

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
SECTOR ENERGIA
PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS
SECRETARIA TECNICA DE VENTA DE SERVICIOS

INFORME FINAL

ACUEDUCTO OROSI

VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CONDUCCION
TRAMO EN ZONA DE LA FALLA NAVARRO

PARTE II

Ing. Johnny Granados B.
Coordinador Técnico

San José, Costa Rica
Mayo, 1998

PARTICIPACION

Dr. Guillermo E. Alvarado I.

Neotectonismo

Msc. María Laporte P.

Sismología

Ing. Alvaro Climent M.

Sismología

Ing. Omar Vargas V.

Hidráulica

Ing. Rodolfo Jenkins M.

Geotecnia

Ing. Mauricio Varela R.

Diseño Estructural

Ing. Johnny Granados B.

Coordinador Técnico

Srita. Mauren Hernández D.

Estilo

TABLA DE CONTENIDO

1.0	INTRODUCCION
1.1	Antecedentes
1.2	Descripción general
1.3	Propósito y objetivos
1.4	Alcance del trabajo
2.0	NEOTECTONISMO EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIO AGUA CALIENTE
3.0	CARACTERIZACION SISMICA DE LA ZONA DEL PROYECTO
3.1	Estimación de la sacudida sísmica
3.2	Estimación del rompimiento superficial de la falla
3.3	Espectros elásticos
3.4	Referencias
4.0	ANALISIS HIDRAULICO DE LA RUPTURA HIPOTETICA DEL ACUEDUCTO DE OROSI A SU PASO POR LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIO AGUA CALIENTE.
4.1	Introducción
4.2	Comportamiento del flujo durante la falla
4.3	Estudio de la inclusión de válvulas
4.4	Conclusiones y recomendaciones
4.5	Referencias
5.0	INFORME GEOTECNICO. ESTABILIDAD TALUDES
5.1	Resumen
5.2	Alcance
5.3	Antecedentes
5.4	Caracterización geotécnica
5.5	Estabilidad por proyección estereográfica
5.6	Estabilidad por equilibrio límite
5.7	Conclusiones y recomendaciones
5.8	Referencias
	Anexo Nº 1 Topografía del sitio y ubicación de secciones
	Anexo Nº 2 Perfiles analizados
	Anexo Nº 3 Proyección estereográfica
	Anexo Nº 4 Salidas programas PCSTABL5
6.0	EVALUACION ESTRUCTURAL DE LA CONDUCCION
6.1	Alcance
6.2	Antecedentes
6.3	Análisis del comportamiento estructural
6.4	Conclusiones y recomendaciones
7.0	CONCLUSIONES GENERALES
8.0	RECOMENDACIONES

1.0 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ha contratado consultores para investigar la vulnerabilidad sísmica del Acueducto Orosi. Entre los estudios realizados se cita el estudio realizado por GEOMATRIX CONSULTANTS, Inc. en 1994. En sus conclusiones y recomendaciones se indica el sitio de cruce del río Agua Caliente como un área de interés para un análisis más detallado. Atendiendo esta recomendación, AyA solicitó al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) una asistencia técnica para hacer estudios y recomendaciones en relación con la vulnerabilidad sísmica del acueducto Orosi en la zona de la falla del río Agua Caliente.

1.2 Descripción general

El acueducto Orosi suministra casi el 50% del agua potable del área metropolitana de San José y Cartago y es administrado por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

Este acueducto toma el agua del embalse El Llano, a 35 km al sureste de la ciudad de San José, a una elevación aproximada de 1573 m.s.n.m. Es una tubería metálica de 1 m de diámetro y una longitud aproximada de 29 km que incluye un túnel de 1 km dentro de la montaña La Carpintera. La planta de tratamiento de aguas está ubicada en Tres Ríos, aproximadamente a 1433 m.s.n.m.

Los primeros 6 km de la conducción se ubican en una zona montañosa con fuertes pendientes, bajando la conducción hasta la elevación 1040 m.s.n.m., donde se ubica el sifón sobre el río Agua Caliente. De allí sube abruptamente hasta unos 1300 m.s.n.m. y pasa por los valles de Cartago y Coris. Luego de atravesar la montaña de La Carpintera con un túnel de 1 km de longitud termina finalmente en la planta de tratamiento de Tres Ríos.

1.3 Propósito y objetivos

Los estudios anteriores que realizaron varios consultores no determinaron en detalle los sitios donde el acueducto de Orosi cruza las diferentes ramificaciones de la falla Navarro. Como primer aspecto a considerar, el AyA solicitó al ICE establecer si existen evidencias del sitio o sitios donde pasa la falla Navarro y, si las condiciones geológicas lo permiten, establecer si es activa o no. Con base en este estudio se realizó una segunda etapa de estudios para determinar si se requieren elementos adicionales para proteger el acueducto en el sector del sifón.

El propósito de esta segunda etapa de estudios es determinar la vulnerabilidad de la conducción en condiciones de sismo, definiendo el tipo y la magnitud del daño esperado.

1.4 Alcance del trabajo

Considerando que los daños asociados con la ocurrencia de un evento sísmico pueden ser el resultado de efectos directos del movimiento de la falla o pueden ser efectos secundarios relacionados con el comportamiento del suelo, como licuación o deslizamientos, se definirán las características del movimiento sísmico en la zona de estudio y se evaluarán y definirán por medio de los parámetros correspondientes.

Se analizarán las condiciones de funcionamiento hidráulico y su comportamiento como consecuencia de un evento sísmico.

Se analizará la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos y la posibilidad de ocurrencia de licuación de terrenos.

Se hará un análisis del comportamiento estructural de la conducción de acuerdo con sus criterios iniciales de diseño y en condiciones de sismo. Según los resultados obtenidos se hará un estudio y análisis de soluciones a proponer.

2.0 NEOTECTONISMO EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIO AGUA CALIENTE

En la primera etapa del estudio realizado por el ICE se establecen las siguientes conclusiones:

- 1.- Las ramificaciones de la falla Navarro atraviesan el acueducto casi perpendicularmente, con un rumbo N 55° E hasta N 70° E, mientras que la falla Orosi lo hace oblicuamente con un rumbo N 35° - 40° W.
- 2.- Las fallas normales, ubicadas cerca de la estación 7 + 330, conforman tres sistemas principales de mayor a menor importancia. El último sistema (N 40° E; 75° NW) se presenta subordinado a los anteriores y es el único que concuerda con la orientación de la falla Navarro. Estos sistemas efectivamente desplazan el suelo unos pocos centímetros (≤ 15 cm).
- 3.- Otro sistema de fallas bien definido, observable en la intersección del acueducto con la carretera que conduce a Cónovas, posee similar orientación a la falla Navarro, incluyendo el tipo de movimiento (normal – sinistral), aunque no se observó que desplacen el suelo.
- 4.- Se puede concluir que, aunque las evidencias son pobres y no contundentes, existen elementos de juicio para asegurar que el ramal aparentemente más activo de la falla Navarro, en la zona de la estación 7 + 330, no representa un mayor peligro para el acueducto pues se ubica en la parte topográfica alta y plana. El otro ramal, aunque aparentemente menos activo, se ubica más cerca del sifón, por lo que merece especial cuidado en

caso de activarse.

- 5.- Con base en los estudios realizados por GEOMATRIX CONSULTANTS, Inc y complementados por el estudio realizado por el ICE, se concluye que la falla Navarro es una falla activa, aunque se desconoce cual podría ser su próxima reactivación. Existe cierta posibilidad de que un evento telúrico, de magnitud intermedia y profundidad somera, ocurra en el Valle del Guarco – Turrialba – Irazú en los próximos 15 a 63 años. Más difícil aún y con una probabilidad más baja, es estimar si la falla Navarro es la próxima en activarse o más bien, sería una de las tantas que se ubican en esa región.

3.0 CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA DEL PROYECTO

Tal y como ha sido identificado en estudios e informes anteriores (Salazar et al., 1992; Geomatrix, 1994; Alvarado, 1997) el Acueducto Orosi se encuentra localizado en un área sísmicamente activa y localmente caracterizada por la existencia de fallas igualmente activas, las cuales, inclusive, cortan el trazo de la tubería en algunos tramos. Por lo anterior, Geomatrix considera dicha zona de alta amenaza sísmica y a la conducción de Orosi muy vulnerable.

Localmente los daños asociados con la ocurrencia de un evento sísmico pueden ser el resultado de los efectos directos del cruce de la falla a través de la fundación de las obras (movimientos superficiales), o más probablemente de la sacudida sísmica del suelo (propagación de las ondas). Pero además, efectos secundarios relacionados al comportamiento del suelo, tales como: licuefacción, deslizamientos y compactación de sedimentos, pueden ser, en algunas ocasiones, generadores de grandes daños de acuerdo a las condiciones propias del sitio.

En este capítulo se definirán las características del movimiento sísmico del suelo en la zona donde se encuentra el sifón, con base en los estudios de detalle previamente obtenidos y a los resultados propios de este informe. Tanto la tectónica y sísmicidad local como regional se evaluaron y representaron por medio de parámetros sísmicos tales como: magnitud, intensidad (MM), aceleración, velocidad, desplazamiento, duración del movimiento sísmico fuerte y desplazamiento superficial. De tal manera que esta representación permita utilizar la información para efectos analíticos y de uso ingenieril.

La metodología empleada durante este estudio está acorde con las recomendaciones dadas por la American Society of Civil Engineers, en el libro Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, preparado por el ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (Nyman, 1984).

3.1 Estimación de la sacudida sísmica

Para efectos de estimar las características que tendrá la sacudida del suelo en el sitio del sifón, debido a la ocurrencia de un evento sísmico, se realizó una estimación determinística de la condición sismo-tectónica local y se complementó con los

resultados obtenidos previamente de análisis probabilísticos.

La sacudida sísmica en campo cercano, como es el caso de la evaluación del sitio de sifón, es un tanto difícil de estimar ya que la misma estará controlada, principalmente, por el patrón de radiación, y la directividad de la fuente. Aunque estos efectos no fueron evaluados estrictamente en este informe, se considera que la metodología utilizada para realizar la estimación lleva implícita los efectos antes mencionados.

3.1.1 Resultados determinísticos

La sacudida sísmica será determinada con base en la definición de escenarios sísmicos específicos, basados en el conocimiento de la sismicidad histórica y el potencial de generar sismos de cada una de las fallas presentes en la zona. Estos escenarios se postularon en términos de magnitud y distancia al sitio.

Muy cerca del área donde se ubica el proyecto es bien conocida la existencia de cuatro fallas activas, las cuales interactúan directamente con el acueducto (Geomatrix, 1994; Alvarado, 1997). En su parte noroeste, el mismo corre paralelo a la fallas Agua Caliente y Coris, que en este informe hemos denominado y simplificado como Agua Caliente-Coris. En su parte sur corta en forma casi perpendicular a la falla Navarro y en forma casi paralela en su finalización sur, a la falla Orosi. La condición anterior se da en una área bastante reducida, como se muestra en la Fig. 1 en la cual se incluyeron solamente las estructuras tectónicas definidas como más significativas y críticas para el acueducto.

De la recopilación histórica se tiene la certeza de la ocurrencia de eventos sísmicos importantes en esta área, presumiblemente asociados con las fallas definidas. Varios de estos sismos son de carácter destructivo, como es el caso del muy conocido terremoto de Cartago de 1910. En el Cuadro 1, se presenta un resumen de los eventos sísmicos más importantes ocurridos históricamente en esa zona y que permite, a la vez tener una idea del tamaño de posibles eventos a ocurrir en el futuro.

Cuadro 1. Sismicidad histórica asociada a fuentes sísmicas ubicadas en el área de interés

FUENTE ASOCIADA	EVENTO	M _s	(I MM)
Falla Navarro	Terremoto de 1951	5,0	VII -VIII (entre Paraiso y Orosi)
	Enjambre 1980	M < 4,0	
Fallas Agua Caliente y Coris	Terremoto de 1841	6,45	IX
	Terremotos de 1910 13 de abril	5,2	VII
	4 de mayo	6,4*	VII (IX)

*Los valores de magnitud e intensidad fueron estimados con base en información macrosísmica (Geomatrix, 1994), y el valor de magnitud marcado con * fue obtenida de registros instrumentales por White y Harlow (1993).

Además de conocer los valores de magnitud históricos asociados a estas fallas, para

este informe el Dr. Guillermo Alvarado realizó la estimación de las magnitudes máximas probables y posibles para cada una de ellas, con base en la longitud estimada de la posible ruptura de la falla. Los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 2 (columna 3). Igualmente, Geomatrix realizó estimaciones empíricas con base en la longitud y área de la posible ruptura. En la columna 4 del mismo cuadro se incluyen los valores obtenidos.

Los valores de magnitud máxima probable fueron obtenidos segmentando las fallas y la máxima posible utilizando la longitud total. A juicio profesional de Geomatrix (1994), la falla Navarro no romperá entera de una sola vez, ya que de ser así se encontraría, en el campo, mayor evidencia geomorfológica y geológica que mostrará desplazamientos mayores y acumulados en el campo, consideración que comparte el Dr. Alvarado.

Cuadro 2 Estimación de la magnitud para cada falla específica.

Fuente	Tipo de falla	Magnitud Máx.(Ms)		Magnitud Máx. (Ms)
		Probable	Posible	Probable
F. Navarro	Sinistral/normal	6,2	6,7	6,4 a 6,8
F. Agua Caliente-Coris	Sinistral	6,1	6,6	6,3 , 6,5
F. Orosi	Normal	5,0	5,9	

Para efectos de estimar la sacudida sísmica que dichas fallas tendrán sobre el sitio del sifón, se definieron una serie de escenarios sísmicos específicos, con base en la evidencia histórica (Cuadro 1) y en lo propuesto por Geomatrix (1994) y Alvarado (para este estudio) en el Cuadro 2. Cada uno de ellos se presenta en la Fig. 1y el Cuadro 3.

Para la estimación de la magnitud se consideró, además, que sismos recientes, tales como Buena Vista (1983) y Piedras Negras (1990), ocurrieron en fallas similares con magnitudes Ms de 6,1 y 6,4, respectivamente. La localización de los epicentros se seleccionó de acuerdo a la segmentación de las fallas y ubicados en la parte central de cada segmento.

Cuadro 3. Escenarios sísmicos específicos en el área del proyecto, fuentes locales

Fuente	Magnitud (Ms)	EPI (km)	Prof. (km)	I MM)
F. Navarro Escenario 1	6,3	7,0	10	VII-VIII
F. Agua Caliente Escenario 2	6,2	12	10	VII-VIII
F. Orosi Escenario 3	5,0	4,0	7	VI-VII

Basándonos en los escenarios específicos, se seleccionó una serie de eventos similares, de los cuales se dispone de registro instrumental de aceleración (acelerograma). Para esta selección se utilizaron las bases de datos recopiladas por el ICE y el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la UCR, así como de las bases de datos mundiales disponibles, tales como: Leeds (1992),

Programa de Instrumentación de Movimientos Fuertes de California (CSMIP/USA) y la del Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC/NOAA/USA).

Para cada uno de los escenarios se obtuvo un promedio de siete eventos similares con registro instrumental que disponían, además de información sobre magnitud, profundidad, distancia epicentral, intensidad epicentral y, en el sitio de registro, aceleración, velocidad, desplazamiento, duración del movimiento sísmico fuerte, nombre de la estación, tipo de instrumento, señal de aceleración-tiempo y espectro de respuesta.

Debido a la poca información disponible en campo cercano para una magnitud definida, se decidió utilizar intervalos de valores alrededor de los definidos en el Cuadro 3. Por ejemplo, en el caso de la falla Navarro se seleccionaron eventos con magnitudes que variaron entre 5,9 y 6,5, profundidades entre 14 y 6 km y distancias epicentrales entre los dos y los nueve km. Se incluyó, en este caso, el terremoto de Piedras Negras del 22 de diciembre de 1990, cuya magnitud M_s es de 6,4.

Del análisis de todos los registros disponibles por escenario, se estimó que en el sitio del sifón, los movimientos sísmicos del suelo estarían caracterizados, según los valores que aparecen en el Cuadro 4, para cada una de las fallas definidas.

Cuadro 4. Parámetros sísmicos estimados y esperados en el sitio específico del sifón de acuerdo con los escenarios propuestos.

Fuente	Acel. Hor. (cm/s^2)	Veloc. (cm/s)	Desplz. (cm)	Durac. Mov. Fuerte (seg.)		I(MM)
				> 5% g	>10% g	
F. Navarro	200-500	10-20	2-5	2-5	0,5-2	VII-VIII
F. Agua Caliente	200-400	10-40	2,5-9	5-7	0,5-4	VII-VIII
F. Orosi	50-350	4-15	0,2-4	1-5	0,5-4	VI-VII

I(MM) Intensidad epicentral

Además de la estimación local se realizó una estimación determinística regional, lo que permite tener el panorama completo del efecto que las fuentes sísmicas más lejanas tendrán sobre el sitio del sifón. En el Cuadro 5 se presentan los valores obtenidos de los diferentes parámetros definidos.

Cuadro 5. Parámetros sísmicos estimados en el sitio para cada uno de los escenarios sísmicos regionales.

Fuente	Acel. Hor. (cm/s^2)	Veloc. (cm/s)	Desplaz. (cm)	I (MM)
F. Superficial, dist 20 km, M_s 5,5-6,5	150-350	4-13	0,5-4	VI-VII
F. Superficial, dist 30 km, M_s 5,5-6,5	150-280	5-15	2-9	VI-VII
F. Superficial, dist 40 km, M_s 5,5-6,5	100-250	3-20	1-9	VI-VII
F. Superficial, dist 90 km, M_s 7,5	100-220	5-30	2-8	VI
Subducción, dist 60 km, M_s 7,0	100-200	8-30	2-7	VI

I(MM) Intensidad en el sitio

Los eventos regionales presentan valores de aceleración menores a los producidos por eventos más locales, pero los desplazamientos son bastante similares.

Otra manera de evaluar el efecto de los escenarios sísmicos sobre el sitio del sifón, es la aplicación directa de ecuaciones empíricas de atenuación de las señales sísmicas, que relacionan niveles de intensidad (aceleración, IMM, etc.) con la magnitud y distancia.

Para este informe, se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Climent et al. (1994) y Dahle et al. (1995) para Centroamérica y las de Schmidt et al. (1997) para Costa Rica. Las dos primeras, son ecuaciones generales, ya que incluyen en su base de datos tanto información de subducción como de fallamiento superficial. En el caso de la tercera, desarrollaron una ecuación general, así como una específica para fallamiento superficial, similar al presente en la zona del acueducto Orosi.

Cuadro 6. Valores de aceleración horizontal pico por ecuación, Ms = 6,3, distancia epicentral 7 km y profundidad 10 km.

Relación de atenuación	Aceleración cm/s ²
Climent et al. (1994)	335,7
Dahle et al. (1995)	328,3
Schmidt	
Ecuación general	347,03
Ecuación para eventos superficiales	430,80

3.1.2 Resultados probabilísticos

En este tipo de estimación, la información sobre la tectónica, sismicidad y atenuación de los movimientos sísmicos, son integrados en un modelo probabilístico para calcular diferentes niveles de la sacudida sísmica del suelo, asociados a una determinada probabilidad de excedencia o periodo de retorno.

Para este proyecto la empresa Geomatrix realizó un estudio de amenaza sísmica probabilística definida en el sitio de ubicación del sifón del acueducto. Los resultados se listan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Aceleración horizontal pico para lecho rocoso vs. periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	Aceleración en roca (cm/s ²)
10	157,79
50	253,04
100	301,30
500	437,17
1000	515,94

Geomatrix recomienda escoger el periodo de retorno de 500 años, para definir la aceleración máxima que se puede presentar en el sitio, con base en la importancia de la obra y su vida útil (50 años). Estas recomendaciones se sugieren a partir de las recomendaciones del Código Sísmico de Costa Rica.

El informe regional de amenaza sísmica probabilística más actualizado para el país, es el realizado por Laporte et al. (1994), en donde se presentan curvas de iso-aceleración relacionadas con diferentes periodos de retorno. Al interpolar las curvas para el sitio donde se encuentra el sifón, se obtienen los valores de aceleración que aparecen en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Aceleración horizontal pico para lecho rocoso vrs. periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	Aceleración en roca (cm/s ²)
50	215,82
100	245,25
500	372,78
1000	441,45

3.1.3 Análisis de los resultados

La utilización de varias metodologías permitió tener un panorama bastante amplio de los valores de la sacudida sísmica a esperar en el sitio del sifón. Los valores finalmente seleccionados de aceleración, velocidad y desplazamiento se escogieron por medio de la correlación entre las diferentes estimaciones.

Los valores de aceleración horizontal pico obtenidos del análisis determinístico fueron bastante coincidentes con los valores de aceleración probabilísticos, para periodos de retorno de 500 y 1000 años.

Si se considera la recomendación de Geomatrix de utilizar un periodo de retorno para 500 años, para la selección de la aceleración en el análisis probabilístico el valor estimado máximo es de 437,17 cm/s², el cual concuerda bastante con el valor obtenido de aplicar la ecuación de Schmidt et al. (1997) al escenario 1 de la falla Navarro, cuyo valor es de 430,8 cm/s² y ambos valores son bastante cercanos al máximo (500 cm/s²) obtenido de la selección de registros instrumentales para cada escenario.

De los escenarios planteados, la ocurrencia de un evento en la falla Navarro sería el más crítico, debido principalmente a que la misma cruza al acueducto cerca del sifón. De ocurrir tal evento, el sifón se vería afectado por una sacudida sísmica de campo cercano, con efecto topográfico importante y posible directividad de la fuente.

Considerando lo anterior y el hecho de que el acueducto es una obra de vital importancia para el suministro de agua potable para la ciudad de San José, se recomienda el uso de los valores superiores de todas las estimaciones realizadas. En este caso, se sugiere tomar un valor de aceleración pico de 500 cm/s^2 , el cual coincidiría bastante con los valores probabilísticos obtenidos de utilizar un periodo de retorno de 500 años.

Para efectos de comprobación del comportamiento dinámico del acueducto en la zona donde se encuentra ubicado el sifón, se recomienda entonces utilizar los siguientes parámetros:

Aceleración horizontal	: 500 cm/s^2
Velocidad	: 30 cm/s
Desplazamiento	: 7 cm ←
Duración mov. fuerte	: $5 \text{ s} (> 5 \% g)$

Los valores anteriores fueron obtenidos para una condición de roca y, dado que el acueducto se encuentra cimentado sobre material considerado como roca, no es de esperar amplificaciones de los valores estimados. Es importante resaltar que los suelos rígidos o roca se caracterizan por tener movimientos sísmicos predominantemente con características de periodo corto.

Aunque en algunos estudios (Malaver, 1997; Lew, 1992), se ha encontrado que cerca de la zona epicentral se pueden presentar valores de aceleración vertical mayor a la horizontal, la tendencia general observada es que el valor de la componente vertical sea un 30 % a 60 % menos que el valor horizontal. Los acelerogramas registrados por el ICE muestran en la mayoría de los casos valores horizontales mayores que los verticales. Considerando lo anterior, se recomienda que el efecto vertical de las sacudidas sísmicas, sea evaluado en base a la reducción de un 20 % del valor de la aceleración horizontal estimado.

3.2 Estimación del rompimiento superficial de la falla

La zona del sifón ha sido identificada como la más crítica en el caso de que sucedan desplazamientos superficiales. Por lo tanto el análisis se centrará en la falla Navarro, ya que la misma cruza el acueducto en dicha zona. Lo anterior no implica que desplazamientos en otras partes del acueducto puedan aparecer.

Para efecto de la estimación del desplazamiento de la falla, Geomatrix, al igual que Alvarado (para este informe) realizaron una estimación del desplazamiento de la falla dada la ocurrencia de un evento sísmico determinado. Los resultados son similares y son el producto del uso de relaciones empíricas desarrolladas a partir de rupturas

históricas.

Geomatrix puntualiza que en general cuando una falla rompe en superficie, el máximo desplazamiento vertical y horizontal ocurren en diferentes partes de la traza y que el desplazamiento promedio puede ser obtenido en base a medidas múltiples a lo largo de la zona de ruptura. Ellos mismos recomiendan utilizar las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) por su metodología de calcular el desplazamiento a partir de un mínimo de 10 medidas del desplazamiento para cada ruptura. En el Cuadro 9 se presentan los valores de desplazamiento obtenidos para la falla Navarro, dada la ocurrencia de un evento de magnitud 6,4 que corresponde con el escenario 1 planteado anteriormente.

Cuadro 9. Estimación del desplazamiento superficial de la falla Navarro.

Evento	Despl. máx.horiz. falla de rumbo	Despl. prom. horiz. falla de rumbo	Despl. prom. Falla combinada
Ms = 6,4	0,3 m.	0,2 m.	0,14 vertical 0,14 horizontal

Las estimaciones anteriores se realizaron para una falla de rumbo y una combinada. En el caso de la falla Navarro, dado que es una falla combinada del tipo desplazamiento de rumbo con componente normal, se esperaría entonces desplazamientos horizontales y verticales promedio de 0,14 cm. Para efectos de ser conservadores y para el análisis de la conducción, se puede tomar el valor máximo obtenido para una falla de rumbo que es de 0,3 m.

Es importante mencionar que durante el trabajo de campo de Alvarado (1997), solamente se observaron desplazamientos antiguos en la traza norte de la falla Navarro, la cual cruza la conducción a unos 200 m del sifón.

3.3 Espectros elásticos

El espectro representa la envolvente del movimiento del terreno generado por sismo ocurridos a distancias hipocentrales de 8.1, 10, 12.2 y 15.6 km, que representan respectivamente distancias y profundidades de 4 y 7 km, 7 y 7 km, 7 y 10 km, y 12 y 10 km. Las magnitudes de los sismos son $M_s = 6.3, 6.75$ y 7.5 , ocurriendo respectivamente, a las distancias más cortas, intermedias y más lejanas. Se utilizó la fórmula espectral para Centro America recalculada por Dahle et al, 1995, y se le aplicó una desviación estandar en los escenarios pertinentes.

En las figuras incluidas, el espectro se presenta en sus tres evaluaciones tripartitas, separadamente, para facilidad de su lectura. En las tablas a continuación también se incluyen sus respectivos valores.

VALORES DEL ESPECTRO ELASTICO CON 5% DE AMORTIGUAMIENTO RECOMENDACION PARA EL ACUEDUCTO OROSI			
PERIODO	VALOR DE PSEUDO ACELERACION	VALOR DE PSEUDO VELOCIDAD	VALOR DE DESPLAZA- MIENTO RELATIVO CM
SEG.	% G	CM/SEG	
0.025	40.6912	1.588289	0.00632
0.05	58.8675	4.595517	0.03657
0.1	76.8320	11.99585	0.19092
0.2	80.5701	25.15899	0.80084
0.5	58.5701	45.72307	3.63853
1	33.5859	52.43801	8.345768
2	14.0500	43.87277	13.96514
4	3.607	22.52687	14.34105

Los valores máximos del movimiento del terreno calculados con las expresiones propuestas por Newmark (1982) correspondientes a este espectro son 40.7 % g, 31.8 cm/seg y 10.3 cm, respectivamente para la aceleración pico, velocidad pico y desplazamiento pico.

3.4 Referencias

Alvarado, G., 1997. Estudio de Vulnerabilidad Sísmica del Acueducto de Orosi. Parte 1: Neotectonismo en la Margen Izquierda del Río Navarro. Inf. Interno ICE, OSV.97.6.ICE. 13 pp.

Climent, A., Taylor, W., Ciudad Real, M., Strauch, W., Santana, G., Villagran, M., Dahle, A., y Bungum, H., 1994. Spectral Strong Motion Attenuation in Central América. NORSAR, Technical Report No. 2-17. 46 pp. RONDICA Project. Kjeller, Noruega.

Dahle, A., Climent, A., Taylor, W., Bungum, H., Santos, P., Ciudad Real, M., Lindhom, C., Strauch, W. y Segura, F., 1995. New Spectral Attenuations Models for Central America, In: Proc. 5th Intern. Conf. on Seismic Zonation, Nice, 1005-1012.

Geomatrix, 1994. Informe Final. Acueducto de Orosi. Sub-Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de Conducción: El Llano a Tres Ríos, Provincia de Cartago, Costa Rica. Geomatrix Consultants, San Francisco, California, viii + 149 pp. + apéndices.

Laporte, M., Lindholm, C., Bungum, H. y Dahle, A., 1994. Seismic Hazard for Costa Rica. NORSAR. Technical Report No. 2-14. 73 pp. RONDICA Project. Kjeller, Noruega.

Leeds, D.J., 1992. State of the Art For Assessing Earthquake Hazards in the United States. US Army Corps of Engineers. Report 28. Recommended Accelerograms for Earthquake Ground Motions. 171 pp, + Appendix.

Lew, M., 1992. Characteristic of vertical ground motion recorded during recent California earthquakes. In: Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V.2.

Malaver, A., 1997. Actividad sísmológica y acelerográfica en Venezuela en el periodo 1970-1990. Seminario sobre evaluación y mitigación del riesgo sísmico en el área centroamericana. 22-26 sept. San Salvador, El Salvador. 12 pp.

Nyman, D.J. (ed.), 1984. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines. American Society of Civil Engineers, xi + 473, New York.

Salazar, L.G., Obando, L. y Mora, R., 1992. Acueducto Metropolitano, tramo Embalse El LLano-Río Navarro (Costa Rica): Un sitio bajo amenaza. -Rev. Geol. Amér Central, 14: 85-86.

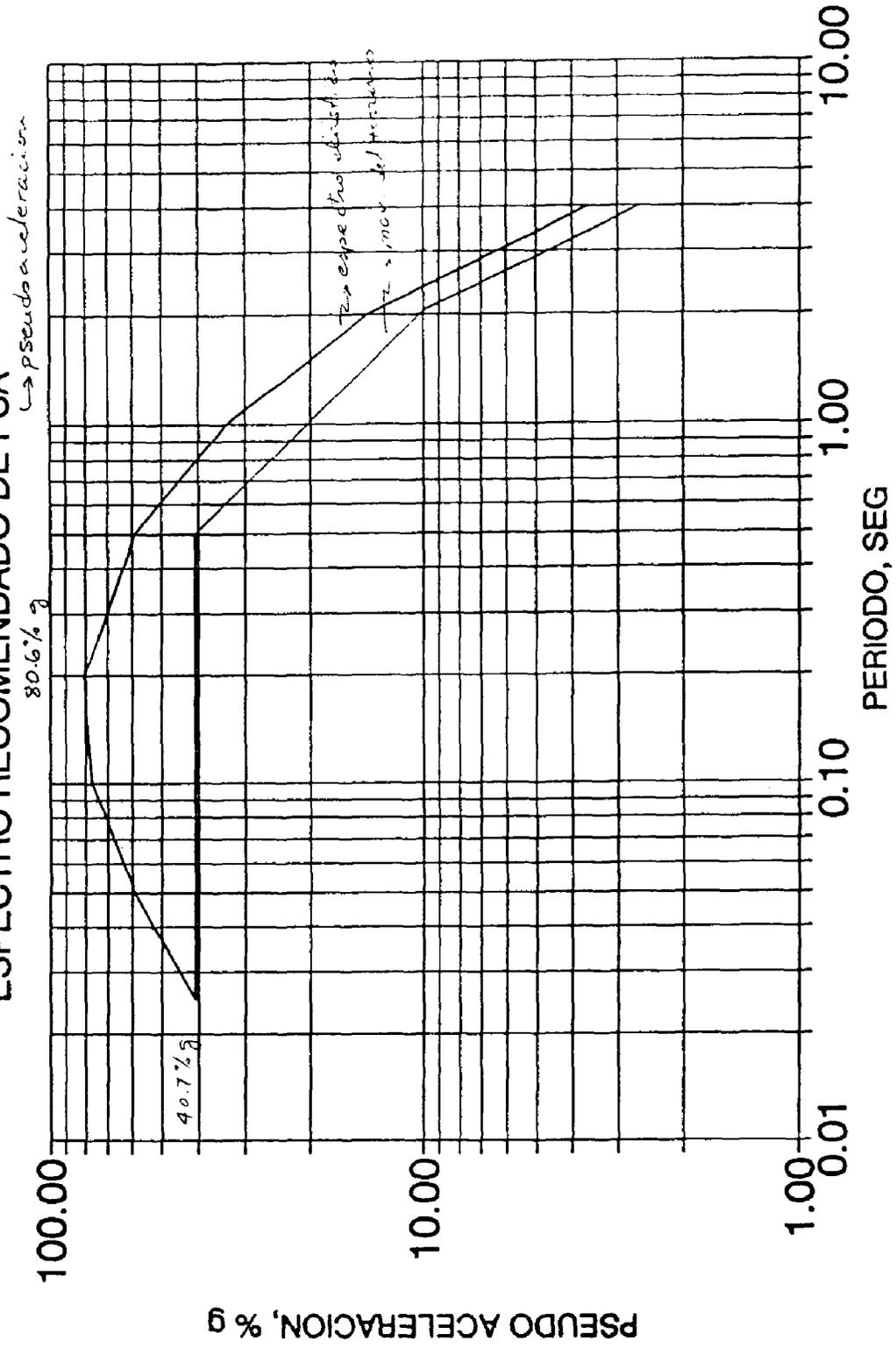
Schmidt, V., Dahle, A. y Bungum, H., 1997. Costa Ricam Spectral Strong Motion Attenuation. NORSAR, Technical Report. 45 pp.

Wells, D. L. y Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84.

White, R.A. y Harlow, D., 1993. Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900: Bulletin of the Seismological Society, V. 83, p. 1115-1142.

PROYECTO ACUEDUCTO OROSI ABRIL98

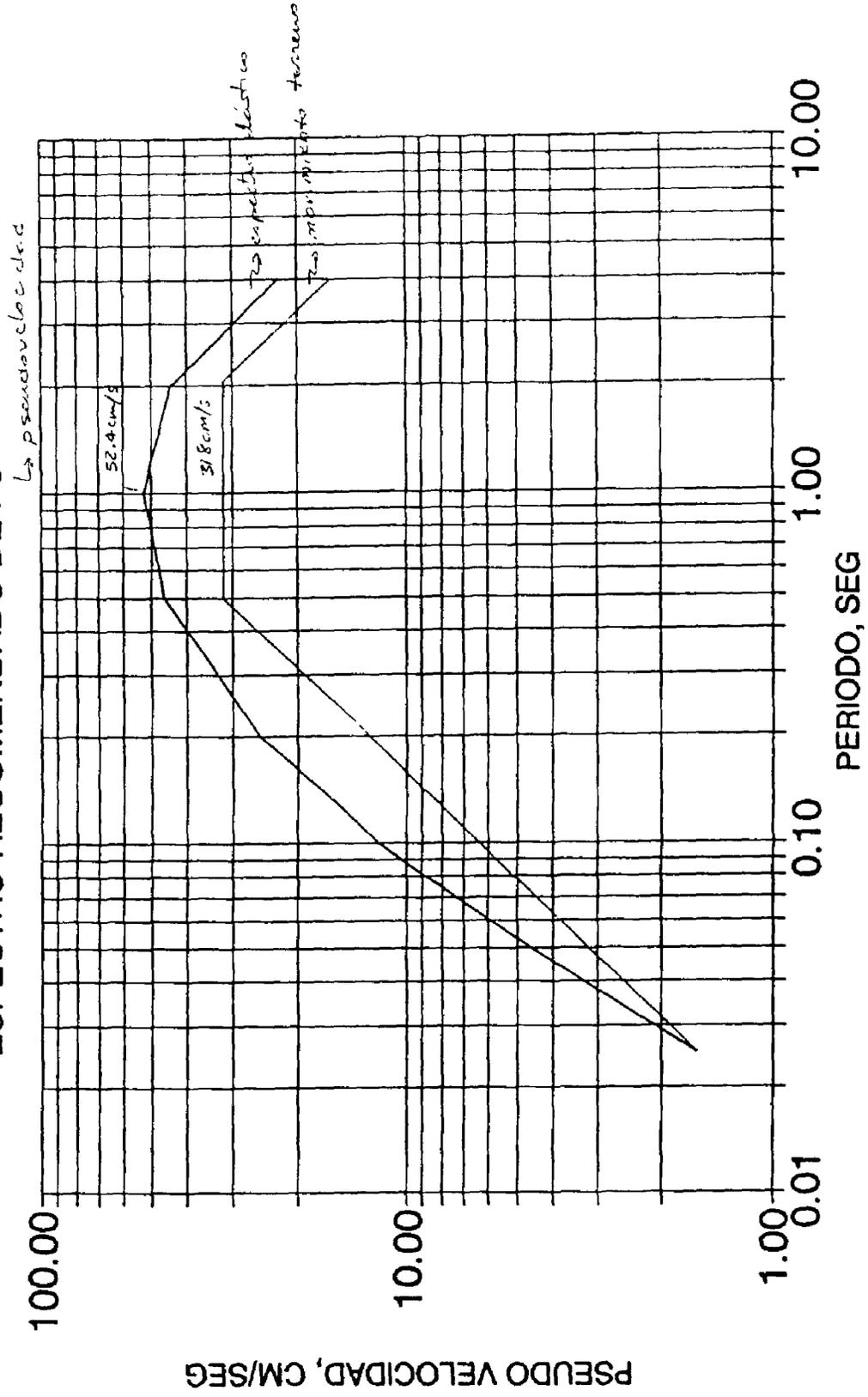
ESPECTRO RECOMENDADO DE PSA



— ESPECTRO ELASTICO — MOV TERRENO

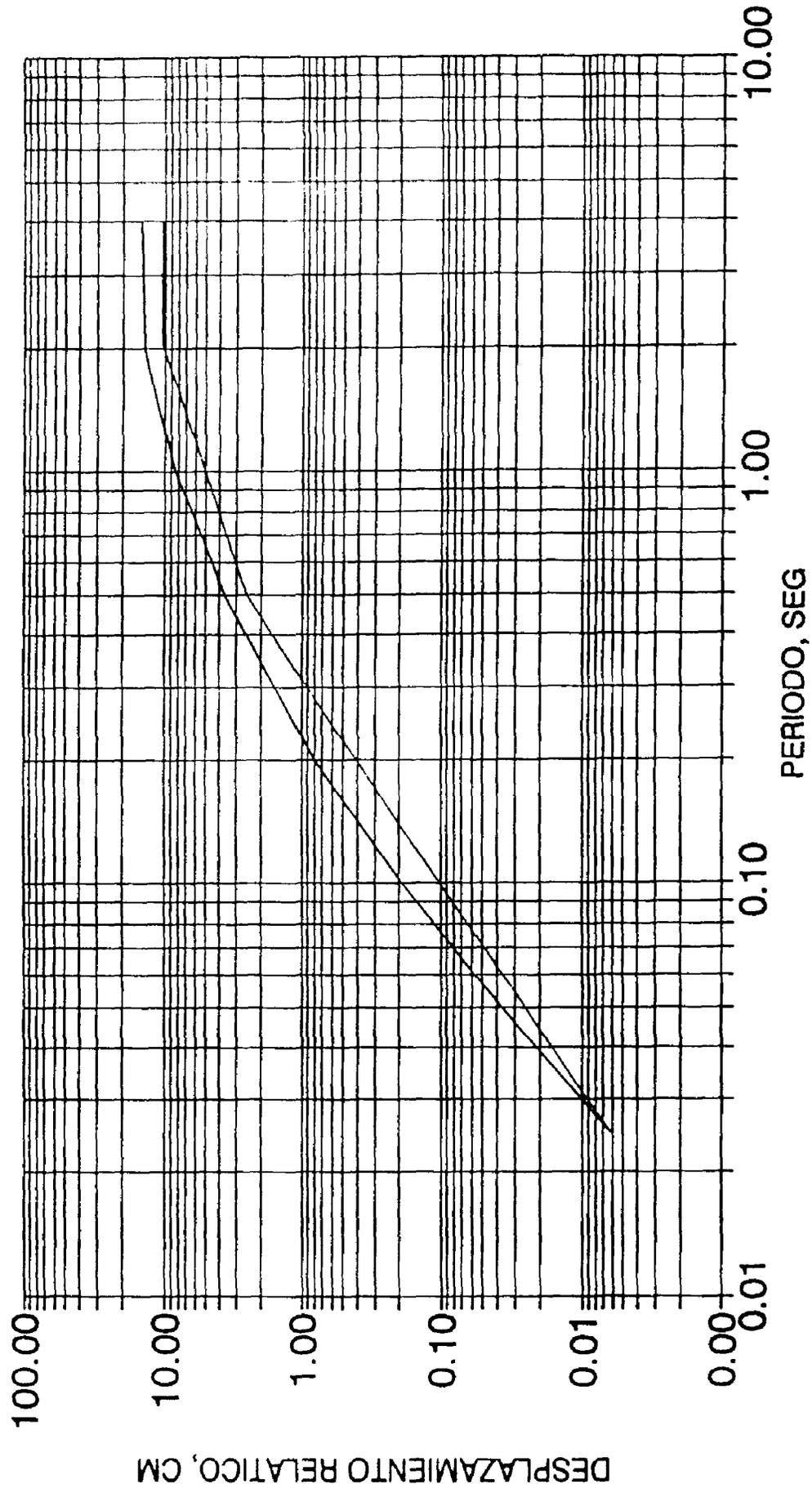
PROYECTO ACUEDUCTO OROSI ABRIL98

ESPECTRO RECOMENDADO DE PSV



— ESPECTRO ELASTICO — MOV TERRENO

PROYECTO ACUEDUCTO OROSI ABRIL98
ESPECTRO RECOMENDADO DE DESPLAZAMIENTO



4.0 ANALISIS HIDRAULICO DE LA RUPTURA HIPOTETICA DEL ACUEDUCTO DE OROSI A SU PASO POR LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIO AGUA CALIENTE

4.1 Introducción

El presente estudio analiza el funcionamiento del acueducto de Orosi cuando se produce una ruptura en el sifón invertido sobre el río Agua Caliente. La susceptibilidad de falla de la obra en esta zona durante un evento sísmico se debe a la presencia de varias fallas geológicas importantes en la margen izquierda del río. El propósito de este análisis es determinar el orden de magnitud de las implicaciones de dicha ruptura y estudiar la posibilidad de mitigar los daños mediante el uso de válvulas de guarda.

El tramo de acueducto en estudio comprende desde la conexión al embalse El Llano hasta el túnel de La Carpintera, lo que corresponde a una longitud aproximada de 23 km de tubería. Dicho tramo incluye tubería de hierro dúctil y acero con un diámetro de 1.1m (Silva, 1985). En la Fig. 1 se muestra el perfil del tramo. Existe una válvula de control al inicio que se cierra automáticamente cuando la velocidad aumenta más allá de la velocidad de régimen. De acuerdo al Ing. Arturo Rodríguez del AyA, el tiempo de cierre de esta válvula es de aproximadamente 2 minutos.

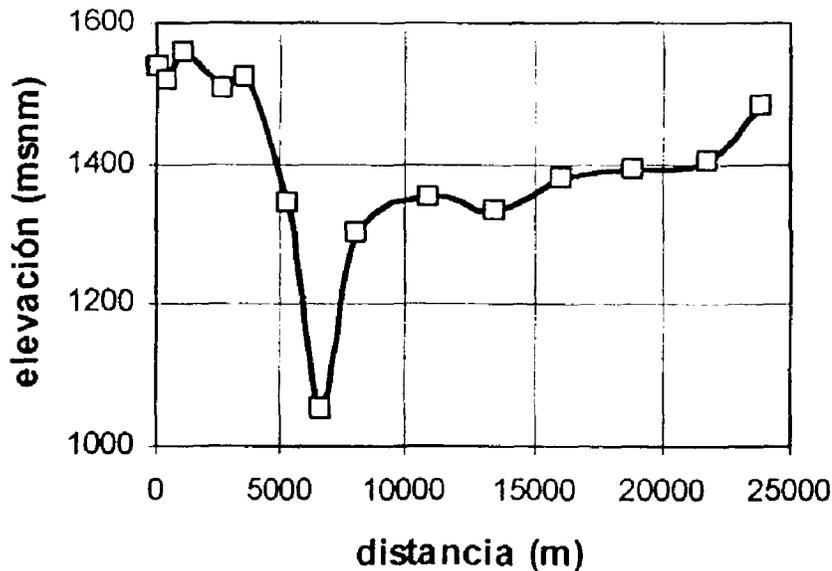


Fig. 1. Perfil de la tubería desde el embalse El Llano hasta el túnel de La Carpintera.

Es imposible determinar la localización y la magnitud de una posible ruptura en la conducción. Sin embargo, la ruptura crítica ocurriría en el punto más bajo del sifón que es, a su vez el punto más bajo de toda la conducción y el que está sometido a mayor presión hidrostática. Por lo tanto, se supone en este análisis lo siguiente:

- el caudal inicial en la conducción es de $2\text{m}^3/\text{s}$;
- nivel del embalse en la elevación 1572 msnm;
- nivel de agua en túnel de la Carpintera en la elevación 1480 msnm.
- la ruptura ocurre en la parte baja del sifón con un área igual al área transversal del tubo;
- la ruptura se produce en un tiempo de 10s
- la curva de cierre de la válvula al inicio del acueducto se toma como lineal.

Las simulaciones se realizan con el modelo WH31 (Chaudry, 1989) que utiliza el método de las características para resolver las ecuaciones de flujo transitorio en tuberías. La tubería cuenta con una cantidad apreciable de válvulas de aire pero, para facilitar el estudio solo se han tomado en cuenta 11 de ellas. El modelo supone que estas válvulas son capaces de suministrar la capacidad necesaria de aire cuando se produce succión en el tubo.

El coeficiente de fricción de Darcy calculado fue 0.017 para ambos tipos de tubería y la celeridad de una onda de presión sería aproximadamente 905m/s para el hierro dúctil y 1035m/s para el acero.

4.2 Comportamiento del flujo durante la falla

En la Fig. 2 se muestra la variación del gradiente hidráulico durante los primeros 15s después de la ruptura. En este gráfico se aprecia que el nivel piezométrico se abate muy rápidamente aguas arriba de la ruptura.

En una longitud importante de la conducción el nivel piezométrico se localiza por debajo del nivel del tubo, lo que indica presiones negativas. Sin embargo, la presencia de las válvulas de aire evitan el rompimiento de la columna de agua. El rompimiento de la columna de agua es un fenómeno que se produce en puntos donde la presión se reduce hasta la presión de vapor del agua llegando a formar una cavidad de vapor que separa el flujo, el colapso de estas cavidades podría destruir la tubería.

Durante la simulación se observó que la cantidad de aire succionado puede llegar a ser importante y podría dar origen a flujo bifásico fuerte (flujo gas-liquido) con la consecuente producción de pulsaciones de Presión.

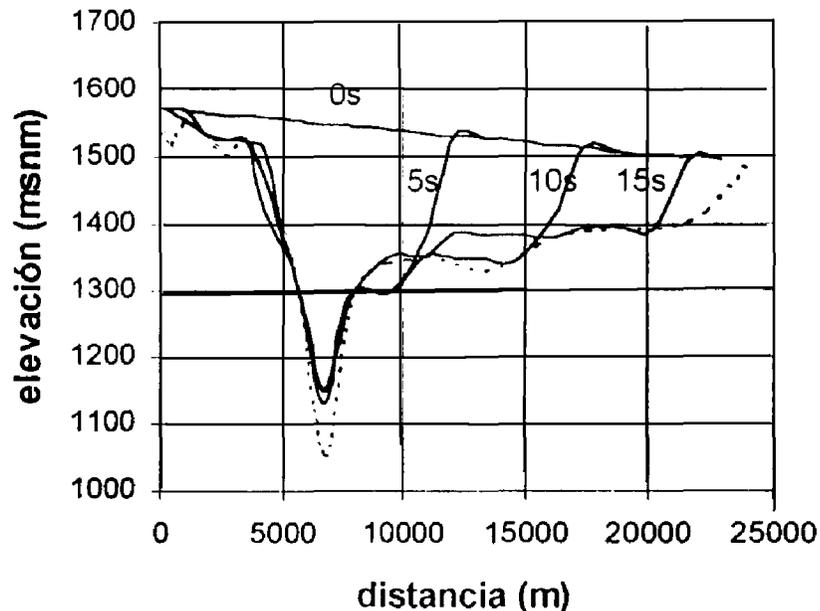


Fig. 2. Variación en los niveles piezométricos a lo largo de la conducción durante la falla.

La Fig. 3 presenta la variación del caudal a lo largo de la conducción. En dicha figura se observa que el caudal se incrementa muy rápidamente aguas arriba de la ruptura y la dirección del flujo se revierte, casi instantáneamente en las inmediaciones de aguas abajo de la misma, provocando que el caudal saliente a través de la falla aumente en forma acelerada.

En la Fig. 4 se muestra la variación del caudal saliendo a través de la ruptura en los primeros 60s. También se muestra la variación del caudal pasando a través de la válvula de control aguas arriba. Obsérvese que a los 50s del transitorio, el caudal en dicha válvula aumenta un 88% a pesar de que la válvula ya se ha cerrado en un 50%, esto es resultado del cambio brusco en el gradiente hidráulico causado por la ruptura.

Es importante observar en la Fig. 4 como el caudal vertido alcanza un máximo estable en solo 20s. Este máximo es igual a $23.5\text{m}^3/\text{s}$ y saldría con una velocidad de aproximadamente 24m/s . De acuerdo a Fahlbusch(1994) este chorro podría producir un hueco de 15m de profundidad al incidir con 30° sobre una superficie horizontal. Lo anterior da una idea de la capacidad destructiva del chorro. Sin embargo es imposible estimar la orientación del mismo y existe la posibilidad de que este desestabilice una parte importante del talud de margen izquierda.

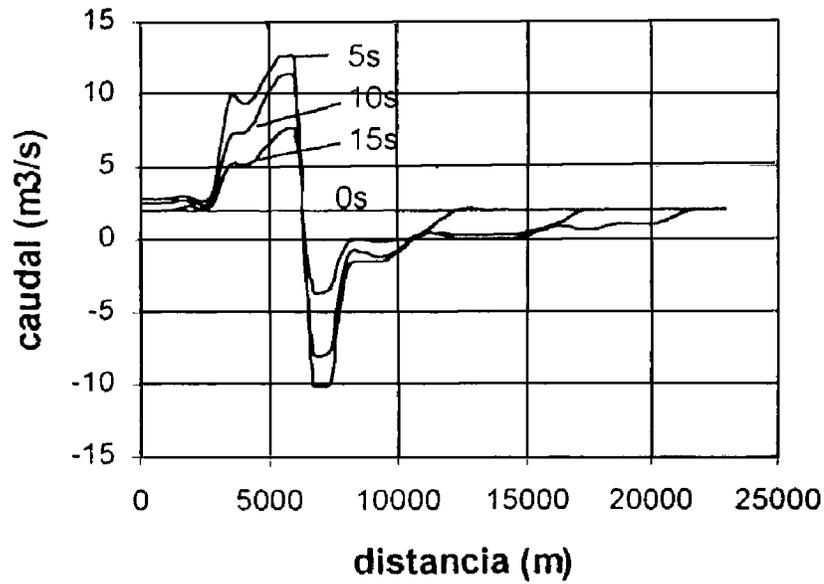


Fig. 3. Variación del caudal a lo largo de la conducción durante la falla.

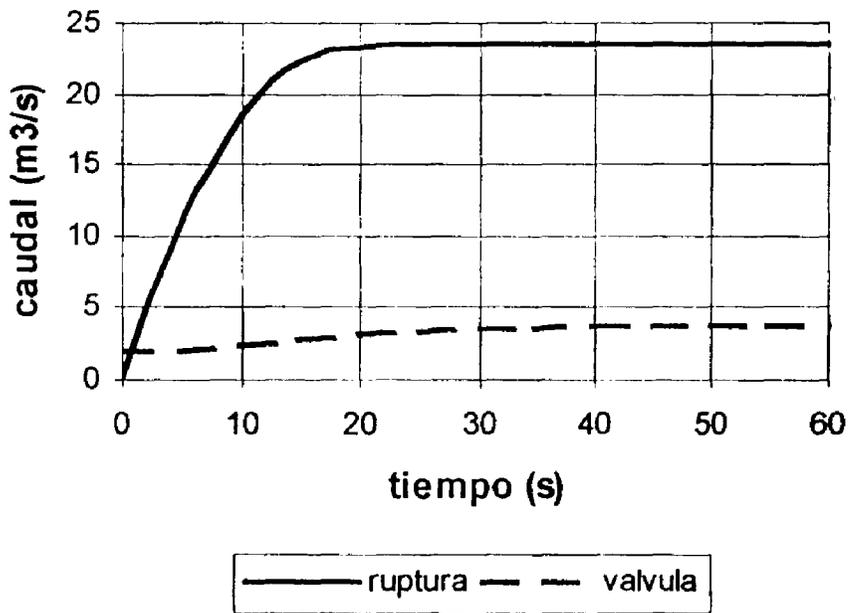


Fig. 4. Caudal a través de la ruptura y la válvula de control.

4.3 Estudio de la inclusión de válvulas de guarda

Se estudió la posibilidad de reducir el volumen de agua vertido mediante la instalación de dos válvulas, una aguas arriba y otra aguas abajo del sifón. La válvula de aguas arriba tiene el inconveniente de que debe cerrarse muy lentamente para mantener el golpe de ariete en un rango aceptable. La válvula de aguas abajo no provoca sobrepresiones importantes pero se produciría rompimiento de la columna de agua a ambos lados de la misma.

Según la revisión de estructural de la tubería esta puede soportar una sobrepresión de 100 mca por encima del nivel de estático con un factor de seguridad aceptable. Se realizó una simulación que incluye una válvula de cierre aproximadamente en la estación 5+325. En dicha simulación la nueva válvula se cierra en 60s inmediatamente después de que la ruptura se produce.

En la Fig. 5 se presenta el gradiente máximo y mínimo aguas arriba de la válvula de guarda incluida, registrado durante los primeros 80s del transitorio. En esta figura se observa la onda de sobrepresión que empieza a moverse hacia aguas arriba con un nivel piezométrico máximo en la elevación 1823msnm, aproximadamente 250mca por encima del nivel estático. El golpe de ariete causado por el cierre alcanzaría presiones mayores a la presión permisible de la tubería. El gradiente mínimo se produce antes del cierre de la válvula como efecto de la ruptura en el sifón.

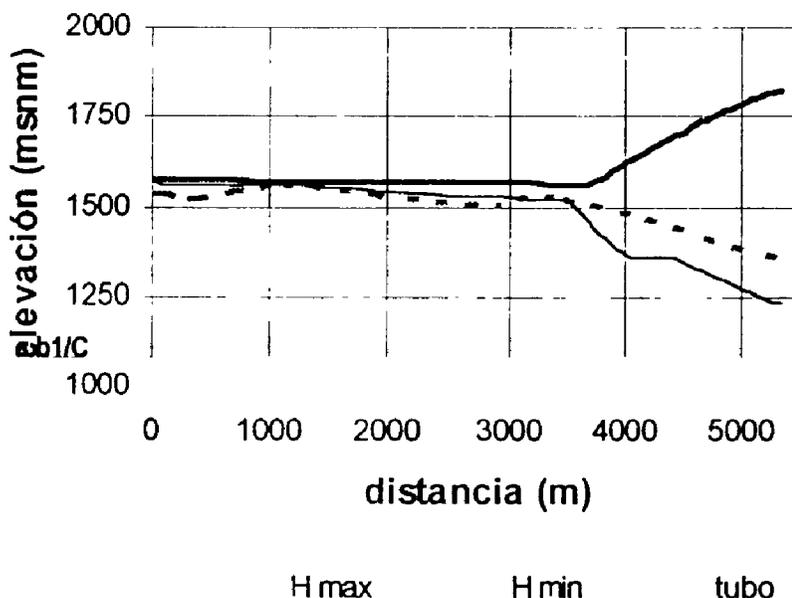


Fig. 5. Gradiente máximo y mínimo durante los primeros 80s de prueba.

Si se aumenta el tiempo de cierre se puede disminuir la sobrepresión de golpe de ariete

sin embargo esta medida pierde sentido práctico ya que el caudal vertido en el sitio de falla habrá sido suficiente para causar destrozos cuantiosos. En el sifón hay aproximadamente 2km de tubería lo que representa un volumen de agua de 1900m³ que inevitablemente se derramaría a través de la ruptura. La Fig. 6 muestra la inutilidad de la válvula incluida ya que el caudal vertido en la falla es prácticamente el mismo calculado sin la presencia de la misma (ver Fig. 4).

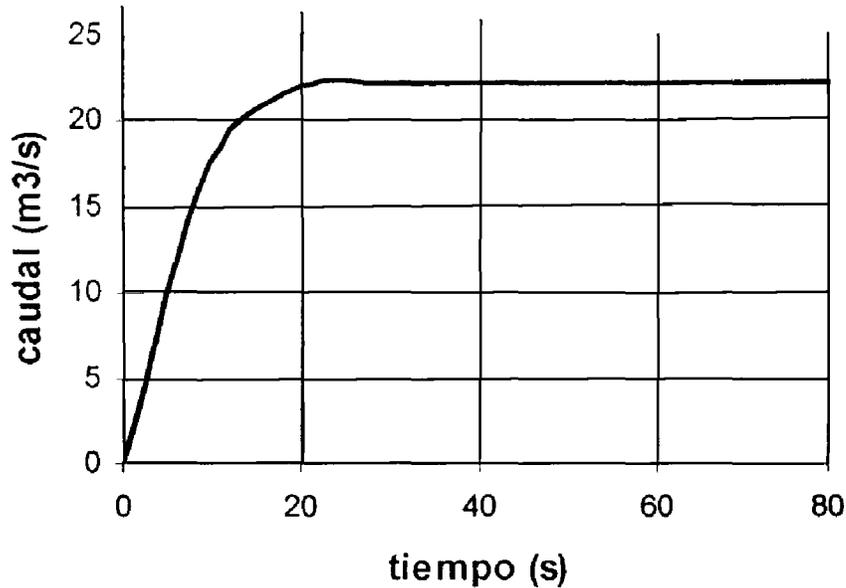


Fig. 6. Caudal saliendo por la ruptura al incluir válvula de cierre aguas arriba.

Existe también la posibilidad de cerrar la válvula rápidamente y a la vez abrir una válvula aliviadora de presión que descargue en un sitio determinado. Sin embargo, esta medida se considera poco práctica ya que se debería manejar un caudal aproximado de 15m³/s en una zona de taludes muy inestables.

4.4 Conclusiones

Se ha encontrado que desde el punto de vista hidráulico no hay una forma efectiva de disminuir los efectos de la ruptura de la tubería en el sifón sobre el río Agua Caliente. La falla generaría un fenómeno transitorio muy complicado que podría dañar la tubería en varios puntos donde la succión sería considerable y el riesgo de cavitación es alto. A lo anterior se une la imposibilidad de determinar la localización y la forma de la ruptura, así como la dirección del chorro saliente que podría desestabilizar buena parte del talud de margen izquierda. En caso de que la ruptura pudiera producirse los daños sobre el acueducto serían catastróficos.

4.5 Referencias

Chaudry, M. H. (1989). Water Hammer in Pumping Systems and Hydroelectric Power Plants, User's Manual for WH. Pullman, USA.

Chaudry, M. H. (1987). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Co. New York, 2 ed.

Fahlbusch, F. E. (1994). "Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams". Hydropower and Dams, July.

Silva M., E. (1994). Proyecto Orosi, Estudio de la Vulnerabilidad de la Conducción El Llano – Tres Ríos, Aspectos Hidráulicos, Hidrológicos y Estructurales. (consultoría para AyA), Bogotá

5.0 INFORME GEOTECNICO. ESTABILIDAD TALUDES

5.1 Resumen

El presente informe forma parte de la consultoría que el Instituto Costarricense de Electricidad está realizando para evaluar la vulnerabilidad sísmica del Acueducto Orosi, en la margen izquierda del río Agua Caliente. Este sector ha sido identificado en anteriores informes como una zona vulnerable para el Acueducto, dada la existencia de fallas (algunas activas), una topografía en ladera y grandes presiones en la Conducción (localizada en un sifón). El objetivo del informe es evaluar la amenaza de deslizamientos en este sector, provocados por ocurrencia de un sismo o la rotura de la tubería.

Tomando como base el levantamiento de diaclasas realizado por Alvarado (1997) y la información topográfica suministrada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (A y A), se analizó la estabilidad de las laderas en este sector utilizando los métodos de proyección estereográfica y equilibrio límite. El estudio se realizó para diferentes secciones transversales a lo largo de la Conducción y un perfil longitudinal del mismo. Los parámetros de resistencia considerados en el análisis se tomaron conservadoramente de las estimaciones sugeridas en la literatura para rocas sedimentarias suaves.

Del estudio de proyección estereográfica se concluye que no hay admisibilidad cinemática que habilite la formación de cuñas susceptibles a deslizar. Asimismo, los análisis por equilibrio límite realizados suponiendo un coeficiente de aceleración horizontal de 0.20 de la gravedad y condición saturada, muestran factores de seguridad (F.S.) superiores a 2 para las secciones transversales y superiores a 1.10 para los taludes longitudinales analizadas. Del estudio paramétrico se observa que aún para cohesiones de 5 T/m^2 (la mitad del valor mínimo sugerido en la literatura) los taludes transversales muestran F.S. superiores a 1.25.

No se encontró evidencia que justifique la ocurrencia de licuefacción. No hay depósitos de arenas blandas en la zona, los niveles freáticos no son superficiales y no hay registros de este fenómeno en los sectores aledaños.

5.2 Alcance

El presente estudio tiene por finalidad evaluar la probabilidad de deslizamientos en el Acueducto Orosi a la altura del río Agua Caliente, específicamente en su margen izquierda, entre los estacionamientos 6+750 y 7+400.

5.3 Antecedentes

La zona en estudio está afectada por dos fallas: Navarro y Orosi (Alvarado, 1997). La evidencia geológica muestra que la primera presenta en el sitio un rumbo N55°-70° y la segunda un rumbo NNW-SE. Adicionalmente, el levantamiento estructural de diaclasas, fracturas y fallas realizado por Alvarado (1997) encontró poca coincidencia entre los alineamientos de estas estructuras y los alineamientos de las fallas. Esta situación, aunado al hecho de una topografía abrupta y una sismicidad alta, hacen del sitio un lugar de gran riesgo para la conducción y las poblaciones vecinas.

La geología regional ubica el sitio como una formación sedimentaria del Terciario (Pacuaca), compuesta por un conglomerado brechoso de origen tobáceo, cuyos componentes son en su mayoría rocas ígneas dentro de una matriz arcillo-arenosa (Mora, 1979). Localmente, la litología observada indica la presencia de una volcanorudita y un conglomerado inmaduro dentro de una matriz arenosa (Alvarado, 1997).

5.4 Caracterización geotécnica

Los parámetros de resistencia correspondientes a los materiales del sitio pueden ser caracterizados por medio de valores típicos recomendados en la literatura para rocas sedimentarias suaves (Hoek, 1974). Con base en lo anterior y siendo conservadores se recomiendan para el análisis los valores mostrados en la tabla No. 1.

Tabla No. 1 - Parámetros de resistencia

Material	Peso unitario (KN/m ³)	Angulo de fricción (grados)	Cohesión (kPa)
Roca sedimentaria suave	20	25	1000

5.5 Estabilidad por proyección estereográfica

La proyección estereográfica es un método gráfico por medio del cual la información tridimensional de la orientación de las características de los planos y de las líneas pueden ser representados en dos dimensiones. Este método permite analizar la estabilidad de un talud considerando el efecto de las discontinuidades planares como fracturas, fallas y planos de deslizamiento. Para ello es necesario obtener la pendiente y la dirección de la pendiente del talud analizado y de cada uno de los planos definidos por las estructuras encontradas. Estos datos son proyectados sobre una retícula denominada proyección ecuatorial, en donde un plano es representado por la línea de máxima pendiente del mismo o por la línea normal a éste, llamada polo.

Para el caso de estudio, con base en la información topográfica suministrada por A y A (ver anexo No. 1), se confeccionó un perfil longitudinal a lo largo de la línea y varios secciones transversales (ver anexo No. 2). Se determinó que las pendientes y direcciones de pendiente de los taludes de interés son respectivamente: 170/30 longitudinalmente y 80/53, 260/54 transversalmente.

Del levantamiento de diaclasas realizado por Alvarado (1997) se determinó la existencia de 6 familias de interés, cuyas pendientes y direcciones de pendiente son:

- $D_1=185/80$
- $D_2=5/80$
- $D_3=217/72$
- $D_4=310/75$
- $D_5=145/50$
- $D_6=140/60$

Dado que estas familias se ubican en diferentes estacionamientos, para el estudio de las fallas por cuña (intersección entre dos familias), estas se separaron en dos grupos. El primero está compuesto por las cuatro primeras familias (estacionamiento 7+330), mientras que el segundo consta de las últimas dos (estacionamiento 6+815). Con ello se establecieron 7 pendientes y direcciones de pendiente adicionales en el análisis: l_{12} , l_{13} , l_{14} , l_{23} , l_{24} , l_{34} , l_{56} .

El primer paso a realizar en un estudio por proyección estereográfica es hacer un análisis de admisibilidad cinemática, el cual consiste en determinar si existe probabilidad de ocurrencia de que se dé una falla planar, de cuña y/o de volcamiento. Para ello, es necesario encontrar para cada talud analizado, la envolvente de afloramiento (define la zona dentro de la proyección donde puede ocurrir falla planar o por cuña) y volcamiento (define la zona dentro de la proyección donde puede ocurrir falla por volcamiento). Luego, si alguna de las familias o intersecciones analizadas cae dentro de alguna envolvente, existe probabilidad de que se produzca una falla. De ser afirmativo lo anterior, es necesario realizar un análisis de estabilidad sobre aquellos casos que se detecten como probables.

En nuestro caso en estudio, al proyectar cada una de las familias e intersecciones de interés y, establecer las zonas susceptibles a falla, se determina que no existe probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento por falla planar, de cuña o de volcamiento. En el anexo No. 3 se muestran algunas de las proyecciones estereográficas realizadas.

Sin embargo, dos intersecciones merecen algunos comentarios. Del análisis de la proyecciones realizadas se observa que la intersección I_{13} cae en los límites de la envolvente de volcamiento para el talud definido por la pendiente y dirección de pendiente 80/53 respectivamente. Este talud corresponde a una sección transversal en el estacionamiento aproximado 6+950, mientras que las diaclasas que definen la intersección mencionada se encuentran aproximadamente en el estacionamiento 7+330, por lo que no son correlacionables.

Asimismo, la intersección I_{56} cae en límite de la envolvente de afloramiento de los taludes definidos por 170/30 y 260/54. El primero de estos planos corresponde a una sección longitudinal a partir del estacionamiento aproximado 7+150 y el segundo a una sección transversal en el estacionamiento aproximado 7+330. Mientras, las diaclasas que definen la intersección (familias 4 y 5) corresponden a un levantamiento cerca de la estación 6+815. Adicionalmente, al proyectar el cono de fricción correspondiente a 25 grados (tomado conservadoramente para una roca sedimentaria suave), se observa que la I_{56} cae en esta área, por lo que no se considera problemática.

5.6 Estabilidad por equilibrio límite

Adicionalmente al análisis por proyección estereográfica se evaluó la estabilidad del macizo por el método de equilibrio límite, utilizando el programa de computadora PCSTBL5 desarrollado por la Universidad de Purdue. Los perfiles analizados fueron tomados de la información topográfica suministrada por A y A. Primeramente se consideró un perfil longitudinal de la conducción, lo que permitió evaluar diferentes secciones a lo largo de la misma. Adicionalmente, se realizaron diversos perfiles transversales ubicados en secciones donde topográficamente se observaran taludes con pendientes altas. De estos perfiles se analizaron cuatro por equilibrio límite. En el anexo No. 4 se adjuntan algunas de las salidas obtenidas con el programa de computadora utilizado.

El análisis se realizó suponiendo los parámetros de resistencia definidos anteriormente. Se evaluó la condición seca y saturada de los materiales y la influencia de sismo suponiendo un coeficiente de aceleración horizontal igual 0.20 de la gravedad. Este coeficiente en primera instancia parece inferior al sugerido en el estudio de amenaza sísmica. Sin embargo, es necesario tener presente

"La página 25 no se encuentra disponible en el original."

No se encontró evidencia que indique que la zona es susceptible a licuación.

- Estimar la socavación y posibles deslizamientos asociados a una eventual rotura de la tubería no es posible realizarla. Por un lado, no se puede puntualizar el lugar exacto en que la tubería puede romperse y por otro las condiciones actuales pueden ser modificadas drásticamente al impactar sobre el terreno una presión de agua tan elevada, lo que invalida cualquier suposición.

5.8 Referencias

Alvarado Induni, Guillermo. Estudio de Vulnerabilidad Sísmica del Acueducto de Orosi. Parte I: Neotectonismo en la Margen Izquierda del Río Navarro. 1997

Bel Ingeniería S.A. y Gannet Fleming Corddry and Carpenter. Revisión del Diseño Proyecto Orosi. Obra No. 1. 1982

CIMCO S.A. Investigación Geológica y Geofísica a lo largo de la Conducción Embalse El Llano-Plantas de Tres Ríos y Tunel en el Cerro de La Carpintera. 1980.

Hoek, E. y Bray J. Rock Slope Engineering. 1974 .

Mora Castro, Daniel. Reconocimiento Geológico Superficial a lo largo de la Línea de Conducción Embalse El Llano-Tres Ríos del Proyecto Orosi. 1979.

Reynolds Alvarado, Harry. Análisis de Estabilidad de Taludes Rocosos por Proyección Estereográfica. 1998.

Universidad de Purdue. Programa PCSTBL5 para el Análisis de Estabilidad de Taludes por Equilibrio Límite. 1990.