sufrido daños, especialmente en lo que se refiere a rosca y superficie de apoyo de las empaquetaduras.
- 5 Verificar la correcta aplicación de los refuerzos, aplicado en la fábrica y su estado.
- 6 Revisión visual de la geometría del elemento conforme normas Neyrpic 028.300 pág. 4, clase 2., para los items 6.1 a 6.4.
 - 6.1 Desalineamiento soldadura de fábrica, longitudinales y circunferenciales.
 - 6.2 Sobre-espesor de soldaduras externas: longitudinales y circunferenciales, y soldadura interna longitudinales.
 - 6.3 Falta de espesor de soldaduras.
 - 6.4 Mordeduras de soldaduras y rayas.

- 6.5 Falta de penetración (control externo) no admitido
- 6.6 Sobre espesor de soldadura interna circunferencial máximo 2 mm.
- 6.7 Soldaduras en ángulo, conforme normas Neyrpic 028.300 pág. 5 - clase 2.
- 6.8 Circularidad (verificada con plantilla de cuerda $D_i \pm 4$), tolerancia $\pm \left(-\frac{D_i}{1000} + \frac{20}{e} + 0.5 \text{ m.m.} \right)$
 Con D_i = diámetro interno
 e = espesor de la pared.
- 6.9 Verificación de la posición de los planos de las bocas.
 Máximo error admitido con referencia al plano teórico ± 0.15 grad
 (~ 5 m.m. sobre $\emptyset 2$ m.), sin corrección previa al ensamblaje del chanflan.
- 6.10 Verificación de los codos compuestos en taller
- 6.10.1 Control de ángulo.
 Máximo error admitido ± 0.3 grad, con corrección en la soldadura de montaje.
- 6.10.2 Control del largo (distancia entre centros de boca)
 Máximo error admitido ± 2 m.m.
- 6.11 Verificación de elementos rectos compuestos en taller (rectitud de generatrices)
- 6.11.1 Desviación máxima entre dos virolas consecutivas 0.05 - grad (~ 5 m.m. con dos virolas de 6 m.)
- 6.11.2 Ondulación máxima con 3 elementos de 6 m., 5 m.m.
- 6.11.3 Ondulación máxima entre vértices, con temperatura uniforme de paredes 5 mm.

NOTA 1.- Cada desvío en las condiciones exigidas, que requieran trabajo de recuperación, tendrá que ser previamente comunicado a la Supervisión en la relativa planilla 1.

NOTA 2.- Para los componenetes del repartidor y las virolas 8, 8 bis y 9, mismas verificaciones con tolerancias conforme clase 1.

SDEM

CNH

Fecha... 3 octubre / 1984

Documento [Empalme 41-42 Planilla 2]

Neyrpic - VCF - SDEM
Electroperú - Ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu
CONTROL DE LA TUBERIA DESPUES DEL MONTAJE
Supervisión - CNH (Consortio Novoa Hidroservice)

Planilla 2: Inspección de Montaje y Soldadura Tubería Forzada.

2do. Elemento... 42 (Planilla 1: Documento... 42-1 Fecha... 25/9/84)
en seguimiento de Montaje al:

1er. Elemento... 41 (Planilla 1: Documento... 41-1 Fecha... 25/9/84)
como elemento "en espera".

1.- a) Desviación de la posición teórica de la boca "en espera" del 1er. elemento.

b) Desviación de la posición teórica... OK! Documento... 2
fecha... OK, después soldadura, de la boca libre... OK

2.- Verificación preliminar conformidad de condiciones de obra civil ofrecidas al Montaje. OK

3.- Tipo de soldadura... W... espesor de paredes... 8 mm... clase soldadura... 1... electrodos... AWS 7018... Material E-312R

4.- Abertura teórica de preparación... 6 m
Abertura efectiva después del apuntalamiento: máximo... 6,2
posición... 12,00 / mínimo... 5,3... posición... 6,00

5.- Proceso de soldadura... W Arco Eléctrico

6.- Nombres de los Soldadores: A. Mév... posición... 2G
E. Maíz... posición... 2G

7.- Verificación visual, dimensional después de la soldadura, del acoplamiento y soldadura... OK

8.- Verificación refuerzos aplicados.....OK!

9.- Verificación de US/(Documento 42 fecha...5/10/94...)

10.- Verificación gamagráfica (Documento 42 4)

11.- Verificación estados superficie: interna...OK...externa...OK...

12.- Verificación de las soldadura de puntales u otras piezas en la superficie externa del tubo.

Conclusión del examen

1) Correcciones requeridas a la Obra Civil

2) Montaje y soldadura aceptada SI NO

Montaje, soldadura y estado superficial a ser corregidos:

- Antes hormigonado /
- Después hormigonado /
- Después inyección /

Con las providencias.....
.....

[Signature]
Control SDEM

[Signature]
Visto Supervisión CNH

NOTA: Verificación y conferencias conforme notas a la Planilla "2"

Fecha.....

Neyrpic - VCF - SDEM

ELECTROPERU: Ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu

CONTROL DE LA TUBERIA DESPUES DEL MONTAJE

SUPERVISION: C'H (Consorcio Novoa Hidroservice)

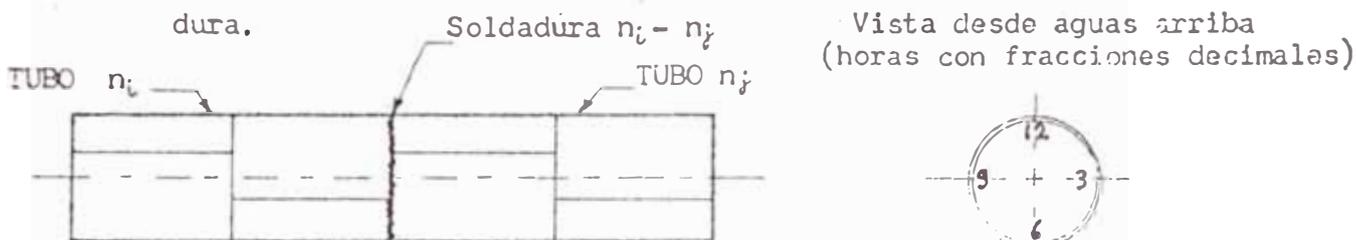
Notas a la planilla 2 (Planillas a ser emitidas por cada soldadura entre virola o elemento).

0.- Convenciones

0.1.- Identificación elemento y bocas



0.2.- Identificación montaje/soldadura e identificación zona soldadura.



Observaciones: 1) En el Pique vertical, de la virola 23 para arriba, se tomará como orientación del eje horario el eje de la tubería al aire libre (N $36^{\circ}28'16.9''$ -E)

2) Para la numeración de los tubos referirse al Plano NV-TF/I-034 R E.

1.- Convención de identificación de desplazamiento del centro referido a la identificación horaria de la boca del tubo.

2.- Verificación de niveles y distancias ofrecidas por las Obras Civiles al Montaje.

3.- Conforme Plano

4.- Máximo valor admitido sin corrección especial de la abertura teórica Σ

Tolerancia:

$$\begin{array}{ccc} \leq & \leq & \frac{\leq}{2} \\ \text{Máximo} & \text{Mínimo} & \end{array}$$

5.- Conforme Plano

6.- Solamente en fase especial de calificación directa, conforme ASME, será admitido soldador no calificado.

7.- Verificación visual

Revisión visual de la geometría del elemento conforme normas Neyrpic 028.300 pág. 4, clase 2 para los items 7.1 a 7.4.

7.1.- Desalineamiento soldadura, longitudinales y circunferenciales.

7.2.- Sobre-espesor de soldaduras externas: Longitudinales y circunferenciales, y soldadura interna longitudinales.

7.3.- Falta de espesor de soldaduras

7.4.- Mordeduras de soldaduras y rayas.

7.5.- Falta de penetración (control externo) no admitido

7.6.- Sobre-espesor de soldadura interna circunferencial máximo 2 mm.

7.7.- Soldaduras en ángulo, conforme normas Neyrpic 028.300 pág. 5, clase 2.

7.8.- Verificación de la posición de los planos de las bocas
Máximo error admitido con referencia al plano teórico ± 0.15 grad (~ 5 m.m. sobre $\phi 2$ m.) sin corrección previa al ensamblaje del chanflan.

7.9.- Verificación de los codos

7.9.1 Control de ángulo

Máximo error admitido ± 0.3 grad, con corrección en -

la soldadura de montaje.

7.9.2 Control del largo (distancia entre centros de boca)

Máximo error admitido \pm 2 m.m.

7.10.- Verificación de elementos rectos (rectitud de generatrices).

7.10.1 Desviación máxima entre dos virolas consecutivas 0.05 —
grad (\approx 15 m.m. con dos virolas de 6 m.)

7.10.2 Ondulación máxima con 3 elementos de 6 m., 5 m.m.

7.10.3 Ondulación máxima entre vertices, con temperatura uniforme de paredes 5 m.m.

NOTA 1.- Cada desvío en las condiciones exigidas, que requieran trabajo de recuperación, tendrá que ser previamente comunicado a la Supervisión en la relativa planilla 2.

NOTA 2.- Para los componentes del repartidor y las virolas 8, 8 bis y 9, mismas verificaciones con tolerancias conforme clase 1.

Items 8, 9, 10, 11 y 12 sin comentarios.

SDEM

CNH

Neyrpic-VCF - SDEM
Electroperú - Ampliación de la central Hidroeléctrica de Machupicchu
Supervisión - CNH (Consortio Novoa-Hidroservice)

CERTIFICADO DE CALIFICACION DE SOLDADOR

Según Norma ASME sección IX

Número: []

Nombre del Soldador:

Marca:

Fecha del Examen:

Fecha del anterior examen:

Datos del examen de calificación:

Material de base: (P)

Espesura: | Diámetro:

Posiciones:

Otros datos:

Proceso de Soldeo:

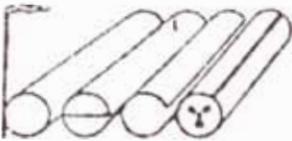
Esquema:

Pase	Proceso	Posiciones	Pre calentamiento	Temp. entre pases

Pase	Material de Aporte			Diámetro	Polaridad	Amp.
	Tipo	F	Marca			

Vistos:

Inspector: | Neyrpic-VCF - SDEM: | CNH:



bernhard corleto s.a

Av. D. 14 Talara - Peru
Diaz Canseco 442 - 202
Miraflores
Telf. 463527 Lima - Peru

CERTIFICADO DE CALIFICACION NUMERO Pagina 2 de 2

Tratamiento térmico:

Exámenes de la soldadura:

Largo de soldadura examinado:

Examen Radiográfico:

Examen de Ultrasonido:

Examen Visual:

Otros Exámenes:

Nombre del Inspector:

Patente número:

Organismo o Firma:

Certifico que este Reporte está fiel y que las pruebas y/o exámenes fueran conducidos de acuerdo a la Norma ASME Sec. IX.

Machupicchu,

de

de 19

Firma del Inspector

Neypic-VCF - SDEM:

Visto bueno CNH:

En el cuadro N° 17 que se muestra a continuación, se tiene los resultados del chequeo del sobreespesor de soldaduras en la galería horizontal.

CUADRO N° 17

CHEQUEO DE SOBREESESOR EN GALERIA HORIZONTAL-SOLDADURAS

Nº TUBO	Nº DE SOLDADUR.	ESPESOR (mm)	CHAFLAN	L (mm)	S a: (mm)	OBSERVACIONES
8bis	8bis-9	28	V	32,11	4,21	No pasa-esmeri lar.
9	9-10	24	V	28,38	3,83	OK!
10	10-11	24	V	28,38	3,83	OK!
11	11-12	20	V	24,65	3,47	No pasa-esmeri lar.
12	12-13	18	V	22,80	3,28	No pasa-esmeri lar.
13	13-14	18	V	22,80	3,28	OK!
14	14-15	18	V	22,80	3,28	OK!
15	15-16	18	V	22,80	3,28	OK!
16	16-17	18	V	22,80	3,28	No pasa-esmeri lar
17	17-18	18	V	22,80	3,28	OK!
18	18-19	18	V	22,80	3,28	OK!

S = sobreespesor de soldadura

Soldadura clase 1: $S \leq L/10 + 1$ ($S_{\text{máx.}} = 5 \text{ mm}$)

Fuente: Archivo electromecánico CNH (chequeo efectuado con ayuda de plantillas).

Testigo de producción: Además de las diversas pruebas que se realizan a las soldaduras efectuadas en la tubería, se realizan las pruebas al llamado testigo de producción. A continuación tenemos las características de uno de los testigos de producción de la tubería de Machupicchu.

a) Características del testigo

- Metal de base: E 355IIR N° fabricación: 44/03/70
- Preparación: Efectuado por oxicorte y esmerilado.
- Dimensiones: 18 mm x 400 mm x 800 mm
- Metales de aporte: * Electrodo ESAB OK 48-10
 - * Clasificación: AWS 7018
 - * Diámetro: \varnothing 3,2 mm
 - * Estufaje: 300-350 °C (1 hora 30').
- Procedimiento de soldaje:
 - * Posición 2 G.
 - * Pre calentamiento: 70°C
- Soldador: Manuel Nasarre.

b) Control realizado al testigo

- % de control: 100%
- Especificación: ASME sección VIII

c) Reporte del control realizado:

El reporte por ultrasonidos se da en el ejemplo de reporte por ultrasonidos.

Respecto a la información de líquidos penetrantes, ver el apéndice L.

6.2 Chequeos topográficos de posicionamiento de tubos

Los chequeos topográficos durante el montaje son necesarios, porque permiten visualizar la marcha del montaje en cuanto al po

al posicionamiento, comparando el real con el teórico, acción realizada en forma periódica para permitir la corrección de las posibles fallas cometidas en el montaje.

El chequeo se realiza con el respectivo equipo de topografía es decir, nivel , teodolito, estancia, mira invar, etc.

En el caso de tuberías horizontales se a de verificar la distancia de los tubos a puntos conocidos y fijos. Mientras que en los piques verticales, se verifica las cotas reales con las teóricas, mediante procedimientos geométricos y trigonométricos.

Para el caso de Machupicchu se tiene los siguientes chequeos:

6.2.1 Chequeo en galería horizontal (Ver figura N° 75).

Resultados ver cuadro N° 18

6.2.2 Chequeo en pique vertical

Lo que se trata de chequear aquí es la verticalidad del pique, para lo que se colocaron planchas a fin de determinar el punto exacto del eje, en la parte superior del pique, tal como se muestra en la figura N° 76.

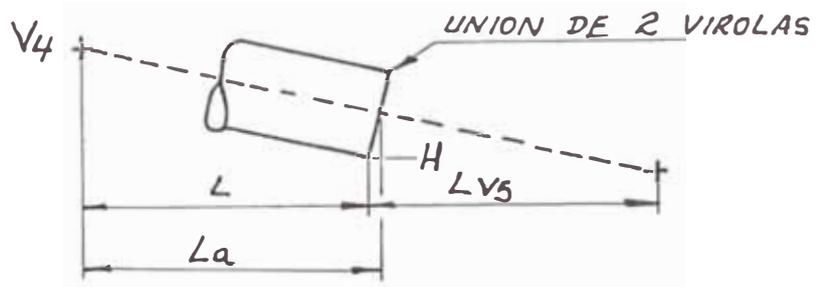


FIG. N° 75 Chequeo en galería horizontal

C U A D R O N º 18

C H E Q U E O D E G A L E R I A H O R I Z O N T A L

UNION VIROLAS Nº	L _a (mm)	H (m)	L (mm)	L _p (mm)	L _{V5} (mm)
19-18	12,980	1707,055 * (1707,055)	12,975	12,975	66,829 * (66,828)
18-17	18,920	1707,025	18,915	18,915	60,889
17-16	24,860	1706,995	24,855	24,855	54,949
16-15	30,800	1706,966	30,795	30,795	49,009
15-14	36,740	1706,936 * (1706,932)	36,735	36,735	43,069 * (43,0675)
14-13	42,680	1706,906	42,675	42,675	37,129
13-12	48,620	1706,876	48,615	48,615	31,189
12-11	54,560	1706,847 * (1706,843)	54,555	54,555	25,249 * (25,248)
11-10	60,500	1706,817	60,495	60,495	19,309
10-9	66,440	1706,787	66,435	66,435	13,369
9-8bis	72,380	1706,757 * (1706,752)	72,375	72,375	7,429
8bis-8	75,350	1706,742	75,345	75,346	4,459

* Mediciones reales

Fuente: Archivos CNH

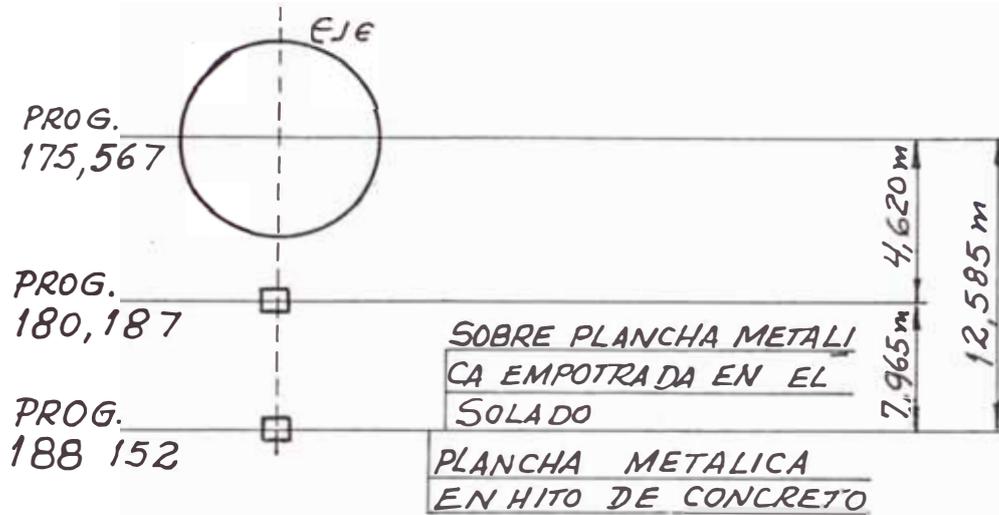


FIG. N° 76 Chequeo en pique vertical

En la virola N° 22 se colocó en el cruce de sus ejes, una señal luminosa que permitiera hacer la medición, la misma que se realizó según la figura N° 77 y arrojó los siguientes resultados:

Desplazamiento respecto al eje principal igual a:

- + 0° 00' 21" S a N
- + 0° 00' 16" SE a NW

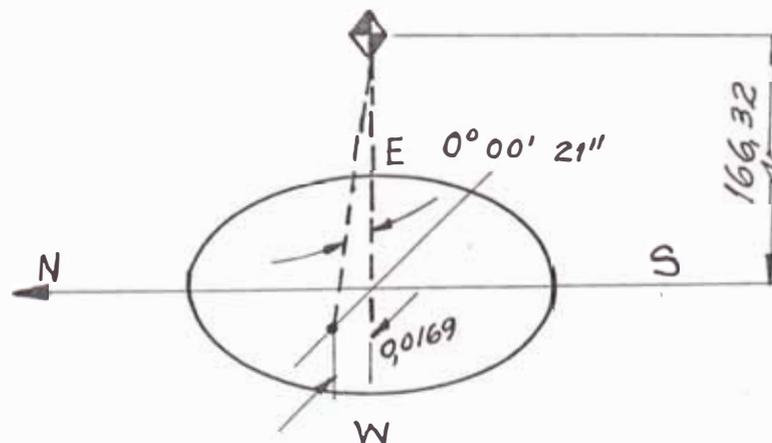


FIG. N° 77

Posteriormente se realizó el chequeo periódico, el cual permitía evaluar el desvío durante el montaje de cada tubo en forma más rápida. Consistía en colocar una plomada, mediante un alambre de acero para piano, desde la parte superior del pique en el punto exacto del eje, introduciéndose la plomada al nivel del chequeo, dentro de un depósito con aceite, a fin de amortiguar las oscilaciones, para luego proceder a la medición del eje del alambre con las paredes de la virola, en las direcciones respectivas.

6.2.3 Chequeo en tramo aéreo

En este tramo se realizaron chequeos periódicos, utilizando para ello un teodolito, una mira invar y cinta métrica. El proceso consiste en colocar el teodolito en un punto aguas arriba del eje de la tubería, del cual se conozca su cota. Aguas abajo se coloca la mira invar, que al visualizar sus extremos permite obtener la distancia horizontal entre teodolito y mira invar. Seguidamente se miden los ángulos formados por las visuales del teodolito a extremos superior e inferior de la boca de tubo en medición (θ_1 y θ_2). Seguidamente se encuentran los otros ángulos y dimensiones por cálculos geométricos y trigonométricos, llegando a determinar la desviación del eje real con el teórico e igualmente las cotas de la boca del tubo en cuestión. (Ver figura N° 78).

$$\theta_1 = 32^\circ 34' 04'' = 32,56777^\circ$$

$$\theta_2 = 38^\circ 02' 20,5'' = 38,03902^\circ$$

En triángulo ABC:

$$\text{Tg } \theta_2 = \text{BC}/\text{AB} \quad \dots\dots\dots \text{BC} = 17300,05 \text{ mm}$$

$$\text{AC} = (\text{AB}^2 + \text{BC}^2)^{1/2} = 28075,48 \text{ mm}$$

$$\theta_3 = 90^\circ - \theta_2 = 51,96098^\circ$$

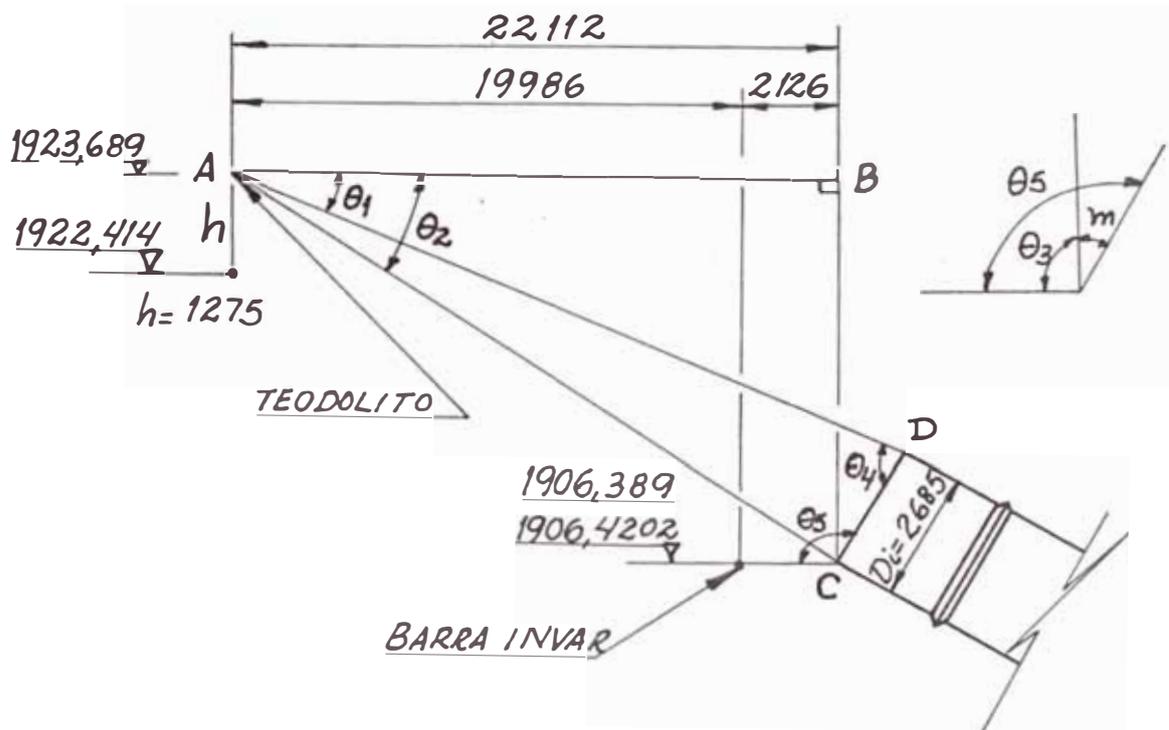


FIG. N° 78 Chequeo en tramo aereo

En triángulo ADC:

$$\text{CD}/\text{sen}(\theta_2 - \theta_1) = \text{AC}/\text{sen } \theta_4$$

Reemplazando: $\theta_4 = 85,546^\circ$

$$\theta_5 = 180^\circ - \theta_4 - (\theta_2 - \theta_1) = 88,983^\circ$$

$$m = \theta_5 - \theta_3 = 37,02163^\circ = 37^\circ 01' 17,9'' \text{ (pendiente real).}$$

La pendiente teórica mostrada en la figura N° 79, permite encontrar las cotas reales del eje y extremos de boca de tubería que se está midiendo.

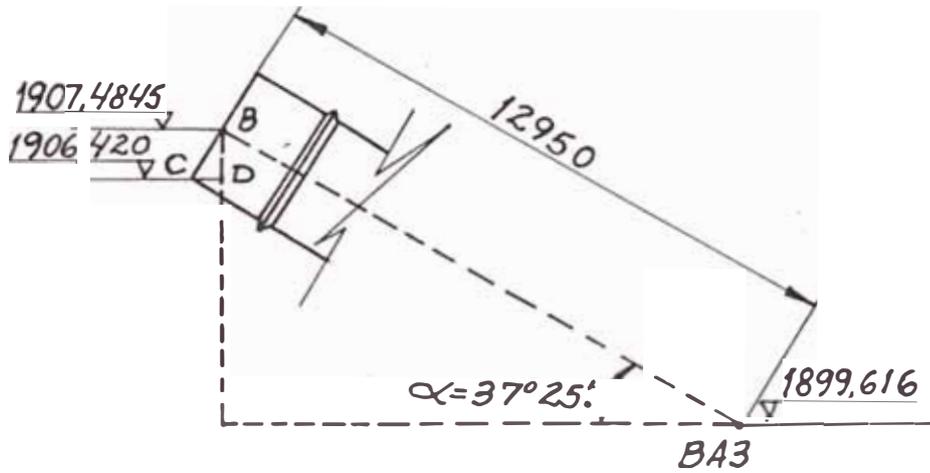


FIG. Nº 79

En triángulo BA-BA3

$$AB = 12950 \operatorname{sen} 37^{\circ} 25' = 7868,51 \text{ mm}$$

$$\text{Cota de B: } 1899,616 + 7,8685 = 1907,4845 \text{ m.s.n.m}$$

En el triángulo BCD:

$$BC = D/2 = 2680/2 = 1340 \text{ mm}$$

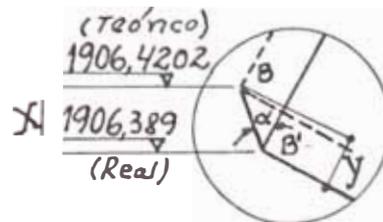
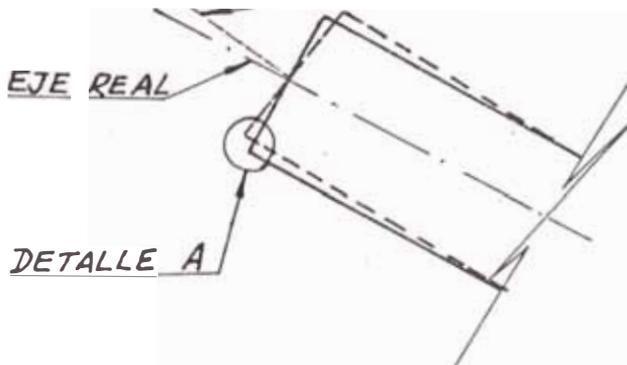
$$BD = BC \cos 37^{\circ} 25' = 1064,279 \text{ mm}$$

$$\text{Cota de C: } 1907,4845 - 1,06427 = 1906,4202 \text{ m.s.n.m}$$

(cota teórica)

$$\text{Cota real de C: } 1906,389 \text{ (Ver figura Nº 80)}$$

EJE TEORICO



DETALLE A

FIG. Nº 80

X = Desplazamiento vertical de la boca de virola N^o 55

$$X = 1906,4202 - 1906,389 = 31,2 \text{ mm}$$

Y = Desplazamiento perpendicular al eje del punto B, igual al desplazamiento del eje real con el teórico.

$$Y = X \cos \alpha \quad \alpha = \angle \text{ eje teórico} - \angle \text{ eje real}$$

$$\alpha = 37^{\circ}25' - 37^{\circ} 01' 19,5''$$

$$\alpha = 0^{\circ} 23' 40,5''$$

$$Y = 31,199 \text{ mm}$$

6.3 Control del espesor de pintura

Dado que es necesario tener la certeza que la aplicación de pintura, a sido aplicada en el espesor contratado (por el que se a pagado), se debe medir dicha espesura en diferentes partes, lo que debe estar establecido contractualmente. Para realizar dicho proceso se utilizan generalmente aparatos basados en el principio magnético.

Para el caso de Machupicchu se utilizo el aparato denominado MIKROTEST. Este se basa en el principio magnético ya que posee interiormente una placa acerada magnética, que se atrae con la plancha del tubo con una cierta fuerza, la misma que es función del espesor de pintura que tenga, la que disminuye ésta fuerza que sería mayor si estuviera desnuda la plancha. Por lo tanto pa ra la medición se coloca el aparato sobre la zona y se deja que placa magnética y plancha se unan por la fuerza magnética existente entre ambas, luego con un cursor se ejerce una fuerza con- traria hasta que se despeguen ambas placas, punto que indicará

el espesor de protección que se tiene, cuya lectura se hace directamente sobre el cursor (en micras).

Estas medidas se hicieron en diferentes partes de cada tubo y para todos los tubos de la tubería, tanto en la parte interna como externa.

Previo al inicio de las lecturas en la tubería, se realizó la lectura de placas conocidas en cuanto a su espesor, a fin de calibrar el instrumento. (ver cuadro Nº 19).

CUADRO Nº 19

CALIBRACION DE MIKROTEST

PLAQUETA	1ra MEDIDA (μ)	2da MEDIDA (μ)	3ra MEDIDA (μ)	MEDIA (μ)	ESPESOR (mm)	ERROR %
Nada	0	0	0	0	0	0
300	320	310	320	316	0,30	+5,3
835	900	900	900	900	0,815	+10,4

* Es necesario aplicar un factor de corrección de + 6,8 % para las medidas en la tubería forzada (450 micras).

Fuente: Archivo CNH

6.4 Pruebas hidráulicas

El método más común de prueba de los recipientes sometidos a presión, es llenarlos con agua a temperatura no mayor de 38°C, aplicando posteriormente presión a dicha agua, hasta un nivel pre determinado, usando para ello una bomba y un manómetro. La presión de prueba varía de acuerdo a la norma usada, desde 1,5 a 2 veces la presión normal de trabajo.

Durante el tiempo en que el sistema de tuberías o el recipiente, están sometidos a la presión indicada, son inspeccionados totalmente para detectar señales de fugas, ésto es realizado por un inspector que representa al fabricante, el comprador, el gobierno o la compañía de seguros. En el caso de Machupicchu los representantes fuerón, 1 por el fabricante-montador, 1 por la supervisión, 1 por el cliente (Electroperu).

6.4.1 Pruebas en la tubería

En toda tubería forzada o de presión, generalmente se realizan pruebas separadas para la tubería misma, para el distribuidor y colector. Sin embargo pudiera hacerse en forma conjunta si las especificaciones y condiciones de montaje lo permiten.

La prueba en conjunto o por separado consiste en llenar la tubería con agua y someterla a la carga correspondiente de presión de servicio mediante una bomba manual o de otro tipo, durante un tiempo determinado (2 días generalmente), tiempo en el que no debe aparecer ningún defecto. Después de esta etapa se a de someter a la presión de prueba (1,2 a 1,5 presión de servicio), con el fin de verificar la estabilidad general. (tiempo aproximado de 30').

A continuación se reduce la presión nuevamente hasta la de servicio, siendo martilladas las soldaduras, donde al terminar dicha operación nuevamente se lleva hasta la presión de prueba, por espacio de 3 horas normalmente.

Si no se encuentra ninguna pérdida de presión ni deformaciones, el ensayo será aprobado. En caso de que resulte necesario llevar a cabo reparaciones de la soldadura, se volverá a realizar la prueba de presión. Al terminar el ensayo la tubería se evacua, y en corto tiempo después de la evacuación se realiza una inspección interna, con el fin de averiguar las eventuales abolladuras de la tubería, ocasionadas por la sobrepresión externa de agua o infiltraciones en caso de grietas.

Los tiempos y presiones de pruebas son normadas por las normas internacionales o por los fabricantes, pudiendo variar para los distintos casos. La norma ASME en su sección VIII- Parte UG-99 a UG-101 así como UCI-101; UCD-101; UCL-52; UCD-99 , habla sobre la prueba hidrostática de recipientes sometidos a presión.

Para el caso de Machupicchu se realizó la prueba del repartidor o distribuidor y de la tubería en si por separado, bajo las siguientes características.

a) Prueba hidráulica del repartidor

La prueba fue realizada después de montado el conjunto de repartición, realizados los muretes soporte pero antes de hormigonar.

Se realizó a una presión igual a 1,3 veces la de diseño, es decir: $420 \times 1,3 = 546$ m de columna de agua.

Para la prueba la tubería se obturó de la siguiente

manera:

- * Aguas abajo mediante 3 tapas soldadas en el extremo de los ramales que se dirigen a los 3 grupos.
- * Aguas arriba mediante una tapa soldada en el extremo del pantalón , contando ésta con el respectivo resalto para el llenado y las conexiones para la bomba y el manómetro

En los puntos altos de los pantalones se tenían los respectivos resaltos para la purga de aire, los cuales fue necesario mantenerlos abiertos durante el llenado, los mismos que son cerrados una vez llena completamente la tubería, estableciéndose la presión necesaria mediante la bomba. Esta presión es de 420 m de agua, mantenida durante 2 días, luego se aumento hasta 546 m de agua (presión de prueba), mantenida durante 30 minutos después de lo cual se bajó nuevamente a 420 m, procediéndose al exámen de las soldaduras.

Después se elevó nuevamente a 546 m de agua, manteniéndose así por espacio de 3 horas, finalizado dicho periodo se bajó a 210 m de columna de agua, presión que se mantuvo hasta después del hormigonado. Terminado éste se desagüo a través de las válvulas de desagüe.

Instalaciones y equipo utilizado:

- * Bomba manual con tanque y manómetro.
- * Dos válvulas de compuerta en serie.

- * Dos válvulas antiretorno. (Una en la aspiración y otra en la descarga de la bomba).
- * Una tee.
- * Volumen de agua requerido para el llenado = 120 m^3
- * Volumen de agua requerido para puesta en presión = 1 m^3

El proceso de esta prueba se plasma en la figura N^o 81 .

b) Prueba de la tubería

Fue realizada después de concluido el montaje de toda la tubería, realizado el empalme con el conducto de repartición, hormigonado de los bloques de anclaje 1, 2 y 3 , hormigonado de los pilares de soporte o apoyo y hormigonado de los trozos blindados en el pozo vertical y galería horizontal.

Para la prueba la tubería se obturó:

- * Aguas arriba mediante una tapa soldada dentro del tubo N^o 112, conteniéndolo los resaltos para llenado del agua, purga de aire y conexión de bomba y manómetro.
- * Aguas abajo mediante una tapa soldada en cada uno de los extremos de los ramales del conducto de repartición.

La presión de prueba fue igual a la presión estática del nivel 2156 m.s.n.m + 114,435 m de agua, por lo que se tiene:

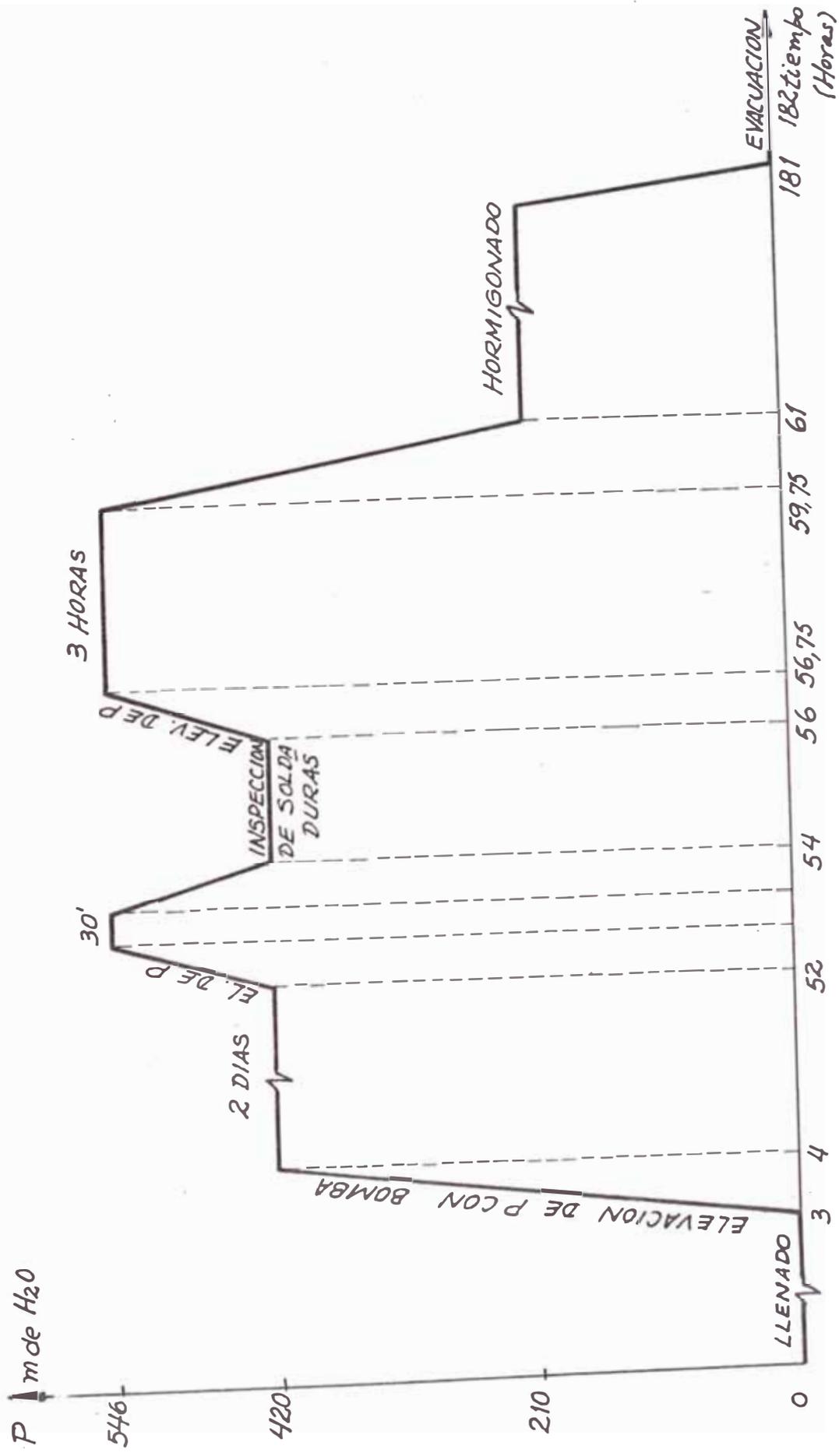


FIG. N° 81 Prueba hidráulica del repartidor

- * Presión aguas arriba = 114,435 m de columna de agua.
- * Presión del repartidor = 448,2 m de columna de agua.

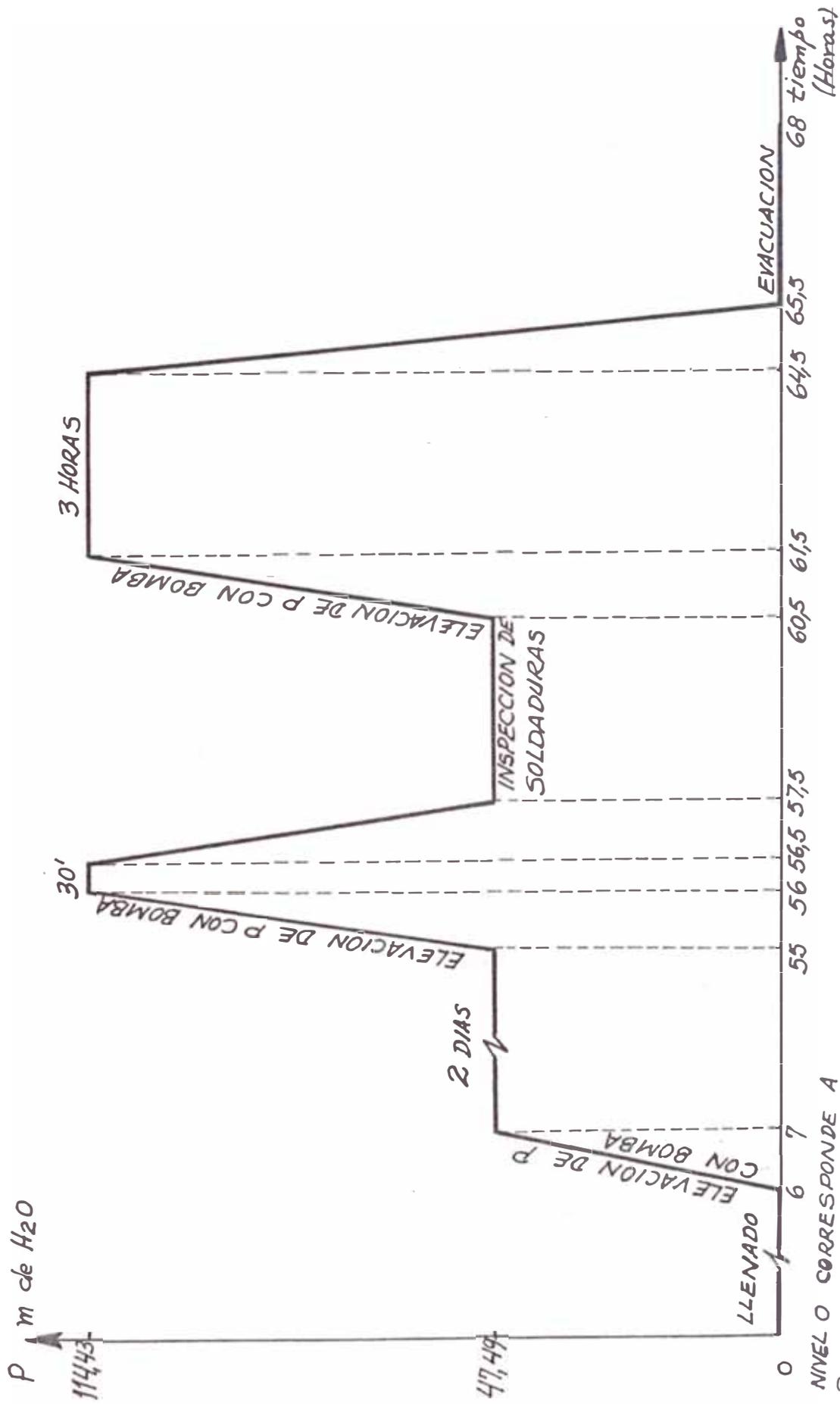
El trabajo consistió en llenar la tubería por gravedad a través del resalto de llenado, terminando el llenado con la bomba y la utilización de las purgas de aire. Luego se subió la presión hasta la de trabajo (incluyendo el 20 % por golpe de ariete), que se obtuvo cuando el manómetro marcaba 47,492 m de agua, la que fue mantenida durante 2 días, luego de lo cual se aumentó a 114,435 m, la que se la mantuvo por espacio de 30 minutos, bajándose nuevamente a la presión de trabajo, examinando las soldaduras para verificar algún defecto, lo que fue negativo.

Concluida la inspección se elevó nuevamente hasta la presión de prueba, mantenida durante 3 horas. Terminada la prueba se bajó la presión y se evacuó por las tuberías y válvulas de desagüe.

Equipo utilizado:

- * Bomba neumática con tanque y manómetro.
- * Dos válvulas de compuerta en serie.
- * Una tee.
- * Dos valvulas antiretorno.
- * Volumen de agua necesario para llenado = 2540 m^3
- * Volumen de agua necesario para puesta en presión = 7 m^3

El proceso de esta prueba se verifica en la figura N^o



NIVEL O CORRESPONDE A
 PESTATICA DEL NIVEL 2156 m.s.n.m. FIG. Nº 82 Prueba hidráulica de la tubería

6.4.2 Pruebas en la válvula mariposa

En toda válvula mariposa son necesarias la realización de pruebas, tanto en el taller de fabricación como en la misma instalación.

a) Pruebas en el taller del fabricante

Deberá montarse la válvula con sus respectivos accesorios en forma completa, para de esta manera asegurar el ajuste y el montaje fácil en obra, efectuándose los siguientes ensayos:

- Ensayo de funcionamiento: Se verifica efectuando algunos ciclos de apertura y de cierre.
- Ensayo de presión: Durante esta prueba ambas bridas de la válvula mariposa deben ser conectadas a las bridas ciegas, teniendo la lenteja entreabierta moderadamente y el cuerpo de la válvula expuesta a una presión de prueba (alrededor de 4 Kg por cm^2), con el objeto de verificar la resistencia de la válvula y la impermeabilidad de la misma.

Después es necesario efectuar la resistencia de la lenteja, exponiéndola a una presión de alrededor de 2,5 Kg/ cm^2 .

- Ensayo de filtración: Después de realizar con éxito el ensayo de presión y de desmontar la brida ciega de salida de la válvula, se rea

liza la prueba de impermeabilidad, hecha con una columna de agua de aproximadamente 10 m.

- Ensayo de presión de servomotores de maniobra: Los servomotores y sus respectivas tuberías deben ser ensayadas a presión igual al 1,5 veces la presión de trabajo.

b) Pruebas en lugar definitivo (F)

Luego de montada la tubería y la válvula mariposa en el lugar definitivo, se procede a hacer las siguientes pruebas:

- Apertura y cierre de la lenteja en seco.
- Apertura y cierre de la lenteja en agua.
- Apertura y cierre de la lenteja en flujo de agua.
- Toma de la presión y del tiempo de apertura.
- Toma de presión y tiempo de cierre.
- Prueba de estanqueidad (según lo establecido contractualmente).

Para el caso de Machupicchu se realizaron todos los ensayos anteriormente descritos, teniendo en cuenta que para el de estanqueidad se estableció una fuga máxima de 20 litros por minuto para una presión de 10 m de columna de agua. Todos los ensayos fueron satisfactorios.

6.5 Pruebas de puesta en funcionamiento

Una vez concluidas las pruebas independientes de las partes componentes de la tubería forzada y de todo el equipo de la central en su totalidad, se ingresa a la etapa de pruebas de puesta en funcionamiento, que permita asegurar que todo funciona tal y para lo cual fue diseñado, realizando los ajustes que fueran necesarios.

En realidad las pruebas realizadas en esta etapa, son en conjunto de toda la central o por lo menos de los equipos que permitan el funcionamiento de uno de los grupos.

De todas las pruebas realizadas y referidas a la tubería forzada, la mayoría se refieren al funcionamiento de los automatismos, tanto en la serie de arranque como en la de parada y sólo una que otra prueba o verificación mecánica.

La prueba mecánica realizada es:

- Chequeo de la presión que se obtiene en la tubería con el golpe de ariete positivo o negativo, para los casos siguientes:
 - * Arranque de 1, 2 ó 3 grupos simultáneamente.
 - * Salida de 1, 2 ó 3 grupos.
 - * Salida intempestiva de los 3 grupos.
 - * Cierre de Válvula Mariposa.
 - * Cierre de válvulas esféricas.

Las pruebas referidas al funcionamiento de los automatismos son entre otras:

- Control del funcionamiento del detector de sobrevelocidad, con las acciones a realizar (cierre de válvula mariposa y señalizaciones).
- Funcionamiento del sensor de baja presión en los colectores de los diferentes grupos, con el accionamiento sobre las válvulas esféricas y válvula mariposa.
- Cierre de la válvula mariposa por inundación de la casa de máquinas, con el respectivo accionamiento del sensor.
- Funcionamiento de automatismos en arranque y parada de los grupos.

Para el caso de Machupicchu fueron realizadas todas las pruebas anteriormente descritas, con ocasión de la puesta en funcionamiento de los grupos N° 3 (Junio 1985) y grupos N°s 4 y 5 (finales de 1985 y comienzos del año 1986), obteniendo resultados adecuados para todos los casos. Sin embargo fué necesario realizar algunos ajustes en los automatismos de la central en conjunto, para obtener el punto exacto de funcionamiento.

Después de realizadas las pruebas anteriores se realiza lo que se llama el periodo de prueba, que significa el funcionamiento continuo con la carga máxima y acoplado a la red de energía, durante un periodo que generalmente bordea los 30 días. En nuestro caso el periodo de prueba de la tubería se realizó con el grupo N° 3, durante 30 días continuos y con carga entre los 25 a 27 MW, sin ninguna novedad para la tubería.

Previa a la realización de las pruebas mismas de puesta en funcionamiento, se tiene el llenado de la tubería forzada, en la que se a de observar los siguientes cuidados:

- Asegurarse previamente que los manómetros y válvulas de entrada y salida de aire están en perfecto funcionamiento.
- En los puntos altos del trazado de la tubería se a de abrir las válvulas de salida de aire.
- Previo al ingreso del agua se a de asegurar la no existencia de elementos extraños o residuos dentro de la tubería, que pudieran dañar los órganos de cierre inferiores o la turbina misma.
- El agua debe ingresar lentamente a la tubería y en un caudal a proximado del 10% del normal. Esto se consigue mediante la abertura incompleta de la válvula mariposa en las tuberías pequeñas o de poca importancia, o a través de la tubería de By-pass en las tuberías que lo posean (caso de Machupicchu).
- Deberá existir una persona en el lugar de válvula mariposa y By-pass, que pueda accionar el cierre de dichos órganos en caso de existir algún problema.
- Si hay posibilidad de congelamiento del agua estancada, se a de preveer la protección de la tubería y válvulas contra el hielo o se mantendrá en circulación el agua a través de las válvulas de desagüe.
- Para temperaturas inferiores a 0° C se a de mantener un caudal mínimo de ingreso, por cada 10 m² de tubería igual a:⁽¹⁾

(1) Superficie referida a la tubería expuesta al aire.

Temperatura externa ...	-5°C	-10°C	-15°C	-20°C
Caudal (litros/seg) ...	0,25	0,6	1	

- El vaciado normal de la tubería se realiza a través de la válvula de desagüe, utilizando la turbina o mediante ambas acciones.
- Una vez llenada la tubería y puesta en servicio se deberá chequear las juntas de dilatación, procediendo al ajuste adecuado hasta evitar las fugas de agua.
- Después del inicio del servicio se observará:
 - * La válvula de desagüe será accionada cada semana para evitar la acumulación de arena.
 - * Todos los dispositivos de cierre con funcionamiento mecánico, como compuertas, válvula mariposa, válvulas de entrada y salida de aire serán inspeccionadas periódicamente.
 - * Los aparatos de seguridad con funcionamiento automático deben ser objeto de particular cuidado.
 - * Regularmente será inspeccionada la protección exterior de la tubería, para verificar la posible iniciación de corrosión o cualquier otra contingencia, que pudiera afectar la vida útil de la tubería.

6.6 Cálculo de inversión

Como todo proyecto además de los conocimientos técnicos de diseño, montaje y puesta en funcionamiento, es importante saber acerca de la inversión realizada, para la financiación requerida

y también como en el presente caso, para el conocimiento acerca de porcentajes de inversión de la tubería con respecto al proyecto en general, al equipamiento mecánico, al costo por Kw instalado y otros, que puedan ser utilizados en el futuro para proyectos similares.

Para esto en nuestro caso utilizaremos cuadros indicativos de la inversión del proyecto en general, del subproyecto conformado por el equipamiento de central hasta patio de llaves, sin considerar las líneas de transmisión y subestaciones, mostrados en el apéndice M en los cuadros M-1 y M-2. Así mismo en los cuadros siguientes N^{os} 20 y 21, se tiene el costo del equipamiento electromecánico de la tubería y también el gasto por concepto de obras civiles.

De los cuadros N^{os} 20 y 21 así como los del apéndice M ⁽²⁾, podemos encontrar:

* Costo total equipamiento electromecánico de tubería forzada (incluyendo transporte montaje y pruebas)	U.S \$ 4 398 549,3
* Costo total obra civil-tubería forzada...	U.S \$ 1 384 922,9
* Costo total tubería forzada.....	U.S \$ 5 783 472,2
* Incidencia de tubería forzada en costo total de central (sólo equipamiento electromecánico).....	12,34 % ⁽²⁾

(2) La diferencia de cuadro M-2 y N^o 20 en cuanto al costo del equipamiento electromecánico se debe a que en el segundo se incluye a la válvula mariposa y otros como pertenecientes a la tubería forzada. El porcentaje hallado es según cuadro N^o 21 .

I N V E R S I O N E L E C T R O M E C A N I C A D E L A T U B E R I A F O R Z A D A

R U B R O	C O S T O E N F . F	C O S T O E N S / .	T O T A L U . S . \$
- Material del tramo al aire libre	3 327 845		803 827,3
- Material de zona en galería blindada	2 894 128		699 064,7
- Material conducto de repartición	819 666		197 987,0
- Material válvula mariposa	1 210 272		292 336,2
- Material rejas finas entrada de tubería	82 231,5	-----	20 104,2
- Material válvulas de desagüe	12 691,5		3 065,5
- Transporte FOB hasta C y F	3 534 929,3		853 847,7
- Transporte C y F hasta obra		16 609 682,9	75 498,6
- Montaje y pruebas	2 817 657,3	-----	680 593,5
- Montaje y pruebas		169 889 415	772 224,6
TOTAL COSTO	14 699 420,6	186 499 097,9	4 398 549,3

* F.F = Franco Francés 1 U.S. \$ = 4.14 F.F (cambio a la fecha de contrato)
 1 U.S. \$ = 220 S/. (cambio a la fecha de contrato)

Fuente: Elaboración propia a base de documentos contractuales GEM-Electroperú S.A

C U A D R O N° 21

R E S U M E N D E C O S T O S D E O B R A C I V I L E N T U B E R I A F O R -

Z A D A

R U B R O	EXCAVACION	COSTO \$	CONCRETO	COSTO \$	TOTAL U.S \$
- Túnel vertical	1712,07 m ³	171 207	1782,6 m ³	213 912	385 119
- Galería horizontal	617,98 m ³	61 798	1085,0 m ³	130 200	191 998
- Tramo aéreo	2784,81 m ³	278 481	3708,8 m ³	445 058,4	723 539,4
- Tubería de distribución	-----	-----	269,6 m ³	32 352	32 352
- Perforación anclajes	-----	-----	-----	-----	9 047
- Material anclajes (cables)	-----	-----	-----	-----	33 347,5
- Concreto anclajes	-----	-----	-----	-----	3 020
- Montaje y tensionado de anclajes	-----	-----	-----	-----	6 500
			TOTAL COSTO OBRA CIVIL		1 384 922,9

Fuente: Elaboración propia a base de datos de supervisión obra civil por parte del CNH

* Incidencia del costo total de tubería forzada en costo total de central (se refiere a costo electromecánico y obra civil y a la central sin líneas de transmisión ni subestaciones).....	6,29 %
* Incidencia del transporte en costo total del equipamiento electromecánico de tubería forzada.....	21,13 %
* Incidencia del montaje y pruebas en costo total del equipamiento electromecánico de la tubería forzada.....	33,03 %
* Incidencia en costo total de proyecto (incluyendo líneas de transmisión y subestaciones).....	4,52 %
* Incidencia de costo de tubería forzada en costo total del proyecto (incluye mejoramiento de redes, ampliación de electrificación al valle sagrado y taller de reparaciones) (3).....	3,85 %
* Costo del Kw instalado del proyecto en general.....	U.S \$ 2 145,3
* Costo de Kw instalado del proyecto con central, líneas y subestaciones.....	U.S \$ 1 826,5
* Costo por Kw instalado del proyecto sin incluir líneas ni subestaciones.....	U.S \$ 1 313,4
* Costo por Kw instalado en función del costo de tubería forzada.....	U.S \$ 82,6

(3) De poco valor para otros proyectos.

* Costo de tubería forzada por metro de
longitud del trazo..... U.S \$ 10 502,1

C O N C L U S I O N E S

- 1.- Los conocimientos necesarios para el diseño, fabricación, montaje y puesta en funcionamiento, de las tuberías forzadas de características similares en nuestro país, son impartidos en nuestras instituciones educativas, contándose por lo tanto con personal técnico peruano muy capacitado, por lo que es necesario que su intervención en el desarrollo de los proyectos sea más protagónica.
- 2.- El punto anterior frecuentemente se debe a las fuentes de financiamiento y a la provisión de materiales adecuados. Referente al primer punto en mi opinión a de buscarse nuevas formas y en lo que se refiere al segundo punto, a de impulsarse la industria siderúrgica del país, principalmente en los aceros aleados.
- 3.- Los conocimientos preliminares anteriores al diseño de la tubería, se refieren principalmente al terreno, por lo que los estudios del mismo deben ser lo más profundos y completos posibles, para evitar durante el desarrollo del proyecto la existencia de algunos cambios drásticos.

4.- En lo referente al estudio del golpe de ariete es mi recomendación, el uso preferible del método analítico de Allievi, dado su facilidad, rapidez y eficiencia comprobada. No así el método gráfico, pues su complejidad y requerimiento de gran precisión en su elaboración, lo hacen de poco uso.

Evidentemente el método computacional es más completo ya que permite verificar el comportamiento de la presión a lo largo del tiempo de duración del fenómeno, por lo que se recomienda su uso si se cuenta con el equipamiento necesario.

5.- Durante los procesos de fabricación y montaje, la parte principal deberá ser el chequeo de las uniones soldadas, mediante los métodos de ultrasonido y rayos X o gamma.

6.- El uso del sobreespesor en las tuberías, es necesario se haga en muestra realidad, porque el mantenimiento preventivo recomendado de la protección de la tubería, no es realizado a tiempo por diferentes motivos.

7.- En lo referente al equipamiento necesario para todas las etapas del desarrollo del proyecto, es bueno indicar que en el país se cuenta en la actualidad con todos ellos.

8.- La función de la supervisión en el desarrollo del proyecto es de suma importancia, para atestiguar el cumplimiento de las normas internacionales, el material y métodos contratados, el tiempo de jecución adecuado y por consiguiente el cumplimiento del presupuesto. Por lo anterior es necesario que el personal de la supervisión sea experimentado y de probada eficiencia técnica y moral.

B I B L I O G R A F I A

M A N U A L E S

- 1.- CREAGERW AND JUSTING - " Hydroelectric Handbook " - Biblioteca Central UNI - S.C- 621.003 - C912
- 2.- CROCKER SABIN - " Piping Handbook " - Biblioteca Central UNI - S.C - 621.02 - C938
- 3.- DAVIS CALVIN - " Handbook of Applied Hydraulics " - Biblioteca Central UNI - S.C - 532.02 - D32
- 4.- DURST - " Manual del mecánico ajustador "
- 5.- FERNANDEZ - " Manual del soldador de metales "
- 6.- HÜTTE - " Manual del Ingeniero " - Tomo III (Construcción de Tuberías)- Editorial Gustavo Gili S.A. - Barcelona 1985
- 7.- KURCHATKIN V.V. - " Manual del Forjador-Soldador con Soplete " Editorial MIR-Moscú - 1983
- 8.- MARKS - " Manual del Ingeniero Mecánico " - Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana - México .
- 9.- MAYNARD - " Manual de Ingeniería de la Producción Industrial " (Gráficos de Gantt) - Editorial Reverté S.A - Barcelona
- 10.- PFAU ARNOLD - " Hydraulic Turbine Handbook " - Biblioteca Central UNI- S.C. - 621.2 - P532
- 11.- ROLL - " Manual moderno del ajustador y montador "
- 12.- STUBBS FRANK W. - " Handbook of Heavy Construccion " - Biblioteca Central UNI - S.C. - 620.02 - S841

L I B R O S

- 1.- BERGERON LOUIS - " Golpe de Ariete Hidráulico " - " Water Hammer in Hydraulics and Wave Surgen in Electricity " - Biblioteca de Mecánica UNI - 532.89 - B391
- 2.- BOLTON - " Trabajos de ajuste y montaje "
- 3.- GRIFFING - " Técnicas para soldar tubería " Ed. DIANA - 1981
- 4.- LEONARDS G. A. - " Foundation Engineering " - Mc. Graw Hill Book Company INC. - 1962

- 5.- MACAGNO ENZO O. - " Ondas de Presión en Conductos " - Biblioteca de Mecánica UNI - 532.59 - M12
- 6.- MATAIX CLAUDIO - " Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas " Harper & Row Latinoamericana - Segunda Edición - México.
- 7.- SCHIMPKE P. y HORM H.A. - " Tratado General de Soldadura " Tomos II y III - Ediciones Gustavo Gili S.A - México D.F - 1982
- 8.- SCERÖCK - " Montaje, Ajuste y Verificación de Elementos de Máquinas "
- 9.- TAYLOR DONALD W. - Fundamentos de la Mecánica de Suelos " - Cía Editorial Continental S.A - México D.F - 1968
- 10.- VIEJO ZUBICARAY M. - " Energía Hidroeléctrica, Turbinas, Plantas Generadoras - Editorial Limusa - México - 1977 - Primera Edición - Biblioteca de Mecánica UNI - 621.26 - V94
- 11.- VILLASEÑOR - " Proyectos de Obras Hidráulicas "
- 12.- ZOPPETTI JUDEZ GAUDENCIO - " Centrales Hidroeléctricas - Estudio Montaje, Regulación y Ensayos " - Editorial Gustavo Gili S.A - Barcelona - 1979
- 13.- BLITZ JACK - " Fundamentos de los Ultrasonidos " - Editorial Alhambra S.A - Madrid - Claudio Coello # 76 - Primera edición

T E S I S

- 1.- OLAYA SALAZAR SEGUNDO - " Estudio del Golpe de Ariete " - M.1.32 - B
- 2.- PANIAGUA CORAZAO JUAN JOSE - " El Desgaste de Turbinas en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu " - M.1.15 - G
- 3.- ROCHSCHILD FLAUT - " Diseño de una Planta Hidroeléctrica " - M.1.2 - G
- 4.- SALINAS ORDOÑEZ JORGE - " Inspección Radiográfica de Soldadura " M.36.2 - G
- 5.- SARNIGHAUSEN O. FRANK - " Interpretación de Radiografías de Cordones de Soldadura y Detección de Fallas Observadas " - M.8.8 -B
- 6.- VASQUEZ ORTEGA OSCAR - "Soldadura de Arco Eléctrico Protegido con Gas Argón " - M.8.5 - B
- 7.- ZAMALLOA URIBE FIDEL HONORIO - " Cálculo y Diseño de Juntas de Expansión para Tuberías " - M.52.4 - G

O T R O S

- 1.- Revista Técnica WATER POWER - Noviembre 1970 - Artículo: " Buckling of Pressure Shaft and Tunnel Linings " - Ing. ERNST AMSTUTZ
- 2.- Documento GG-AG-049-81 - ELECTROPERU - " Estructura de la Venta de Energía Eléctrica por Electroperú en 1980 " - Ing. JORGE CABALLERO - 81.12.22 - Lima Perú .
- 3.- Planos Guías de Obras Civiles de la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu - Grupo Hidroeléctrico Machupicchu - Archivo del Consorcio Novoa Hidroservice.
- 4.- Nota de Cálculo de la Tubería Forzada de la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu- Grupo Hidroeléctrico Machupicchu - Archivo del Consorcio Novoa Hidroservice.
- 5.- Memoria Técnica del Montaje de la Tubería Forzada - Grupo Hidroeléctrico Machupicchu - Archivo del Consorcio Novoa Hidroservice
- 6.- Memoria Técnica del Hormigonado de la Tubería Forzada - Grupo Hidroeléctrico Machupicchu - Archivo del Consorcio Novoa Hidroservice.
- 7.- Memoria Técnica de la Inyecciones en la Ampliación de la Hidroeléctrica de Machupicchu - Archivo del Consorcio Novoa Hidroservice.
- 8.- Informes Mensuales de Consorcio Novoa Hidroservice a Electroperú sobre el Proyecto SERC I - Ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. N^{os} 001 al 075
- 9.- Documento " Avance Físico de las Obras al 31.12.84 del Proyecto Sistema Electrico Regional del Cusco y Ampliación de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu " - Electroperú S.A.
- 10.- Código ASME SECCION VIII - " Rules for Construction of Pressure Vessels "